

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

Ing. DRAGOMIR EMIL HUBER ADRIAN

CONTRIBUTII LA TEHNOLOGIA DE PRELUCRARE
PRIN EROZIUNE ELECTRICA A PRODUSELOR DIN
CARBURI METALICE

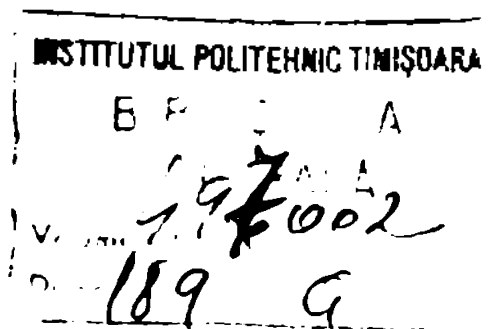
TEZA DE DOCTORAT

BIBLIOTECA CENTRALĂ
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"
TIMIȘOARA

Conducător științific
Prof.dr.doc.șt.ing. AUREL NARU

TIMISOARA

1985



C U P R I N S

pag.

1. CU PRIVIRE LA NECESITATEA OPTIMIZĂRII TEHNOLOGIEI DE PRELUCRARE PRIN EROZIUNE ELECTRICA A PRODUSELOR DIN CARBURI METALICE	1
2. ALIAJE DURE SINTERIZATE, CARACTERISTICI ȘI PRELUCRABILITATE.....	8
2.1. Clasificare și domenii de utilizare.....	8
2.2. Proprietățile aliajelor dure din grupa de utilizare G.....	11
2.3. Prelucrarea aliajelor dure sinterizate.....	14
3. MODELAREA MATEMATICĂ A PROCESULUI DE PRELEVARE DE MATERIAL LA PRELUCRAREA PRIN EROZIUNE ELECTRICA.....	20
3.1. Eroziunea electrică ca metodă de prelucrare.....	20
3.2. Evoluția teoriilor și concepțiilor privind procesul de prelucrare prin eroziune electrică.....	22
3.2.1. Teorii electromecanice cu privire la mecanismul eroziunii electrice.....	22
3.2.2. Teorii termomecanice cu privire la mecanismul eroziunii electrice.....	24
3.2.3. Teorii electrotermice cu privire la mecanismul eroziunii electrice.....	25
3.2.4. Aspecte specifice prelucrării aliajelor dure prin eroziune electrică.....	30
3.3. Analiza proceselor fizice în cazul descărcărilor singulare.....	32
3.3.1. Mecanismul de străpungere a mediului dielectric.....	34
3.3.2. Dezvoltarea în timp a canalului de plasmă..	35
3.3.3. Distribuția energiei electrice.....	36
3.3.4. Transferul de căldură.....	39
3.3.5. Prelevarea materialului.....	40
3.4. Modelarea matematică a procesului de prelevare de material la prelucrarea prin eroziune electrică	42
3.4.1. Criterii matematice.....	42

	203.
3.4.2. Clasificarea geometrică a modelelor	43
3.4.3. Modelul analitic al sursei circulare de căldură.....	45
3.4.4. Program de calcul pentru evaluarea numerică a distribuției de temperatură.....	48
3.4.5. Evaluarea rezultatelor în cazul prelucrării aliajelor dure.....	52
3.5. Instalația experimentală pentru verificarea modelului matematic.....	60
3.5.1. Standul de experimentare.....	60
3.5.2. Selectarea și numărarea impulsurilor de lucru.....	62
3.5.3. Realizarea descărcărilor electrice singulare.....	65
3.5.4. Condiții de experimentare și rezultate obținute.....	66
3.6. Aprecieri cu privire la mecanismul prelevării de material în cazul prelucrării aliajelor dure.....	72
4. CERCETARI TEORETICE SI EXPERIMENTALE PRIVIND INFLUENTA PARAMETRILOR PROCESULUI ASUPRA CARACTERISTICILOR TEHNOLOGICE DE PRELUCRARE.....	77
4.1. Categorii de factori și parametrii la prelucrarea prin eroziune electrică.....	77
4.1.1. Mărimile de intrare a procesului.....	78
4.1.2. Mărimile de ieșire a procesului.....	81
4.2. Ordonarea ponderii de influență a parametrilor asupra criteriilor de performanță prin metoda bilanțului aleatoriu.....	83
4.2.1. Planificarea încercărilor experimentale....	84
4.2.2. Desfășurarea experiențelor.....	86
4.2.3. Metoda bilanțului aleatoriu.....	88
4.3. Program de calcul pentru aplicarea metodei bilanțului aleatoriu.....	89
4.4. Aprecieri cu privire la rezultatele obținute.....	93

5. MODEL MATEMATIC AL PROCESULUI TEHNOLOGIC DE PRELUCRARE DIMENSIONALA PRIN EROZIUNE ELECTRICA A ALIAJELOR DURE DIN GRUPA DE UTILIZARE G.....	104
5.1. Modelarea procesului de prelucrare.....	104
5.2. Programarea experiențelor.....	105
5.2.1. Program factorial de experimentare.....	105
5.2.2. Date experimentale.....	106
5.2.3. Testarea datelor experimentale.....	108
5.3. Analiza de regresie.....	111
5.3.1. Calculul coeficienților de regresie.....	113
5.3.2. Testarea semnificației coeficienților de regresie.....	113
5.4. Verificarea adecvantei modelelor matematice.....	114
6. ASPECTE METALOGRAFICE LA PRELUCRAREA PRIN EROZIUNE ELECTRICA A ALIAJELOR DURE SINTERIZATE.....	119
6.1. Analiza macroscopică a suprafețelor prelucrate...	119
6.2. Analiza microscopică a suprafețelor prelucrate...	124
7. OPTIMIZAREA PROCESULUI TEHNOLOGIC DE PRELUCRARE PRIN EROZIUNE ELECTRICA A ALIAJELOR DURE DIN GRUPA DE UTILIZARE G.....	133
7.1. Stabilirea ecuațiilor dreptelor de regresie.....	133
7.2. Tehnologia optimă de prelucrare a aliajelor dure din grupa de utilizare G.....	137
7.3. Aprecieri cu privire la prelucrabilitatea aliajelor dure din grupa de utilizare G.....	144
8. CONCLUZII GENERALE SI CONTRIBUTIILE ORIGINALE ALE LUCRARIII.....	149
BIBLIOGRAFIE.....	154

C A P I T O L U L 1

CU PRIVIRE LA NECESITATEA OPTIMIZĂRII TEHNOLOGIEI DE PRELUCRARE PRIN EROZIUNE ELECTRICA A PRODUSELOR DIN CARBURI METALICE

Succesele remarcabile obținute în ultima perioadă de timp de industria constructoare de mașini, se datoresc în mare măsură elaborării și folosirii unor aliaje noi, cu caracteristici superioare, precum și aplicării unor tehnologii noi, mai eficiente de prelucrare a acestora.

Între materialele noi elaborate un loc de seamă îl ocupă aliajele dure, obținute prin presarea și sinterizarea unor compuși duri și greu fusibili, formați din carburi metalice, ale căror particule sînt legate cu un liant metalic.

Domeniul de utilizare al sculelor confecționate din aliaje dure, cunoaște o dezvoltare continuă. Pe lângă prelucrarea prin așchiere, în toate domeniile de prelucrare se remarcă tendința de înlocuire a sculelor convenționale prin scule confecționate din aliaje dure, în dorința de creștere a calității produselor și de reducere a prețului de cost al prelucrării /79,80,81,93,130/.

Pentru a rentabiliza folosirea acestor categorii noi de materiale, s-a căutat să se perfecționeze tot mai mult tehnologiile de prelucrare existente și mai ales să se elaboreze tehnologii noi. În acest sens, în ultimele decenii, prelucrarea dimensională în industria constructoare de mașini este caracterizată de extinderea continuă a domeniului de aplicare a metodei tehnologice de prelucrare prin eroziune, ponderea cea mai mare de 65...70% /72, 138,184/ revenind prelucrării prin eroziune electrică. Această situație se datorește posibilităților tehnologice și economice ale metodei de prelucrare prin eroziune electrică și faptului că în ultimii 30 de ani utilajul necesar se produce în serie /54,103, 142,143,152,185,205/.

Procedul de prelucrare prin eroziune electrică permite prelucrarea materialelor electroconductoare, independent de duritatea lor, fără nici un efort însemnat între sculă și piesă, indiferent de complexitatea formei geometrice. Procedul de prelucrare prin eroziune electrică se poate aplica aliajelor dure, în numeroase cazuri, fiind singura metodă care permite prelucrarea acestora.

Problema prelucrării prin eroziune electrică a aliajelor dure a fost abordată pentru cazul generatoarelor de relaxare /65/ și a generatoarelor cu impulsuri comandate /99/. Rezultatele cercetării nu s-au concretizat însă într-o teorie unitară, verificată practic, asupra mecanismului prelevării de material, iar pe de altă parte nu s-a dat un răspuns referitor la stabilirea unei ierarhii a ponderii de influență a parametrilor, care guvernează procesul.

În alte lucrări /97,161,193,217,223/ tematica referitoare la prelucrarea prin eroziune electrică a aliajelor ^{dure} a fost restrânsă, doar la anumite aspecte specifice, fără a da un răspuns de ansamblu referitor la posibilitățile tehnologice de prelucrare.

Pe de altă parte, cu toate progresele realizate, în deosebi în ultimul deceniu, în dezvoltarea componentei constructive a sistemelor de prelucrare prin eroziune electrică, componenta tehnologică a acestora a rămas în urmă, decalajul accentuându-se tot mai mult /152/. Factorii determinanți ai acestei situații sînt:

- slaba organizare, complexitatea și caracterul difuz al sistemului de prelucrare prin eroziune electrică;
- documentația tehnologică pusă la dispoziție de către producătorii de echipamente tehnologice este incompletă și unilaterală, stabilită în condiții standard, fără a specifica corecțiile necesare pentru condițiile concrete de exploatare /197/;
- personalul de deservire nu are cunoștințele tehnologice necesare, pentru exploatarea rațională a instalației, iar experiența acumulată este hotărîtoare, întrucît nu există posibilitatea urmării vizuale directe a procesului de prelucrare /53/.

Rezultatele parțiale ale unui sondaj întreprins de Fa.R. Bosch GmbH /13/ prezintă diferențele, care pot apărea la rezolvarea aceleiași probleme de prelucrare prin eroziune electrică, datorită factorilor enumerați mai sus.

Șase întreprinderi diferite au primit aceeași problemă de prelucrare, de a realiza prin eroziune electrică în regim de degroșare un profil pătrat de dimensiuni date (fig.1.1), în același material, utilizînd un electrod sculă din grafit legat la polul pozitiv, spălarea interstițiului tehnologic fiind asigurată printr-un alezaj central de $\varnothing 6$ mm practicat în piesă.

Rezultatele prelucrării obținute de cele șase întreprinderi (A,B...) analizate în prisma funcțiilor de răspuns: productivitatea

prelucrării Q_p /mm³/min/, grosimea stratului influențat termic h /μm/ și uzura geometrică liniară Δl /mm/. se prezintă în Fig.1.2.

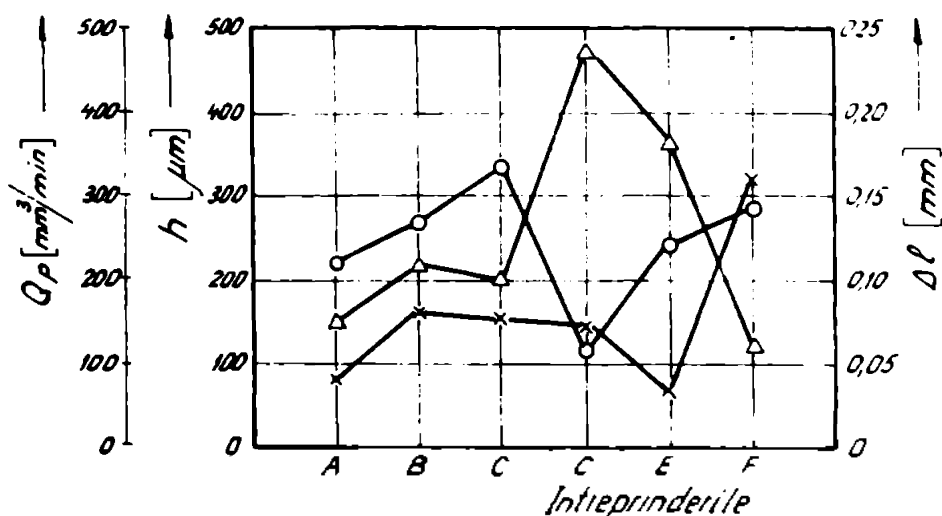
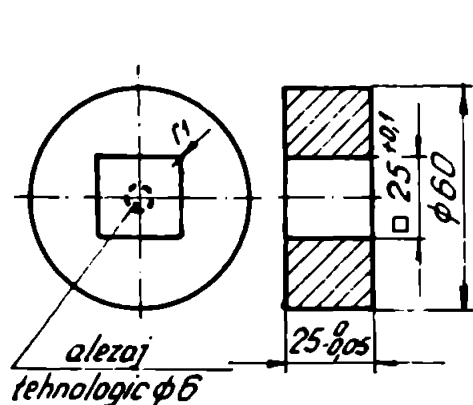


Fig.1.1. Piesa de prelucrat

Fig.1.2. Analiza rezultatelor prelucrării.

Cercetări comparative întreprinse pe plan internațional de CIRP (Collège Internațional pour la Recherche scientifique des techniques de Production Mécanique), au arătat că la aceleași condiții de lucru, independent de instalația de eroziune electrică utilizată se obțin aceleași rezultate ale prelucrării. Această constatare nu se confirmă în cazul prezentat, datorită numărului mare de combinații posibile ale parametrilor impulsului și documentației tehnologice nesatisfăcătoare.

Documentația tehnologică nu prevede date exacte referitoare la alegerea parametrilor impulsului. În fiecare întreprindere analizată, personalul de deservire a interpretat în mod diferențiat documentația, alegând după toate posibilitățile alte combinații ale mărimilor ce caracterizează impulsul.

Numărul mare de combinații posibile ale parametrilor, care guvernează procesul de prelucrare prin eroziune electrică, trebuie restrâns la un domeniu în care obiectivele de prelucrare urmărite sînt maxime sau minime, în vederea creșterii eficienței prelucrării.

În România, documentele programatice ale Partidului Comunist Român /1./ pun în fața cercetării științifice, a ingineriei tehnologice, a întreprinderilor industriale constructoare de mașini și aparate și învățămîntului superior, sarcini de mare importanță pentru progresul economico-social în cincinalul 1986-1990 și de perspectivă pînă în anul 2000. Una din aceste sarcini o constituie perfecționarea tehnologiilor, crearea și aplicarea industriilor de noi tehnologii, care să asigure sporirea mai accentuată a producti-

vității muncii, îmbunătățirea calității producției, reducerea consumurilor specifice de materiale și energie, creșterea substanțială a eficienței economice.

Aceste motive au determinat alegerea ca temă pentru lucrarea de față a unei probleme tehnico-economice actuale, complexe, orientată spre cercetarea fundamentală a fenomenelor procesului de eroziune electrică, legată de nevoile practicii industriale de optimizare a tehnologiilor de prelucrare.

Obiectivul fundamental al unei cercetări pozitive este, ca prin contribuții teoretice și experimentale să constituie elementele necesare progresului științei și tehnicii.

În ideea atingerii unui asemenea obiectiv, evident cu posibilități modeste ale unui individ și în condițiile unui domeniu restrâns în raport cu dimensiunile cunoașterii, lucrarea de doctorat a avut ca obiect rezolvarea mai multor probleme, în cadrul următoarelor direcții :

1. Aprofundarea cercetării teoretice și experimentale a procesului de prelevare de material la prelucrarea prin eroziune electrică a aliajelor dure;

2. Studiul și ordonarea ponderii de influență a parametrilor procesului funcție de criteriile de performanță urmărite;

3. Studii și cercetări pentru stabilirea relațiilor matematice care descriu procesul și determinarea domeniilor aplicării optime a procesului de prelucrare prin eroziune electrică a aliajelor dure.

Prin rezolvarea problemelor propuse, se consideră că se aduc contribuții la fundamentarea fenomenologică a procesului și prin aplicarea industrială a rezultatelor cercetării, se va mări eficiența economică a procedurii de prelucrare prin eroziune electrică a aliajelor dure.

După stabilirea temei și a obiectivelor urmărite, apare întrebarea firească, ce metodă să se folosească pentru a ajunge la obiectivele propuse ?

În lucrarea de față s-a abordat modul de cercetare și tratare sistemică, pornind de la totalitate spre element, de la general la particular, luând în considerare toate aspectele relevante în luarea deciziilor optime. Acest mod de cercetare constituie un instrument științific puternic în cunoașterea și dominarea fenomenelor complexe.

Orice sistem /34,174/ este o mulțime de componente care în limitele anumitor condiții de spațiu și timp, interacționează între ele și funcționează, obținând un rezultat.

Un sistem concret (fig.1.3) este caracterizat de o anumită structură definită de totalitatea componentelor sistemului și a conexiunilor dintre ele, respectiv de o funcționare definită ca ansamblu de procese, fiecare proces fiind o succesiune dinamică de stări în interiorul sistemului, sau în trecere de la un sistem la altul. În conformitate cu programele de funcționare corespunzătoare obiectivului stabilit de om, procesele operează transformări asupra intrărilor în sistem, asupra sistemului însăși și realizează ieșirile din sistem /34,174/. Orărui sistem i se poate atașa un model matematic ce reprezintă într-o formă nouă realitatea obiectivă.

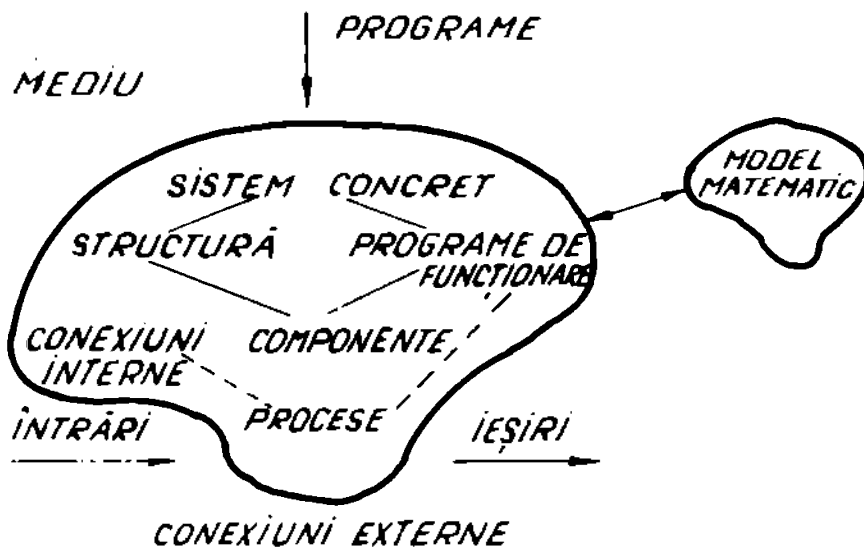


Fig.1.3. Conceptul de sistem și legătura biunivocă cu modelul matematic

rea prin eroziune electrică. Prin cel de al doilea model matematic se realizează o modelare experimentală prin aplicarea statisticii matematice și analizei regresionale, pentru determinarea unui domeniu de prelucrare optimă.

Modelarea matematică a proceselor și dependențelor studiate, este astfel dezvoltată, încât să satisfacă necesitățile aplicării în practică a rezultatelor obținute.

Mașinile electronice de calcul moderne au făcut posibilă rezolvarea economică a modelelor matematice, care simulează fenomenele reale, evitând încercările experimentale dificile și laborioase.

În lumina acestor idei ale caracterii, autorul a ales calea

Pentru sistemul de prelucrare prin eroziune electrică în prezenta lucrare, s-au elaborat două modele matematice. Un prim model matematic este destinat reproducerii principalelor fenomene asociate unei descărcări electrice singulare prin descrierea lor analitică, pentru studiul procesului de prelucrare de material la prelucra-

experimentului intelectual, utilizând calculatorul electronic, în care ecuații potrivite rezumă fenomenul într-o scară nouă, pe care se poate experimenta teoretic.

Pe parcursul lucrării se utilizează denumirea de aliaj dur în loc de carbură metalică, bazat pe prevederile STAS 7935-83 care reglementează terminologia utilizată în metalurgia pulberilor. După STAS 7935-83, aliajele dure, sînt materiale sinterizate pe bază de carburi metalice sau alți compuși neoxidici ai metalelor refractare, legate cu o fază liant, caracterizate prin duritate și rezistență la uzură ridicată. În dorința de a nu modifica, s-a menținut vechea terminologie de carbură metalică, în titlul tezei și al primului capitol.

Teza de doctorat, desfășurată pe 172 pagini, cu 30 tabele, 73 figuri și 249 referințe bibliografice, este structurată pe 8 capitole, corespunzător obiectivului de cercetare stabilit. Din totalul listei bibliografice 17 titluri sînt lucrări publicate sau comunicate de autor, individual sau în colectiv.

Pornind de la cercetarea fundamentală a unor probleme de mare complexitate, nerezolvate, se trece la cercetarea aplicativă și la rezolvarea unor probleme practice de mare interes pentru proiectarea procesului tehnologic de prelucrare prin eroziune electrică și de exploatare rațională a utilajului. Rezultatele obținute au fost parțial aplicate, sau se află în curs de aplicare în producție, la întreprinderea Electrotimiș din Timișoara /248, 249/.

În prima parte a lucrării (cap.1,2) s-a motivat alegerea tezei, s-a definit scopul și obiectivele cercetării întreprinse și s-a prezentat modul de rezolvare al obiectivelor propuse. În continuare s-au prezentat unele aspecte referitoare la aliajele dure sinterizate, motivarea alegerii grupe de utilizare G ca materiale de prelucrat și analiza comparativă a posibilităților de prelucrare a acestora.

Capitolul trei prezintă pentru început într-o viziune originală principalele teorii și concepții cu privire la procesul de prelucrare prin eroziune electrică în general și referirile găsite în literatura de specialitate, privind prelucrarea aliajelor dure în particular. Această parte este necesară fixării locului tezei în cadrul problemei generale și pentru arătarea și susținerea punctelor de vedere emise în teză.

Pornind de la ecuația generală Fourier de transmitere a

căldurii și condițiile de contur aferente, s-a dedus un model matematic care, descrie analitic procesul de prelevare de material, la prelucrarea prin eroziune electrică. Pentru rezolvarea modelului matematic s-a conceput un program de calcul, scris în limbaj Fortran, rulat pe un calculator FELIX-C512.

Pentru verificarea modelului matematic, s-a conceput un stand experimental care să permită selectarea și numărarea impulsurilor de lucru și realizarea unor descărcări electrice singulare în condiții identice cu cele din exploatare.

În capitolul patru s-a prezentat sistemic categoriile de factori și parametri ai procesului de prelucrare prin eroziune electrică. Bazat pe metoda bilanțului aleatoriu, s-a trecut la ordonarea ponderii de influență a parametrilor, asupra criteriilor de performanță urmărite. Pentru rezolvarea problemei s-a conceput un program de calcul, scris în limbaj Fortran, rulat pe un calculator CORAL-4030.

În capitolul cinci, s-a abordat modelarea matematică a procesului de prelucrare prin eroziune electrică a aliajelor dure, din grupa de utilizare G. În acest scop s-a adoptat un sistem de experimentare programat statistic, metoda experimentului factorial. Pe baza analizei de regresie s-au dedus funcțiile matematice, care determină legătura dintre parametrii reglabili ai procesului și caracteristicile tehnologice.

Analiza micro - și macroscopică - a structurilor de aliaje dure prelucrate electroeroziv, s-a abordat în capitolul șase. Pe lângă analiza modificărilor structurale s-a acordat o atenție deosebită microfisurilor apărute în suprafața prelucrată.

Capitolul șapte cuprinde datele necesare optimizării procesului de prelucrare prin eroziune electrică a aliajelor dure din grupa de utilizare G, sub forma unor relații matematice și grafice.

În capitolul de concluzii, se prezintă principalele contribuții originale aduse în domeniul cercetării fundamentale și al celei aplicative.

Autorul exprimă și pe această cale întreaga sa gratitudine și cele mai sincere mulțumiri conducătorului științific prof.dr. doc.șt.ing.Aurel Nanu, pentru modul competent în care l-a îndrumat la elaborarea lucrării, în formarea și specializarea sa profesională.

Autorul mulțumește de asemenea, tuturor colegilor din colectivul catedrei Tehnologie mecanică, din alte colective ale Institutului Politehnic "Traian Vuia" din Timișoara pentru ajutorul acordat pe parcursul și în finalizarea cercetărilor, care au stat la baza elaborării prezentei lucrări.

C A P I T O L U L 2

ALIAJE DURE SINTERIZATE, CARACTERISTICI SI PRELUCRABILITATE

2.1. CLASIFICARE SI DOMENII DE UTILIZARE

În ultimele decenii, în industria constructoare de mașini, au apărut materiale noi cu proprietăți deosebite, printre care un loc bine stabilit îl ocupă aliajele dure sinterizate. Aliajele dure sînt produse tipice ale metalurgiei pulberilor, obținute prin presarea și sinterizarea unuia sau mai multor compuși duri și greu fuzibili (de obicei carburi metalice), ale căror particule sînt legate cu un liant metalic. Carburile conferă aliajului duritate și rezistență mare la uzură, în timp ce metalul liant asigură tenacitatea /42,79,93,130/.

În vederea utilizării aliajelor dure pe scară cît mai largă și în domenii cît mai diferite, s-a pus problema prelucrării lor la formele și dimensiunile necesare exploatării. Dintre procedeele clasice, rezultatele cele mai bune se obțin la prelucrarea cu discuri abrazive cu diamant. Costul ridicat al prelucrării, datorat sculelor utilizate și posibilitățile limitate în obținerea unor forme complexe, au condus la căutarea altor procedee de prelucrare.

Procedeele neconvenționale în general și în mod special eroziunea electrică, au deschis posibilități largi de prelucrare și utilizare aliajelor dure. Prelevarea de material se face sub acțiunea unor energii concentrate, prelucrarea fiind independentă de proprietățile mecanice ale materialelor.

Din punct de vedere al elementelor componente, aliajele dure se pot clasifica în două grupe mari /42,93,130/ :

- aliaje dure cu o singură carbură, pe bază de carbură de wolfram (C_W) și cobalt (Co),
- aliaje dure cu un număr mai mare de carburi, care pe lângă C_W-Co mai conține carbură de titan (TiC), carbură de tantal (TaC) sau carbură de niobiu (NbC).

Aliajele dure pe bază de C_W-Co, sînt utilizate la confecționarea sculelor pentru prelucrarea materialelor metalice prin

acțiuni de curgere și acțiuni de separare (mai puțin așchiere) și a pieselor supuse uzurii.

Aliajele dure cu mai multe carburi în componență (CW-TiC-Co), (CW-TaC(NbC)-Co) sau (CW-TiC-TaC(NbC)-Co), se utilizează în general la confecționarea părților active ale sculelor așchietoare.

După prevederile ISO TC29, preluate de STAS 9130-72, aliajele dure se clasifică în următoarele grupe de utilizare: P,M,K și G., Grupele de utilizare P,M,K cuprind aliajele dure cu un număr mai mare de carburi în compoziție, pe când grupa de utilizare G, cuprinde aliajele dure cu o singură carbură.

Aliajele dure folosite la confecționarea sculelor așchietoare, grupele de utilizare P,M și K, au forme geometrice simple, realizabile direct prin procedeul de fabricare. Prelucrarea la dimensiunile finale, cerute de axplutare, se face fără probleme, cu discuri abrazive cu diamant.

Sculele destinate prelucrărilor prin deformare și tăiere, confecționate din aliaje dure din grupa de utilizare G, au forme complexe, a căror realizare ridică multe probleme tehnologice. Prelucrarea clasică cu discuri abrazive cu diamant, este limitată la forme geometrice simple. Cu creșterea gradului de complexitate al formei, aceste procedee nu mai pot fi aplicate.

În ultimul timp s-a impus tot mai mult prelucrarea aliajelor dure prin eroziune electrică, datorită posibilității de generare a suprafețelor complexe prin copierea formei electrodului sculă, în condiții economice foarte avantajoase /16,17,18,30,42,76,83,108,114,117,247/.

Pornind de la aceste considerente, este justificată orientarea cu precădere a preocupărilor prezentei lucrări, spre prelucrarea aliajelor dure din grupa de utilizare G. Partea experimentală a lucrării a fost efectuată în exclusivitate pe probe din aliaje dure din grupa de utilizare G, iar sorturile prelucrate au fost astfel alese, încât concluziile descrinse să fie semnificative pentru întregul domeniu.

Aliajele dure din grupa de utilizare G își găsesc aplicații în multe ramuri industriale, cum ar fi prelucrarea sîrmelor și tablelor, construcția de mașini și aparate, metalurgia pulgerilor, industria textilă și chimică, etc. Condițiile de bază pentru alegerea sortului de aliaj dur, se referă la duritatea și tenacitatea acestuia, dictată în speță de conținutul Co.

La piese supuse uzurii fără a fi însă solicitate la șocuri, conținutul de Co variază între 6...9%. În cazul, în care se cere pe lângă rezistență la uzură și o tenacitate mare, conținutul în Co poate ajunge la 15...30%.

Basat pe unele exemple mai semnificative, se scoate în evidență complexitatea formelor și dimensiunilor cerute și se conturează domeniul de utilizare a aliajelor dure din grupa de utilizare G.

Primele aliaje dure din grupa de utilizare G întrebuintate industrial, au fost folosite la realizarea filierelor, de tras șirne, bare sau țevi, înlocuindu-le pe cele din oțel și diamant. Productivitățile obținute cu astfel de filiere au fost de 30...200 de ori mai mari, față de cele confecționate din oțel.

Un alt domeniu de aplicare, îl constituie construcția de matrițe de prelucrare la rece a metalelor. Matrițele din oțel pentru confecționarea niturilor, șuruburilor sau cuielor, suferă uzuri foarte mari după 30.000...50.000 de piese realizate. Aceleași matrițe realizate din aliaje dure (15...25% Co), sînt capabile să realizeze de 100 de ori mai multe piese, pînă la atingerea aceluiași grad de uzură.

La laminările de precizie pentru șirne și table, cilindrii de laminor confecționați din aliaj dur (11%Co), asigură o precizie de prelucrare mai mare datorită uzurii reduse și o durabilitate de 50...100 ori mai mare.

Sculele de ambutisat, presat, fasonat și calibrat confecționate din aliaje dure, asigură o precizie dimensională mare și o calitate foarte bună a suprafeței. Matrițele pentru ambutisări așdinci realizate din aliaje dure, permit prelucrarea materialelor greu deformabile și reducerea tratamentelor termice între faze.

Intr-o măsură tot mai mare se realizează scule de tăiat și stanțat sau elemente active ale acestora, din aliaje dure din grupa de utilizare G. Utilizarea acestor scule devine rentabilă la producția de serie mare, sau la prelucrarea materialelor care provoacă o uzură pronunțată cum este cazul tablelor silicioase. Pentru a evita o rupere a muchiilor tăietoare, se utilizează aliaje dure cu un conținut de 20% Co.

Diuzele de diferite forme și dimensiuni se pot realiza de asemenea din aliaje dure. În cazul diuzelor de sablare confecționate din oțel, durabilitatea este de 3...4 ore, pe cînd cele din

aliaje dure ajung la 1000...1600 ore de funcționare.

În metalurgia pulberilor se utilizează aliaje dure la realizarea matrițelor și poansonelor de presare a pulberilor. Aceste scule au o durabilitate de 100...200 de ori mai mare decât a celor din oțel și de 50...100 de ori mai mare față de cele cu suprafețe cromate dur.

În concluzie se poate remarca superioritatea incontestabilă a sculelor confecționate din aliaje dure, față de cele din oțel, chiar dacă prețul de cost este de 3...5 ori mai mare, ele devin rentabile datorită durabilității de 20...60 de ori mai mari.

Varietatea mare de forme și dimensiuni a produselor realizate din aliaje dure din grupa de utilizare G, determină și justifică studiul amănunțit al posibilităților de prelucrare economică a acestora.

2.2. PROPRIETĂȚILE ALIAJELOR DURE DIN GRUPA DE UTILIZARE G.

Aliajele dure din grupa de utilizare G, pe bază de CW-Co, au fost primele aliaje dure, de mare importanță introduse în tehnică /93/. La aceeași compoziție chimică, proprietățile aliajelor dure diferă foarte mult funcție de mărimea grăunților și conținutul în carbon. Astfel, la o granulație fină a carburii, duritatea crește, pe când în cazul unei granulații mai grosolane, duritatea scade și tenacitatea crește. Cu scăderea conținutului în carbon, duritatea crește, iar cu majorarea conținutului în carbon, duritatea scade și tenacitatea crește.

Față de aliajele dure din grupa de utilizare P,M și K, cele din grupa de utilizare G prezintă, la același conținut de Co, o tenacitate mai mare, valori mai mari pentru rezistența la rupere prin încovoiere, precum și o conductivitate termică și electrică superioară.

Densitatea aliajelor dure depinde de conținutul în Co și de gradul de sinterizare. Presiunea de lucru are o influență minoră asupra proprietăților, în schimb temperatura și durata de sinterizare influențează în mod hotărâtor proprietățile.

Între conținutul în Co și duritatea (Vickers) aliajelor dure, realizate în aceleași condiții, există o strinsă legătură. Cu creșterea conținutului în Co duritatea scade (fig.2.1)

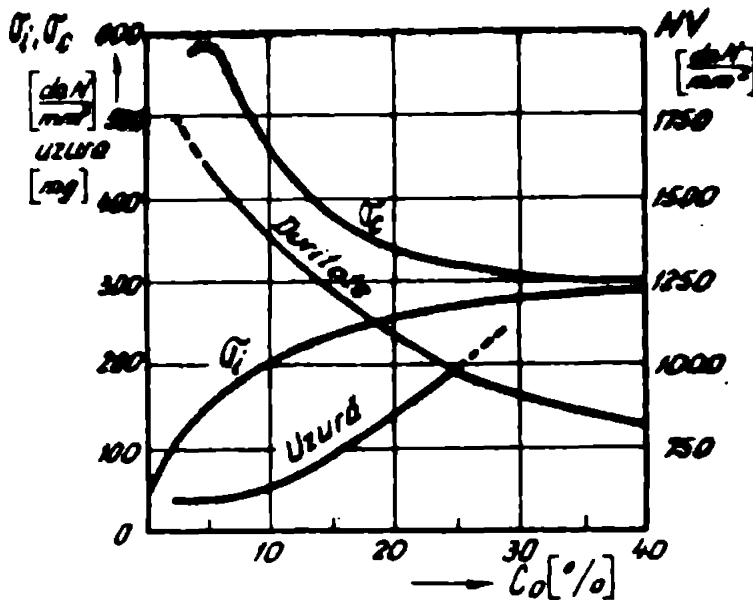


Fig. 2.1. Variatia proprietatilor mecanice functie de continutul in Co.

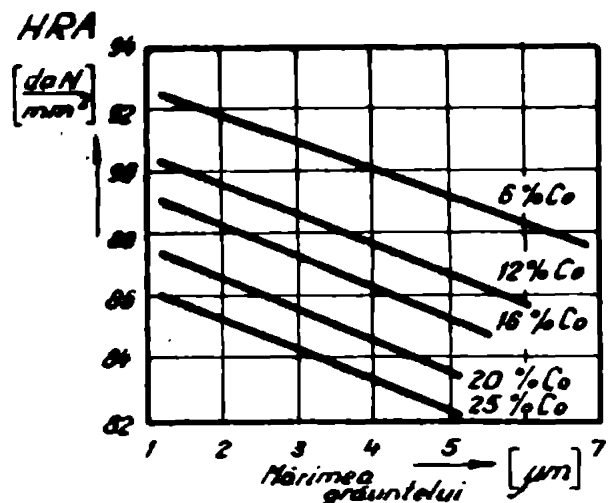


Fig. 2.2. Dependenta duritatii functie de granulatia CW.

Duritatea aliajelor dure mai este influențată de microporozitate, de mărimea grăunților fazei de carbură, precum și de bilanțul de carbon. Dependenta durității de granulatie și continutul in Co se prezintă in fig. 2.2.

Rezistența la rupere prin încovoiere (σ_1) a aliajelor dure are o indicație cu privire la tenacitatea materialului. Cu creșterea conținutului in Co, rezistența la încovoiere crește (fig. 2.1). Scăderea rezistenței la încovoiere după atingerea valorii maxime, la un conținut de 20...25% Co se explică prin faptul, că la o concentrație mare in Co legătura de rezistență între cristalele de CW nu se mai pot realiza.

După Dawidl, D./91/, la solicitarea aliajelor dure la compresiune, după deformarea elastică nu urmează deformarea plastică, ci ruperea materialului. Variația rezistenței la compresiune (σ_c) în funcție de conținutul in Co se prezintă în fig. 2.2.

Conținutul in carbon influențează de asemenea comportarea la încovoiere a aliajelor dure. Aliajele dure decarburate, prezintă valori scăzute ale rezistenței la încovoiere, datorită fazei fragile (fig. 2.3).

Modulul de elasticitate scade cu creșterea conținutului in Co. (fig. 2.4). Pentru același sort de aliaj dur, modulul de elasticitate scade cu creșterea temperaturii.

Modulul de elasticitate al aliajelor dure este aproximativ de trei ori mai mare decât cel al oțelului. Datorită acestei proprietăți, cilindrii de laminor confecționați din aliaje dure, sînt superiori celor din oțel.

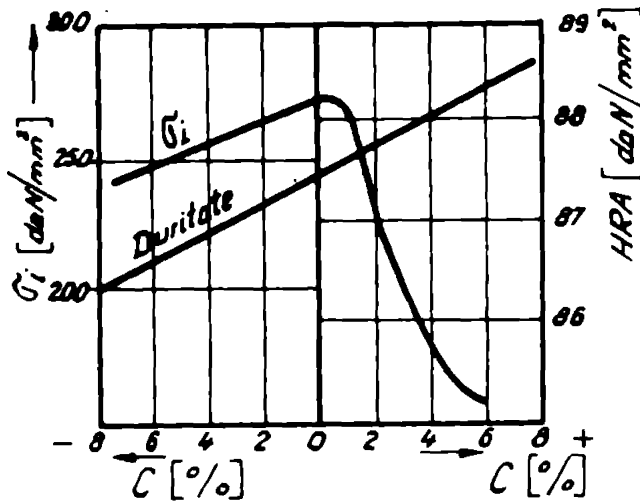


Fig. 2.3. Variația proprietăților mecanice funcție de conținutul în carbon.

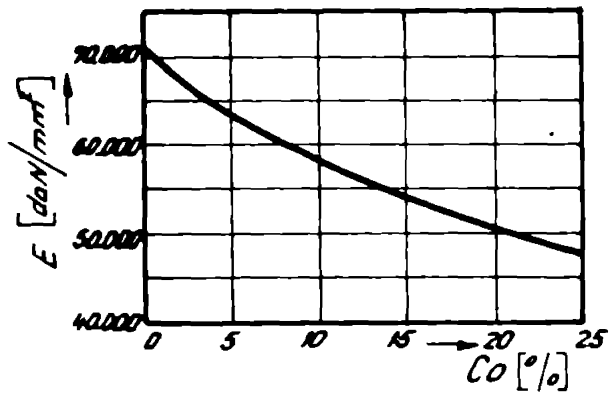


Fig. 2.4. Dependența modului de elasticitate în funcție de conținutul în Co.

Conductivitatea termică a aliajelor dure este de 2...3 ori mai mare decât cea a oțelului, dar prezintă o tendință de scădere cu creșterea conținutului în Co (fig. 2.5)

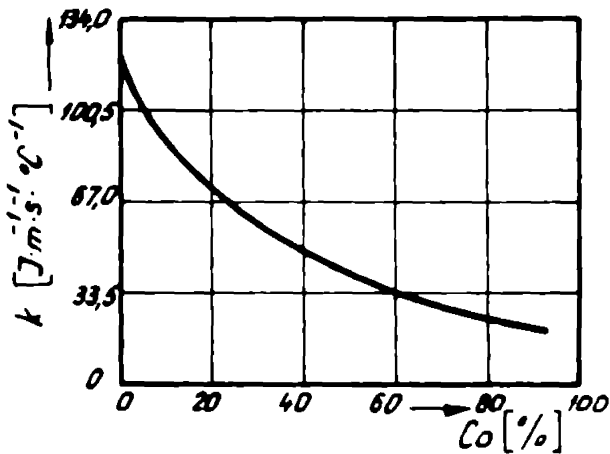


Fig. 2.5. Dependența conductivității termice funcție de conținutul în Co.

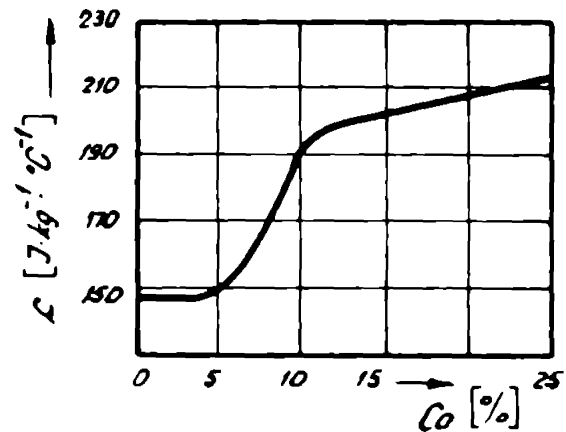


Fig. 2.6. Dependența căldurii specifice funcție de conținutul în Co.

Compoziția chimică influențează căldura specifică (fig. 2.6). La un conținut mic de Co (sub 10%), căldura specifică este influențată de proprietățile termice ale structurii rigide formate din cristalele de CW, care sînt reciproc. Cu creșterea concentrației de Co structura slăbește, datorită întreruperii legăturilor de către liant (soluție solidă γ), a cărei proprietăți termice determină valoarea căldurii specifice.

Principalele proprietăți mecanice ale sorturilor de aliaje dure, utilizate în programul experimental se prezintă în tabelul 2.1.

Constantele termofizice ale acestor materiale se prezintă în capitolul 3.

TABELUL 2.1

Sort	Compoziția [%]		σ_i [kN/mm ²]	σ_c [kN/mm ²]	E [kN/mm ²]	ρ [g/cm ³]	HV ₀₀₅ [kN/mm ²]
	CW	Co					
G10	94	6	1,7	5,8	620	14,8	15,5
G40	80	20	2,6	3,8	540	13,5	10,5
G60	70	30	2,8	3,0	470	12,8	8,5
CW	100	—	0,4	3,0	722	15,7	19
Co	—	100	0,95	—	180	8,7	2,5

2.3. PRELUCRAREA ALIAJELOR DURE SINTERIZATE

La fabricarea sculelor și elementelor active ale acestora, tehnologia de fabricare cuprinde două faze distincte :

- elaborarea eboșului din aliaj dur, un proces cu aspecte metalurgice,

- prelucrarea semifabricatului la dimensiunile și toleranțele prescrise, un proces de prelucrări mecanice.

Indiferent de modul de realizare, piesele sinterizate sînt prelucrate ulterior, pentru eliminarea deformațiilor (în jur de 1%) suferite în timpul procesului de sinterizare, sau/și în vederea obținerii formelor și dimensiunilor dorite, nerealizabile prin presare.

Prelucrarea aliajelor dure se poate realiza prin metode convenționale /66/, sau neconvenționale /4, 43,44,45,137,146,175/. În continuare se va analiza pe scurt prelucrarea aliajelor dure cu discuri abrazive cu diamant, fiind procedeul convențional cel mai frecvent aplicat și prelucrarea prin eroziune electrică, care are ponderea cea mai mare între procedeele neconvenționale.

Din cauza durității mari, a conductivității termice mai reduse și a fragilității mai pronunțate a aliajelor dure, trebuie luate măsuri deosebite la prelucrarea prin rectificare. Discurile abrazive din corund nu se pot folosi la prelucrarea aliajelor dure, întrucît aşchiera are loc numai la presiuni de contact mari, care conduc la încălziri locale puternice favorizînd apariția fisurilor. Din acest motiv aliajele dure se pot prelucra numai cu discuri speciale din carbură de siliciu sau diamant.

Aliajele dure se pot prelucra și prin aşchiere cu scule din diamant sau aliaje dure. Prelucrarea cu scule din aliaje dure se aplică numai sorturilor cu un conținut ridicat de Co /93/.

În ultimii ani s-a lărgit mult domeniul de utilizare a

discurilor diamantate cu liant metalic sau rășină sintetică. Analiza prelucrării cu aceste scule se referă la comportarea discului abraziv funcție de timpul de lucru, granulația și concentrația diamantului pe de o parte și efectele prelucrării apreciate prin cantitatea de material așchiată și calitatea suprafeței, pe de altă parte.

Din analiza întreprinsă /43,165,178/ rezultă că prelucrarea aliajelor dure cu discuri cu diamant este influențată în mare măsură de viteza de prelucrare, presiunea și respectiv forța de apăsare a sculei.

La discurile cu liant metalic, mărirea vitezei și a presiunii au drept rezultat o creștere aproape liniară a productivității. În ambele situații, uzura absolută (grosimea stratului uzat) a discului abraziv crește, în schimb uzura specifică (raportul dintre uzura volumetrică a discului abraziv și volumul de aliaj dur prelevat scade.

Rugozitatea suprafeței prelucrate nu este influențată de viteza de lucru și presiunea dintre discul abraziv și piesă, ci numai de timpul de prelucrare.

La discurile cu liant rășină sintetică, productivitatea crește cu creșterea vitezei de lucru și a presiunii, dar este limitată de rezistența acestora. Uzura absolută și specifică a acestor scule abrazive crește de asemenea cu viteza.

Mărirea presiunii de lucru duce la o creștere relativ mică a uzurii absolute, iar uzura specifică scade, atât timp cât nu se depășește limita de rezistență a discului.

Rugozitatea suprafeței prelucrate prezintă valori mai mici la viteze reduse și nu este influențată de presiune.

Analiza economică a prelucrării cu discuri abrazive cu diamant cuprinde pe lângă uzura specifică, ca cel mai important element și costul discului, manopera și timpul de prelucrare.

În general se desprinde concluzia că prețul de cost al prelucrării scade cu mărirea vitezei de lucru și a presiunii de contact. În cazul discurilor cu liant rășină sintetică presiunea este limitată de rezistența mecanică a discului.

Prelucrarea cu discuri abrazive cu liant metalic este cea mai economică la o granulație mică și o concentrație redusă în diamant, în timp ce la discurile cu liant rășină sintetică se obține un preț de cost minim cu o granulație mare a diamantului și o concentrație mijlocie.

Prelucrarea dimensională a aliajelor dure prin procedee neconvenționale s-a impus în ultimul timp, o pondere mare revenind metodei de prelucrare prin eroziune electrică.

Prelucrarea dimensională prin eroziune electrică se bazează pe efecte erozive complexe, discontinue și localizate ale unor descărcări electrice în impuls, amorțate în mod periodic între obiectul de prelucrat și un electrod sculă, scufundate într-un mediu dielectric.

Generarea suprafețelor se realizează prin copiere, indiferent de gradul lor de complexitate, electrodul având forma conjugată a suprafeței de realizat.

Prin eroziune electrică se pot prelucra materiale electroconductoare, independent de duritatea lor. Sub acest aspect procedeul se pretează foarte bine la prelucrarea aliajelor dure, care prezintă proprietăți mecanice deosebite, față de materialele metalice utilizate în mod curent în industrie.

În vederea analizei, din punct de vedere tehnologic, a procesului de prelucrare prin eroziune electrică a aliajelor dure, în următoarele capitole se abordează studiul fenomenologic și stabilirea parametrilor optimi de lucru.

Prețul de cost al prelucrării este influențat în primul rând de costul electrodului sculă, cu o pondere de 50...60% din costul total al prelucrării /174/. Din acest motiv se acordă o importanță deosebită alegerii materialului și procedeeilor de realizare a electrozilor sculă /2, 26, 31, 145, 174, 183, 207, 208/.

În principiu se pot utiliza ca materiale pentru electrozi toate materialele cu conductivitate electrică și termică bună, având temperatura de topire cât mai ridicată. La alegere trebuie să se țină seama de comportarea la uzură, costul materialului și posibilitățile de prelucrare.

Cel mai utilizat material este Cu, datorită posibilităților foarte bune de prelucrare, uzură mică în timpul prelucrării și preț de cost redus. Grafitul și pseudoaliajele Cu-W, Cu-Ag, Cu-C, realizate prin metalurgia pulberilor dau rezultate foarte bune, în schimb prețul lor de cost este încă mare.

Pentru realizarea electrozilor sculă se pot aplica diferite procedee, alegerea lor fiind dictată de configurația geometrică, cost și scopul urmărit.

Cealaltă componentă a analizei economice este costul unității

de volum prelevat, influențată de utilaj, consumul energetic, precizie dimensională, etc.

Cunoscând proprietățile deosebite ale aliajelor dure și posibilitățile lor de prelucrare, se naște întrebarea, care procedeu de prelucrare este mai adecvat? Pentru a da un răspuns trebuie analizate în paralel posibilitățile de prelucrare prezentate. Greutatea comparației constă în faptul că nu se găsesc piese de aceeași formă¹¹ complexitate realizate prin cele două procedee.

O delimitare a domeniilor de utilizare, pentru cazul general de prelucrare, se prezintă în diagramele calitative din fig.2.7.

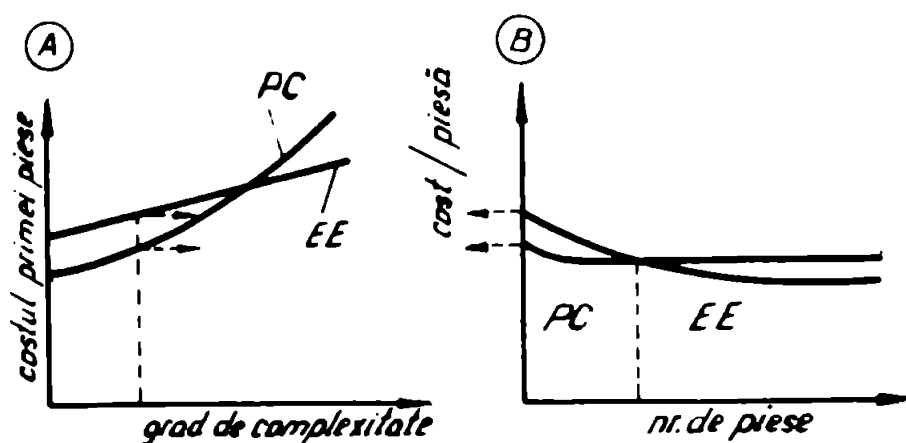


Fig.2.7. Domeniul de utilizare a procedurilor convenționale și neconvenționale de prelucrare

curbe, devenind mai avantajoasă prelucrarea prin eroziune electrică (EE), datorită înlăturării prelucrărilor manuale ulterioare.

Situația transpusă pentru un număr mai mare de piese de o anumită complexitate (fig.2.7.B) arată la prelucrările convenționale o scădere a costului datorată reducerii timpilor auxiliari. La prelucrarea prin eroziune electrică costul este mai mare, dar poate fi redus dacă producerea electrozilor este raționalizată și se aplică re folosirea electrozilor de finisare la prelucrările de degroșare.

Intersecția celor două curbe poate apărea la un număr de aproximativ 10 piese, limita modificându-se funcție de piesele prelucrate și dezvoltarea procedurilor de prelucrare.

Dacă se face analiza prelucrării aliajelor dure cu discuri abrazive cu diamant, prețul de cost va fi mult mai mare, datorită costului sculei. La un anumit grad de complexitate a piesei, nu se mai poate aplica procedeul de prelucrare cu discuri abrazive.

497002/189

Această situație, transpusă și la un număr mai mare de piese de prelucrat, dă oțtig de cauză și mai pronunțat prelucrării prin eroziune electrică.

Analiza economică a posibilităților de realizare a unor matrițe de deformare plastică /16,17,18/, atestă că procedeul de prelucrare prin eroziune electrică este pe departe cel mai economic procedeu pentru realizarea matrițelor de dimensiuni mici. Economii realizate, comparativ cu procedeele convenționale, se cifrează la aproximativ 70%.

Analizând cantitatea de material prelevată în unitatea de timp, procedeele convenționale au o productivitate mai mare decât prelucrarea prin eroziune electrică. Din punct de vedere al prețului de cost, situația se inversează în favoarea prelucrării prin eroziune electrică datorită posibilității de a realiza forme complexe, indiferent de proprietățile mecanice ale materialului. La aceasta se mai adaugă faptul că prelucrarea cu scule diamantate se pretează la piesele la care adăosul de prelucrare nu depășește 0,3...0,4 mm. La grosimi mai mari prețul de cost crește foarte mult, prelucrarea devenind neeconomică.

Comparând procedeele prin prisma complexității formei, atunci prelucrarea prin eroziune electrică dă rezultate mult mai bune. Prelucrarea cu discuri abrazive este limitată la suprafețe plane, forme geometrice simple și anumite raze de racordare dictate de sculele prelucrătoare și rigiditatea lor.

Durabilitatea sculelor din aliaje dure, prelucrate prin eroziune electrică, este mai mare decât a celor prelucrate cu scule abrazive. Îndepărtarea unui strat de aliaj dur cu discuri abrazive se bazează pe retezarea cu grăunți de abraziv a anumitor porțiuni ale semifabricatului prelucrat. Abrasivul determină pe suprafața prelucrată o rugozitate orientată, astfel înoft muchia tăietoare a sculei rezultă zimțată, iar pe suprafața prelucrată rezultă zgîrieturi. Toți factorii favorisează slăbirea stratului superficial și a muchiilor determinând apariția microfisurilor și a uzurii.

În cazul prelucrării prin eroziune electrică nu există o anumită direcție de prelucrare, asigurându-se astfel calități superioare suprafețelor prelucrate /60,104,222/. Sub acțiunea efectului termic al descărcărilor electrice în aliajele dure apar fisuri, care se pot menține în limite acceptabile prin alegerea corespunzătoare a regimului de prelucrare.

In concluzie se poate afirma că nici unul din procedeele analizate nu elimină pe celălalt, ci se completează reciproc. In ultimul timp procedeul de prelucrare prin eroziune electrică s-a impus tot mai mult în industria constructoare de scule în general și în special la prelucrarea aliajelor dure, datorită avantajelor incontestabile :

- cost relativ scăzut al electrozilor sculă,
- consum neglijabil de energie electrică,
- reducerea la minim și chiar renunțarea la prelucrarea finală prin șlefuire cu diamant, foarte costisitoare și de durată mare,
- posibilitatea de prelucrare dintr-o dată a întregii matrițe, renunțându-se la prelucrarea separată și asamblarea foarte dificilă a părților componente,
- posibilitatea de recondiționare și reprofilare a matrițelor,
- utilizarea unui număr mult mai redus de mașini unelte,
- productivitate ridicată a procesului comparativ cu metoda clasică de realizare a matrițelor,
- independența procesului de prelucrare de complexitatea formei obiectului de prelucrat.

Pentru a ajunge la aceste avantaje în cazul prelucrării aliajelor dure prin eroziune electrică, trebuie cunoscute fenomenele fundamentale care stau la baza procesului de prelucrare și trebuie elaborate tehnologiile optime de lucru.

C A P I T O L U L 3

MODELAREA MATEMATICA A PROCESULUI DE PRELEVARE DE MATERIAL LA PRELUCRAREA PRIN EROZIUNE ELECTRICA

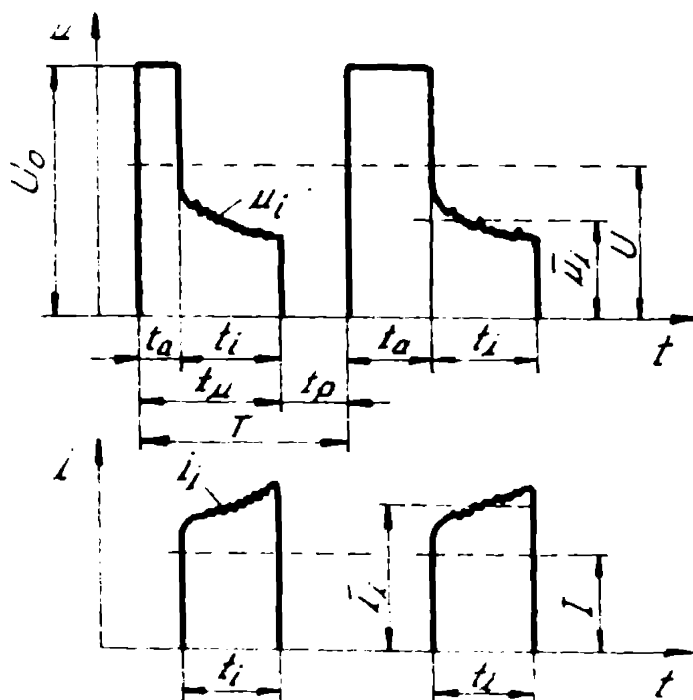
3.1. EROZIUNEA ELECTRICA CA METODA DE PRELUCRARE

Prelucrarea dimensională prin eroziune electrică se realizează prin acțiunea descărcărilor electrice nestaționare sau cuazi-staționare, generate în mod periodic între microneregularitățile electrodului sculă (B) și electrodului obiect de prelucrat (P), scufundați într-un mediu de lucru dielectric /134,139,240,247/.

Prelevarea de material se realizează printr-un proces discontinuu și cumulativ la care, suma descărcărilor electrice produse determină reproducerea reliefului și profilului sculei în piesa de prelucrat.

Descărcarea electrică străpunge lichidul dielectric în locul unde gradientul de tensiune din interstițiu, dat de raportul dintre tensiunea de mers în gol a generatorului și mărimea interstițiului, este maxim.

Descărcarea electrică normală este caracterizată de o anumită evoluție în timp a tensiunii și curentului din interstițiu /2,13,57,87,102,107,141,151,156,189,193,209,223,240/(fig.3.1)



Mărimile caracteristice ale descărcării electrice sînt :

- t_u - durata impulsului de tensiune,
- t_p - timpul de amorsare,
- t_i - durata impulsului de curent (durata descărcării),
- t_p - durata pauzei
- T - perioada impulsului
- U_0 - tensiunea de mers în gol,
- u_1 - tensiunea descărcării,

Fig.3.1. Caracteristicile electrice ale descărcării normale

- \bar{u}_1 - tensiunea medie a descărcării,
- U - tensiunea medie de lucru,
- i_1 - curentul descărcării,
- \bar{I}_1 - curentul mediu al descărcării,
- I - curentul mediu de lucru.

Tensiunea medie a descărcării (\bar{u}_1) este funcție de materialele electrozilor iar curentul mediu al descărcării (\bar{I}_1) se poate regla în trepte pe utilajul tehnologic.

Intre aceste mărimi se stabilesc următoarele relații:

$$t_u = t_a + t_1 \quad (3.1)$$

$$T = t_u + t_p \quad (3.2)$$

Pentru a scoate în evidență timpul efectiv de acțiune al energiei în spațiul de lucru, s-a introdus o mărime convențională de calcul, numită factor de umplere (ζ), determinată cu relația:

$$\zeta = t_u / T = (t_a + t_1) / T \quad (3.3)$$

Timpul de amorsare diferă de la o descărcare la alta, fiind dependent de spațiul de lucru și de tensiunea de mers în gol. Timpul de pauză este totdeauna o mărime comandată, limitată inferior de timpul minim necesar deionizării spațiului, străpuns de descărcarea electrică anterioară, pentru refacerea rigidității dielectrice a interstițiului. Deci va exista totdeauna o mărime care nu se poate controla decât statistic /156/.

Pe această bază s-au dezvoltat două tipuri de generatoare de impulsuri comandate /35/

- generatoare izofrecvență, la care frecvența impulsurilor este constantă, existînd posibilitatea de control și reglare independentă a mărimilor t_u și t_p /242/,

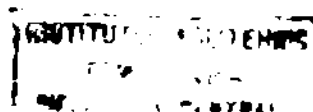
- generatoare izoenergetice, la care energia impulsurilor este constantă, mărimile t_1 și t_p putînd fi controlate și reglate independent /241, 243/.

În cadrul mărimilor electrice caracteristice se mai determină, energia descărcării:

$$W_i = \int_{t_{i1}}^{t_{i2}} u_i \cdot i_i \cdot dt \quad (3.4)$$

și puterea medie a descărcării :

$$P_m = \bar{u}_1 \cdot \bar{I}_1 \quad (3.5)$$



3.2. EVOLUTIA TEORIILOR SI CONCEPȚIILOR PRIVIND

PROCESUL DE PRELUCRARE PRIN EROZIUNE ELECTRICA

Intre descoperirea fenomenului în 1768 de fizicianul englez Priestley și inventarea tehnicii de prelucrare prin eroziune electrică în 1945 de soții Lazarenko (URSS), au trecut aproape două secole, în care nu s-a înregistrat nici un progres real în cunoașterea proceselor fizice de bază ale electroeroziunii /25/.

În ultimele decenii, construcția mașinilor de prelucrat prin eroziune electrică a făcut progrese foarte mari. Cu toate eforturile depuse a apărut un decalaj între maturitatea industrială a mașinilor și posibilitatea de cuprindere a tuturor fenomenelor fizice, care stau la baza procesului, într-o teorie unitară, prin care să se explice în mod univoc mecanismul prelevării și uzurii /13,39/.

Cauzele care au determinat această situație sînt pe de o parte, complexitatea fenomenelor desfășurate într-un spațiu foarte mic (5...1000 μm), într-un timp foarte scurt (0,1...2000 μs) și în prezența unui lichid dielectric, iar pe de altă parte studiul experimental necesită un aparataj, specializat, care a apărut de abia în ultimele decenii, iar interpretarea fizică a datelor obținute a fost posibilă doar prin progresele făcute de fizica solidului și a plamei.

Din teoriile apărute se desprind trei puncte de vedere fundamentale în interpretarea naturii și mecanismului eroziunii electrice în descărcările prin impuls: electromecanic, termomecanic și electrotermic /30,63,65,87,102,107,109,141,150,147,161,164,193,200,222,223,226,232,235/.

3.2.1. Teorii electromecanice cu privire la mecanismul eroziunii electrice

După Williams /46,87,164,226/ câmpul electric de intensitate mare ($\sim 1000 \text{ V/cm}$), produs la suprafața electrozilor datorită densității specifice mari a curentului ($10^6 \dots 10^7 \text{ A/cm}^2$), determină apariția unor forțe relativ mari. Rezistența materialului piesei este limitată, iar ionii nu pot prelua o sarcină mai mare de $5 \cdot 10^3 \text{ coul/cm}^3$. În aceste condiții forța care acționează pe o suprafață foarte mică, va produce tensiuni în material care vor depăși tensiunea admisibilă și astfel se vor smulge particulele de metal din piesă.

Prelevarea de material la catod este cauzată de particolele de metal smulse din anod.

Cercetarea experimentală s-a desfășurat cu descărcări electrice singulare, asupra unor piese din CW în mediul dielectric ulei de transformator /226/. În urma rezultatelor obținute Williams trage următoarele concluzii :

Eroziunea metalelor în arc electric este însoțită de temperaturi ridicate și topiri, pe când la eroziunea cu scînteii electrice, investigațiile microscopice ale suprafeței piesei prelucrate atestă ruperi prin forțe mecanice.

Între volumul de material prelevat la o descărcare și rezistența la rupere a materialului s-a stabilit următoarea relație determinată pe cale experimentală :

$$V_{Pi} = (0,44 \cdot 10^{-6} / \sigma_r) \cdot t_i \cdot i_i^{3/2} \quad (3.6)$$

unde: V_{Pi} - volumul prelevat din piesă la o descărcare,
 σ_r - rezistența la rupere a materialului.

Adîncimea craterului nu depinde de durata impulsului, în timp ce suprafața craterului este proporțională cu durata impulsului, deoarece în cursul unei descărcări se detașează succesiv mai multe fragmente de pe suprafețele adiacente.

Considerînd descărcarea electrică ca o sumă de curenți punctiformi pe suprafața piesei și neglijînd efectul pelicular, s-a determinat pe cale experimentală că adîncimea craterului este proporțională cu rădăcina pătrată a curenților.

Rezultatele obținute de Williams nu au fost confirmate de toate perechile de materiale prelucrate și sînt valabile numai pentru materialele la care temperatura de topire este mai mare de 610°C./164/.

Această teorie este combătută de Lazarenko /110/ ca fiind în discordanță cu majoritatea datelor experimentale. Astfel produsele eroziunii au formă sferică, reprezentînd picături solidificate. Excepție de la această regulă sînt materialele metaloceramice și metalele foarte fragile, iar Williams și-a desfășurat experiențele tocmai cu asemenea materiale - CW.

În lucrările lor Zolotych /235/ și Zingherman /231/ arată că în teoria lui Williams a fost admisă o eroare considerînd că câmpul electric acționează doar pe suprafața particolei de metal, de și în fapt aceasta acționează asupra întregului volum.

După eliminarea acestei erori, teoria nu mai concordă cu rezultatele experimentale.

Rezultatele cercetării metalelor pure cu ajutorul microscopului electronic și analizei röntgenostructurale /231/, au arătat că distrugerea metalelor are natură termică, ne fiind "rece".

Alți cercetători au admis teoria lui Williams numai pentru o anumită fază a descărcării electrice. Astfel, Hockenberry /87/ presupune că în prima fază eroziunea are loc datorită unor forțe mecanice, conform teoriei lui Williams, iar în a doua fază datorită topirii provocate de procesele de transmitere a căldurii. La baza acestei teorii stau rezultatele experimentale obținute prin tehnica filmărilor ultrarapide.

Obaciu /159/ consideră, că la începutul descărcării electrice, datorită efectului Skin se prelevează particole solide din suprafața de formă inelară expusă curentului.

3.2.2. Teorii termomecanice cu privire la mecanismul eroziunii electrice.

Mandelstam și Raiskij /164,231/ au explicat distrugerea anodului prin acțiunea mecanică a jeturilor metalice desprinse din anod. Pe baza observațiilor făcute autorii au constatat că în timpul descărcării electrice, de pe suprafața electrozilor se desprind jeturi luminoase, care pătrund în canalul descărcării. Aceste jeturi au o energie cinetică mare, datorată vitezei de deplasare de 1000 m/s. La impactul cu electrodul opus, se prelevează din acesta particole metalice.

Experiențe similare, efectuate de Sobra și Zitka /231/ în care jeturile au fost separate de canalul descărcării, au arătat că distrugerea anodului numai sub acțiunea jeturilor, este neglijabilă. De fapt jeturile sînt consecința eroziunii electrice și acțiunea lor are un rol secundar.

O explicație asemănătoare este prezentată de Divers și Hoh /164/ care consideră prelevarea de metal ca o consecință a acțiunii mecanice a bombardamentului de electroni și ioni pe suprafața electrozilor. Fenomenele termice apărute la cei doi electrozi, sînt considerate ca fiind o consecință și un efect secundar al bombardamentului cu particole elementare. Prelevarea preferențială de material se explică prin diferența de masă a electrozilor și ionilor și repartiția de energie la anod și catod.

Hinnüber și Rüdiger /83/, analizând suprafețele prelucrate, consideră transformările și fisurile care au loc în straturile marginale, drept cauzele prelevării de metal. Socurile termice, transmise materialului prin descărcările electrice, produc la suprafața electrozilor gradienti de temperatură foarte mari. În material apar tensiuni termice foarte mari, care depășesc tensiunea admisibilă provocând ruperea unor cristale sau grupe de cristale din electrozi. Se poate considera că acesta este mecanismul esențial care conduce la prelevarea de metal în cazul prelucrării materialelor fragile.

3.2.3. Teorii electrotermice cu privire la mecanismul eroziunii electrice.

Pe baza acestor teorii, cauza prelevării de material o constituie procesele termice de încălzire, topire și/sau vaporizare, determinate de parametrii electrici ai descărcării și proprietățile termofizice ale materialelor prelucrate.

La rândul lor aceste teorii se pot împărți în două grupe /70,87,235/.

Prima grupă este formată din teoriile care presupun că rolul preponderant aparține efectului Joule-Lenz, sursele de căldură fiind volumetrice. Reprezentative în acest sens sînt lucrările lui Lebedev, Nekrosevici, Bakuto, Mitkevici, ș.a.

Teoriile din cea de a doua grupă consideră esențial efectele pricinuite de bombardamentul electronilor, respectiv ionilor între canalul de plasmă și suprafața electrozilor. Sursele de căldură astfel create sînt superficiale, caracterizate de o densitate de energie foarte mare. În această grupă se includ lucrările elaborate de Lazarenko, Jones, Somerville, Blevin, Fletcher, Zobtych, Zingherman, Snocys, Van Dijck, ș.a.

Nekrasevici și Bakuto /87,150,231/ împărțind punctul de vedere conform căruia încălzirea electrozilor se datorește efectului Joule-Lenz, consideră craterul format la o descărcare ca o suprapunere de mai multe cratere elementare. Într-un timp foarte scurt curentul este transmis printr-un canal cu diametru mult mai mic decît cel al canalului de plasmă, realizînd astfel un contact punctiform. Un astfel de canal există un timp foarte scurt, se descompune, după care pe un loc nou se formează un canal similar.

Contactul punctiform produce un crater elementar, densitatea

de curent specifică depășind 10^7 A/cm^2 . Durata impulsului elementar este foarte mică, astfel încât metalul se topește datorită căldurii Joule-Lens.

Materialul prelevat la o descărcare singulară este dat de relația :

$$m = \beta \cdot A \cdot i_1^2 \cdot t_1 \quad (3.7)$$

unde: β - coeficient ce definește geometria unui crater elementar funcție de materialul electrozilor, forma impulsului și lichidul dielectric,

A - coeficient care ține cont de proprietățile termice și electrice ale materialului electrozilor.

Teoria elaborată cunoscută sub denumirea de teoria "migrationistă", a fost confirmată cu excepția materialelor feromagnetice și a grafitului. Comportarea diferită a materialelor feromagnetice se poate explica prin efectul Skin, iar pentru grafit nu s-a putut găsi nici o explicație.

Cercetările efectuate de Zitka și Sobra arată că în anumite condiții canalul descărcării are o structură discretă, adică constă din canale separate mai înguste, existente însă simultan și reprezentând componente ale canalului comun /231/.

Somerville și Blevin remarcă că un impuls lasă întotdeauna o singură urmă, deși la curenți mari în anumite cazuri s-au remarcat mai multe urme. Dacă suprafața anodului este acoperită de o peliculă, se formează mai multe urme, iar pe o suprafață curată se formează o singură urmă și curentul se repartizează uniform pe întreaga suprafață a canalului.

Din datele acestor autori se poate stabili, că există simultan întotdeauna mai multe canale, numărul lor fiind cu atât mai mare cu cât curentul este mai mare. În această situație densitatea de curent specifică presupusă în explicația lor de Nekrosevici și Sakuto, este mult mai mică, ceea ce micșorează volumul de metal topit prin efect Joule-Lenz la valori cu totul neglijabile /231/.

La baza teoriilor, care consideră sursa de căldură superficială, trebuie așezate lucrările de pionerat ale lui Lazarenko, continuate și fundamentate teoretic de Zolotych /236,237/ și Zingherman /230,231,232,233,234/.

Zolotych /236/ consideră că prin efectul de frînare a electronilor pe anod și a ionilor pe catod, se formează pe electrozi surse de căldură de durată foarte scurtă, repartizate pe volume

mici. Procesul nestaționar de transmitere a căldurii de la aceste surse, determină topirea locală și vaporizarea parțială a metalului, din zona sursei. Sub acțiunea forțelor electrodinamice și a undei de șoc, metalul topit este prelevat în spațiul de lucru, unde este răcit sub forma unor particole sferice.

Pentru determinarea volumului de metal topit de sursa superficială, autorul pornește de la ecuația generală de transmitere a căldurii, introducând o serie de ipoteze simplificatoare referitoare la constanța coeficienților termofizici, neglijarea căldurii transmise prin radiație și convecție, neglijarea surselor de căldură locale, ș.a.m.d. Asupra relațiilor se va reveni în subcapitolul 3.4.1.

Rezultatele obținute teoretic prin determinarea izotermelor temperaturii de topire a materialului, concordă cu forma spațială a craterului obținut experimental.

Zingherman /231/ a studiat rolul surselor de căldură volumetrice și superficiale, ajungând la concluzia că doar la impulsuri de scurtă durată în metale cu mare rezistență electrică, la începutul impulsului ($\sim 4\%$ din durata impulsului), sursa volumetrică provoacă topirea metalului, volumul topit reprezentând doar 1...2% din volumul craterului.

Pornind de la aceste constatări, autorul calculează volumul de metal topit de sursa superficială, bazat pe aceleași ipoteze ca și Zolotych. În plus a ținut cont de forma impulsului de curent și căldura latentă de topire dar nu a ținut cont de schimbarea stării de agregare a metalului.

O altă problemă rezolvată de autor, se referă la determinarea rasei sursei de căldură. Teoretic diametrul craterului nu poate depăși în mod esențial diametrul canalului descărcării, deoarece viteza de dilatare a canalului descărcării, este cu un ordin mai mare decât viteza de transmitere a căldurii în electrozi /231/. Această teorie a fost verificată experimental de autor.

În modelul propus Zingherman /87,231/ consideră, că toată energia descărcării se consumă pentru topirea materialului electrozilor, fără a lua în considerare forțele necesare prelevării metalului lichid. Dacă la fundul craterului s-a atins temperatura de topire, atunci se poate admite că la suprafața craterului, care este în contact cu coloana de plasmă, se ajunge la temperatura de vaporizare. În această situație o parte însemnată de energie va fi

consumată pentru vaporizarea materialului (ex. pentru a topi 1g. de cupru se necesită 649 J, iar pentru vaporizarea aceleiași cantități 6402 J).

Rezultatele experimentale coincid foarte bine cu curbele teoretice obținute, în urma introducerii unui număr mare de coeficienți determinați experimental.

Teorii mai recente ale procesului de eroziune electrică elaborate de Snoyes și Van Dijk /200,201,217,218,219,220,221/ dau metode de calcul pentru determinarea volumului de metal prelevat la o descărcare ținând cont de fenomenele de topire și vaporizare. Pornind de la repartiția de energie la anod și catod autorii ajung la concluzia, căldura produsă prin efect Joule-Lenz poate fi neglijată.

Pentru calculul izotermelor de topire și vaporizare, autorii au conceput un model de transmitere a căldurii cu o sursă de căldură de formă cilindrică cu raza și energia dependente de timp. Se obține o concordanță foarte bună între rezultatele teoretice și cele experimentale.

Nekrasevici și Bakuto /150/, studiind cazurile întâlnite ale eroziunii electrice, determinate de fenomenele termice de pe suprafața electrozilor, stabilesc o ecuație care descrie în forma cea mai generală procesele termice, în orice metal :

$$\partial T / \partial t = (1/c \cdot \rho) / \text{div}(k \text{ grad } T) + \eta \int \sigma(T) j^2 / \quad (3.8)$$

unde: c - căldura specifică a materialului,

ρ - densitatea materialului,

k = k(T) - conductivitatea termică,

η - echivalentul termic al lucrului mecanic,

$\int \sigma(T)$ - rezistența specifică a materialului electrodului,

j = j(x, y, z, t) - densitatea de curent,

T = T(x, y, z, t) - temperatura,

t - timpul.

Toate teoriile termice ale eroziunii electrice prezentate, au la baza lor diferite cazuri particulare ale acestei ecuații. Pornind de la această constatare se poate admite, că la începutul descărcării electrice canalul de plasmă fiind mic, densitatea specifică de curent depășește 10^7 A/cm^2 , astfel că procesul de eroziune se desfășoară conform termenului al doilea al relației (3.8), adică datorită efectului Joule-Lenz. Odată cu mărirea canalului de plasmă și reducerea densității de curent sub 10^6 A/cm^2 , se poate neglija

încălzirea prin efect Joule-Lenz, procesul de eroziune decurgînd conform primului termen al expresiei (3.8) prin transmiterea de căldură de la o sursă superficială.

Complexitatea fenomenului electroeroziv, precum și insuficiența datelor experimentale au făcut ca pînă în prezent să nu poată fi elaborată o teorie generală a fenomenului, capabilă să explice toate problemele legate de mecanismul eroziunii. Această situație a determinat pe unii cercetători /25,87,129,150,236/ să admită, că alături de fenomenele termice, în anumite cazuri particulare pot acționa și fenomene cu caracter : mecanic, termomecanic, electromagnetic.

Zolotych /87,236/ arată că sursa volumică de căldură, produsă prin efect Joule-Lenz, a cărei influență asupra metalului este neglijată datorită densității de energie reduse, pătrunde în material, producînd tensiuni și fisuri. La materiale cu temperatura de topire ridicată, modul de elasticitate mare și plasticitate redusă, distrugerea prin efect mecanic este o componentă importantă a prelevării.

Albinski /7/ arată că în zona canalului descărcării apar trei straturi distincte. Primul strat în contact cu canalul descărcării încălzit la temperatura de vaporizare, stratul imediat inferior încălzit la temperatura de topire și al treilea strat încălzit la o anumită temperatură sub cea de topire. În al treilea strat apar tensiuni termice mari care pot duce la ruperea materialului.

Pornind de la aceste constatări autorul a emis ipoteza că în procesul de eroziune electrică vor acționa pe lîngă constantele termofizice ale materialului și proprietățile mecanice ale acestuia (modulul de elasticitate, coeficientul lui Poisson, etc). Tensiunile termice ce apar în material pot fi apreciate cantitativ prin relații de calcul deduse de autor.

Pe baza lucrărilor cu caracter fundamental prezentate se poate afirma, că teoriile care atribuie eroziunii electrice a metalelor o natură termică sînt practic unanim acceptate. Formarea craterelor de eroziune pe suprafața electrozilor, este provocată de căldura transmisă din canalul descărcării. Căldura dezvoltată prin efect Joule-Lenz se poate neglija, cu excepția cazurilor unor descărcări electrice de foarte scurtă durată, la care transmiterea căldurii prin conductivitate termică este practic neglijabilă.

Stabilirea naturii termice a eroziunii electrice, a permis determinarea unui coeficient fizic de stabilitate la eroziune a materialului în funcție de proprietățile termofizice ale acestuia /231/, denumit "criteriul lui Palatnik" /141/ sau "criteriu al stabilității termice" /156/:

$$\bar{\Pi} = k.c.q.(T_t - T_o)^2 \quad (3.9)$$

unde: T_t - temperatura de topire,
 T_o - temperatura ambiantă.

Valori mari ale acestui criteriu, cresc rezistența la eroziune electrică, micșorînd volumul craterelor elementare, iar valorile mici scad rezistența la eroziune.

3.2.4. Aspecte specifice prelucrării aliajelor dure prin eroziune electrică

Particularitățile eroziunii electrice a aliajelor dure decurg din specificul materialului care se caracterizează prin /30,93/:

- proprietăți fizice, mecanice și termice specifice. Se remarcă duritatea foarte mare, modulul de elasticitate ridicat, coeficientul de dilatare termică mic, conductivitate termică și electrică scăzută, căldură specifică redusă,

- grad de neomogenitate ridicat. Aliajele dure sînt constituite dintr-o componentă dură (CW) și una moale, cu rol de liant (soluția solidă de CW în Co cu conținut maxim de CW de 10%) a căror proprietăți fizice, mecanice și termice diferă foarte mult.

Un prim punct de vedere în legătură cu mecanismul eroziunii electrice a aliajelor dure a fost emis de Williams /226/ și verificat practic la prelucrarea CW, prezentat în subcapitolul 3.2.1.

Pe plan teoretic ipoteza acțiunii forțelor câmpului electric a fost admisă de Toth-Bitskey și Pocsá /215/ pentru impulsuri de durată foarte scurtă. Pe baza rezultatelor obținute autorii susțin că eroziunea materialului nu este determinată de efectul termic al descărcării electrice întrucît nu au observat o proporționalitate între energia impulsului și materialul erodat. În cazul analizat, cu impulsuri scurte de 1 μ s, efectele intensității câmpului și forțelor electrodinamice sînt predominante.

Impulsurile lungi, cu factor de umplere mare, produc prelevări de material aproximativ proporționale cu energia impulsurilor,

corespunzând cu rezultatele obținute de Zolotykh, care susține că efectul termic are rolul fundamental în eroziune.

Referindu-se la teoria lui Williams, Lazarenko /110/ admite posibilitatea prelevării în stare solidă pentru materiale fragile cum este cazul CW.

Pe plan experimental afirmațiile lui Williams sînt infirmate prin existența pe suprafețele prelucrate a materialului topit și resolidificat și de evidențierea în acesta, prin analize röntgeno-structurale, a carburii duble de wolfram (W_2C), care se formează la temperaturi superioare temperaturii de topire a liantului /41, 65, 83, 231/.

Hinnäber /83/, Gauser /65/ și Devenyi /41/ arată că tensiunile interne provocate de variația de temperatură pe suprafața aliajului dur, determină deprinderi de cristale separate sau grupuri de cristale.

Ipotesele prezentate de Albinski /7/ își găsesc de asemenea aplicație la prelucrarea aliajelor dure.

Intrucît fiecărui material îi este caracteristică o anumită stabilitate la eroziune electrică, în sistemele neomogene, cum este cazul aliajelor dure, se constată o selectivitate a procesului de prelucrare, exteriorizată prin erodarea în primul rînd a liantului, relația (3.9).

O problemă deosebită la prelucrarea aliajelor dure o constituie apariția fisurilor. Poteev /59/ și Kamorkin /90/ prezintă mecanismul de formare a fisurilor ca urmare a eforturilor de întindere, care iau naștere în material datorită fenomenelor de încălzire și răcire din proces. Cele mai periculoase pentru aliajul dur sînt eforturile de întindere, care distrug liantul și determină apariția fisurilor în stratul de suprafață. Valoarea efortului de întindere este funcție de volumul de material încălzit din stratul de suprafață, deci este proporțional cu durata impulsului /59/.

Adîncimea stratului defect crește cu energia și durata impulsului și scade cu mărirea conținutului în cobalt (scade conductivitatea termică și crește rezistența la rupere) /90/.

Zolotykh /235/ și Veroman /222/ au determinat experimental adîncimea de pătrundere a fisurilor funcție de durata impulsului, stabilind valori limită pentru problemele de prelucrare analizate.

Gelfand /69/ studiază influența compoziției chimice și a modului de obținere a aliajului dur, asupra mecanismului de

formare a fisurilor. Aliajele dure cu un conținut mai mare în cobalt și cu granulație mai mare a CW prezintă o stabilitate mai mare față de apariția fisurilor, iar adâncimea fisurilor este mai mică.

Problema prelucrării aliajelor dure este abordată și în lucrările cercetătorilor Ganser /65/, König /99/, Kosek, Rützel, Garbajo /97/, Obrig /161/, Schirholt /193/, Van Dijck, Suseys /217/, Wertheim /223/ în funcție de tematica cercetării propuse, răspunzând doar la anumite aspecte specifice.

De remarcat că lucrări cu caracter fundamental sînt puține, sporadice și unilaterale ca problematică propusă, marea majoritate a lucrărilor abordînd probleme tehnologice de exploatare.

Din acest motiv pînă la ora actuală nu există o teorie unitară verificată de experiență, asupra mecanismului eroziunii electrice a aliajelor dure.

3.3. ANALIZA PROCESELOR FIZICE ÎN CAZUL DESCĂRCĂRILOR SINGULARE

În vederea analizei procesului de prelucrare dimensională prin eroziune electrică este necesar un model matematic, care să descrie fenomenele care au loc la o descărcare singulară.

După Schirholt /193/, Kurr /107/, Mironoff /129/ Bruma /25/, Wertheim /223/ și alți cercetători, fenomenele fizice la o descărcare singulară se desfășoară în trei faze principale, care în esență se caracterizează prin alternarea de efecte Skin și Pinch (fig.3.2)

În prima fază (fig.3.2.a,b) are loc străpungerea mediului dielectric și formarea canalului de plasmă. Variația în timp a tensiunii și curentului sînt mari. Această caracteristică a curentului ($di/dt > 0$) determină o circulație a curentului prin pereții coloanei datorită efectului Skin.

În faza a doua (fig.3.2.c,d) curentul prezintă o caracteristică constantă ($di/dt = 0$), apare efectul Pinch care provoacă o reducere a diametrului coloanei și deci o creștere a densității. Căldura rezultată din energia electrică se transmite electrozilor unde provoacă topirea respectiv vaporizarea unui volum de metal. Aceste fenomene determină creșterea canalului de plasmă și a bulei de gaz.

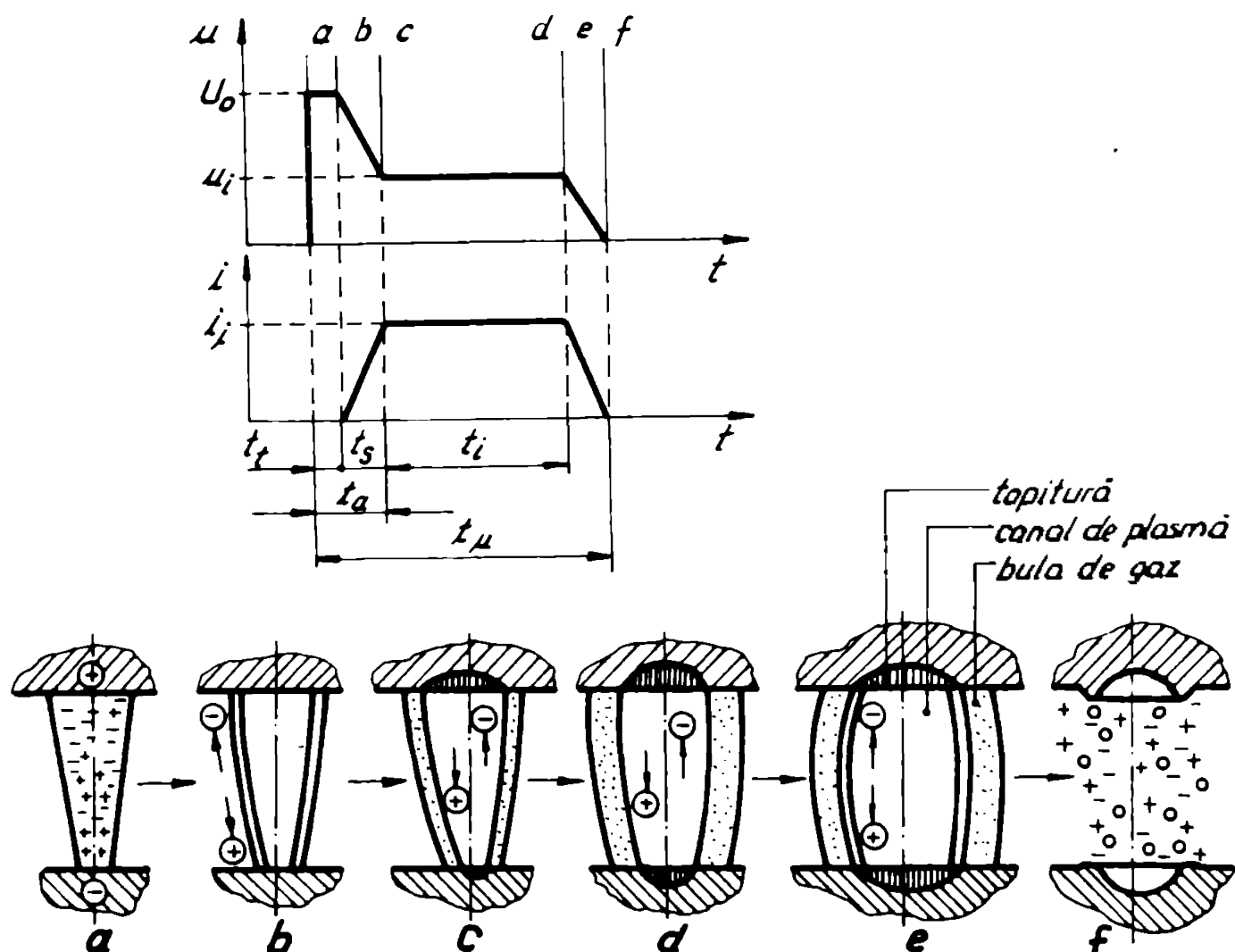


Fig.3.2. Prezentarea schematică a formei impulsului și a fazelor descărcării

Faza a treia (fig.3.2.e,f) se caracterizează prin variații mari de tensiune și curent ($di/dt < 0$), deci apare din nou efectul Skin. Dilatarea bulei de gaz continuă, presiunea scade rapid, astfel că bula de gaz se sparge prin implozie și se fragmentează. Prin acest efect materialul topit respectiv vaporizat este prelevat în mediul de lucru.

Zolotykh /236/, Snoeys și Van Dijck /221/, Wertheim /223/ ș.a. propun descrierea procesului de eroziune prin descărcări electrice în următoarele etape :

- străpungerea,
- dezvoltarea în timp a canalului de plasmă,
- distribuția energiei electrice,
- transferul de căldură
- evacuarea materialului.

3.3.1. Mecanismul de străpungere a mediului dielectric.

Mecanismul de străpungere a mediului dielectric trebuie analizat pentru două situații distincte.

- mediu dielectric curat (cazul teoretic),
- mediu dielectric poluat (cazul real).

La baza explicațiilor mecanismului de străpungere a mediului curat stă teoria strimerilor pentru fenomene de străpungere în gaze /9,14,15/. Această similitudine observată /221/ demonstrează că în faza anterioară străpungerii, în lichid se formează mici cantități de gaze, în care se poate produce descărcarea.

Între momentul aplicării tensiunii de străpungere și momentul în care se observă fenomenul luminos, trece un timp de ordinul a citorva sute de nanosecunde, denumit timp de întârziere (t_t). În continuare electronii emiși de catod sînt accelerați în câmpul electric, lovesc molecule ale mediului dielectric, punînd în libertate noi electroni. Astfel are loc o reacție în lanț, care într-un timp foarte scurt multiplică purtătorii de sarcină electrică. În momentul în care strimerii ating electrodul opus, se produce o cădere instantanee de potențial, indicînd că dielectricul își pierde proprietățile izolatoare și este înlocuit cu un canal de plasmă.

Timpul scurs din momentul aplicării impulsului de tensiune pînă la străpungerea electrică a interstițiului, numit timp de amorsare (t_g), este constituit din două componente /156/ :

- timp de întârziere (t_t), o perioadă cu caracter aleator de pregătire a condițiilor de străpungere;
- timp de străpungere (t_g), necesar formării efective a coloanei de plasmă a descărcării. În acest timp intensitatea curentului crește de la zero la o valoare cvazistacionară (i_1) iar tensiunea scade de la cea de mers în gol (U_0) la o valoare practic constantă (u_1), fig.3.2).

Peșă de cele prezentate, Horsten, Heuvelman și Veenstra /221, 223/ arată că în faza anterioară străpungerii, datorită transportului unei cantități date de energie electrică, în mediul dielectric se formează bule de vapori prin căldură Joule-Lenz, în care se produce străpungerea.

Materialele prelevate din piesă și sculă în timpul procesului eroziv, poluează mediul dielectric cu care se lucrează în practică, influențînd mecanismul de străpungere.

Formarea unor înlănțuiri de impurități determină creșterea

curentului anterior străpungerii. Creșterea concentrației particulelor în zona câmpului electric mare, determină formarea unor punți cu rezistență specifică mai mică, constituind astfel locul de inițiere al descărcării.

Acest punct de vedere este subliniat și de experiențele lui Hockenberry, care observă curenți anteriori străpungerii de ordinul a 1 mA și formarea unor înălțări de particule și bule de gaz.

Aceste efecte explică dependența procesului de prelucrare prin eroziune electrică de cantitatea de impurități din mediul dielectric.

3.3.2. Dezvoltarea în timp a canalului de plasmă

Modul în care se dezvoltă în timp canalul de plasmă și bula de gaz înconjurătoare, influențează în mod hotărâtor rezultatele prelucrării.

Zimanyi /223,229/ a determinat pe cale experimentală și a dedus în ipoteza unei transformări adiabatică în bula de gaz, o relație de calcul pentru raza și viteza de creștere a bulei de gaz. Se remarcă o concordanță bună între valorile determinate experimental și cele calculate.

Bula de gaz ia naștere prin procesul de vaporizare a mediului de lucru și a materialului electrozilor. Viteza de creștere a bulei de gaz scade cu timpul.

Canalul de plasmă are la începutul descărcării, ca urmare a creșterii sale cu viteză supersonică, o formă aproximativ cilindrică. La creșterea în continuare a canalului cu viteză subsonică se observă o dilatare a acestuia mai pronunțată la mijloc față de cele două capete din dreptul electrozilor.

Variația presiunii în timpul descărcării influențează procesul de prelucrare. La începutul descărcării presiunea din bula de gaz este mare datorită vaporizării pronunțate, determinate de densitatea de energie specifică foarte mare, ca urmare a secționii reduse a canalului de descărcare. Prin mărirea canalului de plasmă, presiunea gazului scade pînă la o presiune egală cu suma dintre presiunea atmosferică și presiunea hidrostatică din locul considerat.

La începutul descărcării canalul de plasmă și bula de gaz au aceleași dimensiuni.

Ca urmare a creșterii bulei de gaz, care la începutul descărcării se face cu viteze supersonice, în mediul dielectric apar

unde de șoc, care provoacă oscilații ale presiunii cu timpi de menținere funcție de durata impulsului. Schirholt /193/ explică pe această bază apariția unor depresiuni, care pot provoca o erupție spontană a metalului topit din crater.

3.3.3. Distribuția energiei electrice

Datorită timpului foarte scurt necesar apariției fenomenului de ionizare uniformă, starea de plasmă din canal este formată în timpul fazei de străpungere. Dimensiunea transversală a canalului este determinată de fenomenele termice la suprafața electrozilor și de echilibrul forțelor de inerție dintre mediul dielectric și presiunea interioară.

Distribuția spațială a energiei în interstițiu se poate deduce din curba de potențial caracteristică a unui arc (fig.3.3) /111,131,141,156,179,192,193,221,223/.

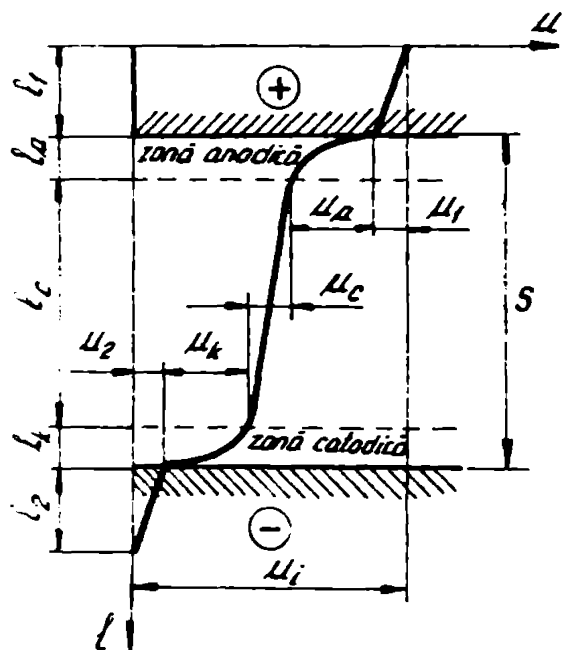


Fig.3.3. Repartiția tensiunii pe spațiul de lucru

Tensiunea descărcării (u_i) se repartizează pe căderea de tensiune catodică (u_k) pe lungimea (l_k) a zonei catodice, o cădere de tensiune (u_c) pe lungimea (l_c) a coloanei, o cădere de tensiune anodică (u_a) pe lungimea (l_a) a zonei anodice și căderile de tensiune (u_1) și (u_2) din electrozi.

Conform teoriilor prezentate, căldura generată în electrozi de căderile de tensiune (u_1) și (u_2) prin efect Joule-Lenz, se poate neglija pentru majoritatea condițiilor de prelucrare prin eroziune electrică.

Coloana de plasmă, conductoare din punct de vedere electric este un amestec de dielectric vaporizat și metal în stare moleculară, atomică sau ionică. Disiparea puterii în canalul de plasmă este determinată de natura gazului din coloană, felul metalului anodului, curentul arcului, presiunea gazului și lungimea arcului.

Puterea disipată într-o coloană de lungime (l_c) se obține din relația :

$$P_c = 0.1 \cdot l_c \cdot i^2 \cdot \epsilon^{1-n} \quad (3.10)$$

unde C - o constantă,

p - presiunea gazului,

m - exponent, funcție de natura gazului din coloana arcului,

i - curentul arcului,

n - exponent, funcție de temperatura de fierbere a materialului anodului.

Pe baza rezultatelor obținute de Van Dijk /221/, puterea disipată pe coloană, P_c , este în mod uzual mai mică de 1% din puterea totală, iar după Zingherman /230/ această putere ajunge la aproximativ 5% din puterea totală.

În regiunea catodică curentul total i_k este dat de însumarea curentului electronic emis de catod (i_{k-}) și curentul ionic scurs spre catod (i_{k+}), densitățile de curent fiind de ordinul 10^{10} A/m^2 .

$$i_k = i_{k-} + i_{k+} \quad (3.11)$$

Puterea disipată la suprafața catodului este dată de relația:

$$P_k = i_{k+} (u_j + u_k - f_k) - i_{k-} \cdot f_k \quad (3.12)$$

unde: u_j - potențialul de ionizare la impactul ionilor pe catod,

f_k - lucru mecanic de extracție din materialul catodului,

$(-i_{k-} \cdot f_k)$ - factor ce ține cont de efectul de răcire datorat emisiei de electroni.

Valoarea maximă a puterii disipate la catod depinde de contribuția relativă a curentului ionic și electronic, raport ce poate fi determinat pe baza teoriei emisiilor de electroni.

Curentul la anod este egal cu curentul electronilor $i_a = i_{a-}$.

Puterea disipată la anod este dată de relația :

$$P_a = i_a (u_a + f_a) \quad (3.13)$$

unde: f_a - lucru mecanic de extracție din materialul anodului.

Căderea de potențial la anod (u_a) ne fiind clar definită, ecuația puterii anodice nu se utilizează sub această formă.

Puterea totală (P_t) poate fi estimată destul de exact prin produsul dintre tensiunea descărcării (u_1), care rămâne aproximativ constantă pentru o pereche de materiale și curentul descărcării (i_1), relația (3.5). Deci puterea disipată la anod va fi :

$$P_a = P_t - P_k - P_c \quad (3.14)$$

Efectul de polaritate în cazul prelucrării prin eroziune electrică este determinată de distribuția de energie din interstițiu. Prelevarea diferențată de material la electrod și piesă

se datorește repartiției neuniforme a energiei la anod și catod, fiind funcție de emisia de electroni din catod /131/.

În general creșterea densității de curent (j) produce o creștere a densității curentului electronic (j_e), care provoacă o mărire a raportului (P_a/P_k) și drept urmare prelevarea unei cantități mai mari de material la anod față de catod.

Din datele prezentate /131/, pentru perechea de electrozi Cu-Cu, în condițiile de lucru $C = 10 \mu F$, $j = 10^6 A/cm^2$ și $P_t = 5,5 kW$ ($290A \times 19V$) s-a obținut următoarea repartiție de putere :

$P_a = 2,7 kW$ (50%), $P_k = 2,5 kW$ (45%) și $P_c = 0,3 kW$ (5%). Valorile diferă funcție de materialul electrozilor.

Față de cele prezentate, Zolotych /236/ constată că efectul de polaritate este determinat în mod hotărâtor de constantele termofizice ale materialului electrozilor în special conductivitatea termică și temperatura de topire. Cu cât diferența dintre constantele termofizice ale materialului celor doi electrozi este mai mare, efectul de polaritate este mai pronunțat.

Un rol însemnat este atribuit și duratei impulsului /65, 236/. La durate lungi ale impulsului o parte din energie se pierde prin conductivitate termică, iar la impulsuri de durată scurtă pierderea de energie se datorește încălzirii până la vaporizare a unei părți din material. Din punct de vedere termodinamic procesul de prelevare optim se obține atunci când energia descărcării este identică cu energia necesară topirii volumului de material prelevat.

După /101,106,118,119,120,129,166,193,197/ prelevarea diferențiată la anod și catod se datorește atât efectului termodinamic cât și comportării în timp a electronilor și ionilor care formează curentul descărcării. Curentul ionic care determină prelevarea la anod, crește cu durata descărcării.

3.3.4. Transferul de căldură

Puterea disipată pe suprafețele celor doi electrozi produce fenomene specifice fluxului de căldură. Au fost elaborate diverse modele de transmitere a căldurii, care descriu influențele termice ale surselor de căldură în electrozi. Pe baza lor se determină izotermale corespunzătoare temperaturii de topire, sau alte temperaturi de transformări cristalografice. Prin acest procedeu de calcul se poate evalua volumul de metal topit sau volumul de metal încălzit.

Pornind de la ecuația de transmitere a căldurii pentru solide omogene și izotrope, fără surse interioare de căldură, s-au determinat expresii analitice de calcul a temperaturii (subcapitolul 3.4.3).

Sursele de căldură spațiale, dependente de timp, determină pe lângă procesele de vaporizare și topire și modificări însemnate ale proprietăților fizico-mecanice ale straturilor marginale. Cimpurile termice nestaționare, din timpul și imediat după descărcare, favorizează apariția și dezvoltarea tensiunilor interne și a deformațiilor plastice /99,193,194,195/.

Ca urmare a acestor fenomene, în craterele produse de descărcări singulare în aliaje dure, s-au observat fisuri radiale și concentrice /223/. La durate scurte și curenți mici s-au observat numai fisuri radiale, iar la curenți mari apar funcție de durată fisuri radiale și concentrice.

Fisurile radiale pot pătrunde mai adânc în material, iar sub acțiunea unor sarcini exterioare se pot dezvolta în continuare. Wertheim /223/ propune un model de analiză a fisurilor în funcție de parametrii electrici (fig.3.4).

Descărcarea se consideră ca o sursă de căldură unitară repartisată pe un volum vaporizat cu raza (r_v) și un volum topit de rază (r_T). Variația temperaturii craterului este caracterizată de temperatura de vaporizare (T_v), temperatura de topire (T_T) și temperatura mediului ambiant (T_0).

Modelul prezintă variația tensiunii tangențiale la fundul craterului ($Z=r_T$) și în materialul învecinat ($Z > r_T$) pe durata încălzirii și răcirii. Cu semnul (+) s-a notat solicitarea de întindere, iar cu semnul (-) cea de compresiune.

La încălzirea suprafeței ca urmare a descărcării electrice, fundul craterului delimitat de raza $Z=r_T$ are tendința să se extindă. Drept urmare în perioada de încălzire, în fundul craterului iau naștere tensiuni de compresiune. Zona învecinată se va opune acestei extinderi prin tensiuni corespunzătoare de întindere. În momentul în care tensiunea de compresiune atinge limite de curgere (σ_c), în material au loc deformații plastice. În zona aflată sub fundul craterului, se poate atinge limite de curgere și drept urmare în material se produc fisuri.

În continuarea descărcării fundul craterului se încălzește.

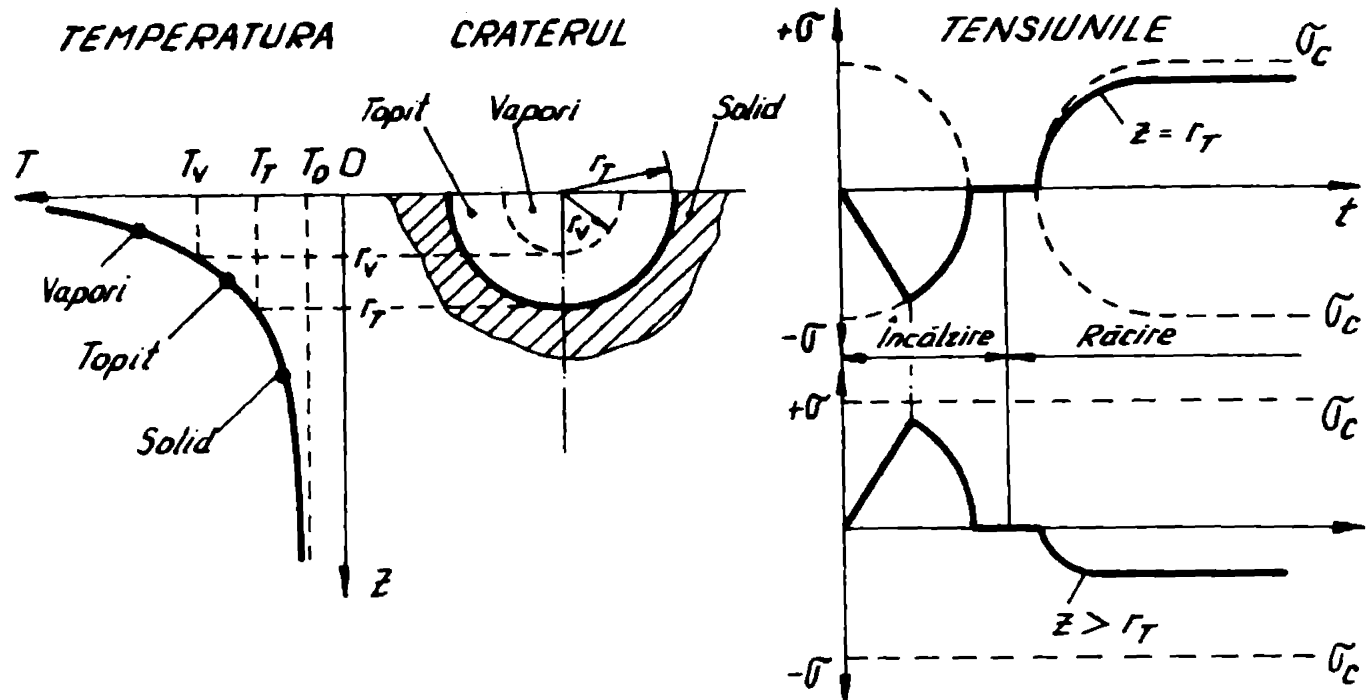


Fig.3.4. Fenomene produse de procesele termice la o descărcare singulară/223/

La creșterea temperaturii tensiunea de curgere scade la o valoare mică critică. În același mod se reduce și tensiunea de compresie astfel încât porțiunea aflată sub acțiunea tensiunii de întindere, va reveni.

Odată cu distrugerea canalului de plasmă urmează perioada de răcire. De data aceasta stratul marginal rămas rece se va opune contracției fundului craterului, provocată de răcirea metalului topit neprelevat. Astfel în fundul craterului apar tensiuni de întindere, menținute în echilibru de tensiunile de compresie din restul corpului.

Pe lângă procesele termice, formarea și extinderea fisurilor, reprezintă o altă cauză a prelevării materialului, în special la aliajele dure.

3.3.5. Prelevarea materialului

Prelevarea de material din electrozi necesită forțe active, existente o durată suficient de lungă de timp, natura lor fiind electrostatică, electromagnetică, hidrodinamică sau termodinamică.

Williams /226/ explică evacuarea metalului sub formă solidă datorită forțelor create de câmpul electric. Teoria lui a fost combătută, cu toate că în anumite situații a fost acceptată parțial. Astfel Zolotych /236/ arată că forțe de natură electrică

pot explica evacuarea metalului topit numai în stadiul inițial al descărcării, într-un timp de ordinul $0,1 \dots 1 \mu s$.

Obaciu /159/ consideră că la începutul descărcării se prelevează particole solide din electrozi, în zona de formă cilindrică a coloanei (fig.3.2.b), ca urmare a efectului Skin.

Hockenberry /87/ consideră că materialul este prelevat din electrozi în două etape. În prima etapă materialul este evacuat cu o viteză de 60 m/s, la câteva μs după începerea descărcării, datorită forțelor cîmpului electric (teoria Williams). Evacuarea de material în a doua etapă are loc după încetarea descărcării, cînd presiunea s-a redus, datorită proceselor de topire.

Singherman /233,234/, a studiat fenomenul evacuării de metal cu tehnica filmării ultrarapide pentru diferite energii, durate ale impulsului, materiale și polarități.

Prelevarea metalului de pe catod începe prin scurgerea unor jeturi de vapori, adică prin mecanismul vaporizării explozive, continuînd, cu întreruperi, pe toată durata impulsului. La anod nu s-a remarcat mecanismul vaporizării explozive.

Eliminarea particolelor din electrozi începe ceva mai tîrziu, după vizualizarea jeturilor. La început sînt evacuate particole mici, iar apoi mai mară. Fenomenul încetează înainte de terminarea descărcării.

Caracterul eliminării particolelor diferă foarte mult pentru diferite metale, datorită neomogenității acestora. Datorită regiunilor cu diferite proprietăți termofizice, în electrod apar zone unde temperatura este egală cu temperatura de vaporizare. Sub acțiunea presiunii vaporilor de metal formați într-o astfel de zonă închisă, vor fi expulzate particole de metal lichid sau vor fi rupte particole de metal netopite.

Conform acestei ipoteze, formarea craterului este urmarea evacuării succesive a particolelor de metal, care lasă pe suprafață urme. Aceste urme au fost interpretate de unii cercetători prin natura discretă a canalului descărcării (Zitka, Sobra, Somerville, Blevin), fie prin migrarea unui canal din loc în loc (Nekrasevici, Bakuta).

Zobotych /87,236/ consideră că imediat la începutul descărcării materialul se vaporizează, timp în care se dezvoltă bula de gaz și se elimină $10 \dots 15\%$ din metal. Restul de metal ($85 \dots 90\%$) se elimină într-un singur act, sub forma unui con luminos de metal topit, după încheierea descărcării. Mecanismul de eliminare

a metalului din crater se explică prin faptul că presiunea în interiorul bulei de gaz ce înconjoară canalul de plasmă, devine mai mică decât cea atmosferică, ceea ce favorizează eliminarea gazelor care la rândul lor antrenează și metalul lichid.

Van Dijck /220/ studiază procesul de formare a picăturilor de metal și determină forțele electromagnetice necesare. Comparând diferitele mecanisme de prelevare a materialului, a ajuns la concluzia că numai în primele microsecunde se elimină picături de metal prin forțe electromagnetice și prin vaporizarea metalului supraîncălzit. La sfârșitul impulsului numai vaporizarea unei cantități mai mari de material poate fi considerată ca fiind cauza, prelevării materialului din electrozi. Rezultatele practice obținute atestă justetea teoriei emise.

În concluzie, un grup de autori /233,234/ consideră că materialul este eliminat continuu din crater în timpul descărcării, iar al doilea grup /87,220,236/ susține că materialul este eliminat din crater la sfârșitul descărcării.

3.4. MODELAREA MATEMATICĂ A PROCESULUI DE PRELEVARE DE MATERIAL LA PRELUCRAREA PRIN EROZIUNE ELECTRICA

Studiul procesului de prelucrare dimensională prin eroziune electrică necesită stabilirea unui model matematic care să reproducă cât mai fidel realitatea. La realizarea acestui deziderat, apar greutăți datorită complexității procesului și necunoașterii în totalitate a fenomenelor care guvernează prelucrarea. Modelele termice propuse de Zolotych /236/, Zincheran /230/, Snoegs și van Dijck /200,201,217,218,219/, îndeplinesc în cea mai mare măsură dezideratul propus.

3.4.1. Criterii matematice

Modelul termo-matematic trebuie astfel conceput încât să permită analiza dependențelor dintre parametrii procesului de prelucrare și mărimile tehnologice caracteristice. Pe baza modelului se vor calcula dimensiunile craterelor produse de o descărcare singulară, în ipoteza că limita acestora coincide cu izoterma temperaturii de topire a materialului, determinată la sfârșitul impulsului.

La baza modelului stă problema transferului de căldură de la

o sursă termică produsă de descărcarea electrică la materialul de prelucrat. Rezolvarea problemei poate fi abordată numeric, prin metoda elementelor finite, sau analitic, prin deducerea relațiilor corespunzătoare de calcul. Metoda elementelor finite necesită un volum mare de calcule /200/, motiv pentru care s-a apelat la metoda analitică de calcul.

Metoda analitică are la bază ecuația generală Fourier de transmitere a căldurii prin solide omogene și izotrope /34,62, 77,124,148,149/ :

$$\frac{dT}{dt} = a \nabla^2 T + \frac{u'}{q.c.} \quad (3.15)$$

unde: $\frac{dT}{dt} = \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{dx}{dt} \cdot \frac{dT}{dx} + \dots$

$a = k/q.c$ - difuzivitatea termică (3.16)
 ∇^2 - Laplacian, scris în sistemul de coordonate considerat,
 u' - căldură internă, produsă în unitatea de timp în volumul considerat.

Considerând că nu există curgeri de masă ($dx/dt=0$) și nici surse interne de căldură ($u' = 0$), ecuația (3.15) devine :

$$\frac{1}{a} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla^2 T \quad (3.17)$$

Zolotych /236/ rezolvă ecuația /3.17/ prin integrarea în timp și în spațiu a funcției de distribuție a temperaturii pentru cazul unei surse de căldură instantanee și punctiforme.

Zingherman /230/ propune rezolvarea directă a ecuației diferențiale pentru cazul unei surse infinit de mari, unidimensionale.

Snoeys și Van Dijck /200,217/ consideră o sursă circulară de căldură și rezolvă ecuația prin metoda transformatei Laplace, prin care ecuația diferențială este transformată în planul complex Laplace și rezolvată prin separarea variabilelor. Acest mod de lucru stă la baza prezentei lucrări și va fi prezentat în subcapitolul 3.4.3.

3.4.2. Clasificarea geometrică a modelelor

Din punct de vedere geometric sursele de căldură pot fi punctiforme, unidimensionale sau circulare. Indiferent de formele lor se admite că fluxul de căldură este constant pe durata impulsului și constantele termice nu variază cu temperatura.

În cazul sursei punctiforme influența dimensiunii transversale a canalului de plasmă este neglijată. Craterelor calculate pentru acel caz au formă sferică, ceea ce se poate accepta numai pentru impulsuri scurte și nivel energetic redus. Între forma calculată și cea practică a craterului apar diferențe.

Dacă sursa de căldură are o rază infinit de mare, problema fluxului de căldură se reduce la o problemă unidimensională. Modelul folosit de Zingherman /230/ a dat rezultate foarte bune pentru impulsuri de durată lungă.

Sursa de căldură circulară propusă de Zolotych /236/ și Snoeys și Van Dijck /200,217,219/ simulează cel mai bine realitatea.

Modelul constă dintr-o sursă circulară de căldură ce acționează asupra electrodului (fig.3.5)

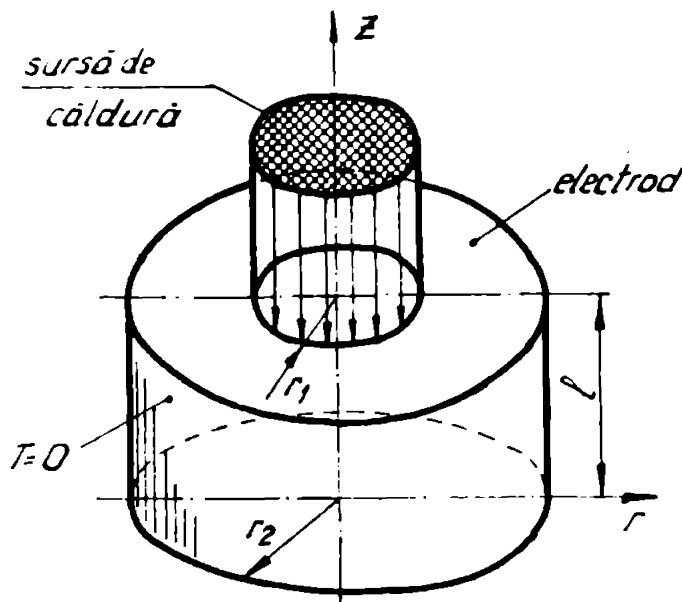


Fig.3.5. Modelul sursei de căldură circulară în coordonate cilindrice

Acest model ia în considerare natura bidimensională a fluxului de căldură, situație mai apropiată de realitate decât în cazul modelelor unidimensionale. Suprafața superioară a electrodului se presupune a fi izolată, în afara locului de acționare a sursei de căldură. În direcție radială mediul (materialul electrodului) este limitat de o suprafață cilindrică, iar în direcție axială are o lungime finită (l). Se presupune că diamet-

rul electrodului este de 50 de ori diametrul sursei, iar temperatura la timpul $t=0$, este egală cu temperatura ambiantă. Pe durata impulsului (t_1), în intervalul de timp $0 < t < t_1$, densitatea de putere a sursei de căldură este constantă $Q/W/m^2$.

Ecuația de bază a fluxului de căldură (3.17) scrisă în coordonate cilindrice în intervalul de creștere a temperaturii (T) este o funcție de rază (r), înălțime (z) și timp (t) :

$$\frac{1}{a} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (3.18)$$

Sînt folosite următoarele condiții de limită :

$$\begin{aligned}
 T(r, z, 0) &= 0 \\
 T(0, z, t) &= \text{valori finite} \\
 T(r_2, z, t) &= 0 \\
 T(r, 0, t) &= 0 \\
 -k \frac{\partial T(r, l, t)}{\partial z} &= \begin{cases} 0 & \text{dacă } r > r_1 \\ -Q & \text{dacă } r \leq r_1 \end{cases}
 \end{aligned} \tag{3.19}$$

Funcția de distribuție a temperaturii va fi /200/ :

$$\begin{aligned}
 T(r, z, t) &= \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} c_{mn} \cdot e^{-a(\lambda_n^2 + \mu_m^2)t} \cdot \sin(\mu_m \cdot z) \cdot \\
 &\quad \cdot J_0(\lambda_n r) + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sinh(\lambda_n z) J_0(\lambda_n r)
 \end{aligned} \tag{3.20}$$

Din cauza dublei însumări această metodă de calcul a dimensiunilor craterului implică un mare consum de timp de calculator.

3.4.3. Modelul analitic al sursei circulare de căldură.

Datorită inconvenientelor prezentate, Snoeys și Van Dijck /200/ menținînd ipotezele prezentate anterior, adoptă pentru modelul sursei de căldură alt sistem de coordonate și dimensiune infinită în direcție axială. (fig.3.6).

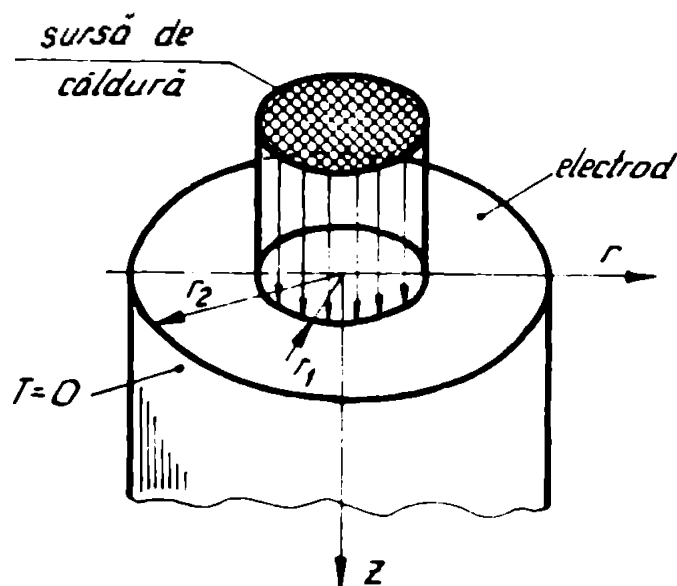


Fig.3.6. Modelul geometric adoptat

Pornind de la ecuația diferențială (3.18), în noul sistem de coordonate se impun următoarele condiții de limită :

$$\begin{aligned}
 T(r, z, 0) &= 0 \\
 T(0, z, t) &= \text{valori finite} \\
 T(r_2, z, t) &= 0 \\
 T(r, \infty, t) &= 0
 \end{aligned} \tag{3.21}$$

$$k \frac{\partial T(r, 0, t)}{\partial z} = \begin{cases} 0, & \text{dacă } r > r_1 \\ -Q, & \text{dacă } r \leq r_1 \end{cases}$$

Transformata Laplace /32,40,92,200/, aplicată ecuației (3.18) pentru condiția $T(r, z, 0) = 0$ va da:

$$\frac{\rho}{a} \cdot \bar{T} = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \cdot \frac{\partial \bar{T}}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial z^2} \tag{3.22}$$

cu următoarele condiții de contur :

$$\begin{aligned} \bar{T}(0, s, p) &= \text{valori finite} \\ \bar{T}(r_2, s, p) &= 0 \\ \bar{T}(r, \infty, p) &= 0 \\ k \frac{\partial \bar{T}(r, 0, p)}{\partial s} &= \begin{cases} 0, & \text{dacă } r > r_1 \\ -Q/p, & \text{dacă } r < r_1 \end{cases} \end{aligned} \quad (3.23)$$

Utilizând metoda separării variabilelor, soluția ecuației poate fi scrisă ca un produs de două funcții: $\bar{T}(r, s) = \bar{R}(r)\bar{Z}(s)$ (3.26)

Ecuația (3.22) va deveni :

$$\frac{1}{r} \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \bar{R}}{\partial r} \right) \right] \frac{1}{\bar{R}} = - \frac{\partial^2 \bar{Z}}{\partial s^2} \cdot \frac{1}{\bar{Z}} + \frac{p}{2} \quad (3.25)$$

Ambele părți sînt egale cu aceeași constantă $-\lambda^2$.

Partea stîngă este o ecuație diferențială generală pentru funcțiile Bessel ordinare, a cărei soluție poate fi de forma :

$$\bar{R}_n = A_n J_0(\lambda_n r) + B_n Y_0(\lambda_n r) \quad (3.26)$$

Partea dreaptă admite o soluție de forma :

$$\bar{Z}_n = C_n \exp(\sqrt{\lambda_n^2 + p/a} \cdot s) + D_n \exp(-\sqrt{\lambda_n^2 + p/a} \cdot s) \quad (3.27)$$

Constantele se determină din condițiile de limită, iar soluția generală obținută prin însumarea tuturor soluțiilor parțiale este de forma :

$$\bar{T}(r, s) = \bar{R}(r) \cdot \bar{Z}(s) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n J_0(\lambda_n r) \cdot \exp(-\sqrt{\lambda_n^2 + p/a} \cdot s) \quad (3.28)$$

Aplicînd acestei ecuații condiția de limită $\bar{T}(r_2, s, p) = 0$, rezultă $J_0(\lambda_n r_2) = 0$, de unde se pot găsi valorile corectărice λ_n ca fiind :

$$\lambda_n = X_n / r_2 \quad (3.29)$$

unde: X_n + rădăcinile funcției Bessel de speța întâi de indice zero.

Aplicînd transformata Laplace soluției ecuației (3.27) și proprietățile transformatei Laplace, funcția de distribuție a temperaturii dependentă de timp, găsită de Snoeys și Van Dijk /200,217,219/ are expresia :

$$T(r, s, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \cdot \frac{c_n}{2\lambda_n} J_0(\lambda_n r) \left\{ e^{\lambda_n s} \left[\operatorname{erf}(\lambda_n \sqrt{at+s/2\sqrt{at}}) - 1 \right] + e^{-\lambda_n s} \left[\operatorname{erf}(\lambda_n \sqrt{at} - s/2\sqrt{at}) + 1 \right] \right\} \quad (3.30)$$

iar c_n se determină cu relația :

$$c_n = 2Qr_1 J_1(\lambda_n r_1) / k \lambda_n r_2^2 J_1^2(\lambda_n r_2) \quad (3.31)$$

unde a - difuzivitatea termică (rel.3.16)

erf - funcția erorilor,

J_0 - funcția Bessel de speța întâi de indice zero,

J_1 - funcția Bessel de speța întâi de indice unu,

k - conductivitatea termică,

Q - fluxul de căldură,

r - raza craterului,

r_1 - raza sursei de căldură,

r_2 - raza electrodului,

t - timpul

s - adâncimea craterului,

λ_n - valori caracteristice determinate cu relația (3.29)

Relația obținută (3.30) nu mai cuprinde însumarea dublă, dar convergența acesteia este destul de lentă în cazul unor valori mici ale rapoartelor r/r_2 , r_1/r_2 , s/r_2 și $(at)^{1/2}/r_2$. Dintre acești parametri doar r_2 poate fi modificat în vederea îmbunătățirii convergenței, ceilalți parametri fiind specifici condițiilor de lucru.

Van Dijck /219/ a analizat diferite tipuri de convergență a temperaturii funcție de numărul de rădăcini ai funcției Bessel de speța întâi de indice zero (n), pentru diferite valori ale raportului (r/r_2). Convergența este asigurată pentru un număr de 300 de rădăcini și raport $r/r_2 < 1/20$.

Numărul necesar de termeni (n) a fost analizat și în funcție de raportul (r_2/r_1) pentru diferite valori ale erorii relative și diferite materiale de electrozi. În general temperaturile calculate cu $r_2/r_1 = 20$ diferă cu mai puțin de 0,5% de cele obținute cu $r_2/r_1 = 100$. Pentru durate ale impulsului $t_1 < 100 \mu s$ se recomandă $4 < r_2/r_1 < 20$, iar pentru $t_1 > 100 \mu s$ $r_2/r_1 \geq 20$.

Distribuția de temperatură la sfârșitul impulsului se poate determina introducând în relația (3.30) $t=t_1$.

Alegând o serie de valori pentru raza craterului (r) se

poate determina mărimea razei la care se atinge temperatura de topire. In același mod se poate calcula adâncimea craterului (z). Cu aceste date se poate determina frontul de topire la sfârșitul impulsului, care in ipoteza că metalul topit este prelevat complet, coincide cu limitele craterului.

Punând condiția $r=0$ și $z=0$ se poate determina temperatura dezvoltată în centrul sursei de căldură.

3.4.4. Program de calcul pentru evaluarea numerică a distribuției de temperatură.

Datorită volumului mare de calcule necesare pentru evaluarea numerică a funcției de distribuție a temperaturii, s-a înlocuit un program de calcul scris în limbaj FORTRAN a cărei schemă logică se prezintă în fig.3.7 /50,55,56,157,158,171,186,202, 214/.

Datele de intrare sînt formate din :

T(J) - durata impulsului, pentru J valori,

R1(I)- raza sursei de căldură, pentru I valori,

R2 - raza electrodului,

P - puterea sursei de căldură,

K - conductivitatea termică a materialului electrodului,

A - difuzivitatea termică a materialului electrodului,

TRBP - temperatura de referință care corespunde temperaturii de topire a materialului electrodului.

In continuare pentru efectuarea calculelor se necesită rădăcinile funcției Bessel de speța întâi de indice zero $X(N)$. /32, 33,40,74,211/. Pentru asigurarea convergenței relației (3.30) sînt necesare primele treisute de rădăcini ($N=1...300$) /221/. In tabelele /211,244,245,246/ se găsesc doar primele 40 de rădăcini, motiv pentru care s-a apelat la formula generală de calcul pentru rădăcina a N-a a ecuației $J_0(X)=0$, /74,246/:

$$X(N) = \pi \cdot \left\{ N - 0,25 + \left[0,050661 / (4N-1) \right] - \left[0,053041 / (4N-1)^3 \right] + \dots \right\} \quad (3.32)$$

pentru $N = 1... 300$

In cadrul schemei logice s-au adoptat următoarele simbolizări:

ASC(I) - aria sursei de căldură,

Q(I) - fluxul de căldură,

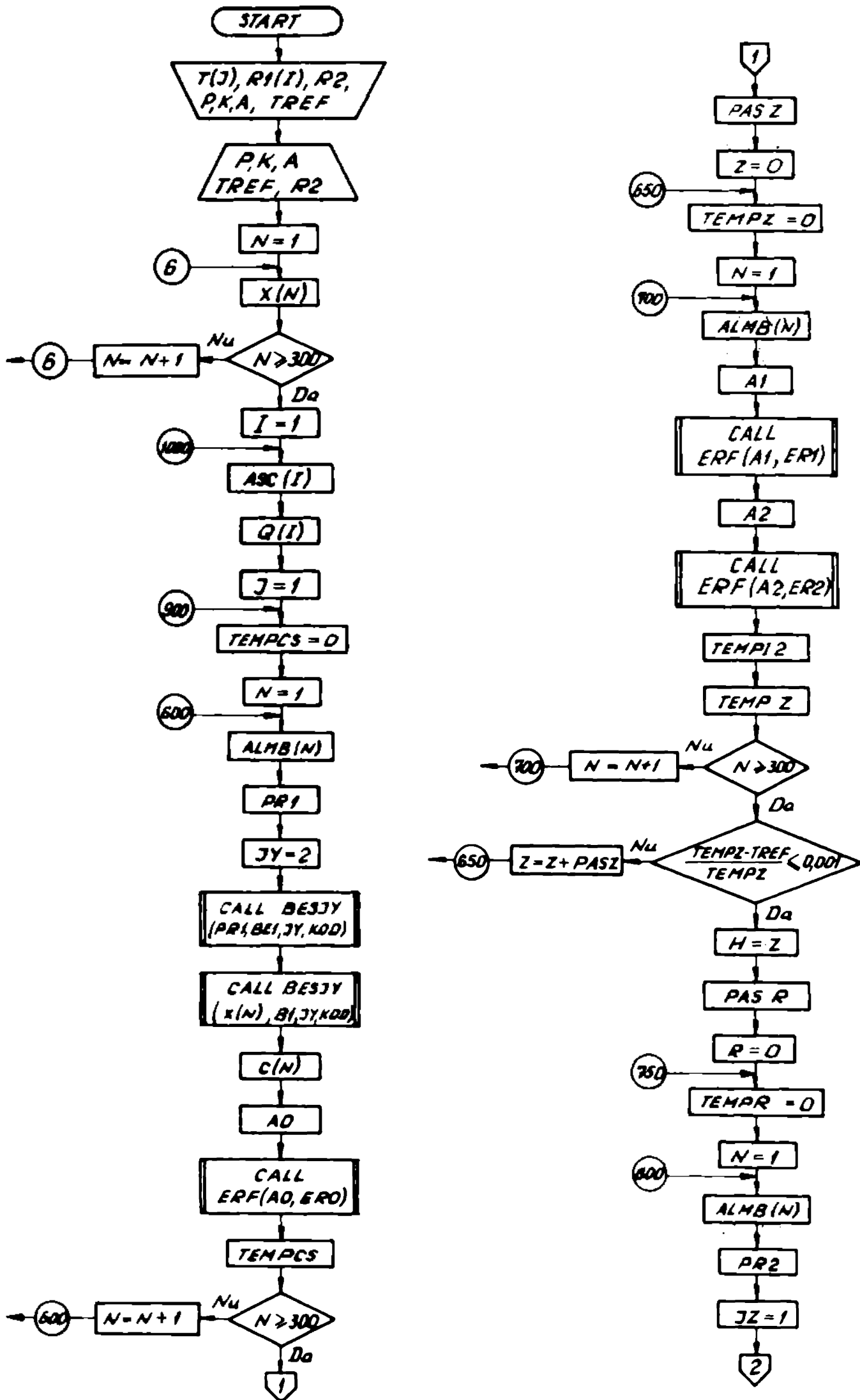


Fig.3.7. Schema logică pentru calculul distribuției de temperatură

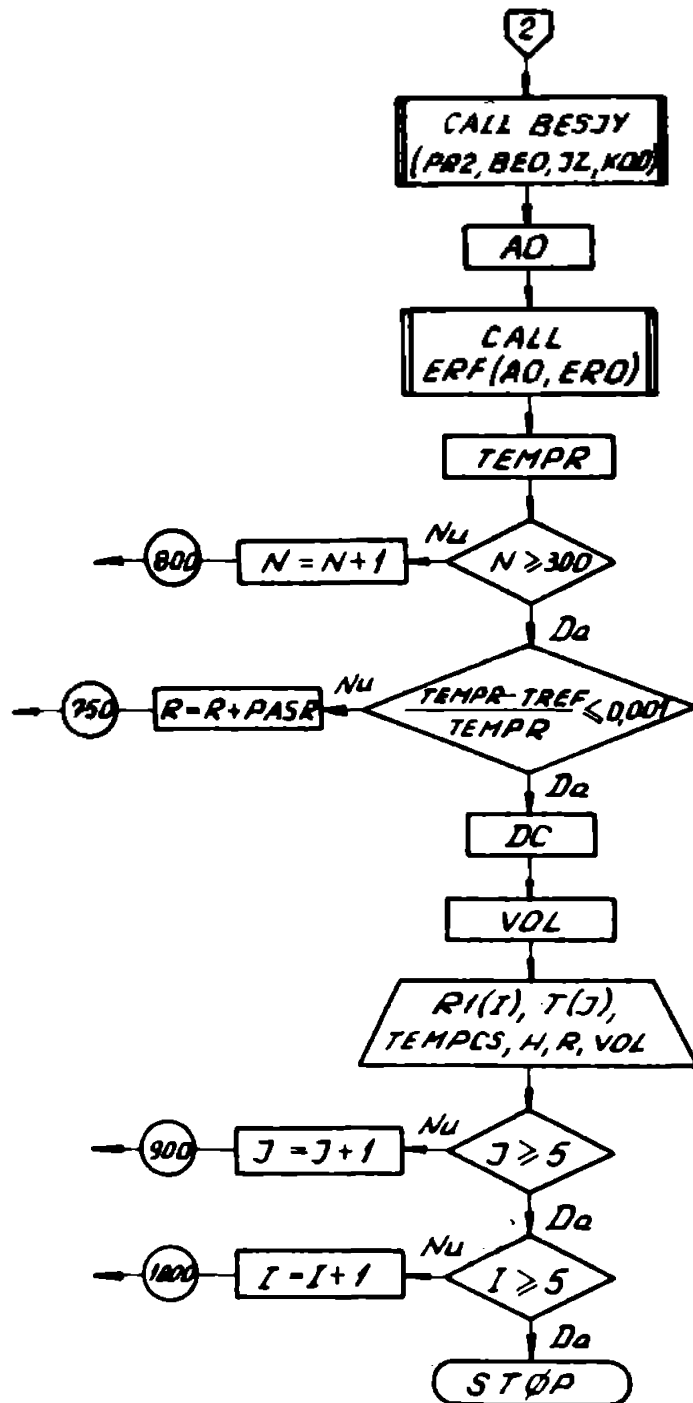


Fig.3.7 Schema logică pentru calculul distribuției de temperatură

ALM3(N) - valorile caracteristice λ_n , calculate cu relația (3.29)

PR1 - argumentul funcției Bessel de speța întâi de indice unu ($\lambda_n r_1$),

PR2 - argumentul funcției Bessel de speța întâi de indice zero ($\lambda_n r$),

AO - relația de calcul a expresiei: $\lambda_n \sqrt{at}$,

A1 - relația de calcul a expresiei: $\lambda_n \sqrt{at+z/2} \sqrt{at}$,

A2 - relația de calcul a expresiei: $\lambda_n \sqrt{at-z/2} \sqrt{at}$,

C(n) - calculul constantei c_n , relația (3.31),

TEMPCS - temperatura în centrul sursei de căldură, pentru $r=0, z=0$, calculată cu relația:

$$T(0,0,t) = \sum_{n=1}^{300} \frac{c_n}{\lambda_n} \cdot \text{erf}(\lambda_n \sqrt{at}) \quad (3.33)$$

TEMP1 - relația de calcul a temperaturii pentru determinarea adâncimii craterului în centrul acestuia ($r=0$):

$$T(0, s, t) = \sum_{n=1}^{300} \frac{c_n}{2\lambda_n} \left\{ e^{\lambda_n s} \left[\operatorname{erf}(\lambda_n \sqrt{at} + \frac{s}{2\sqrt{at}}) - 1 \right] + e^{-\lambda_n s} \left[\operatorname{erf}(\lambda_n \sqrt{at} - \frac{s}{2\sqrt{at}}) + 1 \right] \right\} \quad (3.34)$$

TEMP2 - relația de calcul a temperaturii pentru determinarea razei craterului la suprafața electrodului ($z=0$):

$$T(r, 0, t) = \sum_{n=1}^{300} \frac{c_n}{\lambda_n} J_0(\lambda_n r) \cdot \operatorname{erf}(\lambda_n \sqrt{at}). \quad (3.35)$$

VOL - relația de calcul a volumului craterului în ipoteza că limita craterului coincide cu izoterma temperaturii de topire a materialului electrodului și forma craterului este cea a unei calote sferice:

$$V = \frac{\pi \cdot h}{6} (3r^2 + h^2) \quad (3.36)$$

Atribuind razei (r) și adâncimii (s) valori succesive cu pasul $PASR = PASZ = 5 \cdot 10^{-7} \text{ m}$, se calculează temperaturile aferente pînă la atingerea temperaturii de topire.

Pentru calculul funcțiilor Bessel (J_0, J_1), inițial s-au conceput subprograme, pornind de la dezvoltarea în serie a acestor funcții /32, 38, 40, 74, 211/.

$$J_0(x) = 1 - \left(\frac{x}{2}\right)^2 + \frac{1}{(2!)^2} \cdot \left(\frac{x}{2}\right)^4 - \frac{1}{(3!)^2} \cdot \left(\frac{x}{2}\right)^6 + \dots \quad (3.37)$$

$$J_1(x) = \frac{x}{2} - \frac{1}{2!} \left(\frac{x}{2}\right)^3 + \frac{1}{2!3!} \left(\frac{x}{2}\right)^5 + \dots \quad (3.38)$$

Cu creșterea valorii argumentului și numărul de termeni ai seriei necesari pentru calculul funcției crește foarte mult. Erorile introduse prin trunchiere, se amplifică cu creșterea valorilor ^{exponentilor}, care la rîndul lor cresc odată cu numărul de termeni necesari. Din acest motiv rezultatele obținute pentru argumente mai mari decît $X(N) = 27,494379$ ($N=9$) au fost eronate.

S-a apelat la subprogramul de calcul al funcției Bessel existent în biblioteca matematică a calculatorului FELIX C-512, a Centrului de Calcul Electronic al I.P. "Traian Vuia".

Modul de apelare al subprogramului pentru calculul funcțiilor Bessel este:

CALL BESJY (X,B,JY, KOD) (3.39)

unde: X - argumentul real al funcției,

B - valoarea funcției Bessel,

JY - cod pentru identificarea funcției Bessel de calculat:

JY = 1 - funcția Bessel de speța întâi de indice zero (J_0),

JY = 2 - funcția Bessel de speța întâi de indice unu (J_1),

KOD - cod de eroare.

Funcția erorilor (erf) /32,38,40,211/ se calculează tot cu un subprogram din biblioteca matematică a calculatorului, care se apelează astfel :

CALL ERF (A,E) (3.40)

A - argumentul real

E - valoarea funcției

Procesul de iterație utilizând relațiile prezentate se face pentru primele 300 de rădăcini ale funcției Bessel de speța întâi de indice zero, J valori ale duratei impulsului și I valori ale razei sursei de căldură cu pasul de 0,5 μm , pînă la atingerea temperaturii de topire.

Datele de ieșire prezentate tabelar sînt formate din: TEMPOS, H, R, VOL funcție de $R_1(I)$ și $f(J)$.

3.4.5. Evaluarea rezultatelor în cazul prelucrării aliajelor dure

Programul de calcul conceput a fost aplicat pentru evaluarea influenței materialului electrozilor, duratei impulsului și diametrului sursei de căldură în cazul concret al prelucrării aliajelor dure din grupa de utilizare G, cu electrozi din cupru.

Constantele termofizice ale materialelor, necesare în programul de calcul, se prezintă în tabelul 3.1.

TABELUL 3.1

CONST TERM FIZ. TERIALE	k [$\text{Jm}^{-1}\text{s}^{-1}\text{C}^{-1}$]	ρ [kgm^{-3}]	m [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$]	C [$\text{Jkg}^{-1}\text{C}^{-1}$]	C' [$\text{Jkg}^{-1}\text{C}^{-1}$]	a' [m^2s^{-1}]	a [m^2s^{-1}]	T^* [$^{\circ}\text{C}$]
Cu	359	8,94	205	403	592	0,68	0,996	1083
G10	80	14,80	-	151	-	-	0,358	2800
G60	50	12,80	-	214	-	-	0,183	2270

Pentru a scoate în evidență influența temperaturii asupra constantelor termofizice, s-a calculat difuzivitatea adoptată (a') cu următoarea relație :

$$a' = k/q.c' \quad (3.41)$$

unde: c' - căldura specifică adoptată, calculată cu relația :

$$c' = c + m/T_t \quad (3.42)$$

unde : m - căldură de topire

T_t - temperatura de topire

În cazul aliajelor dure din sortul G10 și G60 nu s-au găsit elementele necesare pentru calculul difuzivității termice adoptate.

Temperatura (T^R) reprezintă în cazul materialelor omogene cum este cuprul, temperatura de topire. La aliajele dure, care sînt materiale eterogene sinterizate nu se poate vorbi de o temperatură de topire, motiv pentru care s-a introdus noțiunea de temperatură de referință (TRRF). Această temperatură s-a determinat din diagrama Cu-Co /79,93,130/, funcție de compoziția aliajului dur, deasupra liniei lichidus.

În toate calculele s-a considerat o singură valoare pentru puterea sursei de căldură P_{locW} . . Această valoare rezultă din considerentul că puterea totală introdusă în spațiul de lucru $P_t = 200$ W se repartisează aproximativ în mod egal pe cei doi electrozi (subcapitolul 3.3.3.).

Programul a fost rulat pentru patru materiale de electrozi, rezultatele obținute prezentîndu-se în tabelul 3.2.

Simbolizarea Ca' indică utilizarea în calcule, pentru acest material a difuzivității termice adoptate (a').

Datele obținute se referă la :

TRMPCB - temperatura la suprafața electrodului în centrul sursei de căldură, la sfîrșitul impulsului,

H - adîncimea craterului,

R - raza craterului,

VOL - volumul craterului, corespunzător impactului unui singur impuls.

Comparînd rezultatele obținute pentru același material (cupru) dar valori diferite ale difuzivității termice, se remarcă valori mai mari pentru temperatură olt și pentru elementele geometrice ale craterului în cazul calculului cu difuzivitatea termică adoptată.

Procentual această diferență variază între 16% la durate de impuls mici și 8% la durate lungi ale impulsului.

Analiza evoluției temperaturii se face în ipoteza, că prelevarea de material se datorește în exclusivitate proceselor de topire.

TABELUL 3.2

Rezultate suport de calcul $10^6 [m]$	Durata impuls $10^6 [s]$	TEMPCS [°C]			$H \cdot 10^{-6} [m]$			$R \cdot 10^{-6} [m]$			$VOL \cdot 10^{-6} [mm^3]$						
		Cu'	Cu	G60	Cu'	Cu	G60	Cu'	Cu	G60	Cu'	Cu	G60				
5	12	7186	7337	30768	45811	23,0	24,5	26,0	27,0	22,5	23,5	23,5	23,5	24,6605	28,9531	31,7570	33,7277
	24	7441	7548	32345	49323	26,0	28,0	31,5	34,5	24,0	24,5	25,5	26,0	32,7270	37,8944	48,5399	58,1350
	48	7623	7698	33464	51820	29,0	31,0	37,5	43,0	25,0	25,5	27,5	29,0	41,2407	47,2672	72,1584	98,4345
	95	7749	7803	34246	53568	32,0	33,0	43,0	52,5	25,5	26,0	30,5	54,0	49,8424	53,8578	204,4628	316,6240
	190	7840	7878	34810	54828	34,0	35,0	48,5	63,5	26,5	27,0	52,5	57,0	58,0846	62,5281	269,7154	458,1396
10	12	6357	6506	27072	40003	22,0	24,0	25,5	26,5	23,5	24,5	25,0	25,0	24,6596	29,8671	33,7165	35,7603
	24	6610	6717	28625	43408	25,5	27,5	31,0	34,0	25,0	25,5	27,0	28,0	33,7165	38,9779	51,0969	62,4507
	48	6791	6866	29734	45866	28,5	30,0	37,0	42,5	26,0	27,0	30,0	50,0	42,3838	48,4904	78,8294	110,4461
	95	6917	6970	30513	47600	31,5	32,5	42,5	52,0	27,5	28,0	49,5	54,5	53,7848	57,9980	203,7702	316,2363
	190	7028	7046	31075	48855	33,5	34,5	48,0	63,0	28,5	29,0	52,5	58,0	62,4268	67,0767	265,7227	463,8262
25	12	2914	3054	11774	16151	17,0	19,0	21,0	22,0	29,5	30,5	32,5	35,0	25,8111	31,3547	39,6913	47,9082
	24	3153	3256	13166	18918	21,0	23,0	27,0	30,0	32,0	33,0	36,0	38,5	38,6274	45,7143	65,2273	83,9865
	48	3328	3402	14216	21128	24,5	26,0	33,5	39,5	34,0	35,0	39,5	44,0	52,1881	59,2326	101,7878	152,3912
	95	3452	3505	14973	22770	27,0	28,5	39,5	49,5	35,5	36,5	43,5	55,5	63,7550	71,7626	149,6767	303,0089
	190	3543	3580	15528	23991	29,5	31,0	45,0	61,0	37,0	38,0	48,5	66,5	76,8794	85,9136	213,9837	542,5806
50	12	1025	1136	3689	4444	-	1,5	5,5	9,5	-	12,0	39,0	48,0	-	0,3410	13,2276	34,8305
	24	1221	1313	4668	5953	4,0	6,5	13,0	18,5	26,0	34,5	45,5	52,0	4,2809	12,2964	43,4256	81,8927
	48	1379	1449	5538	7517	8,5	11,0	21,0	29,5	38,0	40,5	50,0	56,5	19,6015	29,0383	87,3158	161,3660
	95	1497	1549	6225	8882	12,5	14,5	28,5	41,0	42,0	44,0	53,5	61,5	35,6587	45,6916	140,2572	279,6738
	190	1585	1622	6752	9991	16,0	17,5	35,5	53,5	45,0	46,0	57,0	69,0	53,0384	60,9727	204,6000	480,2818
100	12	278	333	904	1023	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	24	382	442	1281	1463	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	48	491	547	1751	2072	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	95	588	634	2233	2815	-	-	-	10,0	-	-	-	77,5	-	-	-	94,8695
	190	668	702	2669	3597	-	-	-	25,5	-	-	-	92,0	-	-	-	347,7100

Variația temperaturii în centrul sursei de căldură la suprafața electrodului în funcție de durata impulsului, pentru diferite raze ale sursei de căldură, se prezintă în fig.3.8.

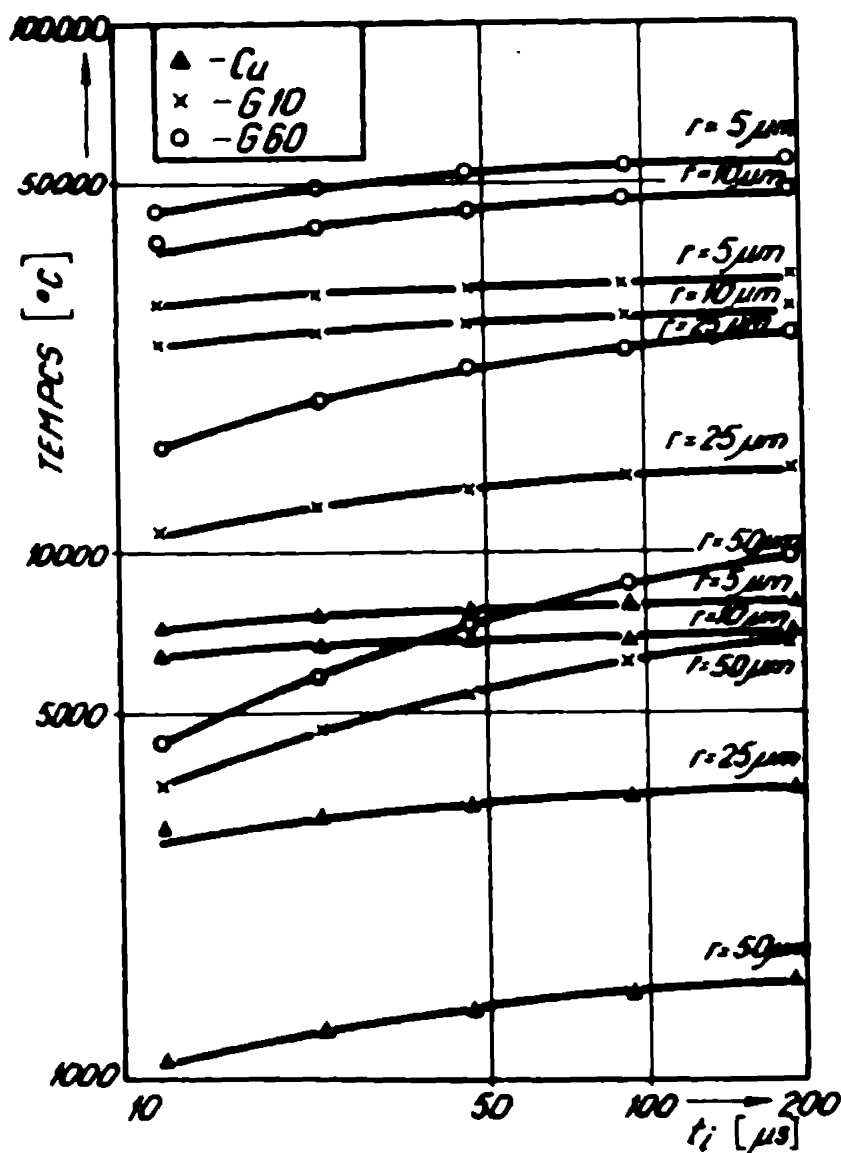


Fig.3.8. Variația temperaturii în centrul sursei de căldură în funcție de durata impulsului.

La aliajele dure G60 și G10 se remarcă o creștere mai pronunțată a temperaturii cu mărirea duratei impulsului, decît în cazul cuprului. Această comportare se datorește conductibilității termice diferite a materialelor analizate. Diferența de temperatură între impulsurile scurte (12 μs) și impulsurile lungi (190 μs) este în cazul cuprului de aproximativ 500°C pe cînd la aliajele dure, este de aproximativ 4000°C (G10) sau chiar 9000°C (G60).

Se observă că la impulsuri de durată scurtă, temperaturile ajung la valori foarte mari, ceea ce contribuie la vaporizarea materialului în zone de interacțiune, chiar la începutul descărcării electrice.

Comparînd curbele trasate, se remarcă faptul că pentru a obține aceeași temperatură la suprafața electrodului de cupru cu cea obținută la electrozii din aliaj dur, densitatea de putere a sursei de căldură ar trebui să fie de 3...4 ori mai mare. Datorită acestui fapt pentru o sursă de căldură dată, cantitatea de material topită la piesă va fi mai mare decît cea topită la electrodul sculă. În acest mod se poate evidenția prelevarea preferențială de material, la prelucrarea electroerozivă.

Considerînd limita craterului, isoterma plană corespunzătoare temperaturii de topire, în cazul materialelor omogene (Cu), sau corespunzătoare temperaturii de referință în cazul materialelor

eterogene (aliaje dure), se poate determina forma teoretică a craterelor. In fig.3.9 se prezintă forma teoretică a craterelor obținute cu o sursă de căldură cu puterea $P = 100 \text{ W}$ și diametrul $2r_1 = 50 \mu\text{m}$, în electrozi din cupru, aliaj dur G10 și G60, durata impulsului fiind parametru.

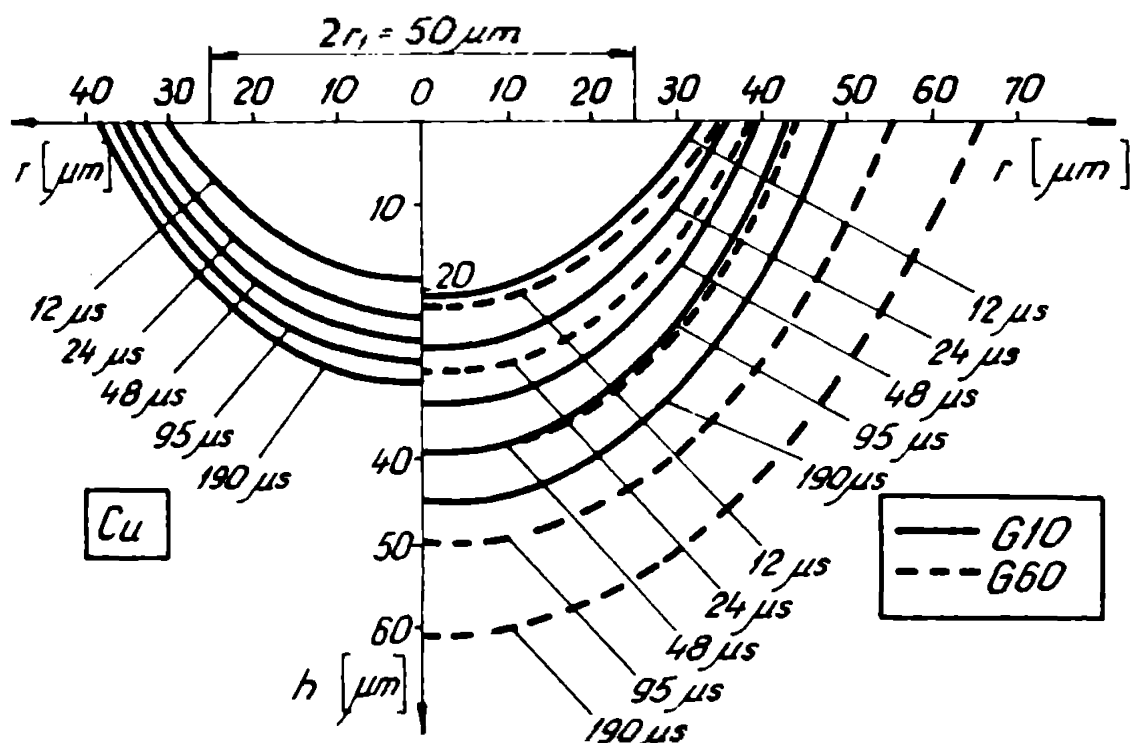


Fig. 3.9. Forma teoretică a craterelor.

Pentru o sursă de căldură de putere dată, forma craterelor este influențată de constantele termice ale materialului electrozilor, diametrul sursei de căldură și durata impulsului.

La un flux de căldură constant și aceeași durată a impulsului, mărimea craterelor este influențată de conductivitatea termică și difuzivitatea termică a materialelor. Cu cât aceste constante termofizice sînt mai mari, craterele formate sînt mai mici. Conductivitatea termică a cuprului este de 7 ori mai mare decît cea a aliajului dur G60, iar craterul format la un impuls cu durata de $190 \mu\text{s}$ este de aproximativ 5 ori mai mic.

Mărimea craterului este influențată în mare măsură de durata impulsului. La impulsuri de scurtă durată, indiferent de material, craterele prezintă dimensiuni geometrice apropiate. Cu creșterea duratei impulsului, dimensiunile craterului se măresc cu atît mai mult, cu cît conductivitatea termică și difuzivitatea termică a materialului are valori mai mici. In cazul materialelor cu conductivitate mare, cantitatea de căldură disipată din zone de interacțiune, este cu atît mai mare cu cît impulsurile au o durată mai lungă.

Volumul de material prelevat din crater s-a calculat în ipoteza, că întreaga cantitate de material aflată deasupra izotermei de topire este expulsată, iar forma craterului corespunde cu o calotă sferică. În fig.3.10 se prezintă volumul de material prelevat la un impuls funcție de durata impulsului, pentru diferite valori ale razei sursei de căldură și diferite materiale.

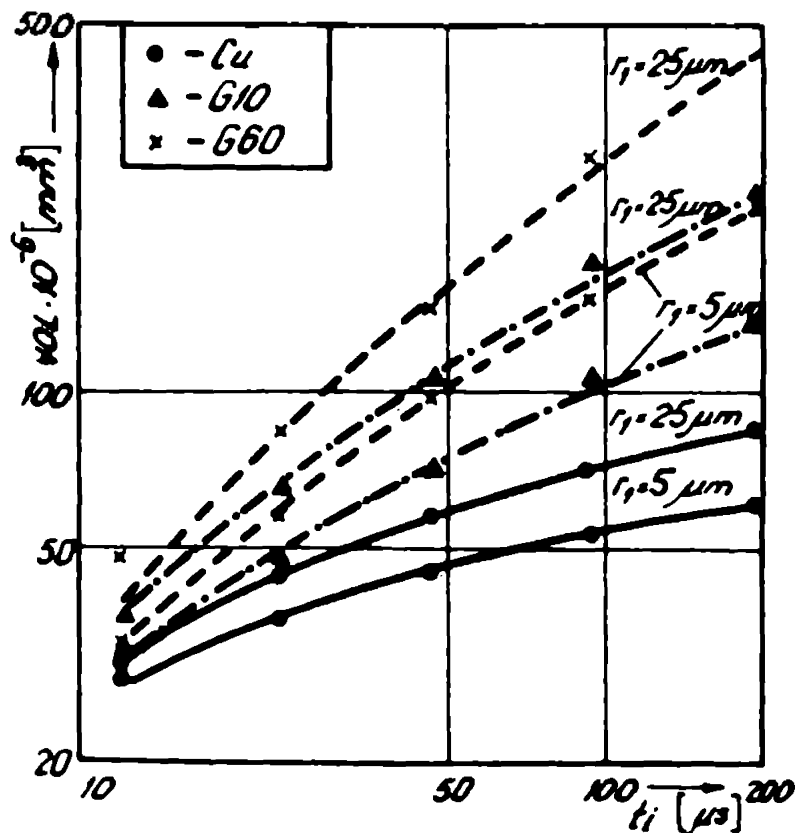


Fig.3.10. Volumul de material prelevat funcție de durata impulsului

Pentru un anumit sort de material, volumul prelevat crește cu mărirea razei sursei de căldură și mărirea duratei impulsului. Comparând în aceleași condiții diferitele sorturi de materiale, se remarcă o creștere a volumului prelevat cu scăderea conductivității și difuzivității termice.

Variația volumului prelevat funcție de diametrul sursei de căldură, pentru diferite valori ale duratei impulsului și diferite materiale de electrozi, se prezintă în fig.3.11.

Volumul de material prelevat crește cu creșterea diametrului sursei de căldură, pînă la o valoare critică a acestuia. În continuare cu toată dezvoltarea canalului de plasmă, volumul prelevat scade. De fapt la o putere constantă a sursei de căldură, fluxul de căldură descrește cînd raza canalului de plasmă crește. În cazul materialelor cu conductivitate mare descreșterea este mai pronunțată, decît în cazul celorlalte materiale.

La durate mari ale impulsului, volumul de material prelevat din diferite sorturi de materiale, variază puțin cu modificarea diametrului sursei de căldură. La impulsuri de durate scurte volumul prelevat variază mult cu mărirea canalului de plasmă. Această variație este cu atît mai accentuată, cu cît conductivitatea termică a materialului este mai mare.

Din datele furnizate de rezolvarea modelului matematic rezultă, că diametrul sursei de căldură influențează forma craterului

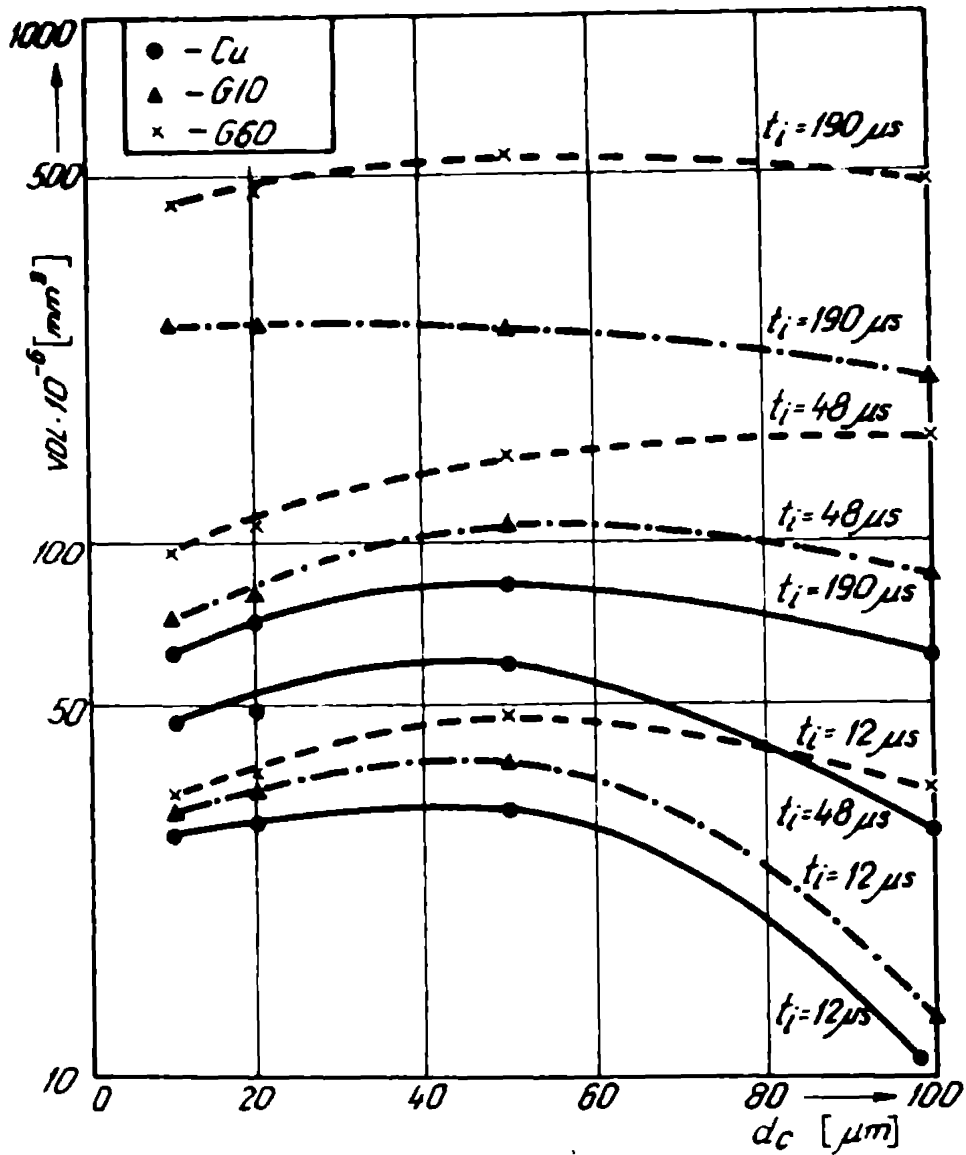


Fig.3.11. Volumul de material prelevat funcție de diametrul sursei de căldură

și volumul de material prelevat. Pentru exemplificare s-au trasat craterele teoretice funcție de raza sursei de căldură, pentru cele două valori extreme ale duratei impulsului, considerate în programul de calcul, în cazul electrozilor din cupru (fig.3.12) și aliaj dur din sortul G 60 (fig.3.13)

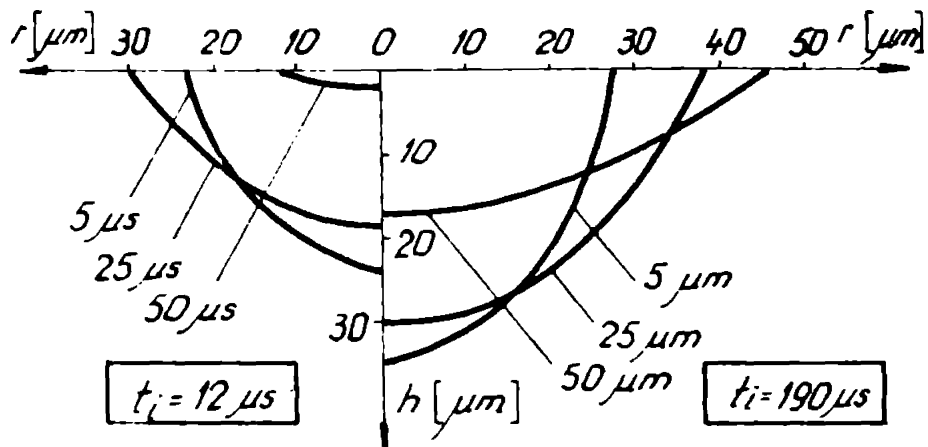


Fig.3.12. Forma teoretică a craterelor funcție de raza sursei de căldură, în electrozi din cupru.

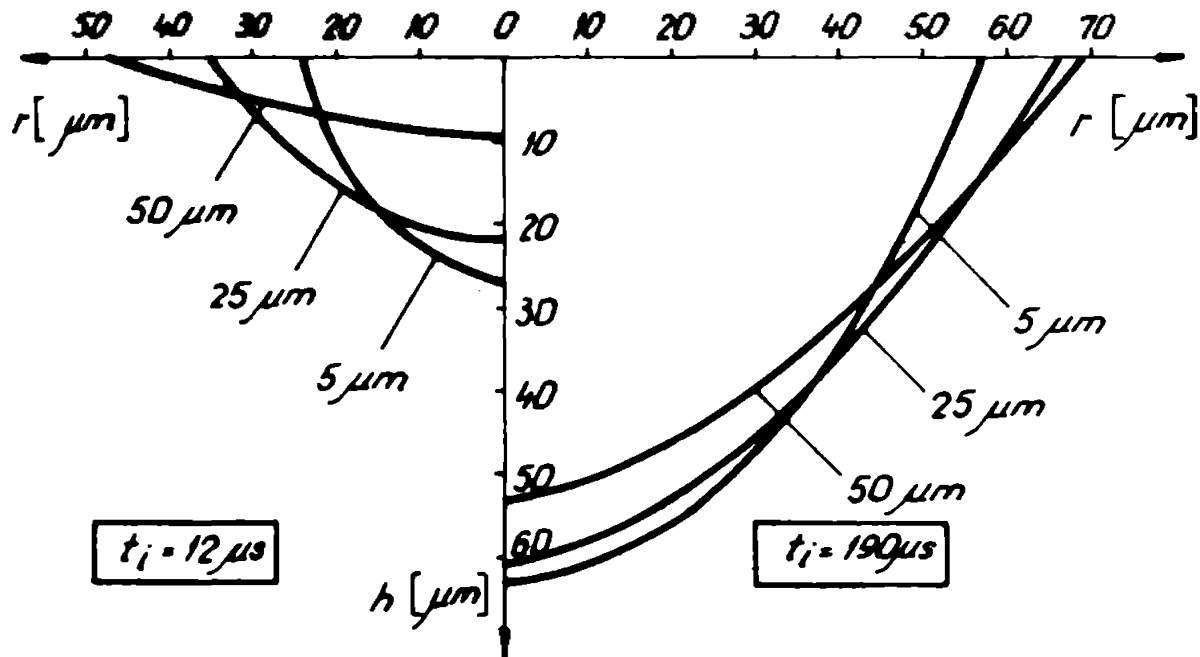


Fig. 3.13. Forma teoretică a craterelor funcție de raza sursei de căldură la electrozi din aliaj dur din sortul Q 6e

La durate de impuls scurte și raze mici ale sursei de căldură, diferența de formă și volum între craterele calculate în cupru și Q 6e nu sînt semnificative. Pe măsura creșterii razei sursei de căldură, diferențele între crateres sînt foarte mari. Același fenomen se remarcă și în cazul impulsurilor cu durată lungă.

Forma craterului se modifică, devenind treptat mai larg și mai puțin adînc, odată cu creșterea diametrului sursei de căldură. Acest fenomen se remarcă mai pregnant în cazul cuprului, unde datorită conductivității mari căldura pierdută prin conducția din zona metalului lichid spre zona metalului solid, poate întrece căldura furnisată.

Rezultatele prezentate (fig.3.12, fig.3.13.) arată clar formele craterelor și diferența între volumele topite în Cu și Q 6e, în special pentru durate lungi ale impulsului, cînd fenomenul de solidificare parțială în adîncime, apare mai repede la cupru.

În acest mod se poate explica prelevarea mai redusă din electrozii de Cu, deci uzura mai mică a acestora. De asemenea se poate afirma, că există o durată de impuls optimă, la care să se obțină o prelevare maximă din piesă corelată cu o uzură minimă a electrodului soutilă. Această valoare optimă depinde foarte mult de dimensiunea sursei de căldură.

Pe baza rezultatelor obținute, prin aplicarea programului de calcul elaborat, se poate trage concluzia că cantitatea de materia

prelevată și forma craterelor este determinată de proprietățile termo-fizice ale materialelor și parametrii impulsului prin puterea și diametrul sursei de căldură și durata impulsului.

3.5. INSTALAȚIA EXPERIMENTALA PENTRU VERIFICAREA MODELULUI MATEMATIC

În vederea verificării modelului matematic elaborat se pune problema determinării numărului de impulsuri efective de lucru din procesul de prelucrare, pentru a putea estima efectul produs de un singur impuls.

Pentru confruntarea formei și mărimii craterelor teoretice cu cele reale, se impune realizarea unor impulsuri singulare în condiții cât mai apropiate de cele reale din exploatare.

3.5.1. Standul de experimentare

Standul de experimentare se compune din instalația propriuzisă de prelucrare (A) și aparatura necesară pentru selectarea și numărarea impulsurilor de lucru (B) (fig.3.14.).

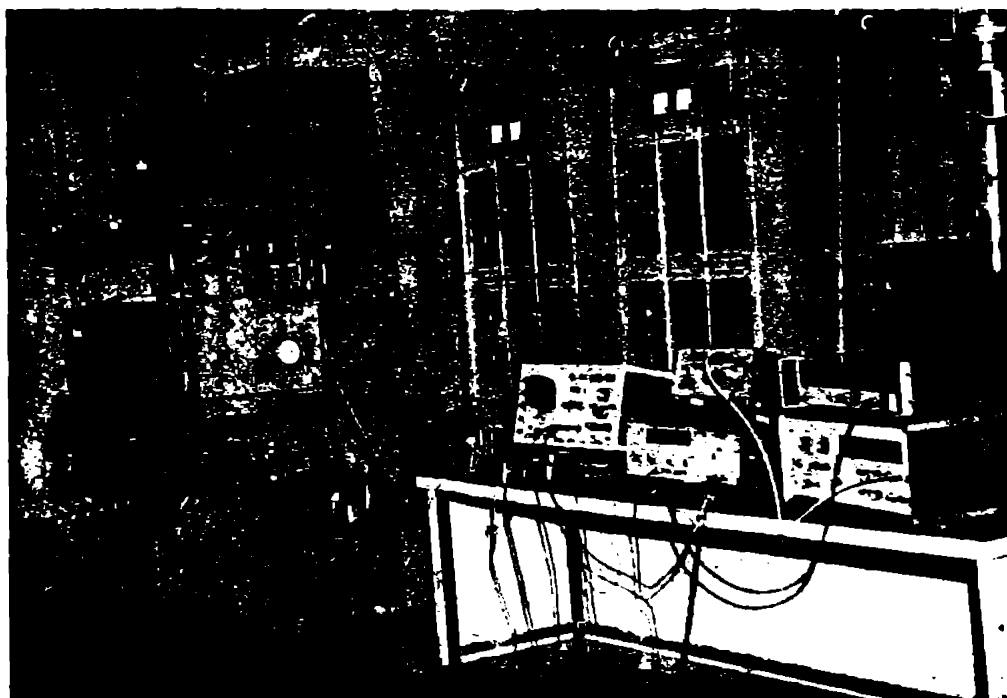


Fig.3.14. Standul de experimentare

Încercările au fost executate pe o mașină de prelucrat prin electroeroziune de tip ELER-01, echipată cu un generator de impulsuri de tip G&P-508, de producție românească, Electrotinaș - Timișoara /241/.

Generatorul de impulsuri comandate este de tip izoenergetic, avind tensiunea de mers în gol $U_0 = 85V$, curentul mediu al descărcării reglabil în 12 trepte ($I_{11} = 3,125A \dots I_{112} = 50A$) și durata impulsului de curent și durata pauzei reglabile în 12 trepte ($t_1 = 2,5\mu s, \dots t_{12} = 1800 \mu s$).

Lichidul de lucru utilizat a fost motorină de iarnă - 15A STAS 240-66.

Aparatura folosită pentru selectarea și numărarea impulsurilor de lucru se compune din (fig.3.15):



Fig.3.15. Aparatura de selectare și numărare a impulsurilor de lucru

1- Analizor de impulsuri realizat în cadrul Colectivului de Cercetări în Tehnologia Neconvențională.

2- Osciloscop cu două canale cu remanență de tip OG2-31 RFT folosit pentru vizualizarea impulsurilor date de generator și ale celor selectate de analizor.

3- Numărător universal cu șapte cifre tip Ro202 A IEMI, cu care s-au numărat impulsurile de lucru pe durata prelucrării.

4- Numărător de tip BM 445 E TESLA utilizat pentru măsurarea frecvenței de repetiție a impulsurilor de lucru.

5- Numărător portabil de tip NOMEPORT NP-632 IFA utilizat ca și cronometru.

6- Generator de tip VERSATESTER RO502 folosit ca bază de timp.

Schema bloc a standului de experimentare se prezintă în fig.3.16.

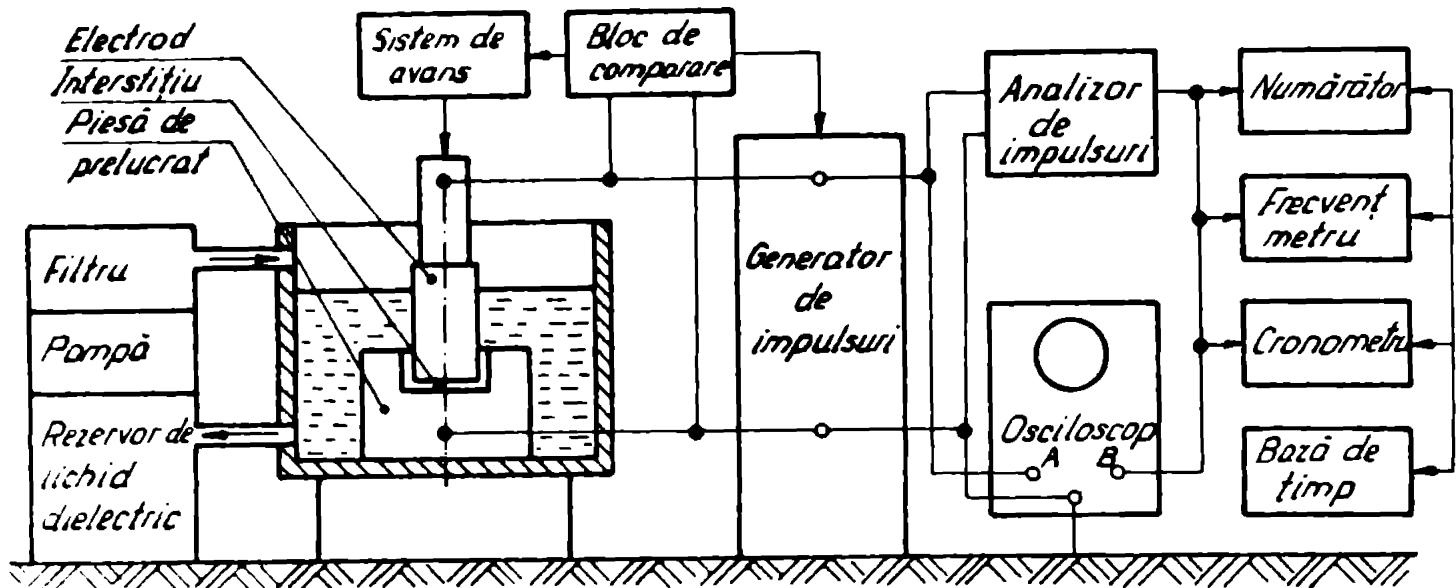


Fig.3.16. Schema bloc a standului de experimentare.

3.5.2. Selectarea și numărarea impulsurilor de lucru

Descărcările electrice care se succed în interstițiul limitat dintre electrod și piesă, sînt influențate de o mulțime de procese fizico-chimice, din acest spațiu restrîns. Datorită acestui fapt nu toate impulsurile de tensiune aplicate pe spațiul de lucru sînt însoțite de procese elementare de eroziune, iar unele dintre impulsuri au caracteristici care se abat mai mult sau mai puțin de la cele normale.

Tipuri caracteristice de impulsuri de tensiune și curent care pot să apară în interstițiu /105,156,223/, sînt prezentate în Fig.3.17.

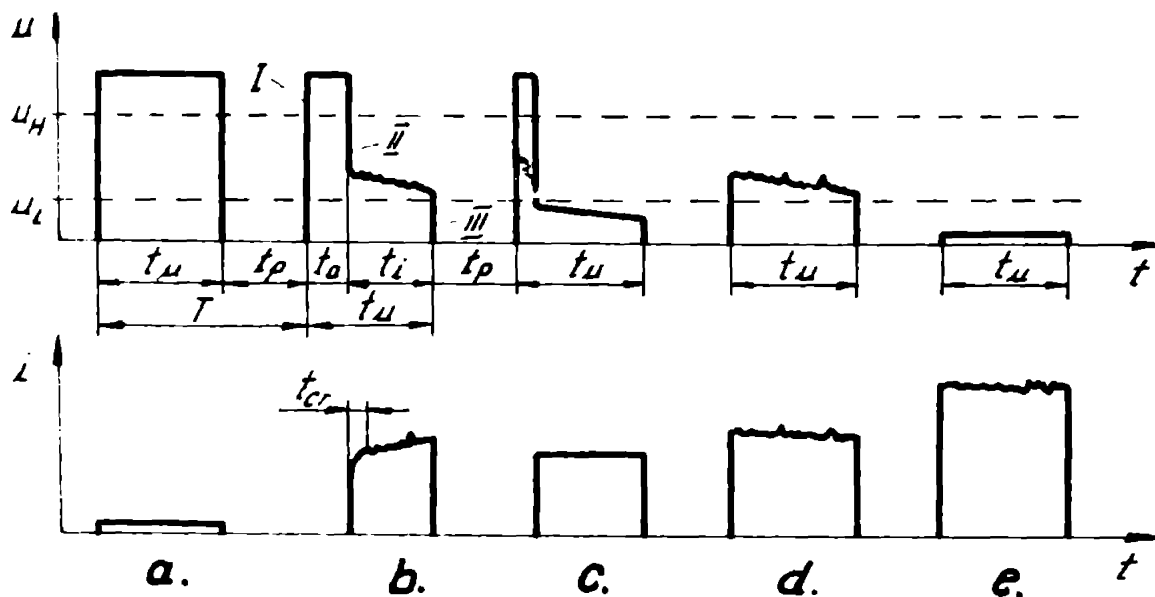


Fig.3.17. Caracteristici dinamice pentru diferite tipuri de descărcări electrice.

Aprecierea tipurilor de impulsuri se face funcție de tensiune, stabilind un nivel superior (u_H) și unul inferior (u_L).

In acest sens se deosebesc :

- Impulsuri de mers in gol, la care $u > u_H$ pe toată durata impulsului de tensiune (t_u), iar curentul descărcării este zero ($i=0$) (fig.3.17,a.). Aceste impulsuri nu provoacă prelevare de material.

- Impulsuri de lucru care provoacă prelucrarea piesei și uzura electrodului. Se caracterizează în prima fază ($t=t_a$) prin tensiunea $u > u_H$, curentul descărcării fiind zero ($i=0$). În a doua fază $t_a < t < t_1$, tensiunea este $u_L < u < u_H$ iar curentul are valoarea nominală corespunzătoare, treptei de putere preselecțate pe generator. (fig.3.17,b).

- Impulsuri fictive, care produc o prelevare redusă de material, o uzură pronunțată a electrodului, deteriorări ale piesei și determină dezvoltarea pronunțată de gaze.

Impulsurile fictive în gaze au caracteristica dinamică asemănătoare cu cea a impulsurilor de lucru, (fig.3.17.c), avînd tensiunea $u > u_H$ pe durata $t = t_a$, iar curentul descărcării egal cu zero. În faza a doua $t_a < t < t_1$, tensiunea este mai mică decît nivelul inferior ($u < u_L$) iar, curentul are o valoare apropiată de cea nominală, lipsind însă timpul de creștere (t_{or}) caracteristic.

Kruth /105/ arată că aceste descărcări sînt lipsite de agotul specific produs în urma trecerii curentului prin canalul de plasmă, iar oscilațiile neregulate de înaltă frecvență ale tensiunii (u_1) și curentului descărcării (i_1) /240/ lipsesc.

La impulsurile fictive în mediul de lucru (fig.3.17,d) lipsește tensiunea de amorsare $u < u_H$ iar $t_a=0$. Pe lângă de nivelul inferior tensiunea poate fi mai mare sau mai mică ($u \geq u_L$), pe întreaga durată a impulsului de tensiune ($0 < t < t_u$). Curentul descărcării poate fi mai mare sau egal cu cel nominal.

- Impulsuri în scurtcircuit (fig.3.17,e) caracterizate de $u \ll u_L$ și un curent mult mai mare decît cel nominal pe întreaga durată a impulsului de tensiune ($0 < t < t_u$).

Analizorul selectează impulsurile, care au tensiunea cuprinsă în intervalul ($u_L \dots u_H$) sau au valori mai mari decît u_H . Deci din gama de impulsuri prezentate vor fi puse în evidență :

- impulsurile de mers in gol ($u > u_H$),
- impulsurile de lucru, selectate după criteriile de amplitudine și secvență (I- $u > u_H$; II- $u_H < u < u_L$; III- $u < u_L$),
- impulsurile fictive în mediul de lucru ($u_L < u < u_H$).

Din câmpul de observare sînt eliminate impulsurile fictive, la care $u < u_L$. De asemenea impulsurile în scurtcircuit nu sînt pu-se în evidență separat, ci împreună cu pauza dintre impulsuri. Pentru separarea acestor impulsuri este necesară extragerea din generator a unui semnal corespunzător duratei de pauză, problemă nerezolvată pînă în prezent.

Pentru lucrarea de față s-a pus problema selectării impulsu-rilor de lucru, în vederea numărării lor.

În cazul real de prelucrare, pe generatorul GEP-50 P, s-au întîlnit următoarele situații tipice pentru impulsurile de lucru, vizualizate pe osciloscop. (fig.3.18,a)

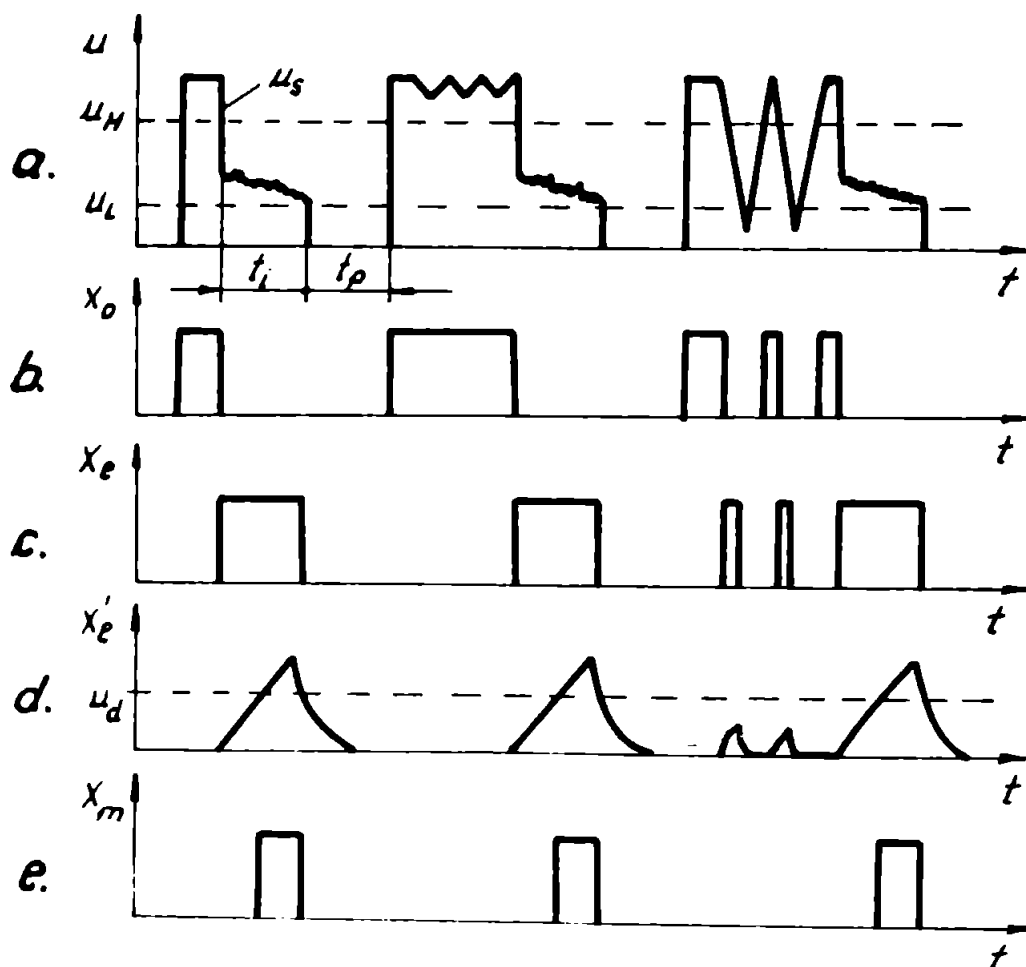


Fig. 3.18. Impulsuri de lucru obținute pe generatorul GEP-50P

semnalele de mers în gol (X_0) sînt prezentate în fig.3.18,b.

Datorită oscilațiilor semnalului peinterstițiu (u_g), semna-lul la ieșirea pentru impulsuri de lucru al analizorului (X_e), es-te eronat (fig.3.18,c).

Pentru înlăturarea acestui neajuns s-a intercalat un filtru, obținîndu-se semnalul filtrat (X'_e) (fig.3.18,d). Tensiunea (u_d) stabilește nivelul de discriminare al semnalului filtrat (X'_e). Înaintea prelucrării cu un anumit regim de lucru, constanta de

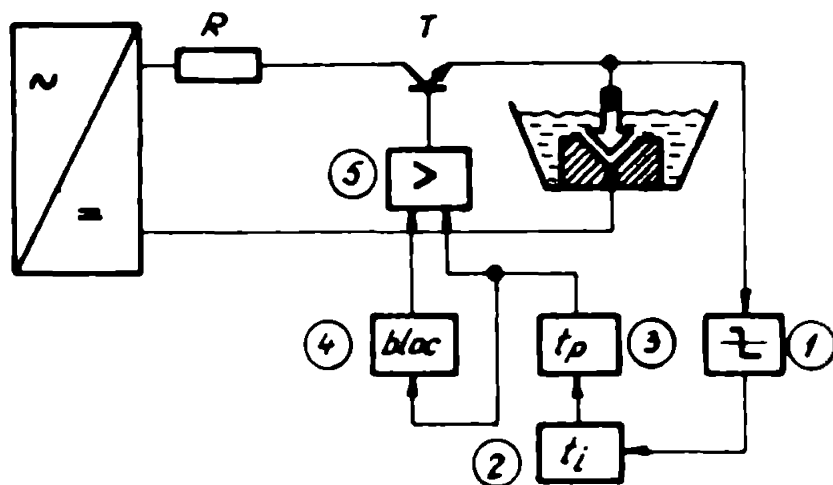
timp a filtrului trebuie pusă în acord cu caracteristicile tempore ale impulsurilor.

Impulsurile care ajung să fie numărate de numărător (X_n) (fig.3.18,e) sînt desafectate de perturbații, fiind cele reale.

3.5.3. Realizarea descărcărilor electrice singulare.

În cazul prelucrării erozive cu impulsuri repetate, suprapunerea fenomenelor determină interacțiuni reciproce, care nu permit analiza și delimitarea strictă a acțiunii unei singure descărcări. Deci apare necesară eliminarea posibilităților de interacțiune reciprocă. dintre descărcările ce apar în mod curent în interstițiu prin realizarea unor descărcări singulare.

Obiectivul propus la realizarea descărcărilor singulare a fost acela de a reproduce cât mai fidel condițiile reale de lucru. Pentru atingerea acestui desiderat, descărcările singulare s-au realizat pe instalația pe care s-au executat și încercările curente, prin modificări corespunzătoare în schema electrică a generatorului (fig.3.19).



Schema bloc pentru realizarea descărcărilor electrice singulare se compune din :

- 1-detector de prag,
- 2-monostabil pentru durata impulsului (t_i),
- 3-monostabil pentru durata pauzei (t_p),
- 4-circuit de blocare,
- 5-preamplificator.

Fig.3.19.Schema bloc adaptată la generatorul GEP-50F pentru realizarea descărcărilor electrice singulare

În figura 3.20 se prezintă schema de principiu a circuitului de blocare, utilizat pentru obținerea impulsurilor singulare pe generatorul GEP-50F.

Generatorul GEP-50F este de tipul isoenergetic, cu posibilitatea prescrierii independente a duratei impulsului de curent (t_i) și a duratei de pauză (t_p). Circuitul (fig.3.20) asigură practic obținerea după un impuls de curent de durată prestabilită, a unei pauze de durată infinită (nedeterminată). Aceasta se realizează prin aplicarea semnalului generat de monostabilul,

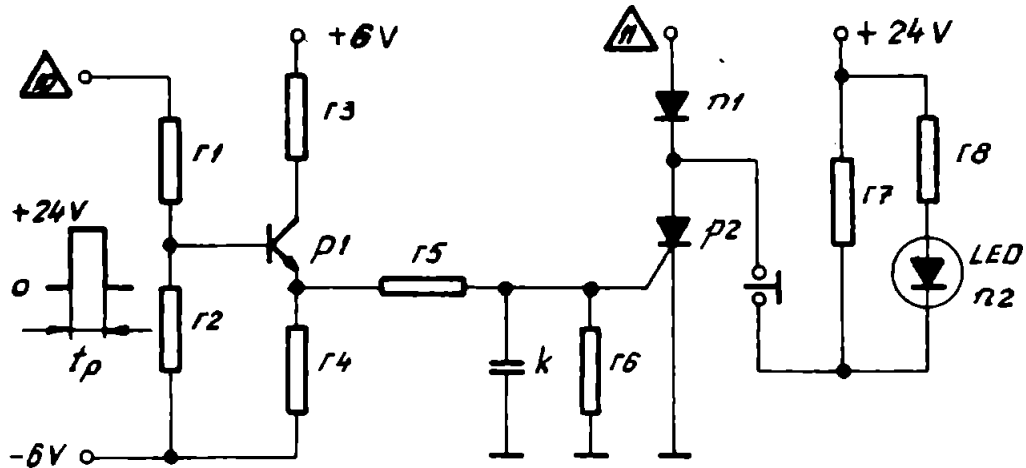


Fig. 3.20. Schema de principiu a circuitului de blocare

pentru durata de pauză (t_p) (poziția 3 - fig.3.19) prin borna (10) la baza tranzistorului (p1) care prin saturație produce amorsarea tiristorului (p2). Astfel, potențialul de borna (11) rămâne scăzut (cca 1,5 V), producând blocarea preamplificatorului atâta timp cât se menține conducția tiristorului, situație semnalizată prin dioda electroluminescentă LED. Blocarea tiristorului, deci inițializarea, se realizează prin butonul normal închis (b).

Pentru a asigura ca pe durata regimurilor tranzitorii din circuitul de blocare să nu se poată produce al doilea impuls de curent, durata pauzei (t_p) se prescrie pe generator la valoarea maximă ($t_p=1800 \mu s$).

În acest mod se realizează descărcări singulare, a căror parametri se pot regla prin manevrarea corespunzătoare a generatorului, în condiții de lucru identice cu cele reale.

3.5.4. Condiții de experimentare și rezultate obținute.

În vederea verificării modelului matematic al procesului, s-au prelucrat aceleași materiale, pentru care s-au făcut calculele teoretice.

Electrozii, de formă circulară, au fost din cupru electrolitic, iar piesele de prelucrat din aliaj dur sortul G10 și G60.

Parametrii impulsului s-au stabilit în concordanță cu cei utilizați în modelul matematic. S-au ales cele cinci trepte ale duratei impulsului de curent (t_i) existente pe generator și utilizate în calcul. Întrucât durata pauzei (t_p) nu influențează rezultatul urmărit, aceasta s-a ales în urma unor experiențe preliminare astfel, făcând prelucrarea să fie cât mai stabilă.

Treapta de putere trebuie astfel aleasă încît să se realizeze pe suprafața unui electrod o surse de căldură cu puterea $P = I \cdot W$ identică cu cea utilizată în calcule. Puterea introdusă în spațiul de lucru este dată de produsul dintre curentul mediu și tensiunea medie a descărcării. Curentul mediu al descărcării se reglează în trepte, iar tensiunea descărcării depinde de perechea de materiale de electrozi. /99,223/ și trebuie determinată pe cale experimentală.

În acest scop s-au realizat experiențe preliminare pentru perechea de materiale Cu-G10 și Cu-G60, măsurînd pe un osciloscop cu remanență valoarea medie a tensiunii descărcării. Tensiunea măsurată pentru perechea Cu-G10 este $\bar{U}_1 = 18,5$ V, iar pentru perechea de materiale Cu-G60, $\bar{U}_1 = 17,5$ V, rezultate confirmate și de /99/ $\bar{U}_1 = 20 \pm 3$ V.

Pe baza rezultatelor obținute, pentru atingerea dezideratului propus inițial, de a asigura o putere $P = I \cdot W$ pe un electrod s-a ales treapta de curent $I_{14} = 12,5$ A. Puterea totală introdusă în spațiul de lucru se diminuează cu aproximativ 5% /230/, ținînd cont de pierderile de putere pe coloana descărcării (P_0). Considerînd o repartiție uniformă la anod și catod se ajunge astfel la o putere de $P = I \cdot W$ pe un electrod.

Pentru fiecare regim de lucru și pereche de materiale, experiențele s-au repetat de trei ori. Durata unei insercări a fost limitată la 5 minute, datorită posibilităților de înregistrare a numărului de impulsuri de lucru.

După prelucrare, electrozii și piesele au fost uscate timp de 24 ore într-o etuvă, iar apoi cântărite pe o balanță analitică cu precizia de 0,001 g. Volumul de material prelevat s-a calculat ca raport între diferența de masă și densitate.

Rezultatele finale, centralizate ca medie a celor trei repetări, se prezintă pentru perechea de materiale Cu - G10 (tabelul 3.3) și Cu - G60 (tabelul 3.4).

În condiții de lucru identice, indiferent de perechea de electrozi, volumul de material prelevat de un impuls (Q_1^i, Q_2^i) crește cu mărirea duratei impulsului (t_1).

Productivitatea prelucrării per impuls, în condiții de lucru identice, este mai mare în cazul aliajului dur din sortul G60, comparativ cu sortul G10. Această diferență se poate pune pe seama constantelor termofizice și proprietăților diferite ale celor două materiale.

TABELUL 3.3

EXPERIMENT: Verificarea modelului matematic CONDIȚII: P: G10 $\bar{I} = 12,5A$ pol. E ⊕ E: Cu $\bar{U} = 18,5V$ $\rho = 0,1 \text{ bar (injecție)}$									
Nr. crt.	t_i [μs]	t_p [μs]	Numărul impulsurilor de lucru n	V_p [mm^3]	Q_p [mm^3/min]	Q'_p [mm^3/imp]	V_E [mm^3]	Q_E [mm^3/min]	Q'_E [mm^3/imp]
1	12	6	7747162	14,6306	2,9261	$1,8885 \cdot 10^{-6}$	14,9626	2,9925	$1,9314 \cdot 10^{-6}$
2	24	8	4927576	17,7838	3,5568	$3,6090 \cdot 10^{-6}$	10,5356	2,1071	$2,1381 \cdot 10^{-6}$
3	48	12	3358910	18,9369	3,7874	$5,6378 \cdot 10^{-6}$	9,8989	1,9798	$2,9470 \cdot 10^{-6}$
4	95	24	1754724	12,7815	2,5563	$7,284 \cdot 10^{-6}$	6,9700	1,3940	$3,9722 \cdot 10^{-6}$
5	190	48	888266	6,7185	1,3437	$7,5636 \cdot 10^{-6}$	4,7528	0,9506	$5,3507 \cdot 10^{-6}$

TABELUL 3.4

EXPERIMENT: Verificarea modelului matematic CONDIȚII: P: G60 $\bar{I} = 12,5A$ pol. E ⊕ E: Cu $\bar{U} = 17,5V$ $\rho = 0,1 \text{ bar (injecție)}$									
Nr. crt.	t_i [μs]	t_p [μs]	Numărul impulsurilor de lucru n	V_p [mm^3]	Q_p [mm^3/min]	Q'_p [mm^3/imp]	V_E [mm^3]	Q_E [mm^3/min]	Q'_E [mm^3/imp]
1	12	6	6831176	22,8906	4,5781	$3,3509 \cdot 10^{-6}$	13,8839	2,7768	$2,0324 \cdot 10^{-6}$
2	24	8	4980957	34,6849	6,9370	$6,9635 \cdot 10^{-6}$	10,3333	2,0667	$2,0746 \cdot 10^{-6}$
3	48	12	3432680	44,0000	8,800	$12,8180 \cdot 10^{-6}$	8,4869	1,6974	$2,4724 \cdot 10^{-6}$
4	95	24	1870440	41,3958	8,2792	$22,1316 \cdot 10^{-6}$	5,1311	1,0262	$2,7433 \cdot 10^{-6}$
5	190	48	1024815	28,2630	5,6526	$27,5787 \cdot 10^{-6}$	3,6816	0,7363	$3,5925 \cdot 10^{-6}$

Prelucrarea celor două sorturi de aliaje dure, s-a făcut cu electrozi din cupru. Comparînd, pentru aceleași condiții de lucru, uzura electrozilor la un impuls, se remarcă valori mai mari în cazul prelucrării aliajului dur G10, față de prelucrarea sortului G60. Această diferență se poate pune pe seama tensiunii descărcării (u_d), care este funcție de perechea materialelor de electrozi, fiind mai mare în cazul Cu-G10.

Analizînd uzura relativă, se remarcă că aceasta este mult mai mare la prelucrarea aliajelor dure din sortul G10 față de cazul prelucrării sortului G60. La descărcări de scurtă durată raportul uzurilor relative este de 1,7 și crește cu durata impulsului, ajungînd la 5,5 în cazul $t_i = 190 \mu s$.

Comparînd numărul de impulsuri de lucru se remarcă, că la

durate scurte ale descărcării, prelucrarea este mai stabilă în cazul prelucrării aliajului dur G10, iar cu creșterea duratei descărcării, stabilitatea este mai mare la prelucrarea sortului G60. Această comportare se poate pune pe seama condițiilor din interstițiu, dictate de perechea de materiale de prelucrat.

Pentru aceleași regimuri de lucru și perechi de materiale s-au realizat descărcări singulare, utilizând scheme de principiu prezentată în (fig.3.19). Fiecare crater singular a fost repetat de cinci ori pentru un regim de lucru dat.

Pentru a asigura o vizualizare mai adecvată a craterelor singulare, suprafața piesei a fost în prealabil rectificată.

Vizualizarea și măsurarea craterelor s-a realizat cu un microscop de laborator tip ML-4M produs la IOR, cu mărire de 100 x. Pentru măsurarea diametrului s-a adaptat la masa microscopului un comparator cu valoarea diviziunii de 0,001 mm. Adâncimea craterului s-a determinat prin reglarea clarității imaginii la suprafața piesei și la fundul craterului.

Media rezultatelor celor cinci repetări, pentru aliajele dure din sortul G10 și G60 se prezintă în tabelul 3.5.

TABELUL 3.5

Nr. ord.	t_d [μs]	G10			G60		
		R [10^3 mm]	H [10^3 mm]	V [10^6 mm ³]	R [10^3 mm]	H [10^3 mm]	V [10^6 mm ³]
1.	190	44	4	12,1977	51	8	32,9532
2.	95	38	4	9,1064	49	7	26,5799
3.	48	32	3	4,8396	36	7	14,4298
4.	24	28	3	3,1087	32	5	8,1079
5.	12	24	2	1,8137	26	4	4,2809

Din analiza rezultatelor obținute se desprind concluzii identice cu cele stabilite anterior, în sensul că, cantitatea de material prelevată crește cu durata impulsului și este funcție de constantele termofisice ale materialelor.

Comparând dimensiunile craterelor elementare obținute prin descărcări electrice singulare cu cele obținute pe baza modelului matematic (tabelul 3.2) se remarcă anumite diferențe. Astfel valorile obținute prin cele două metode, pentru adâncimea craterului, (H) diferă în limite foarte largi. Această situație se poate pune pe seama disipării unei cantități apreciabile de căldură la suprafața piesei /196/. Pe de altă parte, valorile obținute pentru raza craterului (R) sînt destul de apropiate.

Dacă se compară volumele obținute prin cele două metode experimentale, se remarcă o apropiere foarte mare a rezultatelor (tab.3.3, 3.4, 3.5), ceea ce atestă viabilitatea soluțiilor prezentate.

Analizând comparativ prelucrabilitatea celor două sorturi se constată o prelucrabilitate mai bună a aliajului dur G60 față de G10 pentru același regim de lucru. Diferențele dintre volumele de material prelevate se pot pune pe seama selectivității procesului de prelucrare, exteriorizată prin erodarea în primul rând a liantului (Co) care are o stabilitate mai redusă decât carbura (CW).

Vizualizarea craterelor singulare a scos în evidență existența la suprafața prelucrată a două zone.

O primă zonă formată din craterul propriu zis, și o a doua zonă care este dispusă în jurul craterului, denumită zonă afectată termic.

Craterul propriu-zis are o formă neregulată, care se poate aproxima cu o formă circulară. Această constatare se poate pune pe seama eterogenității materialului. În crater se observă urme clare de material topit și resolidificat. La aceste cratere s-a măsurat diametrul și adâncimea.

Zona afectată termic se remarcă printr-o modificare a aspectului, față de restul suprafeței. Căldura transmisă acestei zone nu a pătruns în adâncime, dovadă fiind urmele observate care provin de la prelucrarea precedentă - rectificarea. Aceasta înseamnă, că o parte a căldurii transmise piesei nu contribuie la topirea materialului, ci se extinde pe suprafață producând zona afectată termic. Componenta aceasta reduce productivitatea procesului, iar din punct de vedere energetic reprezintă o pierdere.

În căutarea unor forme de impulsuri cu care să se realizeze o uzură minimă și o eficiență energetică maximă, Schulze /196/ a ajuns la aceeași concluzie, privind căldura pierdută la suprafața piesei prelucrate.

Comparând volumele prelevate la o descărcare, determinate prin modelul analitic și pe cale experimentală, se observă că valorile teoretice sînt mai mari decît cele reale. În cazul electrodului volumul experimental reprezintă 5,5...7% din cel determinat teoretic, funcție de materialul piesei de prelucrat (G10 sau G60) și constantele termofizice utilizate în calcule.

În cazul pieselor volumul prelevat determinat experimental,

reprezintă 5,5% din cel teoretic în cazul aliajelor dure din sortul G10 și 8% în cazul sortului G60. Comportarea diferită se poate explica prin compoziția și constantele termofizice specifice fiecărui sort, care influențează mecanismul prelevării de material.

Diferențele care apar sînt determinate de ipotezele simplificate adoptate inițial, iar pe de altă parte doar un anumit procent din energia totală dezvoltată de descărcarea electrică, se transmite electrozilor.

Diametrul sursei de căldură se modifică în timp, iar în modelul matematic s-au considerat valori constante.

De asemenea s-a considerat că efectul de polaritate este determinat de constantele termofizice ale materialului electrozilor și durata descărcării /65,236/, fără a lua în considerare efectele produse de comportarea în timp a purtătorilor de sarcină /129,131,166,193,197/. În această ipoteză puterea disipată la cei doi electrozi, este egală.

Pe de altă parte, temperaturile calculate în centrul sursei de căldură la suprafața electrozilor au arătat că se depășește de multe ori temperatura de vaporizare, fenomen de care nu s-a ținut cont în modelul matematic elaborat. Avînd în vedere faptul că, cantitatea de căldură necesară încălzirii materialului la temperatura de vaporizare este de 10...20 de ori mai mare decît cea necesară topirii aceluiași volum de material, explică în mare parte diferențele semnalate. În modelul matematic se consideră, că volumul de metal prelevat coincide cu cel calculat în ipoteza, că limita craterului coincide cu isoterma temperaturii de topire a materialului. În realitate numai o parte din metalul topit este prelevat, o parte însemnată resolidificîndu-se în crater. /169/.

Aproximarea formei craterului cu cea a unei calote sferice, introduce la rîndul său erori mai mari sau mai mici, funcție de durata impulsului și diametrul sursei de căldură.

Rezultatele obținute se încadrează în datele din literatura de specialitate găsite pentru cazul prelucrării materialelor omogene.

Astfel Van Dijck /218,220,221/ ajunge la concluzia, că din cantitatea totală de material topit doar 1...10% este prelevat din crater.

Volumul teoretic calculat de Zingerman /230/, pe baza unui model matematic de transmitere a căldurii în materiale omogene, se diminuează cu 0,12...0,15 în vederea corelării cu cel experimental.

Wertheim /223/ consideră că din energia totală a descărcării electrice, 80% se consumă pentru formarea canalului de plasmă și vaporizare, iar restul de 20% este destinat topirii și prelevării de material.

Förster /61/ a găsit pentru cazul prelucrării oțelului aliat pentru scule, că 4% din puterea descărcării electrice contribuie la vaporizarea materialului, 10% se transmite sub formă de putere calorică piesei, iar restul de 86% se disipează în lichidul de lucru.

3.6. APRECIERI CU PRIVIRE LA MECANISMUL PRELEVĂRII DE MATERIAL ÎN CAZUL PRELUCRĂRII ALIAJELOR DURE.

Concluziile desprinse din rezultatele teoretice și experimentale arată că și în cazul prelucrării prin eroziune electrică a aliajelor dure, cauza prelevării de material o constituie procesele termice de încălzire, topire și/sau vaporizare, determinate de parametrii electrice ai prelucrării și proprietățile termofizice ale materialelor prelucrate.

Sursa de căldură avînd un caracter superficial, încălzirea masei materialului are loc prin transmiterea căldurii de la suprafața încălzită. Incălzirea suprafeței este provocată de transferul brusc al energiei transportate de particulele electrizate pe suprafața electrozilor respectivi și transformarea adiabatică în impuls localizat de căldură.

Străpungerea spațiului dintre electrozi la începutul descărcării electrice este condiționată de ionii lichidului dielectric, care umple spațiul, iar apoi de vaporii metalici ionizați, în care cauză densitatea medie a substanței și respectiv sarcini electrice variază în procesul descărcării electrice. În primele microsecunde după străpungere, canalul descărcării se dilată cu o viteză de cca 1000 m/s /222/. Temperatura în interiorul canalului atinge valori foarte mari, iar la suprafața piesei în centrul sursei de căldură poate să ajungă la 40.000°C.

Energia transmisă sub formă de căldură electrozilor, rezintă după diferiți cercetători 30...40% /222/, 20% /223/, 14% /61/ sau 10% /99,160,220/ din energia totală dezvoltată în procesul descărcării electrice. Sursa superficială locală de căldură formează în metal un câmp de temperatură, izotermale

căreia arată că în metal se formează o zonă de topire și o zonă de vaporizare. Dimensiunile relative ale acestor zone sînt determinate de durata impulsului. Astfel la energie constantă, în cazul impulsurilor de durată mare, zona de vaporizare reprezintă 1/10 din volumul craterului, pe cînd la impulsuri de scurtă durată se poate ajunge la 1/2 din volumul topit. La reducerea duratei impulsului se reduce adîncimea de încălzire a metalului.

Adîncimea craterului format depinde de constantele termofizice ale metalului, energia și durata impulsului. Diametrul și adîncimea craterului sînt strîns legate între ele.

Mărirea craterului este influențată de conductivitatea și difuzivitatea termică a metalului. Cu cît acești parametri sînt mai mari, se formează cratere de dimensiuni mai mici.

Mărind energia impulsurilor, se mărește proporțional volumul craterului, deci crește productivitatea prelucrării. La energie constantă productivitatea admite un maxim în funcție de durata impulsului.

Productivitatea prelucrării aliajelor dure prin eroziune electrică ^{diferă} în funcție de conținutul în Co, care modifică conductivitatea termică. Aliajele dure cu mult Co avînd conductivitatea termică mai mică, se prelucresă mai intens, deoarece se reduc pierderile de căldură înspre interiorul materialului.

La durate scurte ale impulsului, indiferent de material, dimensiunile geometrice ale craterelor sînt apropiate. Cu creșterea duratei impulsului dimensiunile craterului cresc cu atît mai mult cu cît conductivitatea și difuzivitatea termică a metalului au valori mai mici. În cazul materialelor cu conductivitate termică mare cantitatea de căldură disipată crește cu mărirea duratei impulsului. Astfel se explică uzura pronunțată a electrozilor din cupru la regimul de finisare, față de regimul de degroșare.

La durate lungi ale impulsului diferența între volumul topit în Cupru față de aliajul dur G60, se datorește fenomenului de solidificare parțială în adîncime, care apare mai repede la materiale cu conductivitate termică mai mare (Cu). În acest mod se poate explica prelevarea mai redusă din electrozii de cupru.

Modelul matematic elaborat a scos în evidență faptul că prelevarea diferențiată la anod și catod este determinată de constantele termofizice (conductivitate termică, difuzivitate termică, temperatură de topire) și durata descărcării.

Considerând cantitatea de putere disipată la cei doi electrozi egală, efectul de polaritate este cu atât mai pronunțat cu cât pechea de materiale prelucrate se caracterizează prin diferențe mai mari ale constantelor termofizice. La o anumită durată a impulsului, pierderile de energie prin conductivitate termică respectiv cele consumate pentru vaporizare, sînt minime.

Pe această bază se poate deci afirma, că există o durată de impuls optimă, la care să se obțină o prelevare maximă din piesa de prelucrat, corelată cu o uzură minimă a electrodului.

Influența razei sursei de căldură asupra volumului de material prelevat, este mai accentuată la durate scurte ale impulsului și mai redusă la durate lungi de impuls. Diferențele funcție de material, cresc odată cu mărirea conductivității termice a materialului.

Diametrul craterului crește cu energia impulsului în alt raport, decît adîncimea craterului. Cauza acestei diferențe o constituie componenta fluxului de căldură disipată numai la suprafața electrodului, care reduce productivitatea procesului și este neeconomică din punct de vedere energetic.

Fenomenele de topire respectiv resolidificare scad cu creșterea temperaturii de topire respectiv vaporizare. Cu cît aceste temperaturi au valori mai mari apar datorită tensiunilor termice fisuri transcristaline și intercristaline. Apariția lor se poate explica pe de o parte prin conductivitatea termică scăzută a aliajelor dure.

Formarea fisurilor se accentuează la materialele, care pe lângă o temperatură de topire și vaporizare mare, se mai caracterizează prin conductivitate termică scăzută, modul de elasticitate mare și duritate mare, proprietăți caracteristice aliajelor dure.

Pe de altă parte apariția microfisurilor este cauzată de caracteristicile impulsului. Dependența prezenței microfisurilor de durata impulsurilor este determinată după toate probabilitățile de raportul dimensiunilor zonei de topire și zonei de vaporizare a materialului formate sub acțiunea descărcării electrice. Impulsurile lungi formează o zonă de topire mai mare, căldura se poate propaga pe o adîncime mai mare, generînd tensiuni în straturile superficiale și ca urmare microfisuri.

Modul de comportare la fisurare a aliajelor dure din grupa de utilizare G studiate și precieri cu privire la mecanismul

formării și propagării fisurilor, se prezintă în cap.6.

Particulele prelevate în lichidul dielectric ^{regăsite} sunt sferice /61/ sau au o formă neregulată /83/, dimensiunile lor fiind mai mici decât volumul craterelor. Această constatare duce la confirmarea ipotezei vaporizării explozive și expulzarea materialului la sfârșitul descărcării electrice.

Analizând aspectul craterelor nu se poate exclude nici prelevarea mecanică, datorită tensiunilor termice. Temperaturile mari care apar localizate pe volume foarte mici și pe durate foarte scurte provoacă în aliajul dur tensiuni termice, care duc la desprinderea de cristale separate sau grupuri de cristale /83/. Aceste fenomene sunt accentuate și de fisurile ce apar la suprafața prelucrată.

Fenomenele de topire observate pe suprafețele erodate sunt dovada unei teorii termice a mecanismului prelevării și în cazul prelucrării aliajelor dure. Topirea nu este provocată numai la Co și la CW, demonstrată prin existența în masa topită a carburii duble de wolfram (W_2C) /83/.

Prelevarea metalului topit din crater este de natură complexă și decurge în mod diferit, după proprietățile materialului prelucrat, fiind condiționată de mai multe fenomene care acționează simultan funcție de stadiile descărcării electrice.

Prelevarea în cea mai mare parte se face în fază lichidă și/sau vaporizată. Cu cât cantitatea de căldură necesară vaporizării este mai mare, cu atât prelevarea de material este mai mică.

Un material se prelucrasează cu atât mai bine, cu cât temperatura de topire este mai coborâtă și conductivitatea termică este mai mică. În acest mod se explică prelucrabilitatea diferită a sorturilor de aliaje dure analizate (G10, G60).

Modelul matematic al teoriei termoelectrice elaborat pornind de la ecuația generală Fourier de transmitere a căldurii, a permis elucidarea unor fenomene ale mecanismului prelevării de material, în cazul prelucrării aliajelor dure, pe baza calculelor termice calculate și a coeficienților de corecție introduși.

Datorită complexității fenomenelor care guvernează prelucrarea, modelul matematic elaborat este susceptibil de îmbunătățiri prin care să țină cont de variația în timp a sursei de căldură și de faptul că o parte din energia descărcării electrice este consumată pentru vaporizarea unei părți din materialul craterului.

Prin aceste completări gradul de complexitate al programului se amplifică foarte mult ceea ce se va reflecta și în volumul de calcule.

Programul de calcul conceput pentru rezolvarea modelului matematic și-a arătat utilitatea prin precizia rezultatelor obținute și volumul mare de calcule efectuate. Timpul de calcul, unitate centrală a calculatorului, a fost de 33 de minute în cazul cuprului și de 64 minute în cazul aliajului dur G60.

C A P I T O L U L 4

CERCETARI TEORETICE SI EXPERIMENTALE PRIVIND INFLUENTA PARAMETRILOR PROCESULUI ASUPRA CA - RACTERISTICILOR TEHNOLOGICE DE PRELUCRARE

4.1. CATEGORII DE FACTORI SI PARAMETRI LA PRELUCRAREA PRIN EROZIUNE ELECTRICA

Calitatea sau valoarea mărimilor variabile care intervin în procesul de prelucrare dimensională prin eroziune electrică, se pot exprima la un moment dat prin diferiți factori sau parametri. Comparativ cu alte metode neconvenționale sau clasice de prelucrare, numărul parametrilor implicați în procesul de eroziune electrică este foarte mare. În general, acești parametri reprezintă variabile independente, specifice fiecărui utilaj de prelucrare, selecționate de operator dintr-o gamă largă de posibilități de reglare a acestuia /2,225,240,241,242,243/.

Numărul mare de posibilități de reglare este justificat de domeniul larg de aplicații, pentru care producătorul a conceput utilajul de prelucrare. Numeroasele combinații posibile ale variabilelor independente, crează dificultăți operatorului în alegerea variantei optime de prelucrare.

Considerând procesul de prelucrare prin eroziune electrică un proces de transformare sistemic /2,3,174/ se disting trei categorii de mărimi : mărimi de intrare, procesul de prelucrare propriusis și mărimi de ieșire (fig.4.1.).

Mărimile de intrare provin de la utilajul tehnologic (UT):
GI - parametri de reglare ai generatorului de impulsuri,
SRA- caracteristicile sistemului de reglare a avansului,
EAE- parametri echipamentului de acționare a electrodului,
SLD- parametri și caracteristicile sistemului de lichid dielectric;

și de la elementele spațiului de lucru (SL):

CP - caracteristicile piesei,
CEL- caracteristicile mediului de lucru,

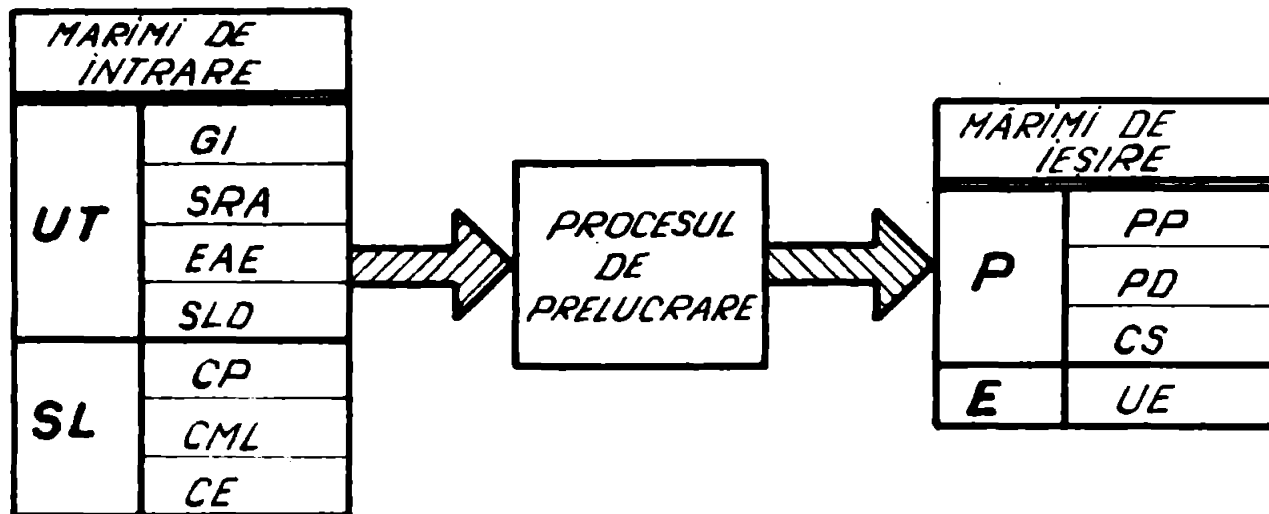


Fig.4.1. Sistemul tehnologic de prelucrare prin eroziune electrică

CE - caracteristicile electrodului,

Mărimile de ieșire caracterizează piesa prelucrată (P) prin:

PP - productivitatea prelucrării,

PD - precizia dimensională,

CS - calitatea suprafeței,

și electrodul sculă (E) prin uzura acestuia (UE).

4.1.1. Mărimile de intrare a procesului

Din această categorie fac parte parametri pe care îi poate stabili sau regla operatorul direct sau indirect, pe utilajul tehnologic (UT). /82,86,89,98,100,102,107,115,116,204/.

Generatorul de impulsuri (GI) la rândul său, poate fi considerat ca un sistem /2/. Intrările în acest sistem sînt formate din parametri de reglare, iar ieșirile sînt stabilite de interacțiunea caracteristicilor funcționale cu elementele spațiului de lucru /35,140,181/.

Tensiunea de mers în gol (U_0) transmisă spațiului de lucru la începutul impulsului de tensiune, este un parametru care determină mărimea interstițiului. Creșterea tensiunii de mers în gol determină o creștere a interstițiului, corelată cu proprietățile mediului de lucru. În general acest parametru nu se poate regla, avînd o valoare unică (generatorul GEP-50F) /241/. În vederea extinderii domeniului de utilizare unele generatoare sînt prevăzute cu două sau trei trepte de reglare a tensiunii de mers în gol (generatorul GEP-MF) /249/.

Polaritatea este un parametru, care se stabilește la începutul operației de prelucrare și nu se modifică în timpul unei

trezori. Efectul de polaritate este influențat de constantele termofizice ale materialelor electrozilor și parametri impulsului. Se poate lucra cu polaritate directă, în cazul conectării polului (+) la piesă și polaritate inversă, când polul (-) este legat la piesă.

Puterea introdusă în interstițiu este determinată de energia impulsurilor și frecvența lor, în strînsă concordanță cu starea spațiului de lucru.

Tensiunea medie a impulsului (\bar{U}_1) este funcție de perechea de materiale prelucrate și caracteristicile mediului de lucru /2,99/. Pentru o pereche de materiale și condiții de prelucrare date, tensiunea medie a impulsului este constantă.

Curentul mediu de impulsuri (\bar{I}_1) este un parametru reglabil în trepte, a cărui mărime determină puterea introdusă în interstițiu. La valori fixe ale tensiunii de mers în gol, duratei impulsului și pauzei, creșterea curentului descărcării determină o creștere a productivității prelucrării, a uzurii relative și a rugozității /156/.

Treapta de curent este limitată practic de densitatea de curent (j), definită ca raport între intensitatea curentului mediu de lucru (I) și aria suprafeței active de prelucrat. Usual se acceptă $j=2...10 \text{ A/cm}^2$ /135/, ajungîndu-se pînă la limita $j < 25 \text{ A/cm}^2$ /2/, funcție de natura și proprietățile materialului de prelucrat.

Parametri de timp reglabili ai impulsului sînt : durata impulsului de curent (t_1) și durata pauzei (t_p).

Durata impulsului (t_1) este un parametru reglabil în trepte, care determină energia impulsului și implicit cantitatea de material prelevat. Dacă se păstrează constante nivelul de intensitate și tensiunea, creșterea duratei impulsului determină creșterea productivității și scăderea uzurii relative. Acest parametru se alege în funcție de regimul de lucru și materialul de prelucrat.

Durata pauzei (t_p) este totdeauna o mărime comandată, care se poate regla în trepte, fiind limitată inferior de timpul minim necesar de ionizarea spațiului străpuns de descărcarea anterioară și refacerii rigidității dielectrice a interstițiului. Timpul de pauză minim este funcție de condițiile din spațiul de lucru. În timpul procesului de prelucrare datorită poluării mediului de lucru, timpul de pauză minim crește. Acest parametru influențează

formarea așă numitelor "cuiburi de descărcări" și cocsificarea electrozilor /2/.

Forma impulsurilor influențează prin gradul de înclinare al frontului de creștere a impulsului, dinamica de dezvoltare a sursei termice /94/. În general forma impulsului nu se poate influența prin reglare exterioară la generatorul de impulsuri /241/. Noile generatoare GEP-MF /249/ permite realizarea următoarelor tipuri de impulsuri de curent :

- cu început rampă și palier pieptene,
- dreptunghiulare cu palier pieptene,
- cu început rampă,
- dreptunghiulare.

Impulsurile de curent la care panta frontală are o înclinație mică, asigură o disipare mai bună a energiei prin conducție, constituind astfel o protecție pentru electrozii refractari. Un front abrupt al impulsului de curent determină concentrarea în timp a energiei, caz favorabil pentru electrozii cu conductivitate termică bună.

Sistemul de reglare automat al avansului (SRA) are rolul de a asigura o poziție relativ stabilă a electrodului față de piesa de prelucrat, definită printr-o valoare optimă a interstițiului. Parametri care determină funcțiile sistemului de avans sînt : gama de reglare, sensibilitatea, viteza de reacție, stabilitatea și valorile de referință programate inițial (U_0, \bar{I}_1, t_1, t_p) /2/. În general intervenția operatorului asupra acestor parametri este limitată. Varietatea parametrilor reglabili este funcție de soluțiile tehnice adoptate de producătorul de utilaje.

Echipamentul de acționare suplimentară a electrodului (SAB) este influențat de sistemul de reglare al avansului, dar are parametri proprii de reglare. Operatorul are posibilitatea să regleze amplitudinea sau frecvența de vibrație, parametri mișcării de rotație și durata de relaxare a electrodului /2,151,156,242, 243/. Mișcărilor suplimentare ale electrodului influențează parametri electrici ai impulsului și procesele de evacuare a produselor eroziunii din interstițiul de lucru.

Sistemul de lichid dielectric (SLD) acționează de asemenea în sensul evacuării produselor erozive, avînd ca funcții introducerea, evacuarea, menținerea constantă a nivelului în cuvă, circulația forțată, curățarea și limitarea temperaturii de încălzire a lichidului dielectric. Realizarea acestor funcții este asigurată

prin soluțiile tehnice adoptate, operatorul avînd posibilitatea să regleze presiunea și debitul lichidului dielectric, să obțină pentru varianta de injecție (continuu sau pulsatorie) sau absorbție a acestuia din interstițiul tehnologic și să programeze termostatul de limitare a temperaturii de încălzire /2,156,241/.

În cadrul mărimilor de intrare se consideră și factorii proveniți de la spațiul de lucru (EL). Elementele spațiului de lucru sînt: piesa de prelucrat, mediul de lucru și electrodul.

Caracteristicile piesei (CP) și caracteristicile electrodului (CE) care intervin în procesul de prelucrare sînt: compoziția chimică, structura, constantele termofizice și proprietățile mecanice ale materialelor./2,156/. Funcție de regimul de lucru adoptat acești caracteristici determină forma, dimensiunile, rugozitatea și structura stratului de suprafață prelucrat.

Mediul de lucru (EL) format din lichidul dielectric determină localizarea și concentrarea energiei, asigurînd densitatea de putere necesară procesului de eroziune. Totodată lichidul dielectric asigură captarea și evacuarea produselor eroziunii. Parametri mediului de lucru implicați direct în procesul de eroziune sînt rigiditatea dielectrică și concentrația impurităților. Transportul și evacuarea produselor eroziunii sînt determinate de viscozitatea și tensiunea superficială a lichidului dielectric utilizat /2,156, 242,243/. În timpul procesului de prelucrare parametrii lichidului dielectric se modifică, datorită fenomenelor termice din proces și creșterii gradului de impurificare.

4.1.2. Mărimile de ieșire a procesului

Principalii factori și parametri, care exprimă calitativ și cantitativ rezultatele transformării tehnologice ale procesului de prelucrare prin eroziune electrică, denumiți "criterii de performanță", se referă la piesa de prelucrat (P) și electrod (E). Din multitudinea de criterii analizate /2,5,13,63,65,99,102,107, 134,135,141,151,161,172,193,223,240/, principalele categorii de caracteristici se referă la productivitatea prelucrării (PP), precizia dimensională (PD) și calitatea suprafeței (CS) în cazul piesei de prelucrat și la uzura electrodului (UE) în cazul sculei.

Caracteristicile globale de productivitate a prelucrării (PP) se exprimă prin /2,181,156,240/.

- Volumul prelevării totale (V_p):

$$V_p = v_{1p} \cdot f_p \cdot t = (M_{p1} - M_{p2}) / \rho_p \quad /mm^3/ \quad (4.1)$$

unde: v_{1p} - volumul de material îndepărtat la un impuls din piesă

f_p - frecvența impulsurilor de prelevare,

t - timpul prelucrării,

M_{p1} , M_{p2} - masa piesei înainte, respectiv după prelucrare,

ρ_p - densitatea materialului piesei.

- Productivitatea prelucrării (debitul prelevării) (Q_p)

$$Q_p = v_{1p} \cdot f_p = V_p / t \quad /mm^3/min/ \quad (4.2)$$

Coefficientul de prelucrabilitate relativă volumică (ϵ_p), mărime care măsoară procentual cantitatea de material prelucrat din piesă la unitatea de volum uzat din electrod.

$$\epsilon_p = (V_p / V_E) \cdot 100 = (Q_p / Q_E) \cdot 100 \quad (\%) \quad (4.3)$$

Precizia dimensională (PD) la prelucrarea prin eroziune electrică cu copierea formei este caracterizată de transferul informațiilor dimensionale inițiale ale electrodului cu anumite pierderi la piesa de prelucrat. Gradul de precizie se poate evalua prin caracteristicile locale de prelucrare, într-o etapă intermediară sau la sfârșitul prelucrării.

Calitatea suprafeței (CS) este condiționată funcțional de aspectul geometric și aspectul fizic al structurii și proprietăților stratului de material din imediata vecinătate a suprafeței prelucrate.

Sub aspect geometric abaterile macrogeometrice sînt mult mai complexe decît în cazul altor prelucrări dimensionale, întrucît peste abaterile provenite din metodele de confecționare a electrozilor se suprapun cele generate de repartiția neuniformă a uzurii.

Abaterile microgeometrice sînt caracterizate de rugozitatea suprafețelor prelucrate prin criteriile R_z (înălțimea medie a microneregularităților), R_a (abaterea medie aritmetică a profilului) și R_{max} înălțimea maximă a asperităților), care în toate direcțiile de măsurare prezintă aceleași caracteristici fără a avea o orientare preferențială.

Sub aspect fizic calitatea suprafeței este caracterizată de adîncimea stratului de material modificat și de adîncimea fisurilor apărute. Aceste caracteristici sînt funcție de materialul piesei și parametri regimului de lucru.

Caracteristicile globale de uzură a electrodului (UE) se exprimă prin /2,141,156,240/t

- Volumul uzurii total (V_E) :

$$V_E = v_{1E}(f_p + f_m)t = (M_{E1} - M_{E2}) / \rho_E \quad /mm^3/ \quad (4.4)$$

unde: v_{1E} - volumul de material prelevat la un impuls din electrod,

f_m - frecvența impulsurilor de mărunțire,

M_{E1}, M_{E2} - masa electrodului înainte, respectiv după prelucrare

ρ_E - densitatea materialului electrodului.

- Debitul uzurii (Q_E)

$$Q_E = v_{1E}(f_p + f_m) = V_E/t \quad /mm^3/min/ \quad (4.5)$$

- Coeficientul de uzură relativă volumică (δ), mărimea relativă care măsoară volumul de material usat din electrod la prelucrarea unității de volum din piesă:

$$\delta = (V_E/V_P) \cdot 100 = (Q_E/Q_P) \cdot 100 \quad / \% / \quad (4.6)$$

4.2. ORDONAREA PONDERII DE INFLUENȚA A PARAMETRILOR ASUPRA CRITERILOR DE PERFORMANȚA PRIN METODA

BILANȚULUI ALÉTORIU

Parametri prezentați, reprezentînd variabilele independente ale procesului de prelucrare, sînt caracterizați de un anumit număr de posibilități de reglare, numite "nivele". În cazul polarității sînt 2 nivele, iar în cazul curentului impulsului, durata impulsului sau durata pauzei se ajunge la un număr de 12 nivele (generatorul GEP-50F) /241/.

La o evaluare modestă, considerînd 9 variabile independente, fiecare cu cîte 4 nivele, se ajunge la un total de $4^9 = 262144$ combinații posibile, la aprecierea unui singur criteriu de performanță /225/. Cercetarea efectelor tuturor acestor combinații pentru a determina care sînt cele mai potrivite pentru cazul de prelucrare dat, este practic imposibilă.

Pe de altă parte problema se amplifică și mai mult, dacă se ține seama de toate criteriile de performanță prin care se apreciază procesul de prelucrare.

Din această cauză este necesară o metodă de cercetare la care prin utilizarea unui număr limitat de încercări, să se determine

efectele pe care diferitele combinații ale variabilelor independente le au asupra criteriilor de performanță. O astfel de metodă de planificare a încercărilor și de analiză statistică a rezultatelor este metoda bilanțului aleatoriu, sau random /6,39,73,133,153,154,190,191,225/.

Această metodă permite deducerea efectelor diferitelor combinații ale variabilelor asupra criteriilor de performanță, pe baza unei singure serii de încercări, precum și ordonarea variabilelor după amplitudinea efectului produs.

4.2.1. Planificarea încercărilor experimentale

Seria de încercări adoptată cuprinde 24 experiențe, care permit analiza variabilelor cu 2,3,4,6 sau 8 nivele. Numărul de experiențe se poate majora sau reduce, alegerea fiind funcție de numărul de nivele ale variabilelor analizate.

Astfel, în cazul seriei de încercări adoptate, pentru a variabilă care are 4 nivele posibile, fiecare nivel va apărea de 6 ori, într-o ordine oarecare în seria de încercări.

Pentru a evita în seria de încercări combinații necorespunzătoare din punct de vedere teoretic și practic, între variabilele independente, posibile datorită selectării aleatoare a acestora, și pentru a diminua eventualele perturbații ale unor parametri dominanți, s-au adoptat valori pentru regimul de degroșare și regimul de finisare. La alegerea acestor valori pentru cele două regimuri de lucru, s-a ținut cont de datele din literatura de specialitate /2,99,141,156,223,240,241,242,243/. Limitarea superioară a duratei impulsului la 500 us s-a făcut din considerentul, că peste această valoare în aliajele dure prelucrate apar fisuri, care periclitizează integritatea piesei /99,239/.

Variabilele luate în considerare și nivelele corespunzătoare se prezintă în tabelul 4.1 pentru regimul de degroșare și tabelul 4.2. pentru regimul de finisare.

Selectarea aleatoare a variabilelor are drept scop anestecarea întâmplătoare a influențelor reciproce.

Distribuția întâmplătoare (randomizarea) nivelelor pentru fiecare experiență, s-a realizat pe baza unui tabel cu numere aleatoare /132,133,153,191,206,228/ singura restricție fiind aceea, că fiecare nivel trebuie să apară de același număr de ori în seria de încercări.

TABELUL 4.1

Nr. crt.	Variabila independentă	Simbol	Unitatea de măsură	Nivelele variabilei				Nr. nivele
1.	Materialul piesei	G	—	G10	G40	G60		3
2.	Polaritatea electrodului	Pol.	—	—	+			2
3.	Curentul descărcării	i_d	[A]	$i_{d1} = 12,5$	$i_{d2} = 25,0$	$i_{d3} = 50,0$		3
4.	Durata pauzei	t_p	[μs]	$t_{p5} = 12$	$t_{p6} = 24$	$t_{p7} = 48$		3
5.	Durata impulsului	t_i	[μs]	$t_{i8} = 24$	$t_{i7} = 48$	$t_{i9} = 95$	$t_{i6} = 190$	4
6.	Presiunea de spălare	p	[bar]	0,1	0,2	0,3		3

TABELUL 4.2

Nr. crt.	Variabila independentă	Simbol	Unitatea de măsură	Nivelele variabilei				Nr. nivele
1.	Materialul piesei	G	—	G10	G40	G60		3
2.	Polaritatea electrodului	Pol.	—	—	+			2
3.	Curentul descărcării	i_d	[A]	$i_{d1} = 3,125$	$i_{d2} = 6,25$	$i_{d4} = 12,5$		3
4.	Durata pauzei	t_p	[μs]	$t_{p1} = 2,5$	$t_{p2} = 4$	$t_{p3} = 6$		3
5.	Durata impulsului	t_i	[μs]	$t_{i3} = 4$	$t_{i5} = 6$	$t_{i4} = 8$	$t_{i5} = 12$	4
6.	Presiunea de spălare	p	[bar]	0,1	0,2	0,3		3

TABELUL 4.3

Nr. exp.	Materialul piesei	Pol.	i_d [A]	t_p [μs]	t_i [μs]	p [bar]	Nr. exp.	Materialul piesei	Pol.	i_d [A]	t_p [μs]	t_i [μs]	p [bar]
1.	G40	—	50,0	24	190	0,1	13.	G60	—	25,0	48	95	0,3
2.	G40	—	50,0	24	24	0,2	14.	G10	+	25,0	48	190	0,2
3.	G60	+	50,0	24	190	0,1	15.	G10	+	12,5	24	24	0,1
4.	G10	—	12,5	48	24	0,1	16.	G10	+	12,5	24	24	0,1
5.	G60	—	25,0	12	24	0,1	17.	G40	+	12,5	24	95	0,1
6.	G10	+	50,0	48	190	0,3	18.	G40	—	12,5	12	48	0,3
7.	G10	+	12,5	48	24	0,3	19.	G40	—	25,0	24	24	0,1
8.	G60	+	50,0	12	190	0,3	20.	G40	+	50,0	24	48	0,2
9.	G10	+	12,5	12	190	0,3	21.	G60	—	12,5	12	48	0,3
10.	G60	+	12,5	48	95	0,2	22.	G60	—	25,0	12	48	0,2
11.	G10	—	25,0	12	95	0,2	23.	G40	—	25,0	48	48	0,2
12.	G60	—	50,0	24	95	0,3	24.	G40	+	25,0	48	95	0,2

Matricea de planificare a experiențelor seria de încercări, întocmită pe baza unui tabel de numere aleatoare pentru distribuirea nivelelor de coloană, se prezintă în tabelul 4.3 pentru cazul regimului de degroșare.

Această matrice de planificare a experiențelor, se utilizează pentru cercetarea efectului aceluiași combinații ale variabilelor independente, asupra tuturor criteriilor de performanță.

În cazul regimului de finisare în matricea prezentată (tab. 4.3) se fac următoarele înlocuiri corespondente, pe baza valorilor prezentate în tabelele 4.1 și 4.2.

$i_{14} \rightarrow i_{11}$	$t_{p5} \rightarrow t_{p1}$	$t_{i6} \rightarrow t_{i2}$
$i_{18} \rightarrow i_{12}$	$t_{p6} \rightarrow t_{p2}$	$t_{i7} \rightarrow t_{i3}$
$i_{116} \rightarrow i_{14}$	$t_{p7} \rightarrow t_{p3}$	$t_{i8} \rightarrow t_{i4}$
		$t_{i9} \rightarrow t_{i5}$

Criteriile de performanță urmărite în cazul celor două regiuri de prelucrare, se prezintă în tabelul 4.4.

4.2.2. Desfășurarea experiențelor

La baza desfășurării experiențelor au stat normele CIRP pentru prelucrarea aliajelor dure /239/.

Drept piese de prelucrat s-au utilizat plăcuțe din aliaj dur, din grupa de utilizare G. Pentru a studia comportarea la prelucrare funcție de compoziția chimică, s-au ales trei sorturi de aliaje dure : G 10 (6% Co, 94% CW) G40 (20% Co, 80% CW) și G60 (30% Co; 70% CW), care acoperă întregul domeniu al compozițiilor realizate.

Piesele au fost, de format pătrată cu latura de 20 mm și grosimea 10 mm.

La alegerea materialului electrodului trebuie analizate mai multe aspecte. Pe lângă costul redus și prelucrabilitate ușoară materialul trebuie să asigure obținerea caracteristicilor tehnice optime ale prelucrării. În practică s-au impus ca materialele de electrozi, la prelucrarea aliajelor dure, grafitul, cupru electrolitic și pseudoaliajul W-Cu /2,99/. În prezenta lucrare electrozii s-au confecționat din cupru electrolitic, întrucât prezintă calități foarte bune de prelucrare și este cel mai utilizat la ora actuală, în practica industrială. Electrozii folosiți au fost cilindrici cu diametrul exterior de $15 \pm 0,1$ mm și diametrul alezajului interior de $3 \pm 0,1$ mm.

TABELUL 4.4

Nr. crt.	REGIM DE DEGROSARE			REGIM DE FINISARE		
	Criteriul de performanță	Simbol	Unitatea de măsură	Criteriul de performanță	Simbol	Unitatea de măsură
1.	Productivitatea prelucrării	Q_p	$\frac{mm^3}{min}$	Productivitatea prelucrării	Q_p	$\frac{mm^3}{min}$
2.	Debitul uzurii	Q_E	$\frac{mm^3}{min}$	Debitul uzurii	Q_E	$\frac{mm^3}{min}$
3.	Coeficientul de prelucrabilitate	E_p	[%]	Rugozitatea suprafeței	R_a	$[\mu m]$
4.	Coeficientul de uzură relativă	δ	[%]	Coeficientul de uzură relativă	δ	[%]

TABELUL 4.5

Nr. experiment	REGIM DE DEGROSARE				REGIM DE FINISARE			
	Q_p $[\frac{mm^3}{min}]$	Q_E $[\frac{mm^3}{min}]$	E_p [%]	δ [%]	Q_p $[\frac{mm^3}{min}]$	Q_E $[\frac{mm^3}{min}]$	R_a [μm]	δ [%]
1.	22,1569	50,1883	44,1475	226,5132	3,2003	6,2307	2,51	194,6911
2.	13,0439	43,2617	30,1505	331,6699	2,9911	4,9494	1,95	165,4709
3.	81,2998	9,2607	661,9348	15,1072	5,6550	2,6929	3,09	47,6198
4.	2,4682	2,2951	107,5422	92,9868	0,4959	0,5068	1,56	102,1980
5.	4,8378	14,6824	32,9497	303,4933	0,0360	0,0270	1,77	75,0000
6.	14,8015	15,3006	96,7380	103,3720	2,9413	2,7319	2,18	92,8807
7.	2,3482	1,6744	140,2413	71,3057	0,0951	0,2150	1,03	226,0778
8.	77,7009	12,6372	614,8585	16,2639	5,4846	3,1680	2,48	57,7617
9.	2,2544	1,1528	195,5586	51,1356	0,1166	0,1146	1,07	98,2847
10.	7,0514	0,9351	754,0798	13,2612	0,1917	0,2277	0,92	118,7793
11.	13,2627	15,2507	86,9645	114,9894	4,6446	4,2386	1,73	91,2587
12.	14,0871	68,8235	20,4684	489,5569	2,8316	6,9898	1,78	246,8498
13.	5,1665	16,7620	30,8227	324,4363	0,9337	2,6454	2,35	283,3244
14.	8,1038	4,9363	164,1675	60,9134	0,9822	0,6137	1,42	62,4822
15.	22,9131	34,7144	68,0046	151,5046	3,0287	4,0217	2,28	132,7863
16.	2,7837	1,6315	170,6221	58,6090	0,1264	0,2566	1,10	203,0063
17.	5,1587	0,8105	636,4837	15,7113	0,0899	0,0929	0,91	103,3370
18.	2,2713	5,9893	37,9226	263,6948	0,1929	0,5753	1,55	298,2374
19.	4,6566	11,1126	41,9038	238,6419	1,6766	3,2038	1,72	191,0891
20.	42,6064	25,4604	167,3438	59,7572	2,2807	2,7015	1,92	118,4505
21.	1,9816	6,5543	30,2336	330,7580	0,1810	0,7768	1,85	429,1713
22.	4,6788	16,8200	27,8169	359,4939	1,4860	4,3873	2,04	295,2423
23.	4,1933	12,4924	33,5668	297,9133	1,5709	2,6637	1,92	169,5652
24.	16,3748	3,9443	415,1510	24,0876	0,7200	0,4004	1,35	55,6111

Prelucrarea s-a executat pe o mașină de eroziune electrică de tip ELER-01., echipată cu un generator de impulsuri de tip GEP-50P, de producție românească, Electrosimiș Timișoara. Parametrii reglabili se prezintă în matricea de planificare a experiențelor.

Fiecare experiență a durat 15 minute, și a fost repetată de trei ori.

Lichidul dielectric utilizat a fost motorină de iarnă - 15A STAS 240-66. Utilizarea altor lichide dielectrice, asemănătoare ca proprietăți cu cel folosit în lucrare, conduce la modificări ale valorilor mărimilor tehnologice caracteristice, care însă rămân în limita domeniului normal de dispersie al erorilor /99/.

Piese prelucrate și electrozii au fost uscați timp de 24 de ore într-o etuvă, înaintea recîntării.

Masele, înainte și după prelucrare, au fost determinate pe o balanță analitică cu o precizie de 0,0001 g.

Calitatea suprafeței prelucrate s-a apreciat prin criteriul de rugozitate Ra, abaterea medie aritmetică a profilului. Măsurările s-au efectuat cu un profilograf - profilometru model 252, în trei zone diferite ale probelor, fiecare repetîndu-se de cinci ori. Pasul de tăiere a fost fixat la 0,8 mm /22,238,239/.

Rezultatele experimentale, centralizate ca medie a celor trei repetări, pentru toate criteriile de performanță prescrise și cele două regimuri de lucru, se prezintă în tabelul 4.5.

4.2.3. Metoda bilanțului aleatoriu

În vederea aplicării metodei bilanțului aleatoriu se parcurg următoarele etape :

- Se calculează media valorilor criteriului de performanță analizat (\bar{x}) pentru fiecare nivel al variabilelor independente, luate în considerare.

- Se determină media valorilor medii (media mediilor) $\bar{\bar{x}}$ pentru fiecare variabilă în parte.

- Calculul dispersiei (D) pentru fiecare variabilă (\bar{x}_{\max} - \bar{x}_{\min}) și stabilirea variabilei cu dispersia maximă. Aceasta reprezintă variabila cea mai importantă pentru criteriul de performanță analizat.

- Eliminarea efectului variabilei cu dispersia cea mai mare prin corectarea rezultatelor. Această operație se realizează

adunând diferența dintre media mediilor ($\bar{\bar{x}}$) și media valorilor pentru fiecare nivel (\bar{x}), a variabilei cu dispersia maximă.

Valorile corectate ale criteriului de performanță pot fi și negative ele ne mai având sens fizic, scopul analizei statistice fiind însă atins.

- După eliminarea variabilei cu ponderea cea mai mare, se reiau etapele de calcul de la început cu valorile corectate ale criteriului de performanță, în calcule rămânând cu o variabilă mai puțin.

Se repetă etapele de calcul până când se cunoaște ordinea de importanță a tuturor variabilelor analizate. Capacitatea de separare a efectelor dominante, prin această metodă, este mare /133/.

Datorită distribuției întâmplătoare a variabilelor independente, chiar dacă apar perturbații în timpul experimentărilor, influența factorilor externi este eliminată, rezultatele fiind valoroase.

La aplicarea metodei bilanțului aleator se poate întâmpla să se scape unii factori importanți, fără însă să existe pericolul ca un factor nesemnificativ să fie considerat semnificativ /133/.

4.3. PROGRAM DE CALCUL PENTRU APLICAREA METODEI

BILANȚULUI ALEATORIU

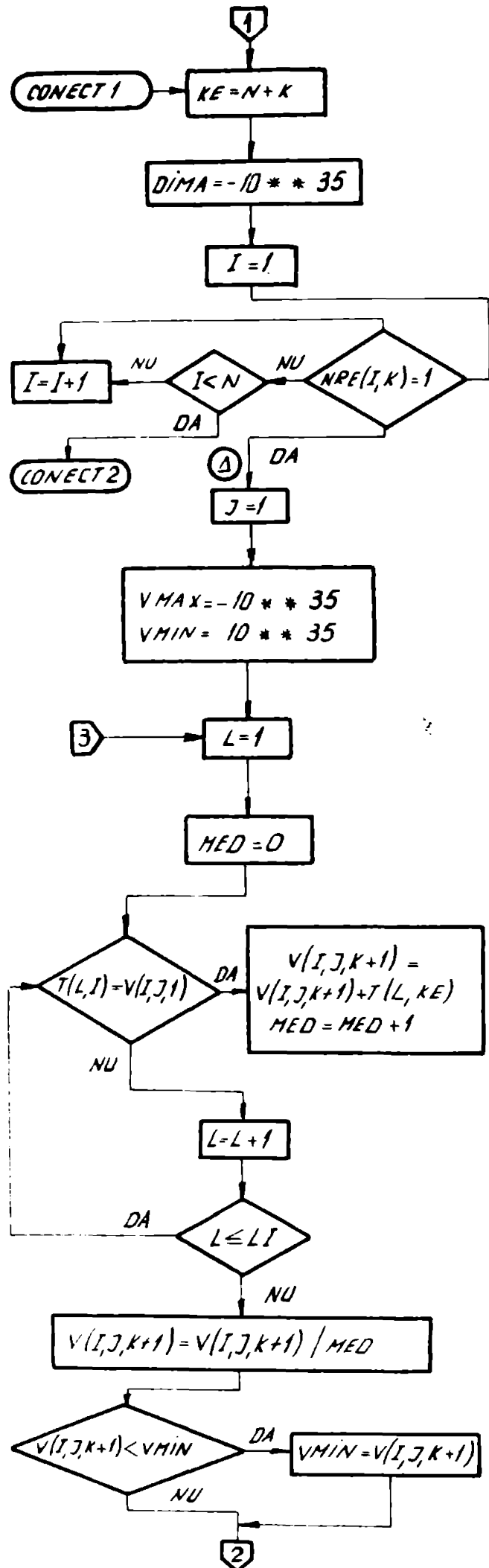
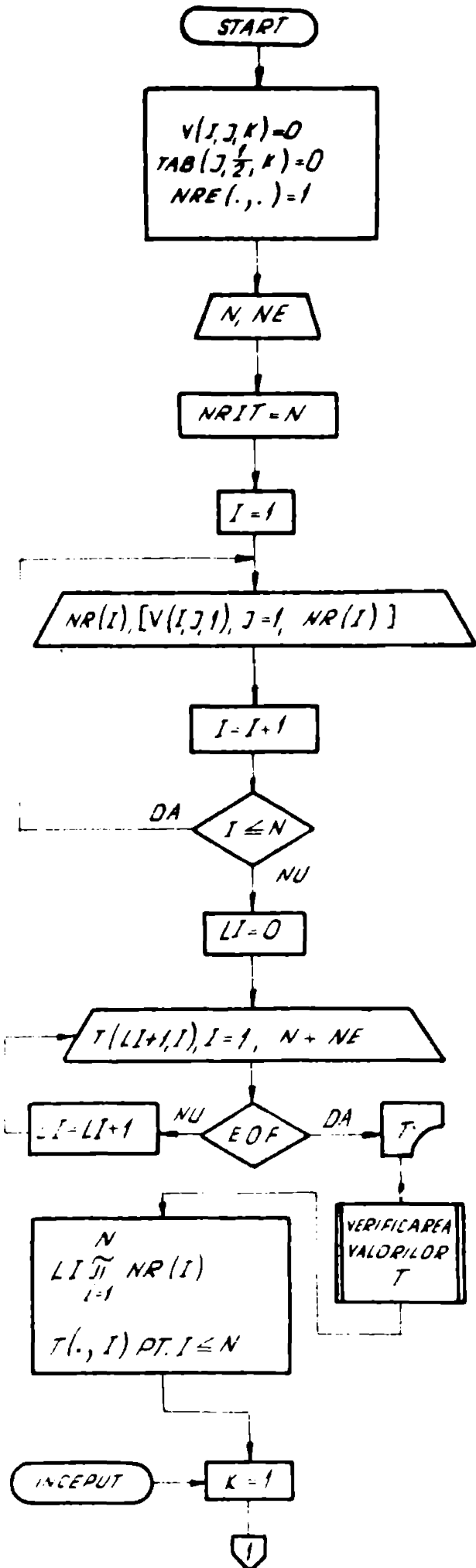
Datorită volumului mare de calcule s-a elaborat un program de calcul /37,48,157,158/, scris în limbaj FORTRAN, rulat pe un calculator CORAL-4030. Schema logică a programului se prezintă în figura 4.2.

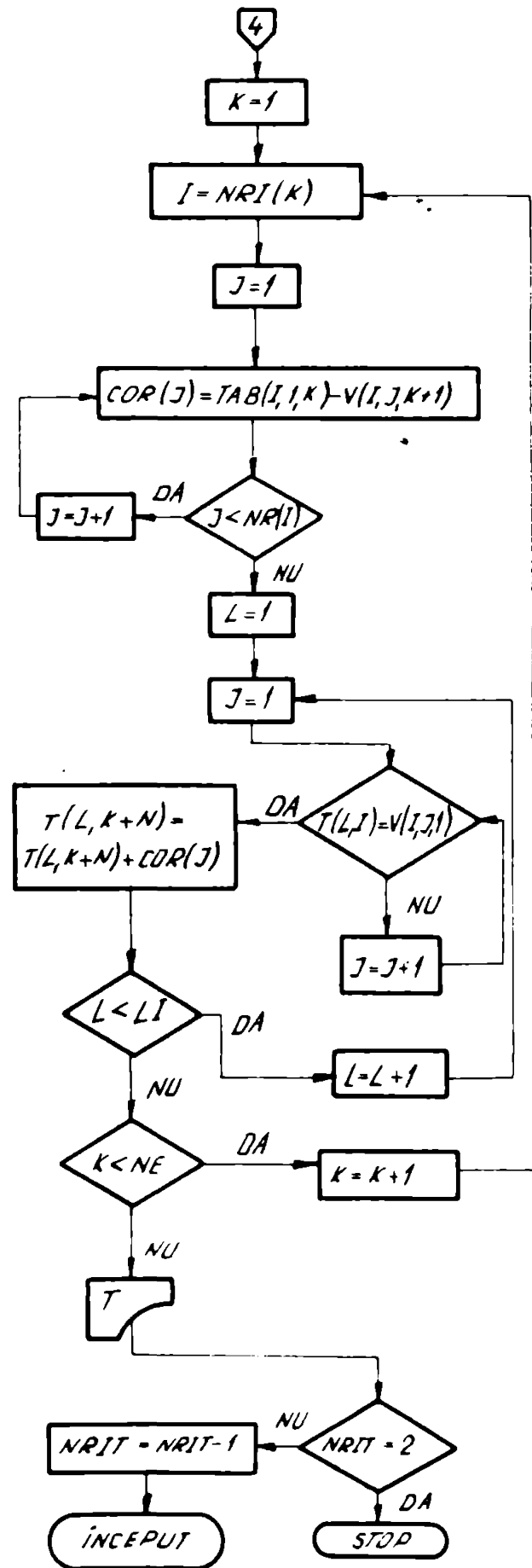
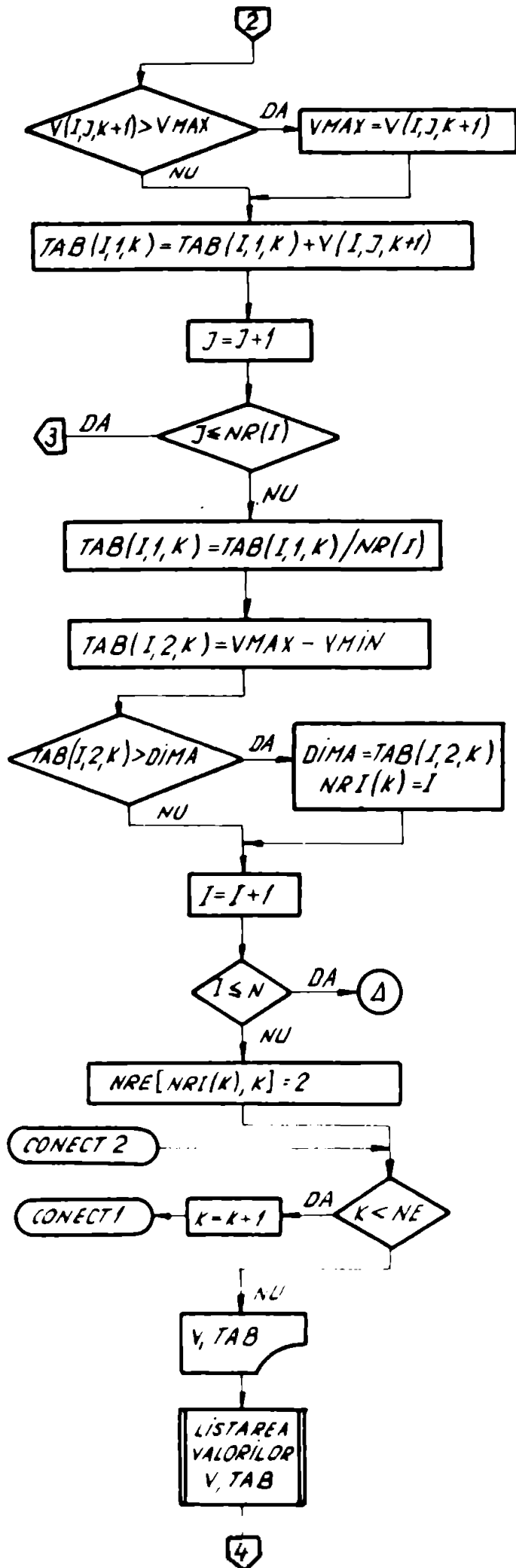
La inițializare s-a considerat numărul variabilelor (N), numărul criteriilor de performanță (NE), numărul de nivele ale variabilelor (NR) și numărul de experiențe (LI). Etapele de calcul prezentate (subcapitolul 4.2.3.) sînt efectuate asupra valorilor indicate în tabelele cuprinse în schema logică.

Tabelul $V(I,J,K) = 0$ are următoarele semnificații :

- pentru $K = 1$, tabelul reprezintă nivelul J al variabilei I , iar
- pentru $K = 2$, tabelul reprezintă media aritmetică a rezultatelor pentru criteriul $K-1$, efectuată pentru nivelul J al variabilei I .

Tabelul $TAB(I,1/2,K) = 0$ poate prezenta următoarele situații:





- pentru (I,1,K) tabelul reprezintă media mediilor pentru variabila I la criteriul de performanță K, iar

- pentru (I,2,K) tabelul reprezintă dispersia pentru variabila I la criteriul de performanță K.

NBE (I,K)=1 este un tabel inițializat cu 1, care are N-linii și NE-coloane, necesare pentru analiza variabilei I. Acest tabel codifică variabila cu 1 dacă ea se va lua în considerare pentru calculul mediei la criteriul de performanță K, iar în cazul în care nu se ia în considerare se utilizează codul zero.

Se inițializează apoi NBIT = N, adică numărul variabilelor în lucru pentru efectuarea corecțiilor.

Pentru citirea valorilor variabilelor s-a inițializat I=1 și prin iterații, punând condiția I=N, se parcurg toate variabilele respectiv nivelele lor.

În continuare se inițializează numărul încercărilor experimentale (LI) cu zero și se face citirea tabelului cu rezultate. Tabelul T(LI,N+NE) citit, este necesar operării calculelor, care are N+NE-coloane corespunzătoare variabilelor și, criteriilor de performanță și LI-linii, fiecare corespunzând unei încercări experimentale.

Dacă nu s-a ajuns la EOF (End of File), se va face LI=LI+1 pentru a se parcurge toate liniile tabelului.

Valorile citite se verifică, în sensul că produsul dintre numărul nivelelor variabilelor (I) trebuie să fie egal cu numărul de probe LI=NR(I), această condiție fiind impusă de metoda randomizării.

Zona de lucru pentru aflarea dispersiei maxime, notată cu DIMA, s-a inițializat cu cel mai mic număr ce poate intra în calculatorul utilizat (-10 x x 35 în cazul calculatorului CORAL-4030).

În continuare se analizează variabila I care intră în calculul mediilor respective.

Dacă NBE(I,K)=1 nu este adevărat, adică variabila (I) nu se va lua în considerare la calculul mediei la criteriul de performanță (K), se va compara (I) cu (N) și se va face trimiterea (CONNECT 2) la subprogramul de listare a valorilor V, TAB (fig.4.4) iar la afișarea rezultatelor se tipărește zero.

Calculul mediei, mediei mediilor și dispersiei valorilor medii se face prin operații cu ajutorul tabelelor. Media se calculează cu ajutorul tabelului V(I,J,K+1) pentru care s-a specificat V(I,J,1)=T(L,I).

Pentru aflarea dispersiei valorilor medii se compară toate valorile tabelului $V(I, J, K+1)$ cu V_{MAX} și V_{MIN} , inițializate anterior. În acest mod se vor reține valoarea maximă, respectiv minimă a valorilor medii corespunzătoare variabilei (I), cu care în continuare se va calcula dispersia, $TAB(I, 2, K) = V_{MAX} - V_{MIN}$. Această operație se efectuează prin iterațiile corespunzătoare pentru toate variabilele (I).

După efectuarea listărilor se trece la corecții. Tabelul $COR(J)$ se folosește ca zonă de lucru pentru calculul corecției la nivelul (J) al variabilei (I) cu dispersia maximă.

Prin numărul variabilelor aflate în lucru pentru efectuarea corecțiilor (NRIT), se analizează reluarea ciclului de la început. Inițial NRIT=N, iar după eliminarea variabilei cu ponderea cea mai mare NRIT=N-1, ș.a.m.d. Ciclul de lucru se oprește normal dacă au mai rămas două variabile NRIT=2.

Schema logică a subprogramului de verificare a valorilor T, se prezintă în fig.4.3., iar cea de listare a valorilor V, TAB în fig.4.4

Schema logică a fost astfel concepută încât rezultatele fiecărei etape de calcul să fie tipărite sub formă tabelară. Tot tabelar se prezintă și rezultatele corectate obținute prin eliminarea variabilei cu ponderea cea mai mare.

Programul de calcul conceput a fost verificat pentru cazuri concrete de prelucrare, rezultatele obținute atestând viabilitatea acestuia /48,52,144/.

4.4. APRECIERI CU PRIVIRE LA REZULTATELE OBTINUTE

Datele experimentale (tab.4.5) au fost prelucrate cu programul de calcul prezentat, rezultatele obținute fiind sintetizate funcție de criteriul de performanță analizat și regimul de lucru adoptat în tabelele 4.6... 4.13.

În tabele valoarea maximă a dispersiei (D) a fost încadrată, notându-se în partea inferioară locul ocupat de fiecare variabilă, funcție de influența exercitată asupra criteriului de performanță analizat. De asemenea s-a scos în evidență, prin subliniere, valoarea medie maximă sau minimă a nivelului ^{variabilei} care, determină maximizarea sau minimizarea funcției de răspuns.

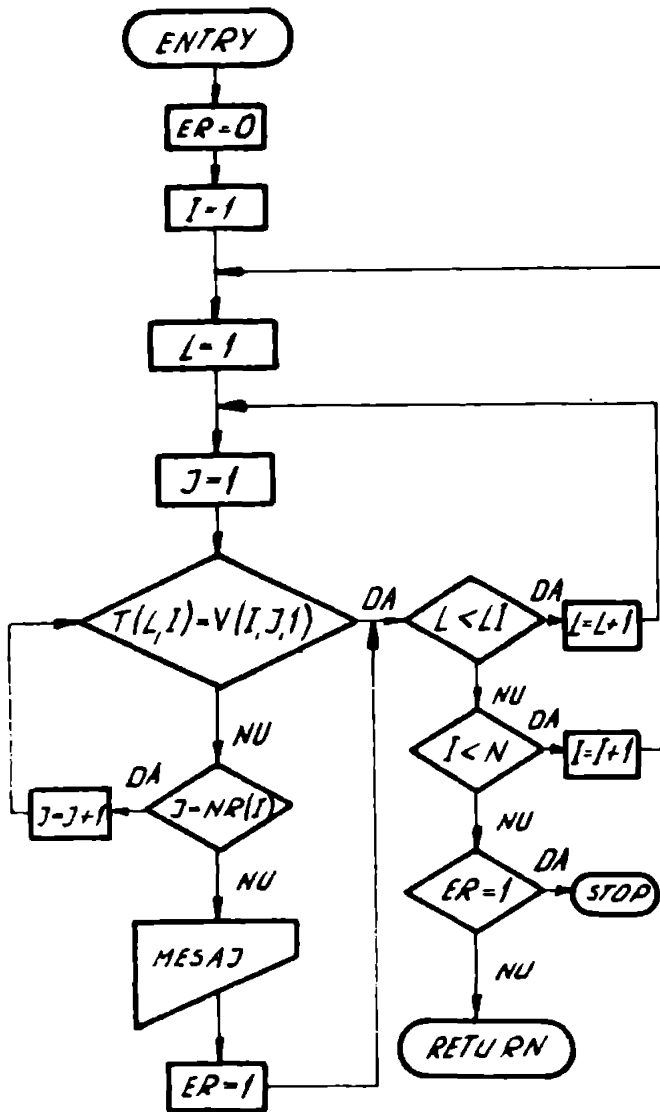


Fig.4.3 Schema logică de verificare a valorilor T

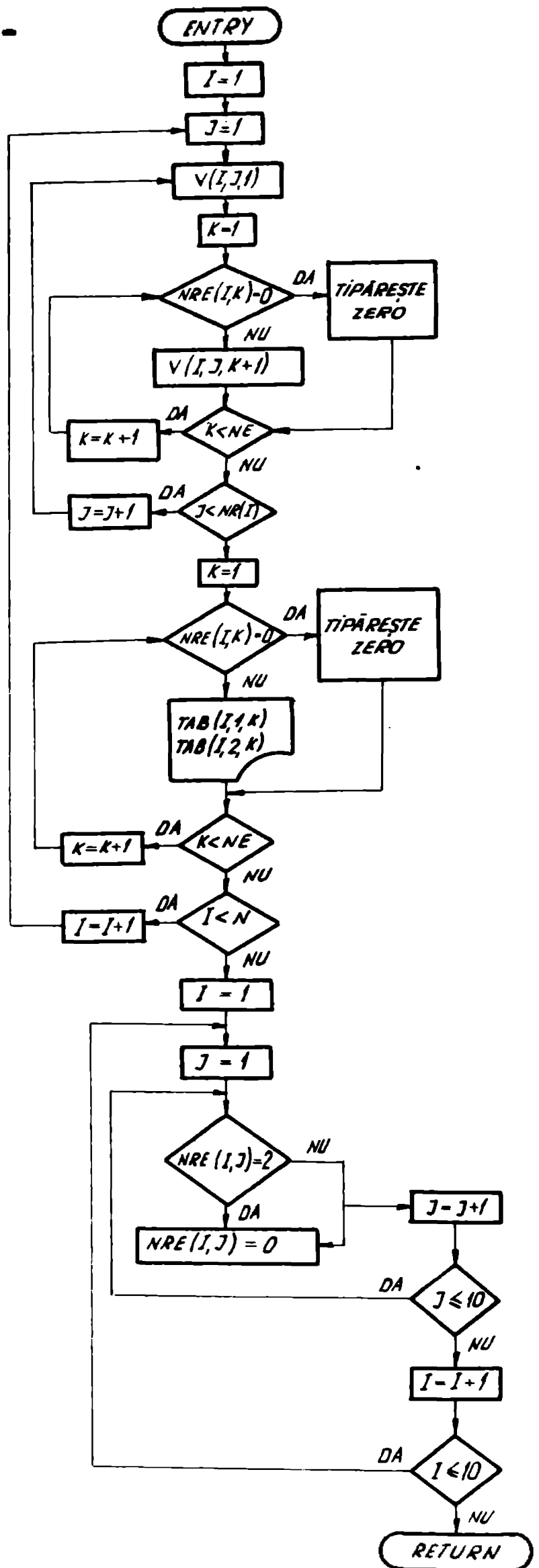


Fig.4.4 Schema logică de listare a valorilor V, TAB

TABELUL 4.6

REGIM DE DEGROȘARE			CRITERIUL DE PERFORMANȚĂ: Q_p									
Nr. var.	Variabilă indep.	Nivel	Valori inițiale		După corecția 1-a		După corecția 2-a		După corecția 3-a		După corecția 4-a	
			\bar{X}	D	\bar{X}	D	\bar{X}	D	\bar{X}	D	\bar{X}	D
1.	Mat P	G10	8,6170		11,5050		10,9867					
		G40	13,8077	13,4835	12,3637	9,1515	13,4360	9,1157				
		G60	22,1005		20,6565		20,1025	II.				
2.	Pol E	⊖	7,7337	14,2160	9,5293	10,6248	11,2121	7,2593	10,2483	9,1868		
		⊕	21,9497		20,1541		18,4714		19,4351		IV.	
3.	i_j [A]	12,5	3,2897									
		25,0	7,6593	30,2865								
		50,0	33,5762	I.								
4.	i_p [us]	12	16,2376		18,5794		18,3743		17,3652		18,5136	
		24	20,7241	13,1606	12,8009	5,7785	13,1805	5,4038	13,2257	4,1395	13,2257	5,7277
		48	7,5635		13,1449		12,9704		13,9342		12,7858	V.
5.	i_i [us]	24	5,0230	26,0299	10,0708	11,6149						
		48	13,1074		13,1074							
		95	10,1835		14,5030							
		190	31,0529		21,6857							
6.	p [bar]	0,1	15,7844		14,8865		15,8202		16,4778		16,4778	
		0,2	13,6644	2,1200	14,9138	0,1889	15,4320	2,5472	15,7834	4,2138	15,7834	4,2138
		0,3	15,0784		14,7248		13,2730		12,2639		12,2639	

TABELUL 4.7

REGIM DE DEGROȘARE			CRITERIUL DE PERFORMANȚĂ: Q_E									
Nr. var.	Variabilă indep.	Nivel	Valori inițiale		După corecția 1-a		După corecția 2-a		După corecția 3-a		După corecția 4-a	
			\bar{X}	D	\bar{X}	D	\bar{X}	D	\bar{X}	D	\bar{X}	D
1.	Mat P	G10	9,6195		12,8857		16,5096		17,6001		18,9015	
		G40	19,1574	9,5380	17,5243	4,6386	15,7124	1,6453	15,3926	3,5065	13,8252	5,0763
		G60	18,3094		16,6763		14,8643		14,0936		14,3597	V.
2.	Pol E	⊖	22,0194	12,6478	22,9432	14,4959						
		⊕	9,3715		8,4477							
3.	i_j [A]	12,5	2,6304									
		25,0	12,0001	29,8255								
		50,0	32,4559	I.								
4.	i_p [us]	12	13,4751		15,5702		13,7583		14,6311			
		24	26,3187	19,0261	19,5716	7,6270	19,5716	5,8151	19,5205	6,5856		
		48	7,2925		11,9445		13,7565		12,9347	IV.		
5.	i_i [us]	24	12,4430	5,3114	17,4139	13,9645						
		48	17,0051		17,0051							
		95	17,7544		21,1636							
		190	15,5793		7,1991							
6.	p [bar]	0,1	15,5869		15,1250		15,1250		15,8446		14,0652	
		0,2	15,3876	0,7241	15,1402	1,6960	15,1402	1,6960	14,0497	3,1422	14,7399	4,2161
		0,3	16,1118		16,8211		16,8211		17,1919		18,2812	

TABELUL 4.8

REGIM DE DEGROSARE				CRITERIUL DE PERFORMANȚĂ: ϵ_p								
Nr. var.	Variabilă indep.	Nivel	Valori inițiale		După corecția 1-a		După corecția 2-a		După corecția 3-a		După corecția 4-a	
			\bar{x}	D	\bar{x}	D	\bar{x}	D	\bar{x}	D	\bar{x}	D
1.	Mat P	610	128,4798		54,3404							
		640	175,8337	143,1657	212,9034	254,3749						
			271,6456		308,7153	"						
2.	Pol. E	⊖	43,7074									
		⊕	340,2653	296,5579								
3.	L_i [A]	12,5	259,0855		272,0158		256,4273		262,0212			
		25,0	104,1679	154,9176	178,3797	46,3797	161,1016	97,9970	153,8178	108,1434		
		50,0	212,7058		175,6360		158,4303		160,0602	"		
4.	L_p [us]	12	136,5386		173,6084		164,2466		200,9585		196,9677	
		24	221,6318	85,0932	221,6318	48,0235	196,5822	50,8839	184,6351	16,3233	191,8439	9,8200
		48	217,7887		180,7189		215,1304		190,3656		187,1476	
5.	L_i [us]	24	87,2349		136,6612		179,0571					
		48	60,4814	263,5136	109,9077	214,0873	83,4805	198,1187				
		95	323,9950		323,9950		281,5992	"				
		190	296,2342		197,3815		223,8087					
6.	p [bar]	Q1	220,1986		220,1986		234,7897		235,6604		230,8968	
		Q2	209,9051	74,3431	209,9051	74,3431	204,6759	98,2961	209,3991	104,7607	232,4442	119,8260
		Q3	145,8555		145,8555		136,4937		130,8997		112,6182	

TABELUL 4.9

REGIM DE DEGROSARE				CRITERIUL DE PERFORMANȚĂ: γ								
Nr. var.	Variabilă indep.	Nivel	Valori inițiale		După corecția 1-a		După corecția 2-a		După corecția 3-a		După corecția 4-a	
			\bar{x}	D	\bar{x}	D	\bar{x}	D	\bar{x}	D	\bar{x}	D
1.	Mat P	610	88,1021		145,0212		143,8342		152,2981		160,7931	
		640	182,2487	143,3193	153,7891	57,9406	164,7094	49,3944	160,4775	36,6984	151,3608	38,2575
		660	231,4213		202,9618		193,2285		188,9966		189,6182	"
2.	Pol. E	⊖	281,0956									
		⊕	53,4191	227,6766								
3.	L_i [A]	12,5	112,1828		140,6424		133,4016					
		25,0	215,4962	103,3134	158,5772	61,9103	167,0049	67,9640				
		50,0	174,0931		202,5527		201,3656	"				
4.	L_p [us]	12	198,9167		170,4571		160,7239		164,9874		156,4407	
		24	179,3208	75,3821	179,3208	27,3267	195,2262	49,4040	182,4040	28,0232	186,3665	29,9259
		48	123,5345		151,9941		145,8221		154,3807		158,9649	
5.	L_i [us]	24	182,7844		144,8384		159,5566		170,8839			
		48	243,8536	164,9694	205,9075	61,0692	202,5842	55,8794	202,5842	72,9335		
		95	163,5071		163,5071		160,1838		165,9106	"		
		190	78,8842		154,7764		146,7048		129,6507			
6.	p [bar]	Q1	137,8209		137,8209							
		Q2	157,7607	68,3695	157,7607	68,3695						
		Q3	206,1904		206,1904							

TABELUL 4.10

REGIM DE FINISARE				CRITERIUL DE PERFORMANȚĂ: Q _p								
Nr. var. indep.	Variabilă	Nivel	Valori inițiale		După corecția 1-a		După corecția 2-a		După corecția 3-a		După corecția 4-a	
			\bar{X}	D	\bar{X}	D	\bar{X}	D	\bar{X}	D	\bar{X}	D
1.	Mat. P	G10	1,5538		1,9443		1,9118		1,9286			
		G40	1,5903	0,5461	1,3951	0,5492	1,4832	0,4287	1,5743	0,3543		
		G60	2,0999		1,9047		1,8491		1,7413	"		
2.	Pol. E	⊖	1,8867	0,1226	1,7472	0,0017	1,8640	0,2319	1,8004	0,1047	1,8455	0,1949
		⊕	1,8094		1,7489		1,6321		1,6957		1,6506	
3.	i _i [A]	3,125	0,1862									
		6,250	1,5063	3,3655								
		12,500	3,5517	"								
4.	t _p [μs]	2,5	1,8963		2,1218		2,1793					
		4	2,3565	1,3651	1,6499	0,6493	1,6489	0,7634				
		6	0,9913		1,4725		1,4159	"				
5.	t _i [μs]	4	0,9035		1,4644							
		6	1,4567	2,1598	1,4567	0,7048						
		8	1,5686		1,9095		"					
		12	3,0633		2,1615		"					
6.	ρ [bar]	0,1	1,7886				1,7584		1,8130		1,8087	
		0,2	1,8584	0,2613	1,7538	0,0265	1,7863	0,1583	1,8693	0,3033	1,9128	0,3893
		0,3	1,5971		1,7319		1,6447		1,5661		1,5235	"

TABELUL 4.11

REGIM DE FINISARE				CRITERIUL DE PERFORMANȚĂ: Q _E								
Nr. var. indep.	Variabilă	Nivel	Valori inițiale		După corecția 1-a		După corecția 2-a		După corecția 3-a		După corecția 4-a	
			\bar{X}	D	\bar{X}	D	\bar{X}	D	\bar{X}	D	\bar{X}	D
1.	Mat. P	G10	1,5874		2,0679		2,4832		2,5981		2,7592	
		G40	2,6022	1,0270	2,3619	0,3062	2,1543	0,3288	2,1471	0,5393	1,9727	0,7865
		G60	2,6144		2,3741		2,1665		2,0588		2,0720	"
2.	Pol. E	⊖	3,0996	1,6631	3,0984	1,6609						
		⊕	1,4364		1,4375		"					
3.	i _i [A]	3,125	0,3457									
		6,250	2,2725	3,8400								
		12,500	4,1857	"								
4.	t _p [μs]	2,5	1,8963		2,4034		2,1958		2,2148			
		4	2,3565	1,3651	2,6711	0,9417	2,6711	0,7340	2,7154	0,8418		
		6	0,9913		1,7295		1,9371		1,8737	"		
5.	t _i [μs]	4	0,9035		2,1664		1,8896					
		6	1,4567	2,1598	2,5211	1,1183	2,2442	0,8617				
		8	1,5686		2,7513		2,7513		"			
		12	3,0633		1,6331		2,1867		"			
6.	ρ [bar]	0,1	1,7886				2,1296			2,1296		2,2817
		0,2	1,8584	0,2613	2,2808	0,2639	2,2808	0,2639	2,1659	0,1905	2,2645	0,4103
		0,3	1,5971		2,3935		2,3935		2,3574		2,4749	

TABELUL 4.12

REGIM DE FINISARE			CRITERIUL DE PERFORMANȚĂ: R_a									
Nr. var.	Variabilă indep.	Nivel	Valori inițiale		După corecția 1-a		După corecția 2-a		După corecția 3-a		După corecția 4-a	
			\bar{X}	D	\bar{X}	D	\bar{X}	D	\bar{X}	D	\bar{X}	D
1.	Mat. P	G10	1,5462		1,6766		1,6702					
		G40	1,7288	0,4888	1,6636	0,3062	1,6569	0,3260				
		G60	2,0350		1,9698		1,9829	III.				
2.	Pol. E	⊖	1,8942	0,2483	1,8898	0,2396	1,9004	0,2608	1,8754	0,2108	1,8754	0,2108
		⊕	1,6458		1,6502		1,6396		1,6646		1,6646	
3.	t_i [A]	3,125	1,2487									
		6,250	1,7875	1,0250								
		12,500	2,2738	I.								
4.	t_p [μs]	2,5	1,8463		1,9092		1,8376		1,7827		1,7806	
		4	1,8725	0,2812	1,6858	0,2234	1,7151	0,1225	1,7450	0,0377	1,6926	0,1442
		6	1,5913		1,7150		1,7574		1,7823		1,8368	
5.	t_i [μs]	4	1,5217		1,6925							
		6	1,9267	0,6183	1,9267	0,3390						
		8	1,5067		1,5877		IV.					
		12	2,1250	1,8731								
6.	p [bar]	0,1	1,8675		1,8697		1,8859		1,9125			
		0,2	1,6563	0,2112	1,5845	0,2852	1,5909	0,2949	1,6192	0,2933		
		0,3	1,7863		1,8558		1,8332		1,7783	IV.		

TABELUL 4.13

REGIM DE FINISARE			CRITERIUL DE PERFORMANȚĂ: δ									
Nr. var.	Variabilă indep.	Nivel	Valori inițiale		După corecția 1-a		După corecția 2-a		După corecția 3-a		După corecția 4-a	
			\bar{X}	D	\bar{X}	D	\bar{X}	D	\bar{X}	D	\bar{X}	D
1.	Mat. P	G10	126,1218		143,3312		137,9061		154,4076		160,6509	
		G40	162,0565	68,0967	143,5204	52,2141	165,0200	44,5647	156,7693	16,8125	145,0864	31,5734
		G60	194,2186		195,5453		179,4708		171,2201		176,6598	
2.	Pol. E	⊖	211,8415	102,0851	193,8019	66,0058	193,8019	66,0057				
		⊕	109,7565		127,7961		III.					
3.	t_i [A]	3,125	197,3865		188,8631		169,9757		178,2264		181,2141	
		6,250	152,9466	65,3226	145,7500	43,1131	170,0625	27,7037	153,5611	27,6169	159,8044	39,8356
		12,500	132,0639		147,7839		142,3588		150,6095		141,3785	V.
4.	t_p [μs]	2,5	184,7178		163,3656		147,2912		139,0405			
		4	158,8143	45,8530	168,8270	18,6228	184,7007	37,4095	184,7007	45,6602		
		6	138,8648		150,2043		150,4052		158,6559	IV.		
5.	t_i [μs]	4	160,4737									
		6	240,5755	148,2888								
		8	149,8600	I.								
		12	92,2867									
6.	p [bar]	0,1	131,2159		139,9020							
		0,2	134,6075	85,3575	117,3981	107,6987						
		0,3	216,5735		225,0968							

In tabelul 4.14 se prezintă sintetic ordonarea variabilelor independente după amplitudinea efectului produs asupra criteriilor de performanță analizate, în cadrul celor două regimuri de lucru - degroșare și finisare.

Totodată din rezultatele prezentate se pot trage concluzii cu privire la nivelele caracteristice ale variabilelor independente.

TABELUL 4.14

REGIM DE DEGROȘARE							REGIM DE FINISARE						
Criteriul de perform.	Ordinea de influență a variabilelor						Criteriul de perform.	Ordinea de influență a variabilelor					
	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.		I.	II.	III.	IV.	V.	VI.
Q_p	I_1	t_1	Mat.P	Pol.E	t_p	p	Q_p	I_1	t_1	t_p	Mat.P	p	Pol.E
Q_E	I_1	Pol.E	t_1	t_p	Mat.P	p	Q_E	I_1	Pol.E	t_1	t_p	Mat.P	p
E_p	Pol.E	Mat.P	t_1	I_1	p	t_p	R_a	I_1	t_1	Mat.P	p	Pol.E	t_p
δ	Pol.E	p	I_1	t_1	Mat.P	t_p	δ	t_1	p	Pol.E	t_p	I_1	Mat.P

In cazul regimului de degroșare, productivitatea prelucrării (Q_p) este influențată în primul rînd de energia descărcării. Intrucît tensiunea medie a descărcării (\bar{u}_1) este constantă pentru o pereche de materiale de electrozi, în cazul analizat $\bar{u}_1 = 20 \pm 3V / \text{cap.} 3.54,99/$, valoarea energiei este dată de curentul mediu al descărcării (treapta de curent) (I_1) și durata impulsului (t_1). Pentru programul experimental prezentat, productivitatea maximă se obține cu treapta cea mai mare de curent $i_{116} = 50A$ și nivelul superior al duratei de impuls considerat $t_{19} = 190 \mu s$.

In continuare în ordinea influenței exercitate asupra productivității urmează materialul piesei și repartiția energiei în interstițiu prin efectul de polaritate. Productivitatea cea mai mare se obține la prelucrarea aliajului dur din sortul G60, electrodul fiind legat la polul pozitiv.

O importanță mai mică revine duratei de pauză (t_p) și presiunii de spălare a interstițiului (p). Valorile maxime s-au obținut la o durată de pauză cît mai scurtă $t_{p5} = 12 \mu s$ și la o presiune de spălare de $p = 0,1 \text{ bar}$.

Analizînd debitul uzurii (Q_E) se remarcă unele inversiuni în ceea ce privește ordinea de influență și mărimea nivelelor variabilelor independente. Astfel cel mai important parametru rămîne curentul mediu al descărcării, care la valoarea cea mai mică a treptei de curent aleasă pentru regimul de degroșare, $i_{14} = 12,5A$ asigură uzura minimă. A doua variabilă ca importanță este de data aceasta polaritatea. Uzura minimă se obține la legarea anodică a electrodului.

În continuarea ordinii de influență urmează durata impulsului ($t_{i9}=190 \mu s$) și durata pauzei ($t_{p7}=48 \mu s$). Influența cea mai mică o exercită materialul piesei și presiunea de spălare a interstițiului.

Analizând coeficientul de prelucrabilitate se remarcă influența hotărâtoare a polarității. Cea mai bună prelucrabilitate se obține în cazul când electrodul este legat la polul pozitiv.

Natura și compoziția chimică a materialului piesei de prelucrat reprezintă a doua variabilă în ordinea importanței. Prelucrabilitatea cea mai bună se obține în cazul aliajului dur din sortul G60.

În continuare prelucrabilitatea este influențată de energia descărcării prin durata impulsului (t_i) și curentul mediu al descărcării (\bar{I}_i). Ponderea cea mai mică fiind exercitată de presiunea de spălare a interstițiului (p) și durata pauzei (t_p).

Coeficientul de uzură relativă (δ) este influențat în primul rând de repartiția energiei în interstițiu. Valoarea minimă a acestui coeficient se asigură în cazul când electrodul este legat la polul pozitiv.

A doua variabilă în ordinea de influență este presiunea de spălare a interstițiului de lucru. Cu creșterea presiunii se favorizează îndepărtarea din interstițiu a particulelor, ^{prelevate} dar se influențează în mod negativ fenomenul de producere al descărcărilor și se accentuează uzura. Valoarea minimă a uzurii relative se obține la o presiune $p = 0,1$ bar.

În continuare, uzura relativă este influențată de energia descărcării prin curentul mediu al descărcării (\bar{I}_i) și durata impulsului (t_i). Valorile minime se obțin pentru $\bar{I}_{i4} = 12,5$ A și $t_{i9} = 190 \mu s$.

Materialul piesei de prelucrat și durata pauzei exercită o influență mai slabă asupra uzurii relative.

În cazul regimului de finisare, productivitatea prelucrării este influențată în principal de aceleași variabile întâlnite și la regimul de degroșare. Productivitatea maximă se obține cu treapta de curent, cea mai mare aleasă pentru acest regim $\bar{I}_{i4} = 12,5$ A și durata de impuls cea mai lungă $t_{i5} = 12 \mu s$.

A treia variabilă în ordinea importanței este durata pauzei. Productivitatea crește cu scăderea timpului de pauză, atingând valoarea maximă la valoarea cea mai mică aleasă pentru regimul de finisare $t_{i1} = 2,5 \mu s$.

Natura și compoziția chimică a materialului piesei, constituie a patra mărime în ordinea ierarhică stabilită, Productivitatea maximă se obține la prelucrarea aliajului dur din sortul 010, care conține cantitatea cea mai mică de Co (6%). Această deosebire față de regimul de degroșare, unde productivitatea crește cu conținutul în cobalt (060) se poate pune pe seama mecanismului prelucrării, care diferă funcție de regimul adoptat și materialul piesei.

Presiunea de spălare a interstițiului (p) și polaritatea sînt variabile independente cu influență mai slabă asupra productivității. Față de regimul de degroșare, productivitatea prelucrării este mai mare în cazul în care electrodul este legat la polul negativ.

Analizînd debitul uzurii (Q_p) se remarcă că ordinea de influență a variabilelor este identică cu cea stabilită în regimul de degroșare.

Rugozitatea suprafețelor prelucrate, criteriul R_a , este influențată de energia descărcării și materialul piesei de prelucrat. Rugozități mici se obțin cu curenți mici ($i_{11}=3,125$ A) și durate lungi ale impulsului ($t_{14}=8\mu s$). În aliaje dure au conținut ridicat de Co.

Rugozități mici se obțin la presiuni de spălare a interstițiului $p=0,2$ bar și legarea anodică a electrodului.

Influența cea mai slabă asupra rugozității o exercită durata pauzei (t_p).

Comparînd ordinea de influență a variabilelor asupra coeficientului de uzură relativă (γ) în cazul celor două regimuri, se remarcă inversiuni în ordinea de influență.

Variabila cu ponderea cea mai mare este durata impulsului (t_1). Cu creșterea duratei impulsului se obțin valori mai favorabile pentru coeficientul de uzură relativă.

A doua variabilă de influență este ea și în cazul regimului de degroșare, presiunea de spălare a interstițiului. Valorile minime ale coeficientului de uzură se obțin pentru presiunea $p=0,2$ bar., valoare mai mare decît în cazul regimului de degroșare. Această modificare se poate pune pe seama reducerii interstițiului.

Repartiția energiei influențează prin polaritatea aleasă uzura relativă. Valori minime se obțin la legarea anodică a electrodului.

Următoarele variabile în ordinea de influență și nivele co-responsabile pentru o uzură relativă minimă sînt durata pauzei $t_{pl} = 2,5 \mu s$ curentul mediu al descărcării $\bar{I}_{14} = 12,5$ A și materialul piesei de prelucrat.

În urma analizei rezultatelor obținute se pot face aprecieri și recomandări cu privire la prelucrarea prin eroziune electrică a aliajelor dure din grupa de utilizare G.

Productivitatea prelucrării este influențată în mare măsură de energia descărcării prin curentul mediu al descărcării (\bar{I}_1) (treapta de curent) și durata descărcării (t_1).

Materialul de prelucrat influențează la rîndul său productivitatea, prin constantele termofizice care îl caracterizează. Cu cît conductivitatea termică a unui material este mai mică, prelucrarea este mai intensă datorită reducerii pierderilor de căldură.

Obținerea unei productivități maxime cu uzuri minime este influențată în mare măsură și de polaritate. La regimul de degroșare, curenți de descărcare mari și durate lungi ale impulsului, se recomandă legarea anodică a electrodului. În cazul regimului de finisare, curenți de descărcare mici și durate scurte ale impulsului, se obțin rezultate mai bune cînd electrodul se leagă la polul negativ.

În cazul prelucrării aliajelor dure cu generatoare de relaxare /65/, s-a arătat că legarea electrodului la anod este de asemenea mai favorabilă.

Pașă de cele prezentate în cazul prelucrării aliajelor dure cu electrozi din grafit, legați la polul pozitiv, procesul este instabil /99/. Inversarea polarității duce la stabilizarea procesului, rezultatele obținute fiind foarte bune.

Între conținutul în Co a aliajelor dure și polaritatea electrodului există de asemenea o strînsă legătură. La un conținut bogat în Co se obțin rezultate mai bune în cazul legării electrodului la anod. La prelucrarea aliajelor dure din sortul G10, G20, G30 se recomandă legarea electrodului la polul negativ iar pentru celelalte sorturi, cu conținut mai bogat de Co, legarea anodică a electrodului.

La prelucrarea aliajelor dure cu electrozi din cupru, uzura relativă scade cu creșterea duratei impulsului (t_1). Această comportare se poate pune pe seama conductivității termice bune a cuprului, care la durate lungi permite disiparea mai bună a energiei

transmise electrodului și deci o uzură mai scăzută a acestuia /107/.

La durate scurte ale impulsului (regim de finisare) productivitatea scade cu creșterea conținutului de Co, iar spre durate de impuls mai lungi aceste diferențe se reduc. În cazul regimului de finisare, datorită duratei scurte a impulsului, gradientii termici sînt mai mari, astfel încît în material se produc tensiuni interne cu atît mai mari cu cît conținutul în Co este mai redus. În aceste materiale aportul factorilor mecanici ai prelevării este mai pronunțat contribuind la mărirea productivității.

Eficiența maximă a prelucrării este asigurată la spălarea interstițiului de lucru cu o presiune $p = 0,1 \dots 0,2$ bar.

Calitatea suprafeței, caracterizată de adîncimea și diametrul craterelor formate de descărcările electrice singulare, este influențată de energia descărcării prin durata impulsului (t_1) și curentul mediu al descărcării (\bar{I}_1). Rugozitatea crește cu creșterea energiei descărcării. La aliajele dure cu conținut mai ridicat de Co, calitatea suprafeței este mai bună datorită cobaltului, care contribuie la aplatizarea craterelor formate.

Pe baza rezultatelor obținute prin metoda bilanțului alecteriu, s-a adus o contribuție la o problemă nerezolvată univec pînă în prezent, de stabilire a unei ierarhizări a influenței factorilor și parametrilor de intrare reglabili, care determină mărimile de ieșire ale sistemului prin valorile caracteristicilor tehnologice pentru cazul prelucrării aliajelor dure din grupa de utilizare G.

Totodată pe baza rezultatelor obținute se pot selecta variabilele cu ponderea cea mai mare asupra criteriilor de performanță analizate, cu nivelele caracteristice corespunzătoare, în vederea elaborării unui model matematic al procesului de prelucrare prin eroziune electrică a aliajelor dure analizate.

C A P I T O L U L 5

MODEL MATEMATIC AL PROCESULUI TEHNOLOGIC DE PRE- LUCRAREA DIMENSIONALA PRIN EROZIUNE ELECTRICA A ALIAJELOR DURE DIN GRUPE DE UTILIZARE G,

5.1. MODELAREA PROCESULUI DE PRELUCRARE.

Modelarea este o fază deosebit de importantă a cercetării, utilizată ca mijloc de investigare a procesului de prelucrare. Prin model, în accepția științifică a cuvintului, se înțelege un sistem teoretic cu ajutorul căruia pot fi studiate indirect proprietățile și transformările unui alt sistem complex, cu care modelul prezintă o anumită analogie /10,11,12/.

Modelul statistic al unui proces înlocuiește un model real, care ar putea fi obținut numai prin efectuarea unui număr infinit de experiențe. Metoda de interferență statistică limitează experiențele numai la o selecție din întreaga populație /8,19,20,21, 33,58,75,96,113,123,125,126,127,128,163,168,182,199,210,216,227/.

Procesul de prelucrare prin eroziune electrică este un sistem complex de acțiune, format dintr-un număr mare de factori și parametri legați între ei prin relații de interdependență, care dirijează transformările tehnologice /2,156,174/. Mărimile de intrare în sistem (variabilele independente), care prezintă interes pentru operator, sînt reprezentate de parametri reglabili ai utilajului de prelucrare, așa numitul regim de lucru, iar caracteristicile tehnologice urmărite reprezintă funcțiile de răspuns ale sistemului (variabilele dependente).

Datorită combinațiilor multiple dintre factori, legătura dintre parametri reglabili ai procesului și caracteristicile tehnologice, este o legătură statistică numită și legătură de corelație. Pentru caracterizarea acestei legături este necesar să se rezolve următoarele probleme :

- să se găsească o funcție matematică, pe baza analizei de regresie, care să determine forma legăturii;

- să se caracterizeze prin analiza de corelație, în ce măsură funcția matematică găsită, denumită model matematic al procesului a reușit să descrie corect starea sistemului.

Metodele statistice ale teoriei corelației multiple permit măsurarea influenței comune a mai multor parametri, asupra caracteristicii tehnologice considerate.

5.2. PROGRAMAREA EXPERIENȚELOR

Pentru a evidenția efectul influenței parametrilor procesului de prelucrare asupra caracteristicilor tehnologice, trebuie găsit un sistem de programare a experiențelor, care să furnizeze un volum de informații cât mai mare. În procedeele tradiționale de experimentare, pentru găsirea parametrilor optimi ai unui proces, se modifică de obicei numai un singur factor, în timp ce restul factorilor se mențin la valori constante. Această metodă de cercetare are dezavantajul că necesită un număr mare de experiențe, nu sesizează interacțiunea factorilor și există posibilitatea ca punctul optim al procesului să fie ecclit.

Din aceste considerente s-a adoptat un sistem de experimentare programat statistic, la care valorile mai multor factori independenți au fost variate simultan, iar efectele fiecăruia precum și cele ale interacțiunilor lor, au fost determinate separat.

5.2.1. Program factorial de experimentare

Metoda experiențelor factoriale se caracterizează printr-un program, care cuprinde numai experiențele strict necesare pentru obținerea informațiilor dorite privind procesul de prelucrare studiat /6,10,11,12,28,29,71,122,133,176,177,188/. Experimentul factorial face posibilă estimarea efectelor factorilor și interacțiunii dintre ei, respectiv formularea ecuației, care descrie această funcție sub forma unui polinom.

Intr-un program factorial variabilele iau un număr limitat de valori, numite nivele. Programul factorial utilizează toate combinațiile posibile ale variabilelor și nivelelor, pentru alcătuirea unei matrici de experimentare.

Dintre tipurile de experiențe factoriale s-a ales un program factorial cu două nivele. Numărul experiențelor este în acest caz 2^k , k fiind numărul variabilelor independente luate în considerare. Variabilele independente se notează cu litere majuscule A, B, C, ... precisând nivelele corespunzătoare prin indicii 1 (nivelul inferior) și 2 (nivelul

superior). Pentru simplificarea reprezentării se introduce notația cu litere latine mici. Se scrie litera latină mică ce corespunde variabilei cu nivelul superior și se omiț variabilele cu nivelul inferior. Combinația tuturor variabilelor la nivelul inferior se notează prin convenție cu (1). Schema aranjamentului factorial complet de tipul 2^3 se prezintă în tabelul 5.1.

TABELUL 5.1

C_1				C_2			
B_1		B_2		B_1		B_2	
A_1	A_2	A_1	A_2	A_1	A_2	A_1	A_2
$A_1B_1C_1$	$A_2B_1C_1$	$A_1B_2C_1$	$A_2B_2C_1$	$A_1B_1C_2$	$A_2B_1C_2$	$A_1B_2C_2$	$A_2B_2C_2$
(1)	a	b	ab	c	ac	bc	abc

5.2.2. Date experimentale

În capitolul precedent s-a stabilit ordinea ponderii de influență a variabilelor independente asupra funcțiilor de răspuns, în cazul prelucrării celor trei sorturi de aliaje dure din grupa de utilizare G. Pe această bază s-au putut alege principalii trei parametri reglabili care au ponderea cea mai mare asupra funcției de răspuns considerate. Nivelul superior și inferior al variabilelor independente considerate, se alege funcție de rezultatele obținute (tab.4.6.-tab.4-13). Nivelele corespunzătoare valorilor maxime sau minime ale funcției de răspuns, au fost evidențiate prin subliniere.

Pe baza acestor considerente s-au ales variabilele independente pentru prelucrarea celor trei sorturi de aliaje dure din grupa de utilizare G, în regim de degroșare și regim de finisare, cu nivelele corespunzătoare (tabelul 5.2.).

TABELUL 5.2

NIVELELE VARIABILELOR		REGIM DE DEGROȘARE			REGIM DE FINISARE		
		X_1 [μs]	X_2 [μs]	X_3 [A]	X_1 [μs]	X_2 [μs]	X_3 [A]
Nivel de bază	X_{10}	18	142,5	37,5	3,25	10	9,375
Interval de variație	ΔX_i	12	95	25	1,50	4	6,25
Nivel superior	+1	12	190	50	2,50	12	12,50
Nivel inferior	-1	24	95	25	4,00	8	6,25

Variabilele independente considerate sînt :

X_1 - durata pauzei / μ s/

X_2 - durata impulsului / μ s/

X_3 - curentul mediu al descărcării (treapta de curent)/A/

Ceilalți parametri reglabili au fost menținuți la nivele constante, corespunzătoare obținerii valorilor dorite ale funcțiilor de răspuns. În toate experiențele electrozii au fost din cupru electrolitic, cu aleeaj central, legați la polul pozitiv. Această regulă nu s-a respectat în cazul prelucrării sortului Glo, unde datorită instabilității procesului, s-a lucrat cu electrozii legați la catod, ceea ce confirmă rezultatele obținute în capitolele precedente.

Presiunea de spălare a interstițiului tehnologic s-a menținut constantă la $p=0,1$ bar. Durata unei experiențe a fost de 15 minute, fiecare experiență fiind repetată de trei ori.

Incercările experimentale și determinarea rezultatelor au fost efectuate în aceleași condiții, descrise în capitolele precedente.

În vederea realizării tuturor combinațiilor posibile ale variabililor și nivelelor, s-a alcătuit o matrice experimentală cu valori codificate, prezentate în tabelul 5.3

TABELUL 5.3

Nr. exp	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$	Simbol	Funcție de răspuns
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	(1)	Y_1
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	a	Y_2
3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	b	Y_3
4	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	ab	Y_4
5	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	c	Y_5
6	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	ac	Y_6
7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	bc	Y_7
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	abc	Y_8

Valorile reale ale variabilelor independente s-au transformat în valori codificate, care permit exprimarea fiecărui interval de sondaj între limitele - 1 și + 1, conform relației :

$$x_i = \frac{X_i - X_{i0}}{\Delta X_i} \quad (5.1)$$

unde: x_i - valoarea codificată a variabilei,
 X_i - valoarea reală a variabilei,

X_{10} - valoarea reală a variabilei la nivelul de basă,
 ΔX_1 - intervalul de variație al variabilei reale.

Pentru calculul mediei funcției de răspuns, s-a introdus o variabilă fictivă X_0 . De asemenea pentru o mai mare claritate s-au introdus și simbolurile prezentate și discutate în tab.5.1.

Matricea de experimentare cuprinsind valorile reale ale variabililor independente, pentru regimul de degroșare și finisare, se prezintă în tabelul 5.4.

TABELUL 5.4

Nr. exp.	REGIM DE DEGROȘARE			REGIM DE FINISARE		
	$X_1, [\mu s]$	$X_2, [\mu s]$	$X_3, [A]$	$X_1, [\mu s]$	$X_2, [\mu s]$	$X_3, [A]$
1	24	95	25	4	8	6,25
2	12	95	25	2,5	8	6,25
3	24	195	25	4	12	6,25
4	12	190	25	2,5	12	6,25
5	24	95	50	4	8	12,5
6	12	95	50	2,5	8	12,5
7	24	190	50	4	12	12,5
8	12	190	50	2,5	12	12,5

5.2.3. Testarea datelor experimentale

Pentru fiecare experiență s-au calculat valorile funcțiilor de răspuns caracteristice: Q_p (mm³/min), R_a / μm /, Q_g /mm³/min/ și γ /%/ (tab.4.4.). Pe baza valorilor obținute s-a calculat media aritmetică a rezultatelor replicilor pentru experimentul considerat cu relația :

$$\bar{y}_e = \left(\sum_{r=1}^n y_{er} \right) / n \quad (5.2)$$

unde $r = 1 \dots n$ numărul de replici (repetări) ale fiecărui experiment
 $e = 1 \dots N$ numărul de experiențe,

y_{er} - rezultatul replicii r din experimentul e ,

\bar{y}_e - media aritmetică a rezultatelor celor n replici ale experimentului e .

Acceptându-se aprioric o repartiție normală a rezultatelor, s-au calculat dispersiile funcțiilor de răspuns cu relația :

$$S_{ye}^2 = \left(\sum_{r=1}^n (y_{er} - \bar{y}_e)^2 \right) / (n-1) \quad (5.3)$$

Rezultatele obținute pentru cele două regimuri de lucru, cele trei sorturi de aliaje dure și condițiile considerate, se prezintă sintetic în tabelul 5.5 și tab. 5.6.

TABELUL 5.5

P	No	Q_p [mm^3/min]		R_p [μm]		Q_e [mm^3/min]		γ [%]	
		\bar{y}_p	s_{yp}^2	\bar{y}_r	s_{rp}^2	\bar{y}_e	s_{ep}^2	\bar{y}_γ	$s_{\gamma p}^2$
610	1	11,8557	0,5005	2,99	0,2107 *	12,0030	10,4525	102,2386	113,6132
	2	10,7808	1,1177	2,91	0,0439	12,7644	8,7195	120,2076	1532,0880
	3	12,8735	1,8863	2,81	0,1506	14,0551	13,0985	111,3117	1599,1096 *
	4	13,5133	0,2311	2,97	0,0741	14,3824	5,9754	106,8208	479,1339
	5	27,2766	0,5470	3,30	0,0838	59,2577	6,5016	217,2009	11,9649
	6	25,6887	7,3471 *	3,34	0,0201	57,5637	11,8716	226,2446	1392,5528
	7	32,2417	1,0874	3,64	0,0343	70,9427	20,7252	220,3801	452,8575
	8	29,9239	1,7339	3,52	0,0057	80,7075	39,8823 *	269,5056	85,4670
		$\sum_{p=1}^8 s_{yp}^2$	14,4610		0,6230		1172266		6666,7869
		G_c	0,5081		0,3382		0,3402		0,2399
	s_y^2	1,8076		0,0779		14,8533		833,3484	
640	1	20,4140	6,4658	3,91	0,1488	4,5426	0,0567	22,5582	13,7055
	2	18,7200	13,1941	3,87	0,0680	4,0392	0,5020	21,8036	11,6035
	3	15,5393	2,9810	3,58	0,0003	3,0275	0,0381	19,7177	10,3446
	4	16,0056	3,1740	3,92	0,0357	3,1451	0,1525	19,9540	18,3292
	5	47,6015	20,7033	5,07	0,2386 *	18,0891	4,1389 *	38,3040	38,8388
	6	47,8494	19,5780	4,68	0,2041	17,8450	3,4608	37,8855	44,7140 *
	7	40,6673	0,0674	4,83	0,0157	12,6145	2,9560	31,0374	19,4424
	8	40,7552	38,5803 *	4,74	0,0076	12,5373	1,6093	31,3036	39,1898
		$\sum_{p=1}^8 s_{yp}^2$	99,8939		0,7136		12,9121		196,1648
		G_c	0,3369		0,3358		0,3206		0,2278
	s_y^2	12,4617		0,0892		1,6140		26,5206	
680	1	31,4469	1,8879	3,05	0,0240	4,4065	0,1253	14,0522	2,4810 *
	2	29,0493	4,2722	3,44	0,0446	4,1863	0,0222	14,3082	2,1629
	3	25,7365	2,4862	3,18	0,0840	2,8652	0,0799	11,1235	0,4539
	4	25,3819	3,3854	2,98	0,2275	2,7296	0,0713	10,7379	0,1045
	5	63,5092	118,5391 *	4,90	0,0122	12,9847	1,8994 *	20,8213	2,4417
	6	70,7606	3,8502	4,44	0,0272	14,2287	0,2695	20,1108	0,3758
	7	56,5493	83,2225	4,46	0,0121	8,3668	0,8678	16,6995	1,8019
	8	60,9769	53,5703	4,84	0,2871 *	9,6450	1,2304	15,8234	0,0771
		$\sum_{p=1}^8 s_{yp}^2$	281,1818		0,6787		4,5719		9,8383
		G_c	0,4216		0,4377		0,4155		0,2522
	s_y^2	35,1452		0,0868		0,5715		1,2298	

TABELUL 5.6

Materi P	Nr. exp.	Q_p [mm^3/min]		R_a [μm]		Q_E [mm^3/min]		δ [%]			
		\bar{y}_e	$s_{y_e}^2$	\bar{y}_e	$s_{y_e}^2$	\bar{y}_e	$s_{y_e}^2$	\bar{y}_e	$s_{y_e}^2$		
G10	1	0,8183	0,0284	1,39	0,0012	0,6145	0,0056	75,9603	46,5034		
	2	0,7228	0,0622	1,31	0,0031	0,5034	0,0423	68,7725	115,9050		
	3	1,0105	0,0005	1,45	0,0005	0,6085	0,0024	60,2513	28,2280		
	4	0,7853	0,1392 *	1,45	0,0006	0,4794	0,0501	61,0177	3,0624		
	5	2,9176	0,0164	2,29	0,0097	3,4173	0,0801	117,3655	145,7971		
	6	2,9652	0,0182	2,19	0,0037	3,2664	0,1106 *	109,9799	45,0505		
	7	3,6994	0,1121	2,28	0,0165	2,9693	0,0449	81,0287	160,8168 *		
	8	3,1976	0,0000	2,18	0,0208 *	2,8372	0,0589	88,7349	59,0403		
		$\sum_{e=1}^N s_{y_e}^2$		0,3770			0,0561			0,3949	604,4035
		G_c		0,3692			0,3708			0,2801	0,2661
	s_y^2		0,0471			0,0070			0,0494	75,5504	
G40	1	1,1610	0,3156	1,34	0,0200	0,5785	0,0137	54,0605	171,8308		
	2	0,9829	0,1634	1,35	0,0013	1,4901	0,0034	53,4964	177,5781		
	3	1,4553	0,2911	1,40	0,0064	0,5680	0,0031	41,6068	120,5502		
	4	1,4142	0,1789	1,28	0,0027	0,4916	0,0020	36,5689	85,0612		
	5	3,6728	1,0407 *	2,30	0,0046	2,5463	0,0249 *	72,1042	228,7131 *		
	6	2,8591	0,0435	2,21	0,0032	2,4412	0,0082	85,5492	12,7720		
	7	5,2711	0,7829	2,52	0,0386 *	2,3476	0,0106	45,1180	27,4511		
	8	5,0617	0,2748	2,41	0,0096	2,2197	0,0162	44,0670	14,9822		
		$\sum_{e=1}^N s_{y_e}^2$		3,0909			0,0864			0,0821	838,9387
		G_c		0,3367			0,4468			0,3033	0,2726
	s_y^2		0,3864			0,0108			0,0103	104,8673	
G60	1	1,8767	0,1012	1,39	0,0000	0,8597	0,0016	46,7678	73,9320		
	2	1,7828	0,0802	1,53	0,0019	0,7600	0,0029	43,5850	81,7642		
	3	2,3090	0,0333	1,45	0,0177	0,8384	0,0008	36,4165	4,5166		
	4	1,8946	0,0302	1,45	0,0020	0,6634	0,0000	35,2203	11,1029		
	5	4,2637	0,5669 *	2,40	0,0272	3,3770	0,1583 *	81,0517	248,6571 *		
	6	3,7594	0,0510	2,32	0,0184	3,1750	0,0389	84,6608	28,1388		
	7	5,5854	0,0808	2,77	0,0362 *	3,1034	0,0002	55,6523	7,0886		
	8	5,1603	0,2932	2,69	0,0343	2,8469	0,0014	55,6076	39,0820		
		$\sum_{e=1}^N s_{y_e}^2$		1,2368			0,1377			0,2041	494,2822
		G_c		0,4584			0,2629			0,3624	0,5030
	s_y^2		0,1546			0,0172			0,0255	61,7853	

Omoogenitatea dispersiilor a fost verificată cu ajutorul criteriului Cochran :

$$G_0 = \frac{(S_{y_0}^2)_{\max}}{\sum_{e=1}^N S_{y_0}^2} \quad (5.4)$$

unde $(S_{y_0}^2)_{\max}$ reprezintă valoarea maximă din șirul de dispersii calculate pentru experiențele $e = 1 \dots N$.

Această valoare a fost verificată cu valoarea tabulată $G_T(m_1; m_2; \alpha)$ /10,11,85,132,188,206,212,213/ unde m_1 și m_2 reprezintă gradele de libertate iar α pragul de semnificație. Pentru $m_1 = N = 8$, $m_2 = n-1 = 3-1 = 2$, și $\alpha = 0,05$ se obține $G_T(8; 2; 0,05) = 0,5157$.

Dispersiile se consideră omogene atunci cînd este îndeplinită condiția :

$$G_0 < G_T(m_1; m_2; \alpha) \quad (5.5)$$

Tot în cadrul tabelelor s-a calculat dispersia erorii experimentale, necesară pentru obținerea pragului de semnificație a coeficienților de regresie cu relația :

$$S_y^2 = \left(\sum_{e=1}^N S_{y_0}^2 \right) / N \quad (5.6)$$

Numărul gradelor de libertate considerate la determinarea acestei dispersii, s-a notat cu f_2 și se determină în relația $f_2 = N(n-1)$ (5.7)

Din analiza rezultatelor obținute se poate trage concluzia, că toate dispersiile calculate sînt omogene, fiind îndeplinită condiția (5.5).

5.3. ANALIZA DE REGRESIE

Pentru exprimarea dependenței dintre două sau mai multe variabile cu ajutorul unei funcții matematice, se folosește analiza de regresie /49,51,52,155,180/. La un număr mai mare de variabile independente, funcția nu poate fi reprezentată grafic, ci numai analitic sub forma unei funcții matematice cu mai multe variabile.

Modelul matematic al unui proces reprezintă o relație funcțio-

nală, între funcția de răspuns η și variabilele independente $x_1, x_2, x_3, \dots, x_k$, care pot fi măsurate și controlate. Realitatea fizică satisface dependența :

$$\eta = f(x_1, x_2, \dots, x_k) \quad (5.8)$$

Dezvoltând funcția f , datorită complexității fenomenelor, forma funcției f , nu poate fi cunoscută exact, însă poate fi determinată cu o oarecare aproximație, pe cale experimentală. Dezvoltând funcția în serie Taylor, în jurul unui punct, considerat centrul experimentului de coordonate $(x_{10}, x_{20}, \dots, x_{k0})$, se obține :

$$\eta = f(x_{10}) + \sum_{i=1}^k \left. \frac{\partial f}{\partial x_i} \right|_{x_{10}} \cdot x_i + \sum_{i < j}^k \left. \frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j} \right|_{x_{10}} \cdot x_i x_j + \dots \quad (5.9)$$

Intrucât nu se pot calcula derivatele parțiale, funcția necunoscută f se înlocuiește cu o expresie polinomială de forma :

$$\eta = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i < j}^k \beta_{ij} x_i x_j + \dots \quad (5.10)$$

unde: $\beta_0, \beta_i, \beta_{ij}, \dots$ reprezintă coeficienții de regresie teoretici.

Expresia funcției de estimare a funcției teoretice η este:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i < j}^k b_{ij} x_i x_j + \dots \quad (5.11)$$

în care b_0, b_i, b_{ij}, \dots reprezintă estimațiile absolut corecte ale valorilor teoretice ale coeficienților de regresie.

Experimentul factorial beneficiază de proprietatea de ortogonalitate, care asigură estimarea independentă a coeficienților modelului, deoarece estimațiile de cel mai mic pătrat al coeficienților sînt funcții ortogonale de observații.

Pentru experimentul factorial complet 2^3 ecuația regresiei multiple liniare are forma generală :

$$Y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{123} x_1 x_2 x_3 \quad (5.12)$$

În acest caz, suprafața de regresie liniară a lui Y în raport cu x_1, x_2, \dots, x_n reprezintă un hiperplan în spațiul euclidian cu $n+1$ dimensiuni.

5.3.1. Calculul coeficienților de regresie

Estimațiile coeficienților de regresie pentru ecuația (5.12) se pot calcula prin metoda celor mai mici pătrate /6,10,11,28,29, 71,176,177,187/.

Intrucât experimentul s-a efectuat după o schemă ortogonală, se pot aplica expresii de calcul rezultate din utilizarea coloanelor matricei experimentale (tabelul 5.3) /2,6,10,11/.

Expresiile de calcul ale coeficienților de regresie :

$$b_i = \frac{1}{N} \cdot \sum_{e=1}^N x_{ie} \cdot \bar{y}_e \quad (5.13)$$

unde $i = 0, 1, 2, 3, \dots, k$ este numărul factorilor,

$$b_{iu} = \frac{1}{N} \sum_{e=1}^N (x_i \cdot x_u)_e \cdot \bar{y}_e \quad (5.14)$$

$$b_{inv} = \frac{1}{N} \sum_{e=1}^N (x_i \cdot x_u \cdot x_v)_e \cdot \bar{y}_e \quad (5.15)$$

unde $i \neq u \neq v = 1, 2, 3$, reprezintă numărul de ordine al variabilelor independente în interacțiune.

Valorile coeficienților de regresie pentru cele două regiuri de lucru, și funcțiile de răspuns considerate, se prezintă în tabelul 5.7 și tabelul 5.8.

5.3.2. Testarea semnificației coeficienților de regresie

Coefficienții de regresie calculați se consideră semnificativi atunci, când în valoare absolută depășesc o valoare critică de semnificație notată cu b_T .

$$|b_i| \geq b_T \quad (5.16)$$

unde: $b_T = t(\alpha, f_2) \cdot S_{b_i} \quad (5.17)$

$t(\alpha; f_2)$ - este valoarea tabulată a unei variabile aleatoare cu distribuție de repartiție cunoscută, distribuția Student /29, 29,71,122,176,177,187/ cu care se testează semnificația coeficienților, funcție de pragul de semnificație (α) acceptat și numărul de grade de libertate (f_2). Pentru $\alpha = 0,05$ și $f_2 = N(n-1) = 8(3-1) = 16$, valoarea tabulată este : $t(0,05; 16) = 2,120$.

S_{b_i} - este abaterea standard a estimațiilor coeficienților de regresie calculată cu relația :

$$s_{bi} = \sqrt{s_{bi}^2} = \sqrt{\frac{s_y^2}{n \cdot N}} \quad (5.18)$$

unde: s_y^2 - este dispersia erorii experimentale (rel.5.6)

n - este numărul replicilor

N - este numărul experiențelor

În tabelele 5.7 și 5.8 s-au marcat cu semnul * coeficienții semnificativi rezultați în urma testului aplicat. Coeficienții nesemnificativi, se pot exclude din model.

5.4. VERIFICAREA ADECVANTEI MODELELOR MATEMATICE

În urma testelor aplicate s-au obținut următoarele modele matematice, pentru prelucrarea prin eroziune electrică a celor trei sorturi de aliaje dure din grupa de utilizare G.

$$Y'_{QP;G10} = 20,5178 + 1,6203 x_2 + 8,2595 x_3 \quad (5.19)$$

$$Y'_{QE;G10} = 40,2096 + 4,8124 x_2 + 26,9083 x_3 + 3,8948 x_2 x_3 \quad (5.20)$$

$$Y'_{Ra;G10} = 3,19 + 0,27 x_3 \quad (5.21)$$

$$Y'_{\delta;G10} = 171,7387 + 30,8255 x_2 + 61,5941 x_3 \quad (5.22)$$

$$Y'_{QP;G40} = 30,3440 - 2,7022 x_2 + 13,2743 x_3 \quad (5.23)$$

$$Y'_{QE;G40} = 9,4790 - 1,6479 x_2 + 5,7904 x_3 - 1,0456 x_2 x_3 \quad (5.24)$$

$$Y'_{Ra;G40} = 4,3350 + 0,5200 x_3 \quad (5.25)$$

$$Y'_{\delta;G40} = 27,7956 - 2,2925 x_2 + 6,7870 x_3 \quad (5.26)$$

$$Y'_{QP;G60} = 45,4266 - 3,2649 x_2 + 17,5224 x_3 \quad (5.27)$$

$$Y'_{QE;G60} = 7,5454 - 1,3937 x_2 + 4,0110 x_3 - 0,6567 x_2 x_3 \quad (5.28)$$

$$Y'_{Ra;G60} = 3,9538 + 0,7063 x_3 \quad (5.29)$$

$$Y'_{\delta;G60} = 15,4346 - 1,8385 x_2 + 2,8792 x_3 \quad (5.30)$$

$$Y''_{QP;G10} = 2,0146 + 0,1586 x_2 + 1,1804 x_3 + 0,0949 x_2 x_3 \quad (5.31)$$

$$Y''_{QE;G10} = 1,8370 - 0,1134 x_2 + 1,2856 x_3 - 0,1059 x_2 x_3 \quad (5.32)$$

$$Y''_{Ra;G10} = 1,8175 + 0,4175 x_3 \quad (5.33)$$

$$Y''_{\delta;G10} = 82,8889 - 10,1307 x_2 + 16,3884 x_3 - 4,2648 x_2 x_3 \quad (5.34)$$

TABELUL 5.7

Coefi- cienti	G10					G40					G60					
	Q_p	R_a	Q_E	δ	Q_p	R_a	Q_E	δ	Q_p	R_a	Q_E	δ	Q_p	R_a	Q_E	δ
b_p	20,5178	3,1900	40,2096	171,7387	30,9440	4,3350	9,4790	27,7956	45,4266	3,9538	7,5454	15,4346				
b_l	-0,5441	0,0010	1,4449	0,9559	-0,1115	-0,0325	-0,0874	-0,1089	1,1161	0,0563	0,1396	-0,1885				
b_z	1,6203	0,0500	4,8124	30,8255	-2,7022	-0,0475	-1,8479	-2,2925	-3,2649	-0,0889	-1,3937	-1,8385				
b_A	8,2595	0,2700	26,9083	81,5941	13,2743	0,5200	5,7804	6,7870	17,5224	0,7263	4,0110	2,8782				
b_B	0,1246	0,0100	1,3781	2,2027	0,2500	0,0750	0,0975	0,2346	-0,0974	-0,0113	-0,1039	-0,1259				
b_H	-0,4378	-0,0200	0,8728	5,5864	0,4054	-0,1125	0,0091	0,0209	1,8037	-0,0763	0,2440	-0,4577				
b_M	0,6853	0,0800	3,8948	6,3442	-0,8049	0,0275	-1,0456	-1,1997	-0,9210	0,0788	-0,6587	-0,2138				
b_{T9}	-0,3076	-0,0500	1,4866	7,8177	-0,2900	-0,0250	-0,0578	-0,0134	-0,6086	0,0223	-0,1376	0,0345				
b_T	0,7126	0,1479	2,0288	15,2991	1,5276	0,1583	0,5498	2,1429	2,5854	0,1260	0,3271	0,4799				

TABELUL 5.8

Coefi- cienti	G10					G40					G60					
	Q_p	R_a	Q_E	δ	Q_p	R_a	Q_E	δ	Q_p	R_a	Q_E	δ	Q_p	R_a	Q_E	δ
b_p	2,0146	1,8175	1,8370	82,8889	2,3348	1,8513	1,4604	54,0714	3,3290	2,0000	1,9530	54,8703				
b_l	-0,0929	-0,0350	-0,0654	-0,7626	-0,1553	0,0388	-0,0487	0,0490	-0,1697	-0,0025	-0,0517	0,1018				
b_z	0,1586	0,0225	-0,1134	-12,1307	0,5858	0,0513	-0,0537	-0,2312	0,4083	0,0900	-0,0900	-0,1461				
b_A	1,1804	0,4175	1,2855	16,3884	1,4806	0,5088	0,9283	7,6382	1,3632	0,5450	1,1726	14,3729				
b_H	-0,0849	0,0100	0,0001	2,8808	0,0927	-0,0188	-0,0004	-2,3712	-0,0302	-0,0175	-0,0162	-0,2004				
b_M	-0,0187	0,0150	-0,0054	0,8428	-0,1005	-0,0113	-0,0085	2,2495	-0,0526	-0,0375	-0,0230	0,8829				
b_{T9}	0,0949	-0,0275	-0,1058	-4,2648	0,3944	0,0538	-0,0514	-4,8859	0,2723	0,0950	-0,0695	-4,4671				
b_T	-0,0525	-0,0100	0,0046	0,8922	0,0584	0,0138	0,0435	-1,2528	0,0499	0,0175	0,0026	-0,7051				
	0,0939	0,0362	0,0982	3,7614	0,2690	0,0450	0,0438	4,4315	0,1702	0,0568	0,0691	3,4015				

$$Y_{QP,040}^* = 2,7348 + 0,5658 x_2 + 1,4806 x_3 + 0,3844 x_2 x_3 \quad (5.35)$$

$$Y_{QE,040}^* = 1,4604 - 0,0537 x_2 + 0,9283 x_3 - 0,9814 x_2 x_3 \quad (5.36)$$

$$Y_{Ra,040}^* = 1,2513 + 0,0513 x_2 + 0,5088 x_3 + 0,0538 x_2 x_3 \quad (5.37)$$

$$Y_{\gamma,040}^* = 54,0714 - 12,2312 x_2 + 7,6382 x_3 - 4,8859 x_2 x_3 \quad (5.38)$$

$$Y_{QP,060}^* = 3,3290 + 0,4083 x_2 + 1,3632 x_3 + 0,2723 x_2 x_3 \quad (5.39)$$

$$Y_{QE,060}^* = 1,9530 - 0,0900 x_2 + 1,1726 x_3 - 0,0695 x_2 x_3 \quad (5.40)$$

$$Y_{Ra,060}^* = 2,0000 + 0,0900 x_2 + 0,5450 x_3 - 0,0959 x_2 x_3 \quad (5.41)$$

$$Y_{\gamma,060}^* = 54,8703 - 9,1461 x_2 + 14,3729 x_3 - 4,4671 x_2 x_3 \quad (5.42)$$

Modelele marcate cu semnul (*) se referă la regimul de degroșare iar cele cu semnul (°) la regimul de finisare. Indicii sînt formați din două grupe de litere și cifre. Primul grup de litere reprezintă simbolul funcției de răspuns, pentru care s-a determinat modelul, iar al doilea grup reprezintă simbolul aliajului dar din grupa de utilizare G.

Verificarea adecvantei modelelor elaborate se face pe baza testului F (Fischer-Snedecor) prin care se stabilește dacă diferența observată între dispersii este reală sau întâmplătoare. Admițînd aprioric ipoteza de zero, se verifică această ipoteză, cu ajutorul testului $F = S_1^2 / S_2^2$, a cărui valoare depinde numai de gradele de libertate f_1 și f_2 , corespunzătoare celor două dispersii /71/. Valoarea calculată a testului F se determină cu relația:

$$F_C = S_{ad}^2 / S_y^2 \quad (5.43)$$

unde: S_{ad}^2 - este dispersia abaterilor modelului față de valoarea medie a funcției de răspuns calculată cu relația:

$$S_{ad}^2 = n \cdot \sum_{e=1}^N (Y_e - \bar{y}_e)^2 \quad (5.44)$$

pentru $f_1 = N - k$ grade de libertate

Y_e - este valoarea dată de modelul matematic la experiența e,

\bar{y}_e - valoarea medie a funcției de răspuns la experimentul e.

k - numărul coeficienților de regresie semnificativi, inclusiv b_0

S_y^2 - dispersia erorii experimentale (rel.5.6), pentru $f_2 = N(n-1)$ grade de libertate.

TABELUL 5.9

Analiza adecvantei modelului	G10					G40					G60				
	Q_P	R_a	Q_E	\bar{y}	\bar{y}	Q_P	R_a	Q_E	\bar{y}	\bar{y}	Q_P	R_a	Q_E	\bar{y}	\bar{y}
	$n \sum_{i=1}^n (Y-\bar{y})^2$	17,4840	0,2868	98,9074	13934,9080	31,7085	0,5508	0,4941	0,9918	2,9801	137,4456	0,9918	2,5749	2,9801	2,9801
f_i	5	6	4	5	5	6	4	6	5	5	6	4	5	5	5
S_{ad}^2	3,4968	0,0478	24,7269	2786,9816	6,3417	0,0918	0,1235	0,1653	0,5920	27,4891	0,1653	0,8437	0,5920	0,5920	0,5920
F_c	1,9345	0,6136	1,6875	3,3443	0,2586	1,0291	0,0765	1,6764	0,4814	0,7822	1,6764	1,1264	0,4814	0,4814	0,4814
$F_T(\alpha; f_1; f_2)$	3,69	2,74	3,84	3,69	2,85	2,74	3,01	2,74	2,85	2,85	2,74	3,01	2,85	2,85	2,85

TABELUL 5.10

Analiza adecvantei modelului	G10					G40					G60				
	Q_P	R_a	Q_E	\bar{y}	\bar{y}	Q_P	R_a	Q_E	\bar{y}	\bar{y}	Q_P	R_a	Q_E	\bar{y}	\bar{y}
	$n \sum_{i=1}^n (Y-\bar{y})^2$	0,2448	0,0696	0,1044	249,2766	311,3574	1,1091	0,0516	0,0018	0,0486	0,1071	0,0486	0,1071	0,1071	36,8832
f_i	4	6	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
S_{ad}^2	0,0816	0,0116	0,0261	62,3192	77,8394	0,2773	0,0129	0,0006	0,0122	0,0268	0,0122	0,0268	0,0268	9,2208	9,2208
F_c	1,7325	1,6571	0,5283	0,8249	0,7423	0,7176	1,1944	0,0583	0,7064	1,0500	0,7064	1,0500	0,1492	0,1492	0,1492
$F_T(\alpha; f_1; f_2)$	3,01	2,74	3,01	3,01	3,01	3,01	3,01	3,01	3,01	3,01	3,01	3,01	3,01	3,01	3,01

Valoarea tabulată $F_T(\alpha; f_1, f_2)$ se determină din tabele funcție de gradul de semnificație (α) și gradele de libertate (f_1) și (f_2) /10, 11, 28, 29, 71, 132, 176, 177, 188, 212/.

Modelul matematic elaborat se consideră adecvat dacă este îndeplinită condiția :

$$F_C \leq F_T(\alpha; f_1; f_2) \quad (5.45)$$

Rezultatele sintetice ale acestei analize se prezintă pentru toate funcțiile de răspuns considerate și cele trei sorturi de aliaje dure, în tabelul 5.9 pentru regimul de degroșare și tabelul 5.10 pentru regimul de finisare. Toate modelele matematice (5.19...5.42) sînt adecvate.

Pe baza modelelor matematice elaborate se pot trage concluzii generale, privind interacțiunea dintre variabilele independente și funcția de răspuns considerată și se pot determina ecuațiile necesare trasării grafice a acestor interdependențe.

Modelul matematic cuprinde numai variabilele semnificative și după caz interacțiunea dintre ele.

Coeficienții de regresie, indică gradul de influență a variabilei considerate asupra funcției de răspuns atunci, cînd variabila crește de la nivelul inferior la nivelul superior. Semnul algebric al coeficienților indică felul interacțiunii dintre variabila considerată și funcție de răspuns, o variație direct sau invers proporțională.

Pe baza acestor modele matematice se vor determina ecuațiile necesare trasării grafice a interacțiunii dintre funcția de răspuns și variabila independentă considerată. Acestea vor permite operatorului alegerea regimului optim de prelucrare, funcție de scopul urmărit.

C A P I T O L U L 6

ASPECTE METALOGRAFICE LA PRELUCRAREA PRIN EROZIUNE ELECTRICA A ALIAJELOR DURE SINTE- RIZATE

Prin fundamentarea științifică a proceselor care au loc la prelucrarea prin eroziune electrică a aliajelor dure sinterizate, cu implicații importante în privința calității fizice și geometrice a suprafeței, s-au întreprins investigații macro și microstructurale pe eșantioane semnificative.

Astfel, din cele trei sorturi de aliaje dure studiate, s-au selectat epruvetele care au fost prelucrate prin degroșare, respectiv finisare, la regimuri corespunzătoare valorilor maxime sau minime ale funcțiilor de răspuns analizate.

În acest fel s-a urmărit evidențierea simultană a influenței compoziției chimice și a regimului de prelucrare asupra mecanismului de prelevare a materialului și asupra eventualelor transformări structurale intervenite în stratul afectat de procesul eroziv.

6.1. ANALIZA MACROSCOPIA A SUPRAFEȚELOR PRELUCRATE

Analiza macroscopică a suprafețelor prelucrate, selectate după criteriile indicate anterior, s-a făcut cu ajutorul unui stereomicroscop. Rezultatele obținute sînt prezentate grupat funcție de sortul de aliaj dur și regimul de prelucrare în planșele I...VI. (fig.6.1 ... fig.6.24).

În cazul regimului de degroșare, aplicat aliajelor dure din sortul Glo, cu o cantitate mică de liant, respectiv o duritate ridicată, dimensiunile craterelor formate sînt mici, iar proporția de particule de compoziți dure este semnificativă, aceștia avînd o distribuție uniformă pe suprafața prelucrată. (fig.6.1; fig.6.2; fig.6.3 - planșa I).

La regimul cel mai dur de prelucrare ($i_1=50A$; $t_1=95\mu s$) a aliajului dur din sortul Glo se remarcă o ușoară scădere a proporției de compoziți rămași pe suprafața prelucrată și o dezvoltare dimensională a craterelor formate (fig.6.4.-planșa I).

P L A N S A I

ANALIZA MACROSCOPICA A ALIAJELOR DURE G10-REGIM DE DEGROSARE



Fig.6.1. x100; $i_1=25A$; $t_1=48\mu s$



Fig.6.2. x100; $i_1=25A$; $t_1=95\mu s$

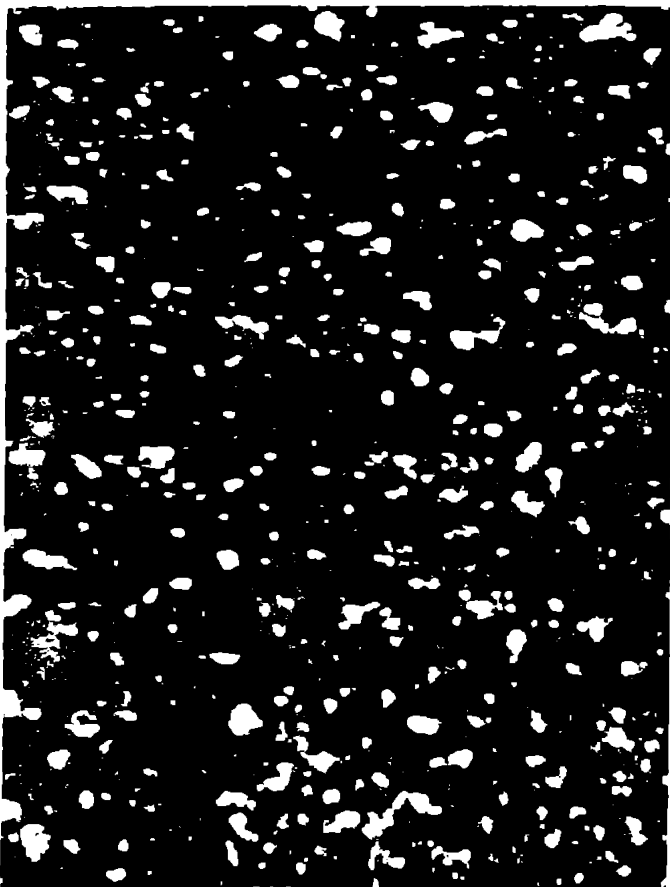


Fig.6.3. x100; $i_1=50A$; $t_1=48\mu s$

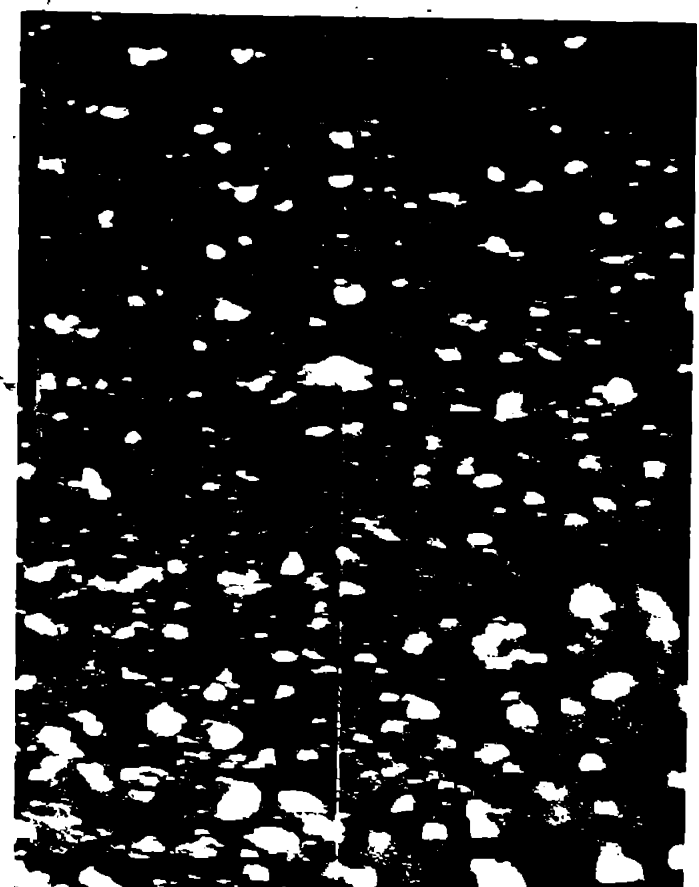


Fig.6.4. x100; $i_1=50A$; $t_1=95\mu s$.

La aliajele din sortul G40, cu o cantitate mai mare de liant, respectiv o duritate mai mică, se remarcă o creștere a ariei secțiunii fiecărui crater și o tendință de aplatizare a formei acestora (fig.6.5; fig.6.6; fig.6.7; fig.6.8 - planșa II).

În cazul regimurilor dure de prelucrare (fig.6.7; fig.6.8; - planșa II) apare o tendință de delimitare a craterelor formate și o mărire a densității particulelor de compuși fini pe suprafața erodată.

La aliajele dure din sortul G60 prelucrate la regimuri de degroșare mai puțin dure (fig.6.9; fig.6.10 - planșa III) se formează cratere cu dimensiuni medii și relativi adânci, cu o proporție ridicată de compuși având dimensiuni relativi mari.

Creșterea curentului impulsului de dublu favorizează o aplatizare a craterelor și o mărire a densității de compuși cu dimensiuni mici pe suprafața prelucrată (fig.6.11; fig.6.12 - planșa III).

La același regim de prelucrare, creșterea conținutului de liant de la sortul G10 la sortul G60 se manifestă prin mărirea ariei craterelor formate și prin creșterea tendinței de aplatizare a acestora, fenomen explicabil prin schimbările intervenite în privința raportului cantitativ al fazelor constitutive prezente în aliajul dur.

Pornind de la faptul că fiecărui material îi este caracteristică o anumită stabilitate la eroziune electrică, în cazul prelucrării aliajelor dure se remarcă o selectivitate a procesului de prelucrare, exteriorizată prin erodarea în primul rând a liantului (Co) cu stabilitate mai redusă decât carbura (CW). În acest mod se pot explica diferențele ce apar între dimensiunile craterelor funcție de sortul aliajului dur, la același regim de prelucrare.

În cazul regimului de finisare, la aliajele dure din sortul G10, aspectul microscopic al suprafeței prelucrate scoate în evidență existența unor cratere mici, cu distribuție uniformă; parametrii de lucru considerați nu conduc la diferențe ale geometriei suprafeței obținute (fig.6.13; fig.6.14; fig.6.15; fig.6.16 - planșa IV).

La aliajele dure din sortul G40, se remarcă o ușoară creștere a diametrului și adâncimii craterelor la depășirea duratei impulsului de 8 μ s și a curentului de 6,25A. (fig.6.17; fig.6.18; comparativ cu fig.6.19; fig.6.20. - planșa V).

P L A N S A II.

ANALIZA MACROSCOPICA A ALIAJELOR DURE G40 - REGIM DE DEGROSARE

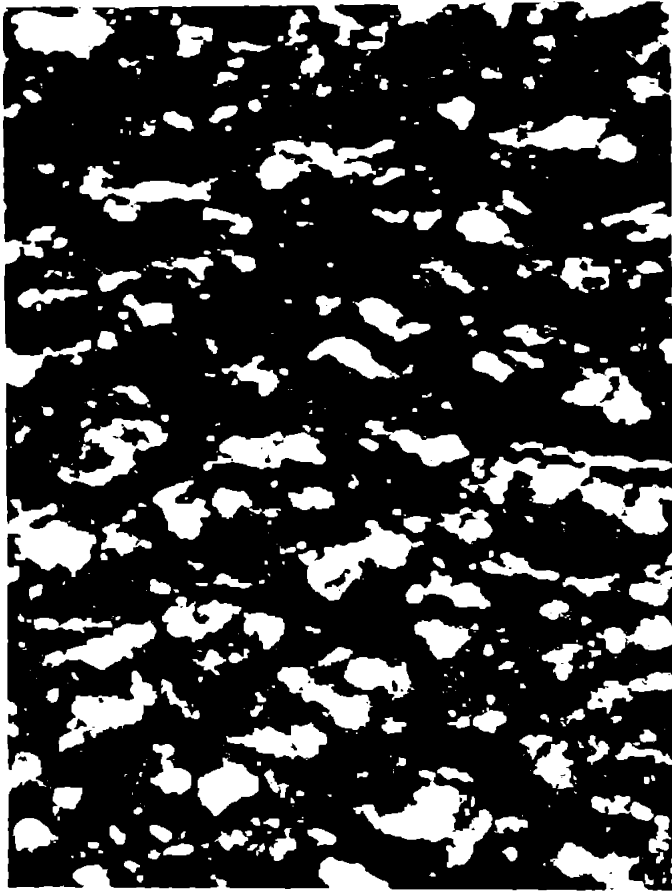


Fig.6.5. x100; $i_1=25A$; $t_1=95\mu s$



Fig.6.6. x100; $i_1=25A$; $t_1=190\mu s$

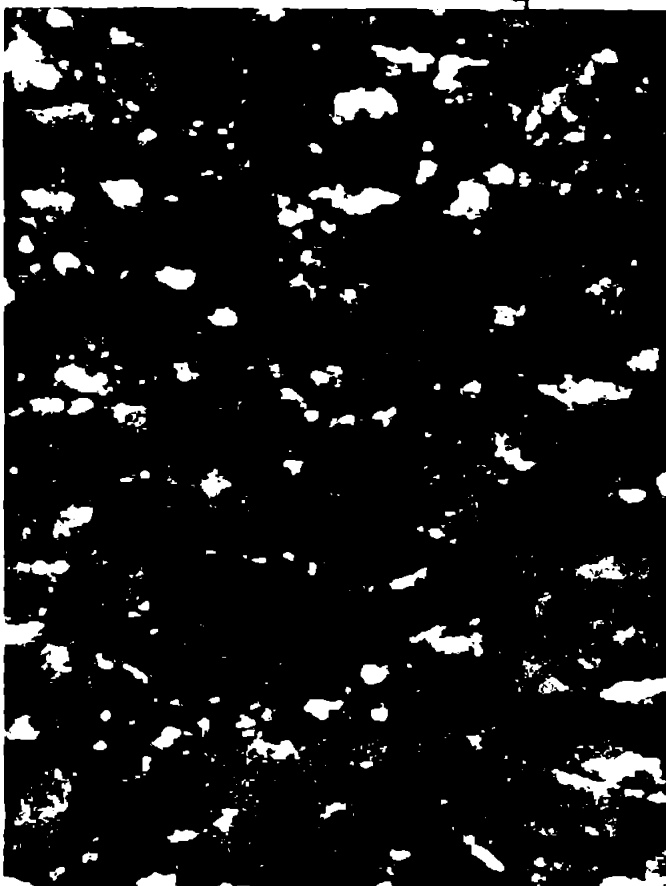


Fig.6.7. x100; $i_1=50A$; $t_1=95\mu s$



Fig.6.8. x100; $i_1=50A$; $t_1=190\mu s$.

P L A N S A III

ANALIZA MACROSCOPICA A ALIAJELOR DURE G60-REGIM DE DEGROSARE



Fig.6.9. x100; $i_1=25A$; $t_1=95\mu s$

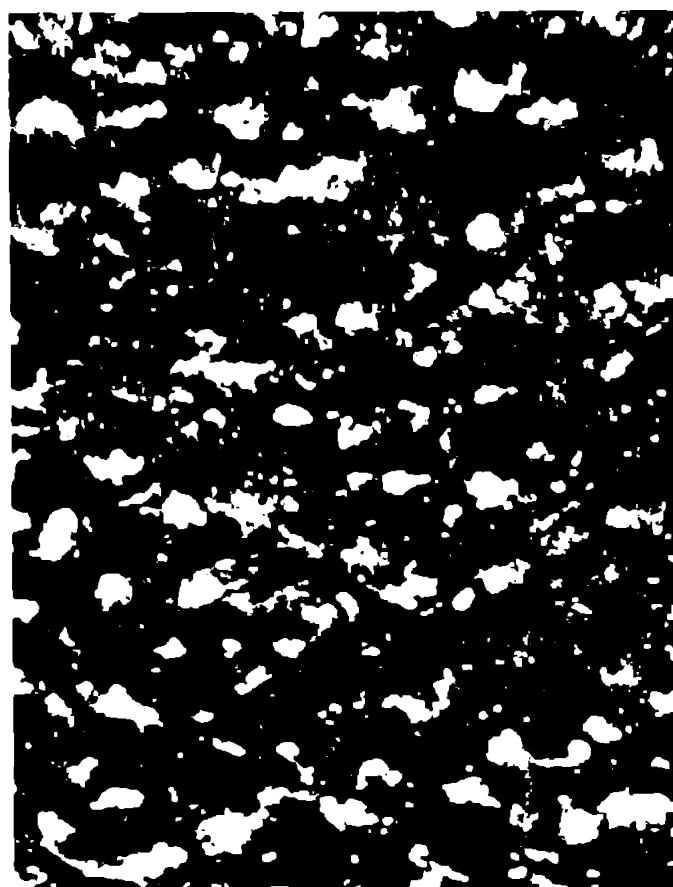


Fig.6.10. x100; $i_1=25A$; $t_1=190\mu s$



Fig.6.11. x100; $i_1=50A$; $t_1=95\mu s$.

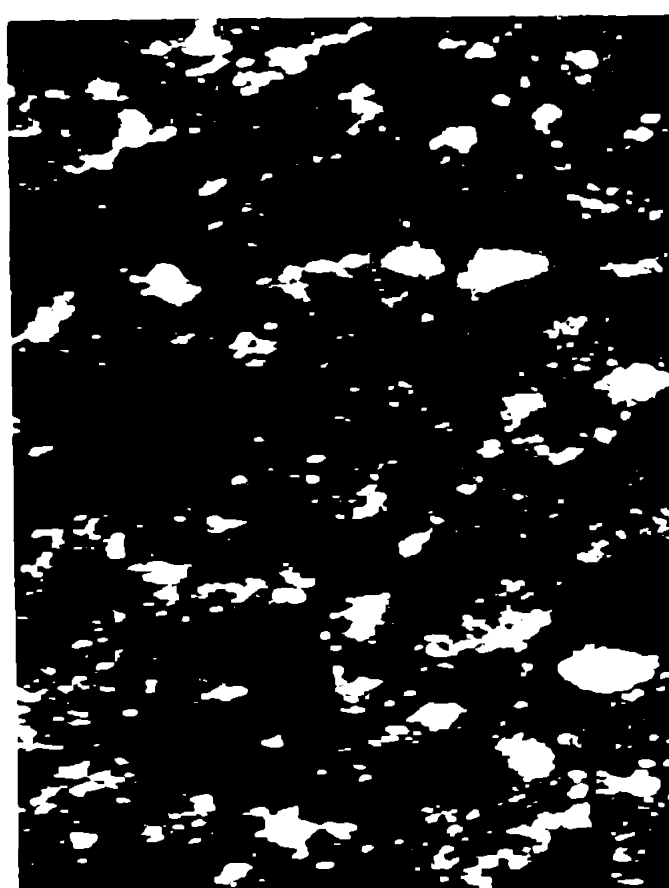


Fig.6.12. x100; $i_1=50A$; $t_1=190\mu s$

O situație similară apare și la aliajele din sortul G60. care la regimuri de finisare situate spre limita superioară a parametrilor dau naștere unor cratere ceva mai adânci (fig.6.21; fig.6.22; comparativ cu fig.6.23; fig.6.24.- planșa VI).

Examinarea macroscopică a suprafețelor prelucrate, arată că prelucrarea de material se realizează printr-un proces discontinuu și cumulativ.

Aspectul suprafețelor prelucrate prin eroziune electrică se caracterizează printr-o izotropie completă față de prelucrarea cu muchii așchietoare care introduc în mod inevitabil o direcție preferențială. Rugozitatea unei suprafețe prelucrate prin eroziune electrică va fi aceeași în toate direcțiile.

6.2. ANALIZA MICROSCOPICA A SUPRAFEȚELOR PRELUCRATE

O parte din epruvetele prelucrate la diferite regimuri de lucru au fost secționare transversal și supuse prelucrării metalografice în vederea analizei microscopice.

După debitare prin eroziune electrică cu electrod filiform pe o mașină ELEROPIL, probele au fost rectificade fin pe suprafața ce urma a fi pregătită și apoi au fost șlefuite cu hîrtie metalografică hidrofugă de diverse granulații.

A urmat o nouă șlefuire cu pastă de diamant, tehnică specială utilizată cu precădere la obținerea unor suprafețe cît mai curate a acestor aliaje.

În final s-a făcut lustruirea mecanică, atacul chimic cu reactivul Murakami și examinarea metalografică la un microscop optic în lumină reflectată Epityp 2.

În planșele VII, VIII și IX sînt redade cîteva microstructuri caracteristice grupate pe cele trei sorturi de aliaje dure, prelucrate la regimuri diferite.

La cele trei sorturi de aliaje dure cercetate se constată existența unui strat superficial, afectat de procesul eroziv, /27,91,97,99,203/ a cărui grosime se mărește relativ cu creșterea parametrilor regimului de prelucrare. Acest strat superficial ia naștere datorită procesului de topire și resolidificare a topiturii neprelevate, rămase în cratere.

P L A N S A IV

ANALIZA MACROSCOPICA A ALIAJELOR DURE 010- REGIM DE FINISARE

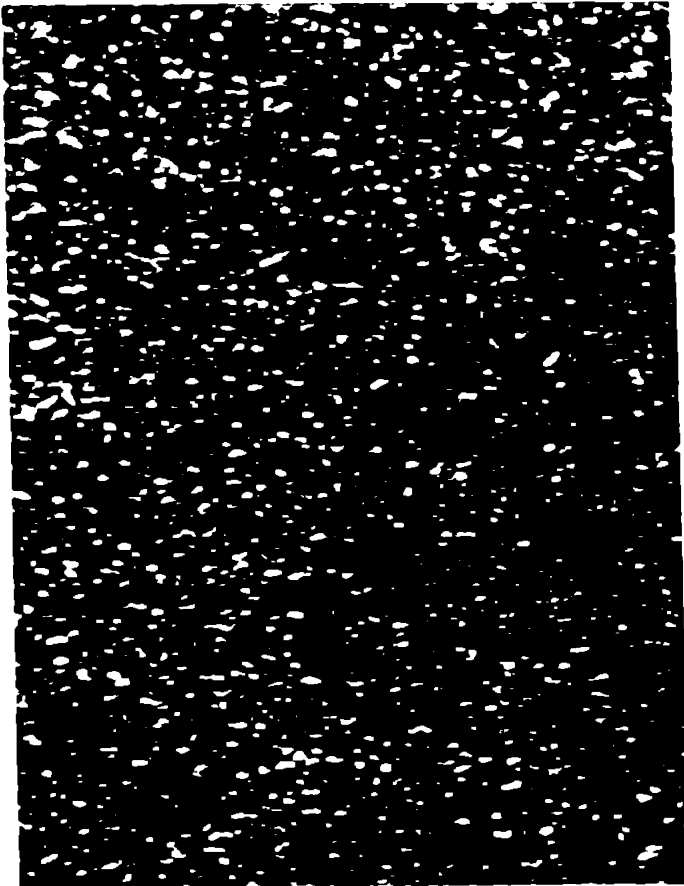


Fig. 6.13. x100; $i_1=6,25A$; $t_1=8\mu s$

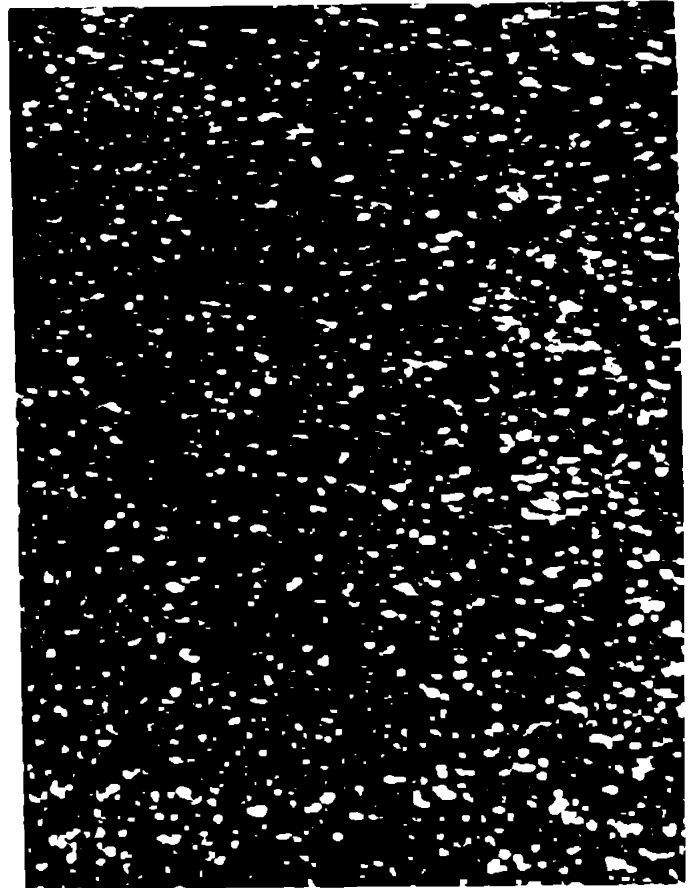


Fig. 6.14. x100; $i_1=6,25A$; $t_1=12\mu s$

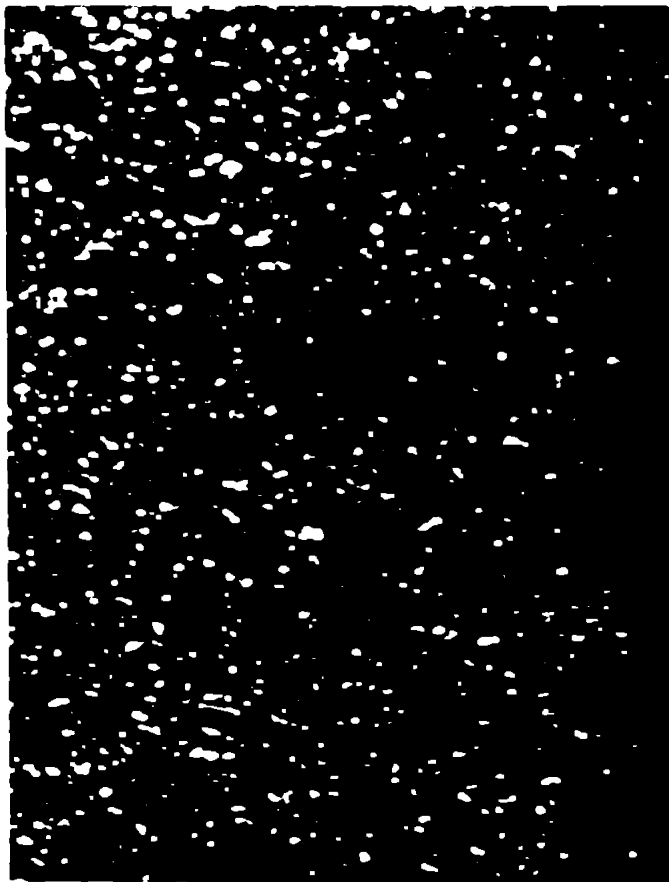


Fig. 6.15. x100; $i_1=12,5A$; $t_1=8\mu s$

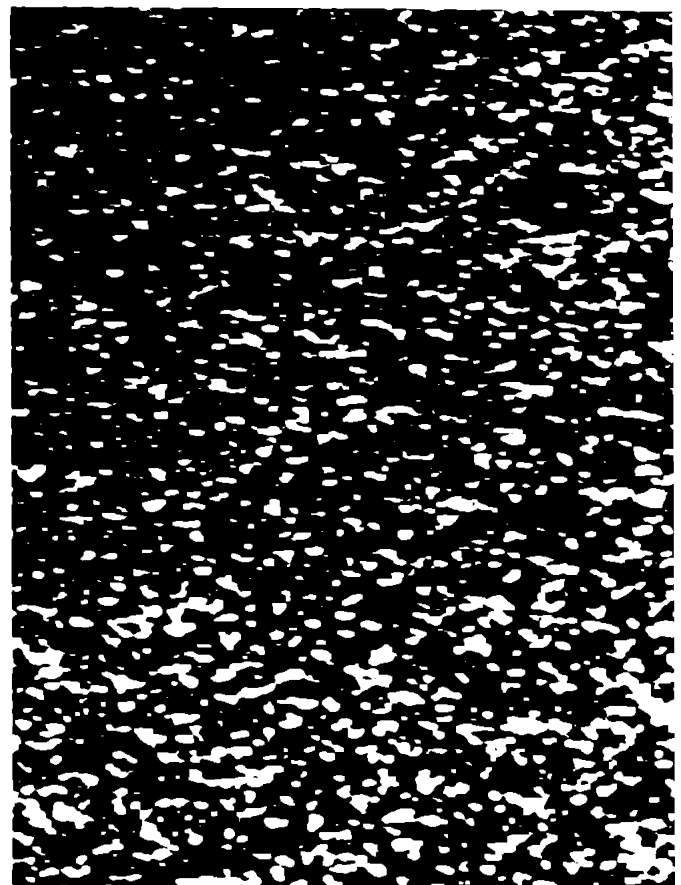


Fig. 6.16. x100; $i_1=12,5A$; $t_1=12\mu s$

P L A N S A V

ANALIZA MACROSCOPICA A ALIAJELOR DURE G42- REGIM DE FINISARE

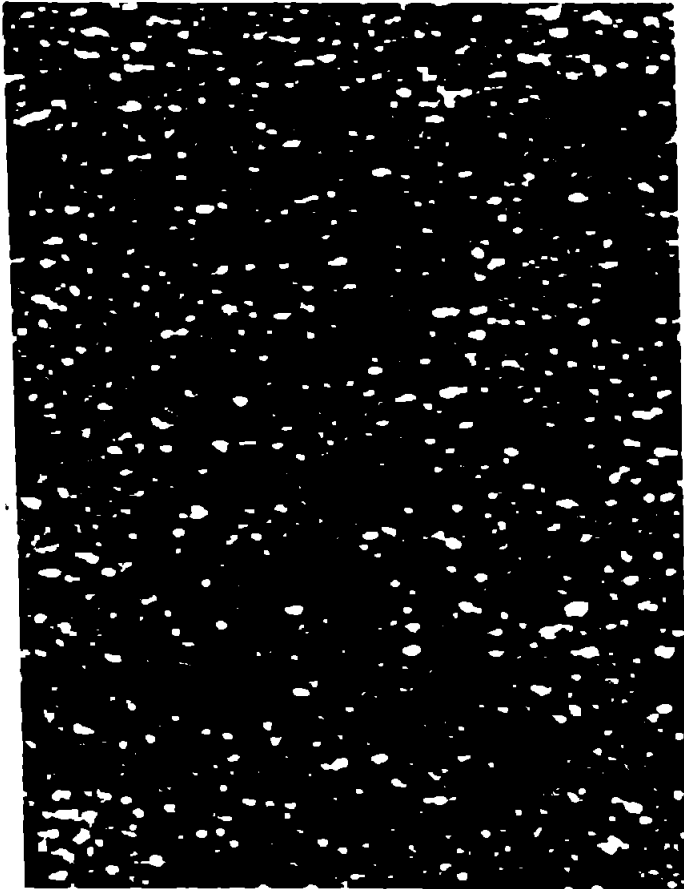


Fig.6.17.x100; $i_1=6,25$; $t_1=8\mu s$

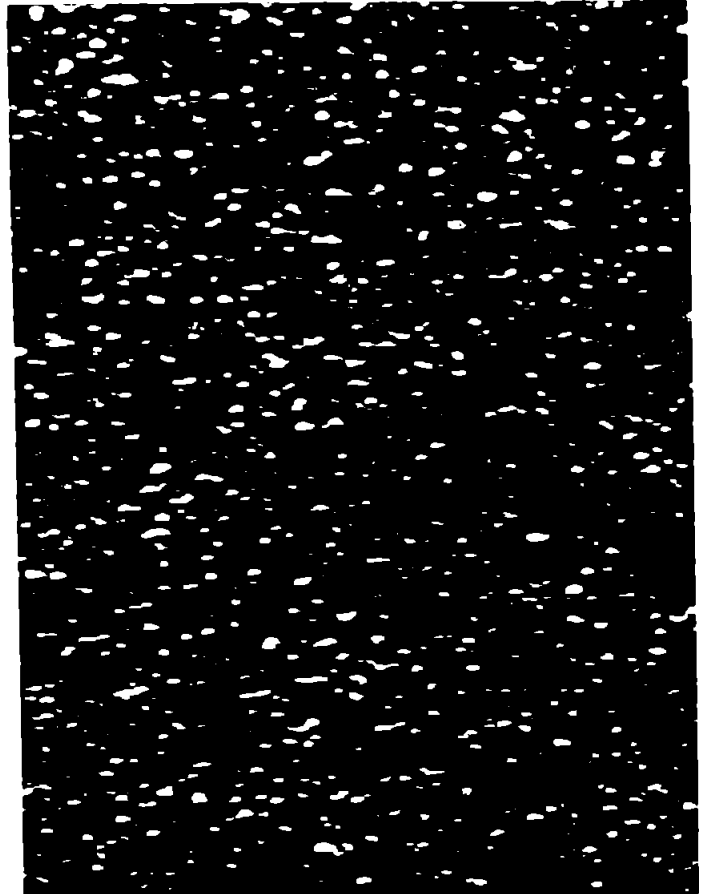


Fig.6.18.x100; $i_1=6,25A$; $t_1=12\mu s$

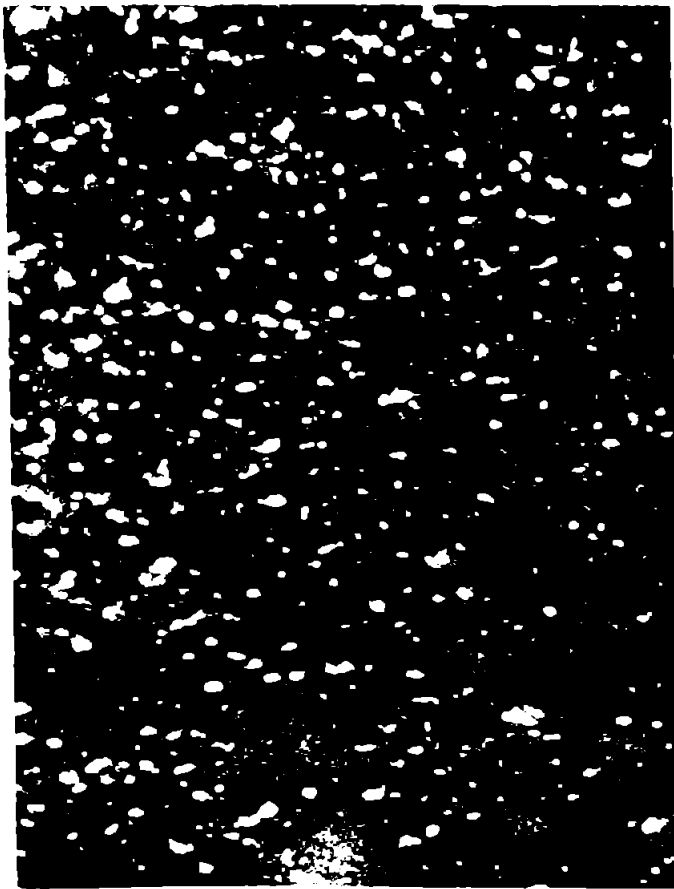


Fig.6.19.x100; $i_1=12,5A$; $t_1=9\mu s$

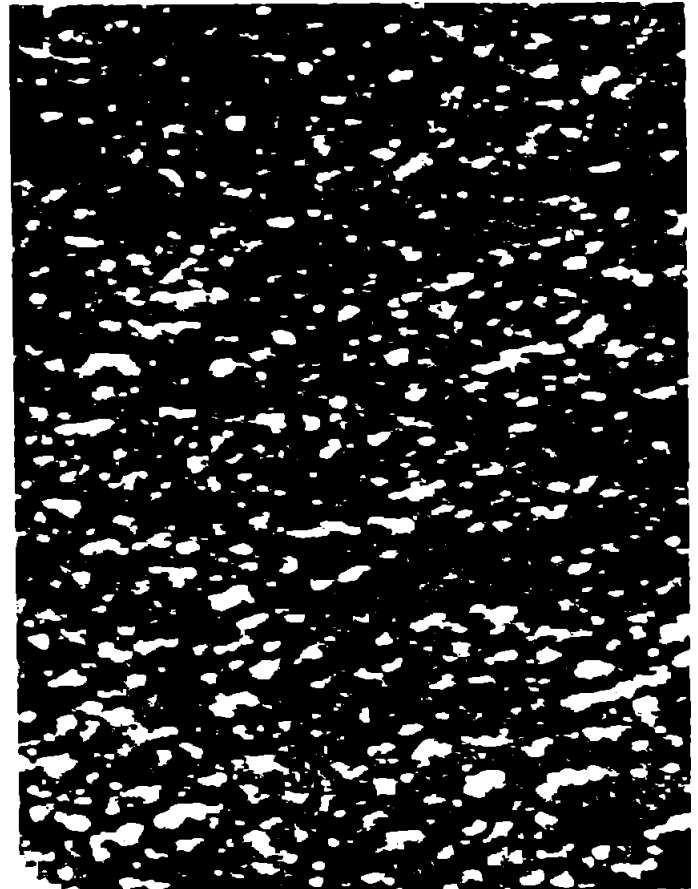


Fig.6.20.x100; $i_1=12,5A$; $t_1=12\mu s$

P L A N S A VI

ANALIZA MACROSCOPICA A ALIAJELOR DURE G60- REGIM DE FINISARE

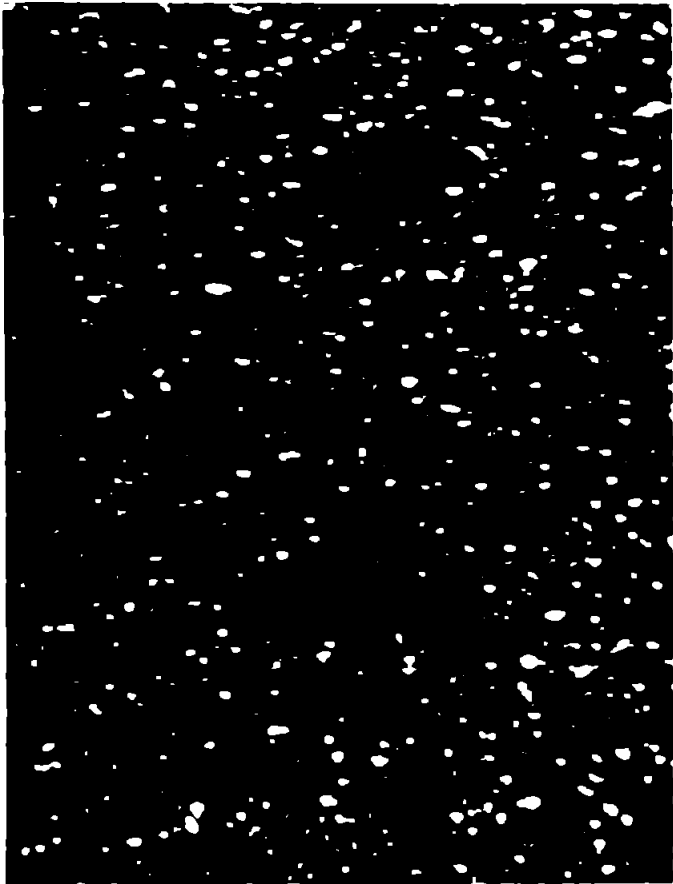


Fig.6.21.x100; $i_1=6,25A$; $t_1=8\mu s$

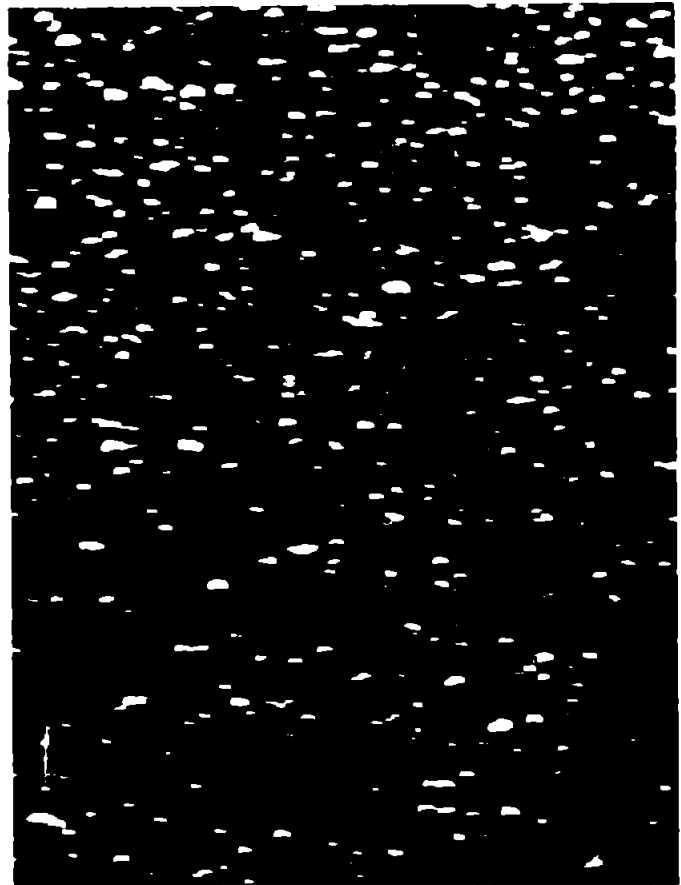


Fig.6.22.x100; $i_1=6,25A$; $t_1=12\mu s$

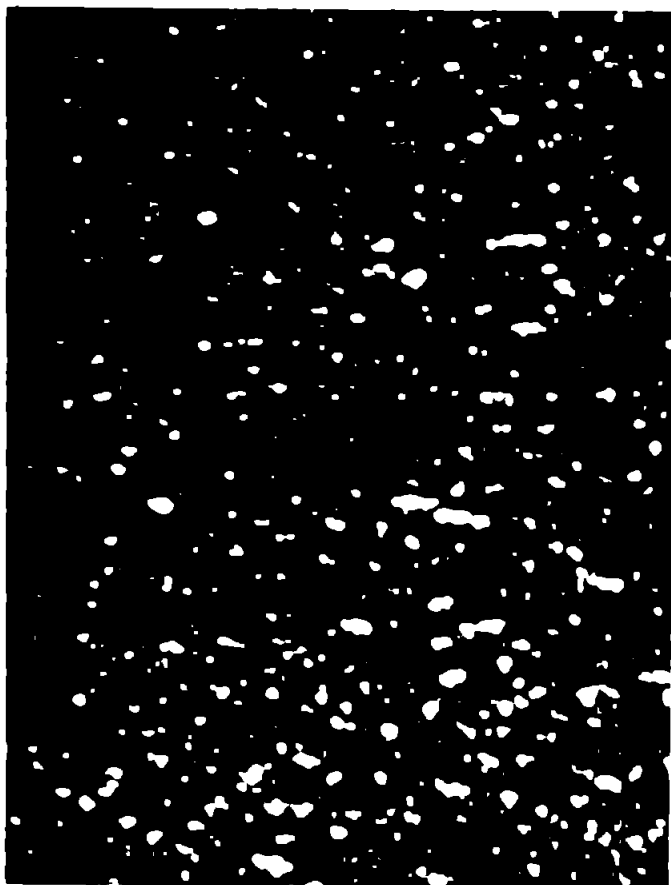


Fig.6.23.x100; $i_1=12,5A$; $t_1=8\mu s$

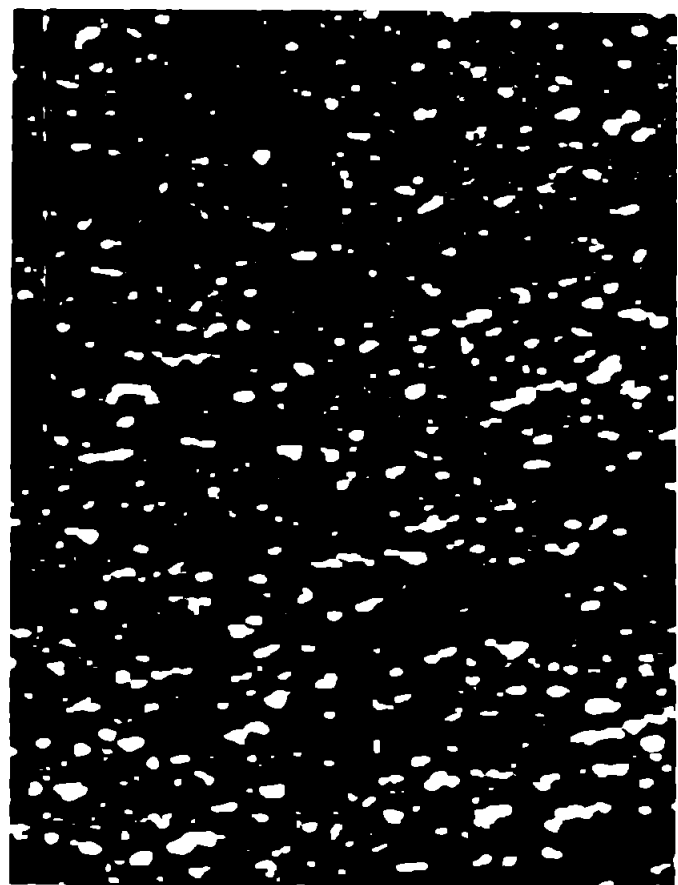


Fig.6.24.x100; $i_1=12,5A$; $t_1=12\mu s$

Interacțiunea dintre mediul de lucru și materialul de prelucrat determină, după aspectul microstructurii, modificări ale naturii carburilor prezente în stratul superficial, comparativ cu cele din miezul probelor, pentru decelarea acestora fiind necesare investigații la microsonda electronică.

Așa cum era de așteptat, la același aliaj dur, operațiile de degroșare se manifestă prin adâncimi de strat superficial mult mai mari comparativ cu cele de finisare (fig.6.25; fig.6.28; fig.6.31 în comparație cu fig.6.27; fig.6.30; fig.6.33).

Creșterea conținutului în liant de Co de la aliajul dur Glo la G60, respectiv micșorarea durității Vickers, provoacă o micșorare a rezistenței la eroziune și deci mărirea grosimii stratului superficial modificat (fig.6.25 comparativ cu 6.28 și fig.6.31).

Depășirea anumitor valori ale regimului de degroșare, conduce la apariția de microfisuri în stratul marginal /24,88,95,99,121,194,195/, orientate perpendicular pe suprafața prelucrată și amorșate de obicei pe porii existenți în aliajul dur (fig.6.25; fig.6.28; fig.6.29; fig.6.31).

În stratul superficial al probelor prelucrate la regimuri de finisare (fig.6.27; fig.6.30; fig.6.33) nu s-au găsit defecte de tipul fisurilor.

Adâncimea de pătrundere a microfisurilor crește cu creșterea duratei impulsurilor (fig.6.25; fig.6.28; fig.6.30). La durate ale impulsului de 12 μ s nu se constată fisuri nici la măriri de 100 de ori.

Din analiza microstructurilor rezultă natura termică a apariției fisurilor. Pe această bază se poate formula o concepție probabilă a mecanismului de formare a microfisurilor.

Descărcarea electrică provoacă încălzirea unei anumite porțiuni de material din stratul de suprafață, a cărui volum tinde să se mărească. Acestei tendințe i se opun straturile reci de material alăturat. În acest fel în volumul încălzit apar eforturi interioare de compresie.

După încetarea impulsului de curent, volumul de material încălzit este răcit de mediul de lucru, care determină micșorarea volumului. Straturile reci înconjurătoare se opun acestei tendințe și ca rezultat în stratul de suprafață se dezvoltă eforturi de întindere.

PLANS A VII
MICROGRAFIJ OPTICE A ALIAJELOR DURE G 10

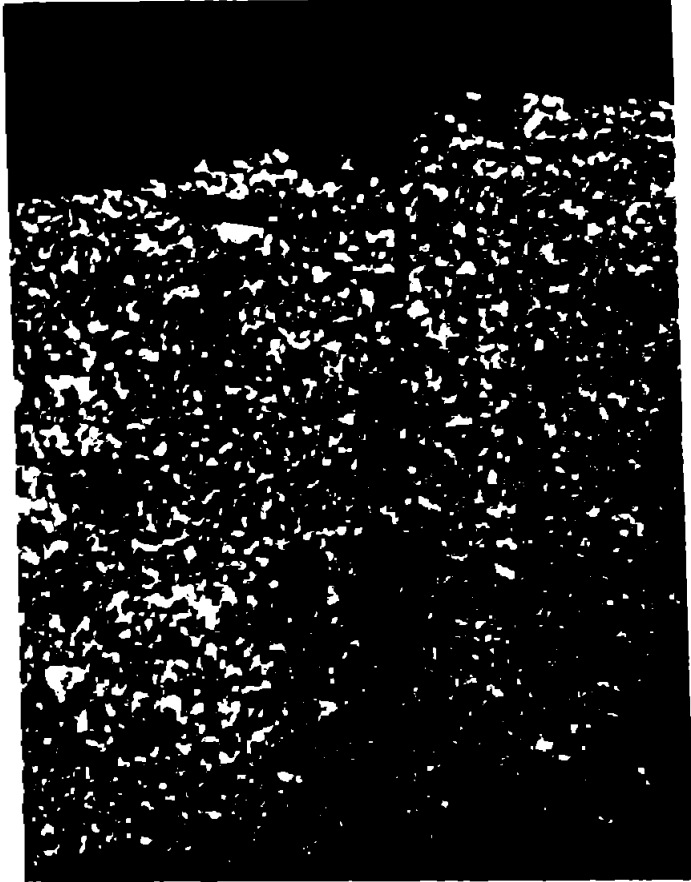


Fig.6.25.x500; $i_1=50A$; $t_1=95\mu s$

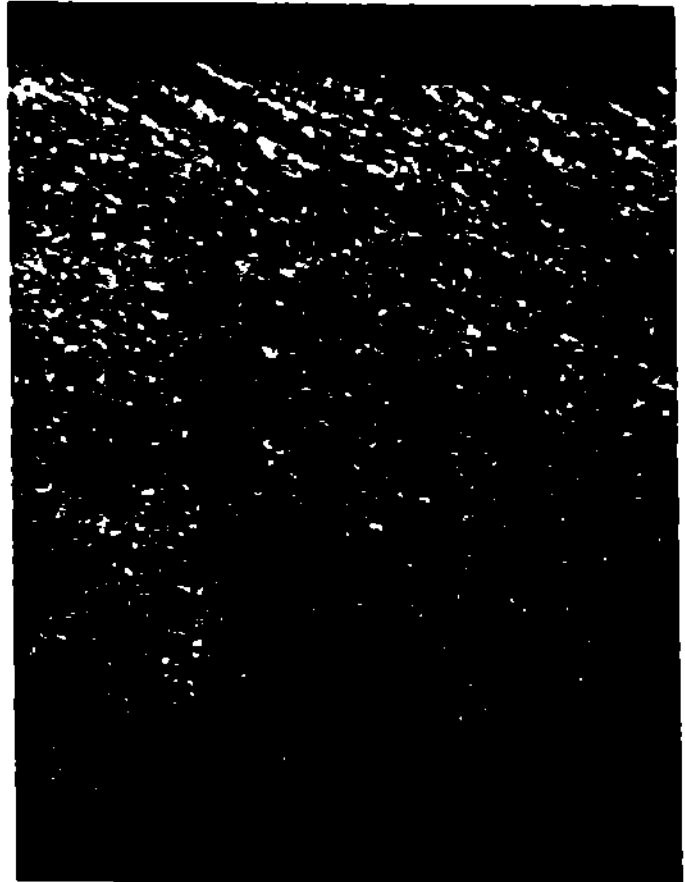


Fig.6.26.x500; $i_1=12,5A$; $t_1=12\mu s$

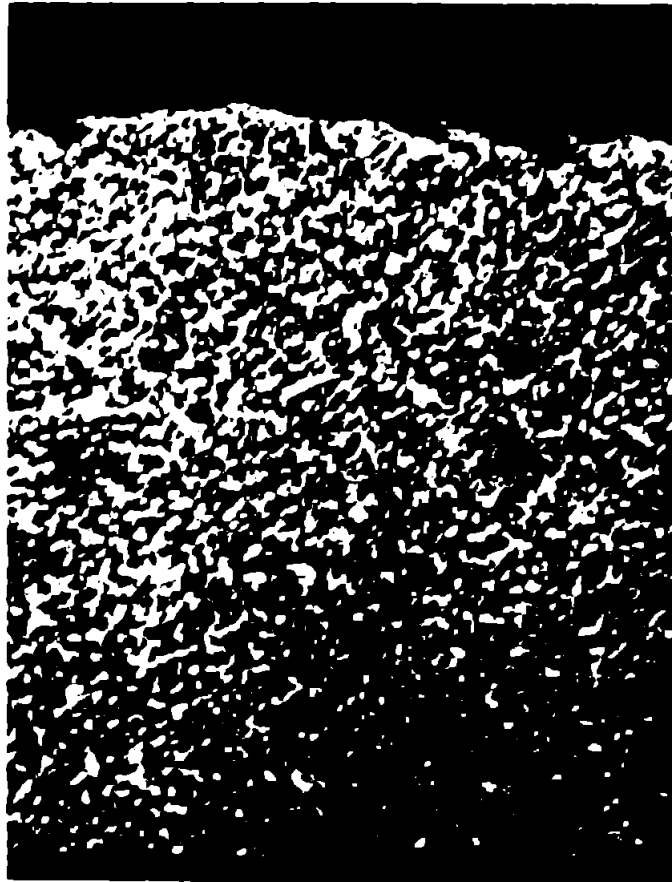


Fig.6.27.x500; $i_1=6,25A$; $t_1=9\mu s$

PLANS A VIII
MICROGRAPII OPTICE A ALIAJELOR DURE G 40

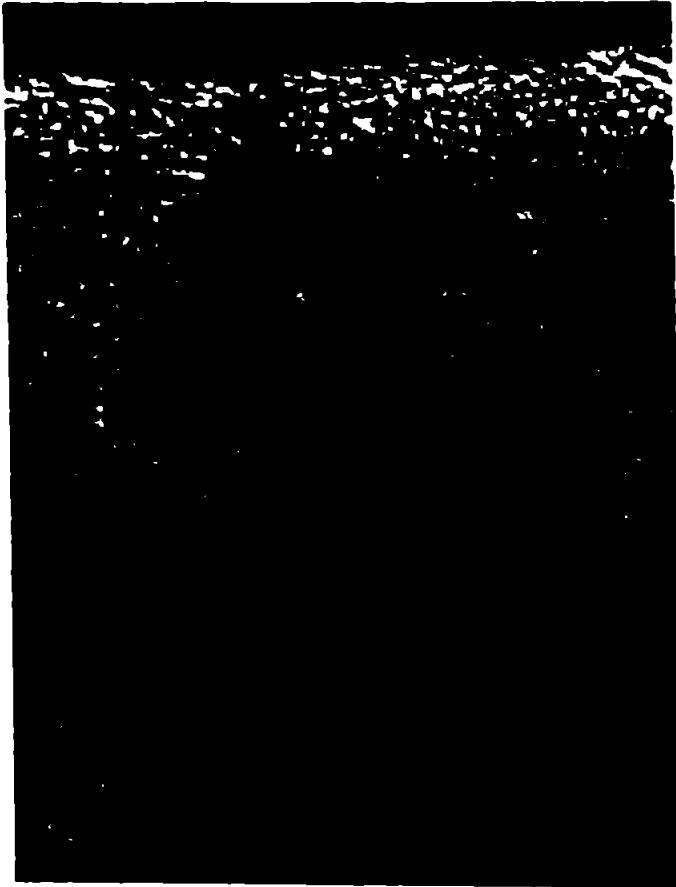


Fig.6.28.x500; $i_1=50A$; $t_1=19\mu s$

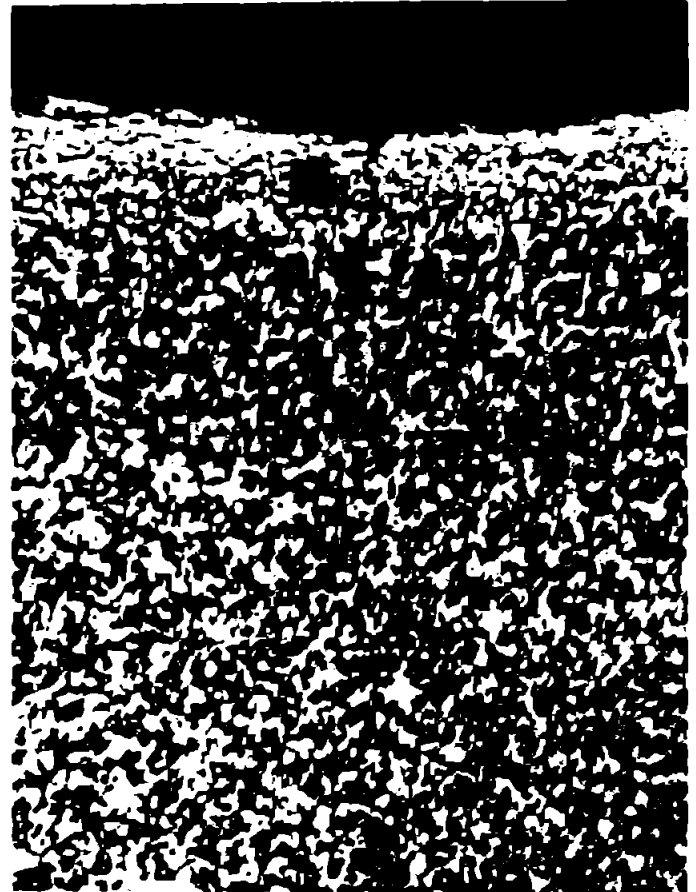


Fig.6.29.x500; $i_1=50A$; $t_1=19\mu s$

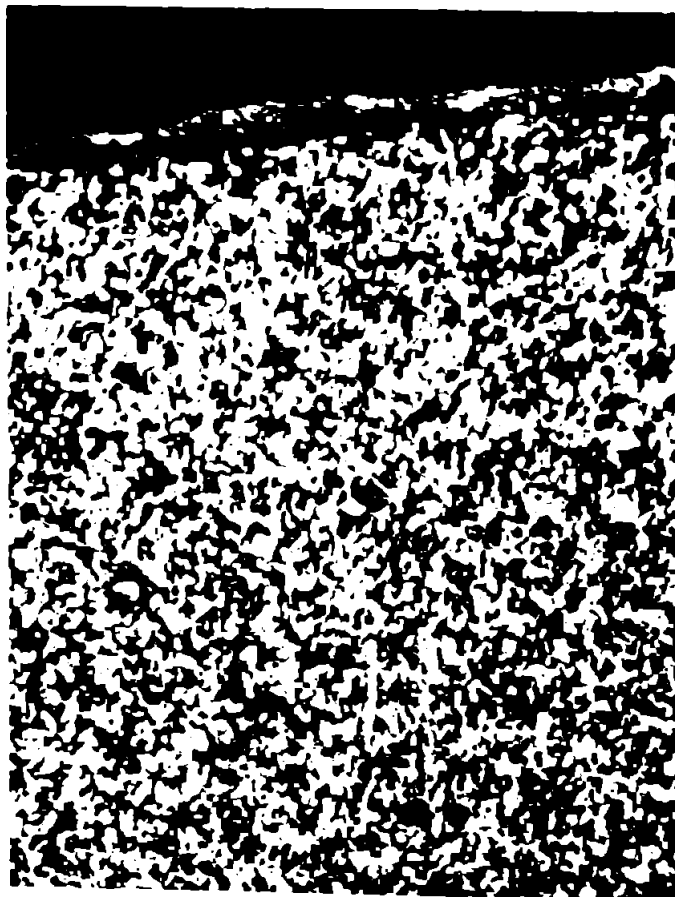


Fig.6.30.x500; $i_1=12,5A$; $t_1=12\mu s$

P L A N S A IX
MICROGRAFII OPTICE A ALIAJELOR DURE G60



Fig.6.31.x1000; $i_1=50A$; $t_1=19\mu s$

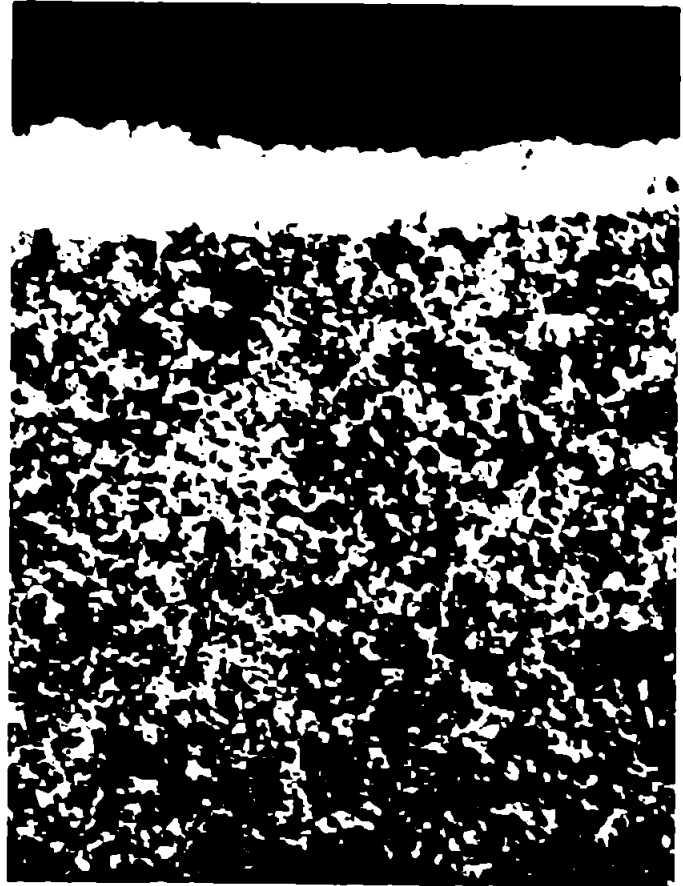


Fig.6.32.x500; $i_1=50A$; $t_1=19\mu s$

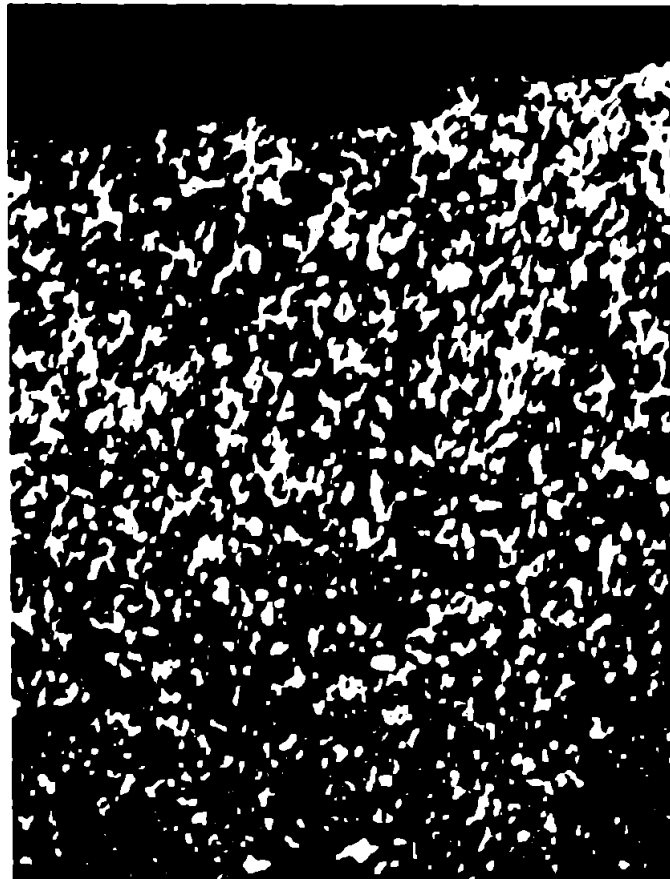


Fig.6.33.x500; $i_1=12,5A$; $t_1=12\mu s$

Pentru aliajul dur eforturile de întindere sînt cele mai periculoase intrucît distrug liantul și determină apariția fisurilor în stratul superficial. Mărimea eforturilor variază funcție de volumul de material încălzit.

Cu cît durata impulsului este mai mare, cu atît volumul de material încălzit este mai mare și apar eforturi mai pronunțate care, determină fisurarea stratului de suprafață.

Dependența prezenței microfisurilor de durata impulsurilor este determinată de raportul dimensiunilor zonei de topire și zonei de vaporizare a materialului, sub acțiunea descărcărilor electrice. Impulsurile lungi formează o zonă de topire mai mare, căldura se propagă într-un volum mai mare de material. La impulsuri scurte prelevarea de material se realizează în principal ca rezultat al vaporizării, căldura nu ajunge să se propage în adîncime, încălzirea limitîndu-se doar la un volum mic de material.

Adîncimea stratului fisurat scade cu creșterea conținutului de Co. Comportarea bună la fisurare a aliajelor dure cu un conținut ridicat de Co se poate pune pe seama scăderii conductivității termice și a creșterii rezistenței la rupere.

Pe baza rezultatelor obținute se poate afirma că în cazul prelucrării aliajelor dure mecanismul de prelevare de material este influențat pe lîngă procesele termodinamice și de fisurile din stratul superficial, care favorizează desprinderea de particole solide.

Examinările macro- și microscopice efectuate asupra celor trei sorturi de aliaje dure, prelucrate la regimuri diferite, au demonstrat influența atît a compoziției chimice cît și a parametrilor de lucru asupra calității fizice și geometrice a suprafeței prelucrate. Concluziile desprinse se pot sintetiza după cum urmează:

Aspectul suprafețelor prelucrate prin eroziune electrică, caracterizate printr-o izotropie completă, este determinat de sortul de aliaj dur prelucrat și regimul de lucru aplicat.

Stratul superficial modificat a apărut la toate probele analizate, mărimea lui fiind funcție de sortul de aliaj dur prelucrat și regimul de lucru.

Adîncimea stratului fisurat este funcție de energia impulsului și sortul de aliaj dur, influența cea mai puternică fiind exercitată de durata impulsului. La durate ale impulsului $t_i \leq 12 \mu s$ nu s-au constatat fisuri în stratul de suprafață.

C A P I T O L U L 7

OPTIMIZAREA PROCESULUI TEHNOLOGIC DE PRELUCRARE

PRIN EROZIUNE ELECTRICA A ALIAJELOR DURE DIN

GRUPA DE UTILIZARE G.

7.1. STABILIREA ECUATIILOR DREPTELOR DE REGRESIE

Modelele matematice ale procesului tehnologic de prelucrare dimensională prin eroziune electrică a aliajelor dure din grupa de utilizare G, deduse în capitolele precedente, stau la baza stabilirii unei zone de lucru de maximizare sau minimizare a funcțiilor de răspuns. În acest scop, pe baza relațiilor (5.19...5.42) se determină dreptele de regresie, care să delimiteze zona de optim a prelucrării /23,36,47,136,167,173,198/.

În modelele matematice determinate au fost semnificative variabilele independente notate cu x_2 și/sau x_3 (tab.5.2) și după caz interacțiunea dintre ele. În centrul experimentului, la nivelul de bază al variabilelor independente (în valori codificate $x_2=0$; $x_3=0$), valoarea funcției de răspuns este dată de valoarea coeficientului termenului liber (b_0).

Considerând una din variabile constantă la nivelul de bază, se poate determina valoarea funcției de răspuns pentru cele două nivele considerate ale celeilalte variabile, introducând valorile codificate (+1) sau (-1). Coordonatele punctelor astfel obținute, stau la baza calculului coeficientului unghiular (m) și ordonatei în origine (y_0) a dreptei de regresie de forma :

$$y(x) = y_0 + mx.$$

Pentru determinarea dreptelor de regresie în cazul interacțiunii dintre variabile, se calculează valoarea funcției de răspuns pentru variabila considerată la nivelul superior și inferior al acesteia, cealaltă variabilă fiind parametru la nivelul superior sau inferior. În acest mod se pot determina câte două ecuații de regresie pentru fiecare variabilă.

În vederea discutării complete a rezultatelor obținute, s-au considerat după caz și variabilele și interacțiunile, care din punct de vedere statistic nu au fost semnificative. Pe baza metodei prezentate s-au determinat pentru cele două regimuri de

lucru, cele trei sorturi de aliaje dure și cele patru funcții de răspuns considerate, un număr de 144 ecuații de regresie.

Ecuațiile se prezintă grupate pentru fiecare sort de aliaj dur analizat, funcție de nivelul considerat al variabilei parametru, funcția de răspuns urmărită și regimul de lucru. Pentru identificarea ecuațiilor de regresie, simbolul funcției de răspuns (tab.4.4) are drept indice un grup de litere și cifre, care reprezintă în ordine regimul de lucru (D=degroșare; F=finisare) și valoarea reală a variabilei considerate parametru.

Aliaje dure din sortul 0 10:

$Q_P(D; 37,5A) = 15,6569 + 0,0341t_1$	$Q_P(D; 142,5\mu s) = -4,2607 + 0,6608i_1$ (7.1)
$Q_P(D; 50A) = 21,8605 + 0,0485t_1$	$Q_P(D; 190\mu s) = -4,6963 + 0,7156i_1$ (7.2)
$Q_P(D; 25A) = 9,4533 + 0,0197t_1$	$Q_P(D; 95\mu s) = -3,8251 + 0,6059i_1$ (6.3)
$Ra(D; 37,5A) = 3,04 + 0,0011t_1$	$Ra(D; 142,5\mu s) = 2,38 + 0,0216i_1$ (7.4)
$Ra(D; 50A) = 3,07 + 0,0027t_1$	$Ra(D; 190\mu s) = 2,19 + 0,0280i_1$ (7.5)
$Ra(D; 25A) = 3,01 - 0,0006t_1$	$Ra(D; 95\mu s) = 2,57 + 0,0152i_1$ (7.6)
$Q_E(D; 37,5A) = 25,7724 + 0,1013t_1$	$Q_E(D; 142,5\mu s) = -40,5153 + 2,1527i_1$ (7.7)
$Q_E(D; 50A) = 40,9963 + 0,1833t_1$	$Q_E(D; 190\mu s) = -47,3873 + 2,4642i_1$ (7.8)
$Q_E(D; 25A) = 11,7283 + 0,0131t_1$	$Q_E(D; 95\mu s) = -33,6433 + 1,8411i_1$ (7.9)
$\delta(D; 37,5A) = 79,2622 + 0,6490t_1$	$\delta(D; 142,5\mu s) = -13,0436 + 4,9275i_1$ (7.10)
$\delta(D; 50A) = 121,8237 + 0,7825t_1$	$\delta(D; 190\mu s) = -1,2507 + 5,4351i_1$ (7.11)
$\delta(D; 25A) = 36,7007 + 0,5154t_1$	$\delta(D; 95\mu s) = -24,8365 + 4,4199i_1$ (7.12)
$Ra(F; 9,375A) = 1,7050 + 0,0113t_1$	$Ra(F; 10\mu s) = 0,5650 + 0,1336i_1$ (7.13)
$Ra(F; 12,5A) = 2,2600 - 0,0025t_1$	$Ra(F; 12\mu s) = 0,6700 + 0,1248i_1$ (7.14)
$Ra(F; 6,25A) = 1,1500 + 0,0250t_1$	$Ra(F; 8\mu s) = 0,4600 + 0,1424i_1$ (7.15)
$Q_P(F; 9,375A) = 1,2216 + 0,0793t_1$	$Q_P(F; 10\mu s) = -1,5266 + 0,3777i_1$ (7.16)
$Q_P(F; 12,5A) = 1,9275 + 0,1268t_1$	$Q_P(F; 12\mu s) = -1,6527 + 0,4091i_1$ (7.17)
$Q_P(F; 6,25A) = 0,9157 + 0,0319t_1$	$Q_P(F; 8\mu s) = -1,4005 + 0,3474i_1$ (7.18)

$$Q_E(P; 9, 375A) = 2,4400 - 0,0567t_1 \quad Q_E(P; 10\mu s) = -2,0198 + 0,4114i_1 \quad (7.19)$$

$$Q_E(P; 12,5A) = 4,2191 - 0,1997t_1 \quad Q_E(P; 12\mu s) = -1,8155 + 0,3775i_1 \quad (7.20)$$

$$Q_E(P; 6,25A) = 0,5889 - 0,0038t_1 \quad Q_E(P; 8\mu s) = -2,2241 + 0,4463i_1 \quad (7.21)$$

$$\delta(P; 9, 375A) = 133,5424 - 5,0654t_1 \quad \delta(P; 10\mu s) = 33,7237 - 5,2443i_1 \quad (7.22)$$

$$\delta(P; 12,5A) = 171,2548 - 7,1978t_1 \quad \delta(P; 12\mu s) = 36,3874 + 3,8796i_1 \quad (7.23)$$

$$\delta(P; 6,25A) = 95,8300 - 2,9330t_1 \quad \delta(P; 8\mu s) = 31,0600 + 6,6090i_1 \quad (7.24)$$

Aliaje dure din sortul Q40

$$Q_P(D; 37,5A) = 39,0506 - 0,0569t_1 \quad Q_P(D; 142,5\mu s) = 8,8789 + 1,0619i_1 \quad (7.25)$$

$$Q_P(D; 50A) = 54,7396 - 0,0738t_1 \quad Q_P(D; 190\mu s) = 9,1664 + 0,9976i_1 \quad (7.26)$$

$$Q_P(D; 25A) = 23,3616 - 0,0399t_1 \quad Q_P(D; 95\mu s) = -8,5914 + 1,1263i_1 \quad (7.27)$$

$$R_a(D; 37,5A) = 4,4775 - 0,0010t_1 \quad R_a(D; 142,5\mu s) = 2,7750 + 0,0416i_1 \quad (7.28)$$

$$R_a(D; 50A) = 4,9150 - 0,0004t_1 \quad R_a(D; 190\mu s) = 2,6450 + 0,0438i_1 \quad (7.29)$$

$$R_a(D; 25A) = 4,0400 - 0,0016t_1 \quad R_a(D; 95\mu s) = 2,9050 + 0,0394i_1 \quad (7.30)$$

$$Q_E(D; 37,5A) = 14,4227 - 0,0347t_1 \quad Q_E(D; 142,5\mu s) = -7,8922 + 0,4632i_1 \quad (7.31)$$

$$Q_E(D; 50A) = 23,3499 - 0,0567t_1 \quad Q_E(D; 190\mu s) = -6,4033 + 0,3796i_1 \quad (7.32)$$

$$Q_E(D; 25A) = 5,4955 - 0,0127t_1 \quad Q_E(D; 95\mu s) = -9,3811 + 0,5469i_1 \quad (7.33)$$

$$\delta(D; 37,5A) = 34,6743 - 0,0483t_1 \quad \delta(D; 142,5\mu s) = 7,4346 + 0,5430i_1 \quad (7.34)$$

$$\delta(D; 50A) = 44,8192 - 0,0718t_1 \quad \delta(D; 190\mu s) = 8,5012 + 0,4534i_1 \quad (7.35)$$

$$\delta(D; 25A) = 24,5270 - 0,0247t_1 \quad \delta(D; 95\mu s) = 6,3680 + 0,6325i_1 \quad (7.36)$$

$$R_a(P; 9, 375A) = 1,5948 + 0,0257t_1 \quad R_a(P; 10\mu s) = 0,3249 + 0,1628i_1 \quad (7.37)$$

$$R_a(P; 12,5A) = 1,8346 + 0,0526t_1 \quad R_a(P; 12\mu s) = 0,2148 + 0,1800i_1 \quad (7.38)$$

$$R_a(P; 6,25A) = 1,3550 - 0,0013t_1 \quad R_a(P; 8\mu s) = 0,4350 + 0,1456i_1 \quad (7.39)$$

$$Q_P(P; 9, 375A) = -0,0942 + 0,2829t_1 \quad Q_P(P; 10\mu s) = -1,7070 + 0,4738i_1 \quad (7.40)$$

$$Q_P(P; 12,5A) = -0,5356 + 0,4751t_1 \quad Q_P(P; 12\mu s) = -2,2944 + 0,5968i_1 \quad (7.41)$$

$$Q_P(P; 6,25A) = -0,3472 + 0,0907t_1 \quad Q_P(P; 8\mu s) = -1,1196 + 0,3508i_1 \quad (7.42)$$

$Q_E(F; 9, 375A) = 1,7289 - 0,0269t_i$	$Q_E(F; 10\mu s) = -1,3245 + 0,2971i_i$ (7.43)
$Q_E(F; 12,5A) = 2,9142 - 0,0526t_i$	$Q_E(F; 12\mu s) = -1,2240 + 0,2806i_i$ (7.44)
$Q_E(F; 6,25A) = 0,5436 - 0,0012t_i$	$Q_E(F; 8\mu s) = -1,4250 + 0,3135i_i$ (7.45)
$\delta(F; 9, 375A) = 115,2274 - 6,1156t_i$	$\delta(F; 10\mu s) = 31,1568 + 2,4442i_i$ (7.46)
$\delta(F; 12,5A) = 147,2951 - 8,5586t_i$	$\delta(F; 12\mu s) = 33,5833 + 0,8807i_i$ (7.47)
$\delta(F; 6,25A) = 83,1597 - 3,6727t_i$	$\delta(F; 8\mu s) = 28,7303 + 4,0077i_i$ (7.48)

Aliaje dure din sortul Q60

$Q_P(D; 37,5A) = 55,2213 - 0,0687t_i$	$Q_P(D; 142,5\mu s) = -7,1406 + 1,4018i_i$ (7.49)
$Q_P(D; 50A) = 75,5067 - 0,0881t_i$	$Q_P(D; 190\mu s) = -7,6425 + 1,3281i_i$ (7.50)
$Q_P(D; 85A) = 34,9359 - 0,0493t_i$	$Q_P(D; 95\mu s) = -6,6387 + 1,4755i_i$ (7.51)
$Ra(D; 37,5A) = 4,2202 - 0,0019t_i$	$Ra(D; 142,5\mu s) = 1,2349 + 0,0565i_i$ (7.52)
$Ra(D; 50A) = 4,6901 - 0,0002t_i$	$Ra(D; 190\mu s) = 1,5097 + 0,0628i_i$ (7.53)
$Ra(D; 25A) = 3,7503 - 0,0035t_i$	$Ra(D; 95\mu s) = 2,1601 + 0,0502i_i$ (7.54)
$Q_E(D; 37,5A) = 11,7265 - 0,0293t_i$	$Q_E(D; 142,5\mu s) = 4,4876 + 0,3209i_i$ (7.55)
$Q_E(D; 50A) = 17,7076 - 0,0432t_i$	$Q_E(D; 190\mu s) = 3,9112 + 0,2683i_i$ (7.56)
$Q_E(D; 25A) = 5,7454 - 0,0155t_i$	$Q_E(D; 95\mu s) = 5,0640 + 0,3734i_i$ (7.57)
$\delta(D; 37,5A) = 20,9501 - 0,0387t_i$	$\delta(D; 142,5\mu s) = 6,7970 + 0,2303i_i$ (7.58)
$\delta(D; 50A) = 24,4707 - 0,0432t_i$	$\delta(D; 190\mu s) = 5,5999 + 0,2132i_i$ (7.59)
$\delta(D; 25A) = 17,4295 - 0,0342t_i$	$\delta(D; 95\mu s) = 7,9941 + 0,2474i_i$ (7.60)
$Ra(F; 9, 375A) = 1,5500 + 0,0450t_i$	$Ra(F; 10\mu s) = 0,3650 + 0,1744i_i$ (7.61)
$Ra(F; 12,5A) = 1,6200 + 0,0925t_i$	$Ra(F; 12\mu s) = 0,1700 + 0,2048i_i$ (7.62)
$Ra(F; 6,25A) = 1,4800 + 0,0025t_i$	$Ra(F; 8\mu s) = 0,5600 + 0,1401i_i$ (7.63)
$Q_P(F; 9, 375A) = 1,2875 + 0,2042t_i$	$Q_P(F; 10\mu s) = -0,7606 + 0,4362i_i$ (7.64)
$Q_P(F; 12,5A) = 1,2892 + 0,3403t_i$	$Q_P(F; 12\mu s) = -1,1692 + 0,5234i_i$ (7.65)
$Q_P(F; 6,25A) = 1,2831 + 0,0682t_i$	$Q_P(F; 8\mu s) = -0,3538 + 0,3492i_i$ (7.66)

$$Q_E(F_1 9, 375A) = 2,4030 - 0,0450 t_1 \quad Q_E(F_1 10 \mu s) = -1,5648 + 0,3752 i_1 \quad (7.67)$$

$$Q_E(F_1 12, 5A) = -3,9231 - 0,0798 t_1 \quad Q_E(F_1 12 \mu s) = -1,4463 + 0,3530 i_1 \quad (7.68)$$

$$Q_E(F_1 6, 25A) = 0,8829 - 0,0103 t_1 \quad Q_E(F_1 8 \mu s) = -1,6833 + 0,3975 i_1 \quad (7.69)$$

$$\gamma(F_1 9, 375A) = 100,6008 - 4,5731 t_1 \quad \gamma(F_1 10 \mu s) = 11,7516 + 4,5993 i_1 \quad (7.70)$$

$$\gamma(F_1 12, 5A) = 137,3092 - 6,8066 t_1 \quad \gamma(F_1 12 \mu s) = 16,0068 + 3,1699 i_1 \quad (7.71)$$

$$\gamma(F_1 6, 25A) = 63,8924 - 2,3395 t_1 \quad \gamma(F_1 8 \mu s) = 7,4964 + 6,0288 i_1 \quad (7.72)$$

Pe baza acestor relații tehnologul poate calcula valoarea funcției de răspuns dorite, pentru variabilele independente din domeniul analizat (tab.5.2) și variabila parametru dată. Relațiile sînt valabile pentru cazul prelucrării aliajelor dure din grupa de utilizare G, cu electrod din cupru legat la polul pozitiv și presiunea de spălare a interstițiului tehnologic de 0,1 bar. O singură excepție apare în cazul prelucrării sortului G1e, în regim de degroșare, cînd datorită instabilității procesului electrodul a fost legat de catod, restul condițiilor fiind menținute la parametrii prezentați.

7.2. TEHNOLOGIA OPTIMĂ DE PRELUCRARE A ALIAJELOR

DURE DIN GRUPA DE UTILIZARE G.

Pentru a ușura munca tehnologului și a operatorului pe baza relațiilor (7.1...7.72) determinate, s-au trasat dreptele de regresie, care delimitează domeniul optim, în care funcția de răspuns are după caz valoarea maximă sau minimă. Pentru fiecare funcție de răspuns, domeniul este limitat superior și inferior de cele două drepte de regresie, determinate din interacțiunea variabilelor, variabila parametru fiind menținută la nivelul superior respectiv inferior. Dreapta cuprinsă în interiorul domeniului a fost determinată pentru cazul cînd variabila parametru a fost menținută la nivelul de bază.

În fig.7.1...fig.7.6 se prezintă tehnologia optimă de prelucrare a aliajelor dure din grupa de utilizare G. Sintetizată în grafice, pentru funcțiile de răspuns considerate.

Pornind de la problema de prelucrare dată și funcția de răspuns urmărită, tehnologul sau operatorul poate alege din grafice regimul de prelucrare optim.

REGIM DE DEGROSARE:
 Materialul piësei: G10
 Materialul electrodului: Cu

Polaritatea electrodului: \ominus
 Presiunea de spãlare: 0,1 bar

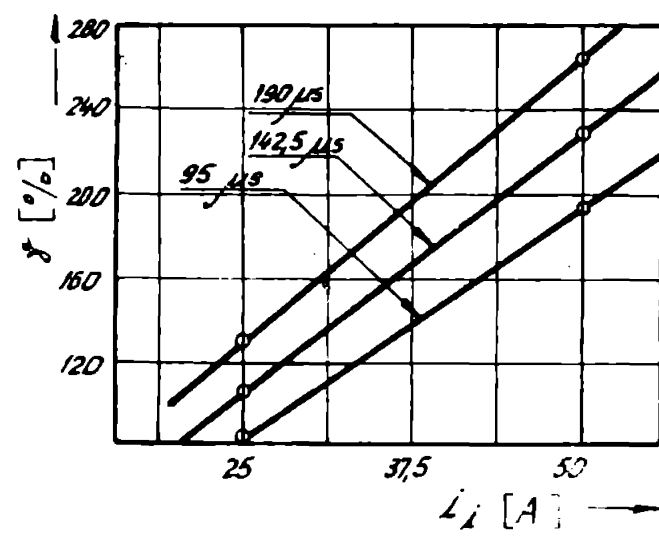
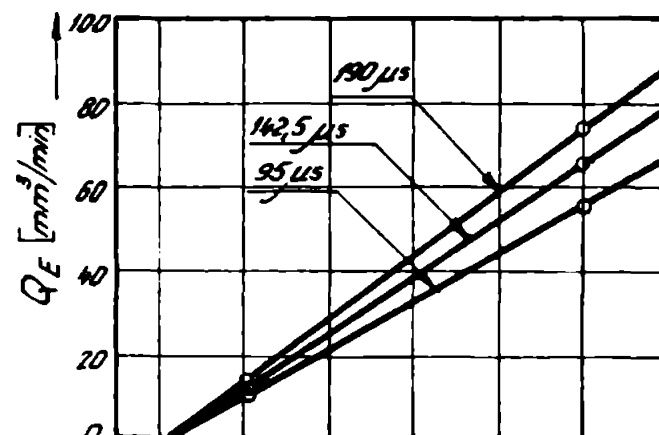
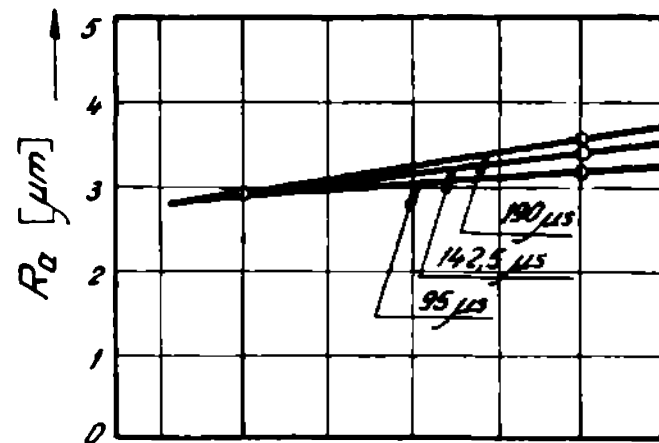
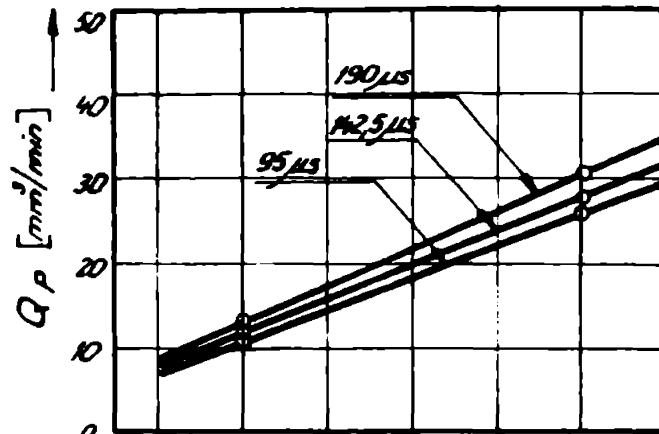
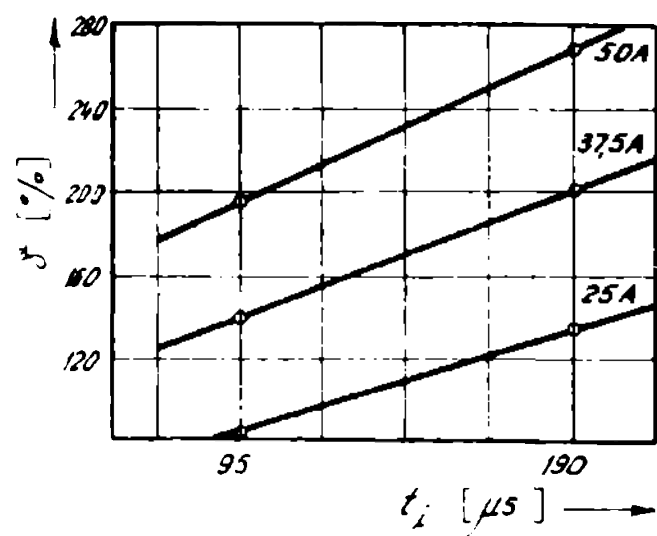
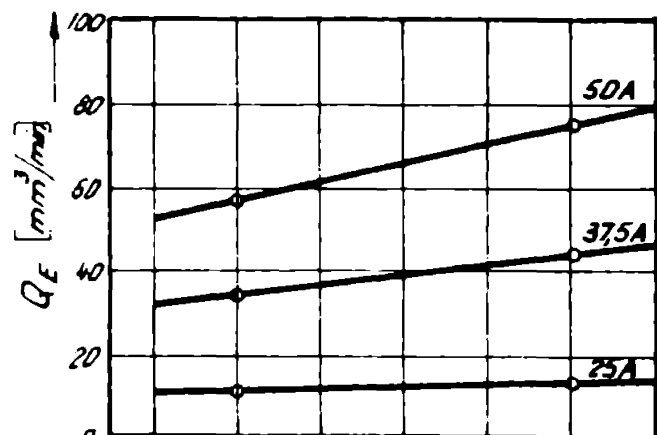
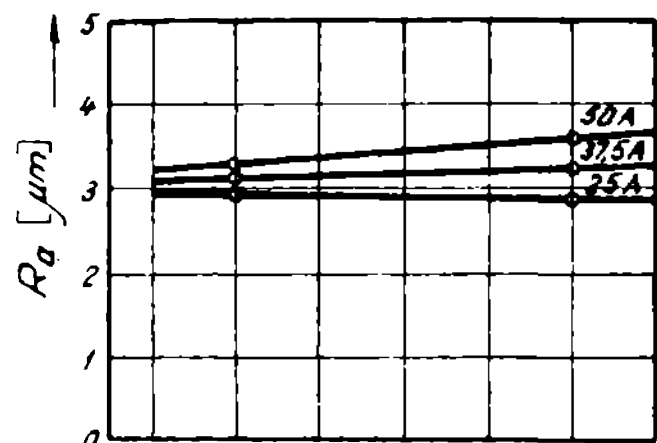
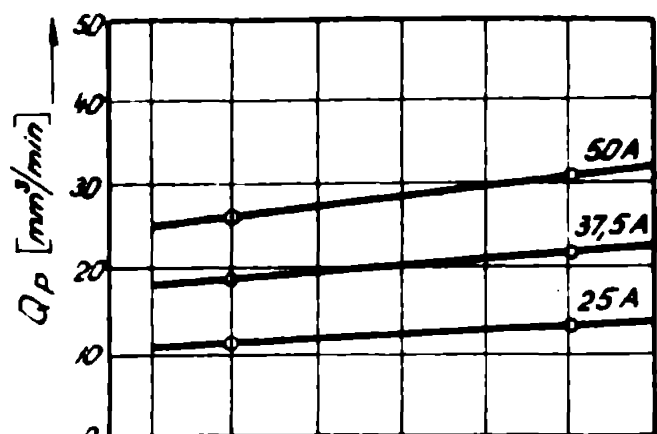


Fig.7.1. Caracteristici tehnologice ale aliajelor dure G10-regim de degrosare

REGIM DE DEGROȘARE:
 Materialul piesei: G40
 Materialul electrodului: Cu

Polaritatea electrodului: ⊕
 Presiunea de spălare: 0,1 bar

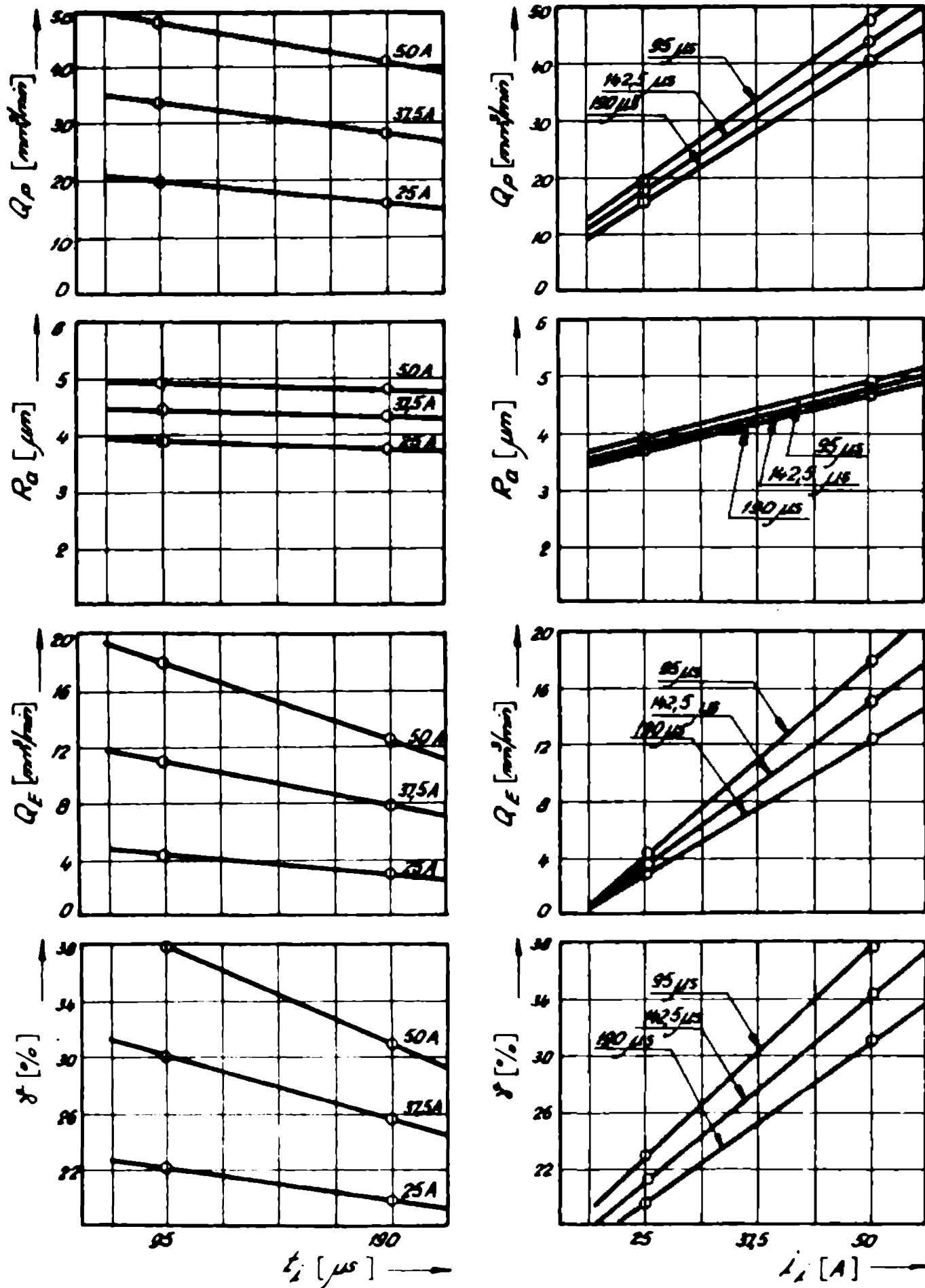


Fig.7.2. Caracteristici tehnologice ale aliajelor dure G40-
 regim de degroșare

REGIM DE DEGROSARE:
 Materialul piesei: G60
 Materialul electrodului: Cu

Polaritatea electrodului: ⊕
 Presiunea de spălare: 0,1 bar

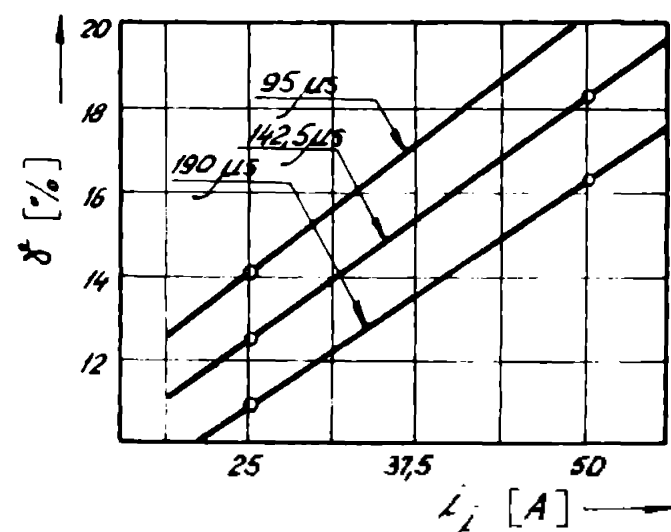
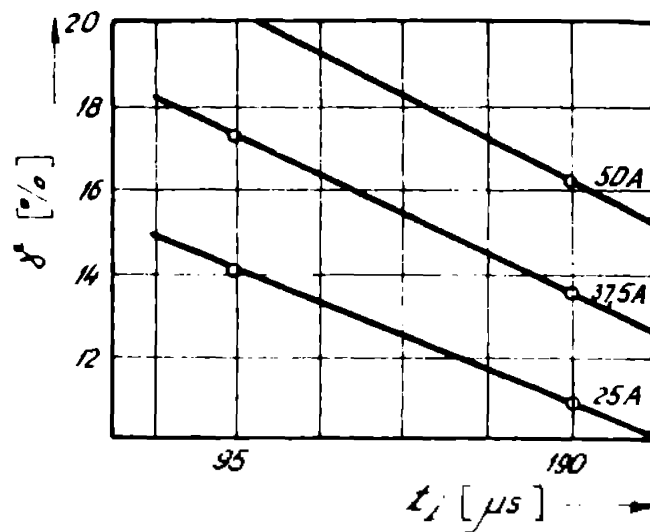
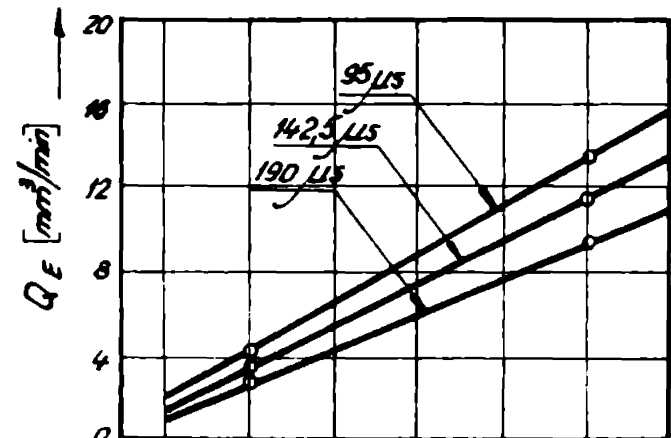
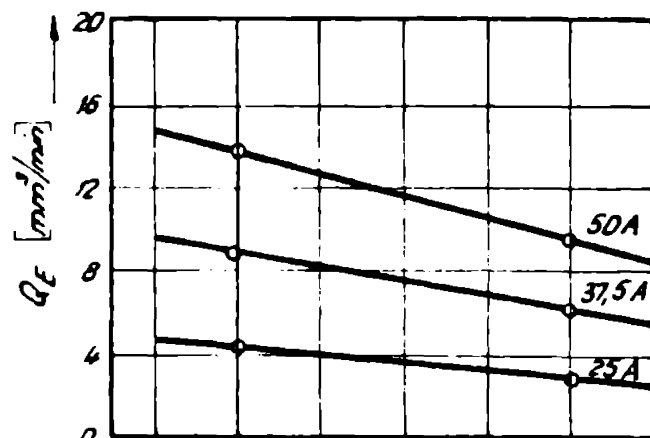
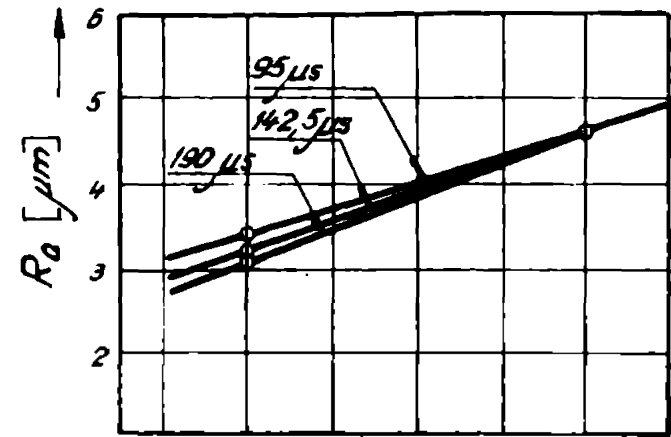
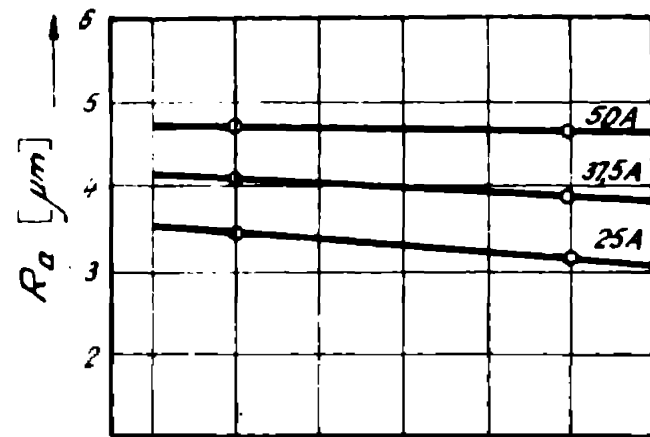
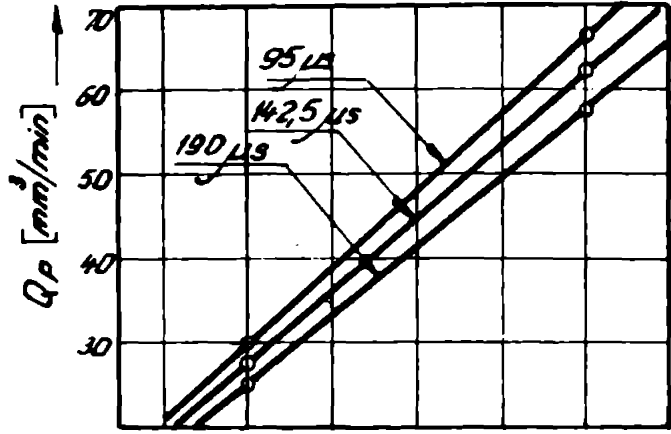
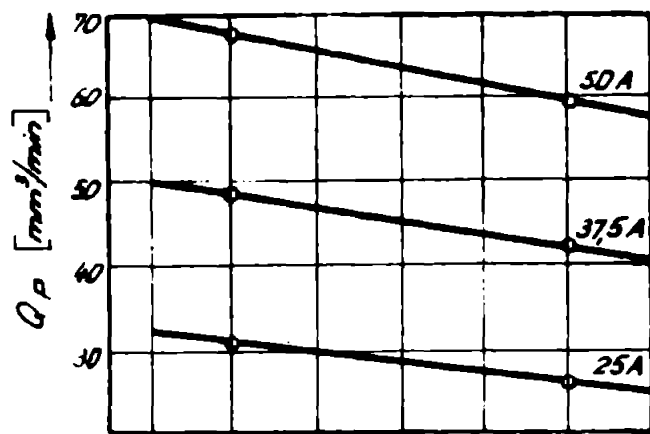


Fig.7.3. Caracteristici tehnologice ale aliajelor dure G60-
 regim de degroșare

REGIM DE FINISARE:
 Materialul piesei: G 10
 Materialul electrodului: Cu

Polaritatea electrodului: ⊕
 Presiunea de spălare Q/bar

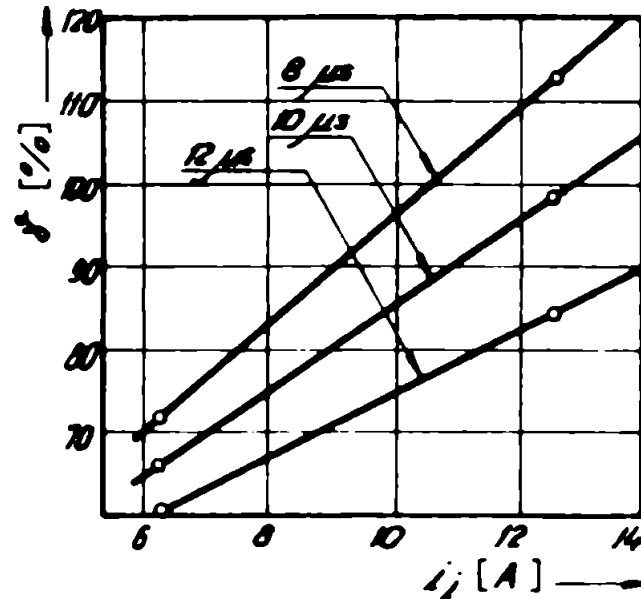
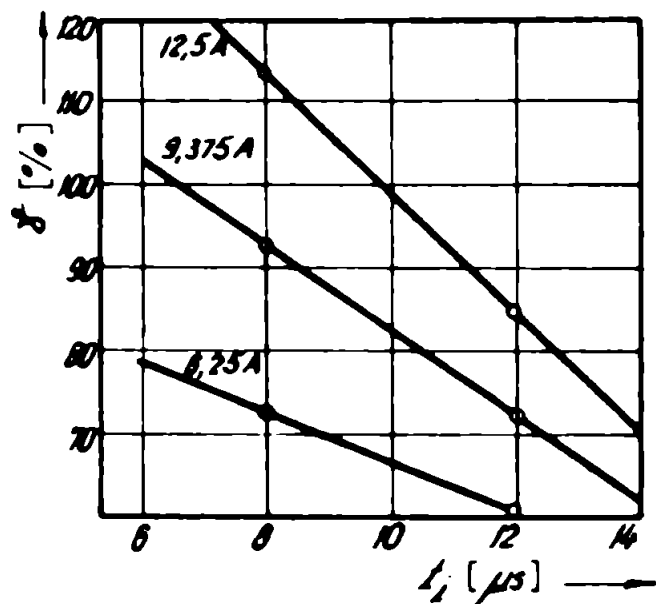
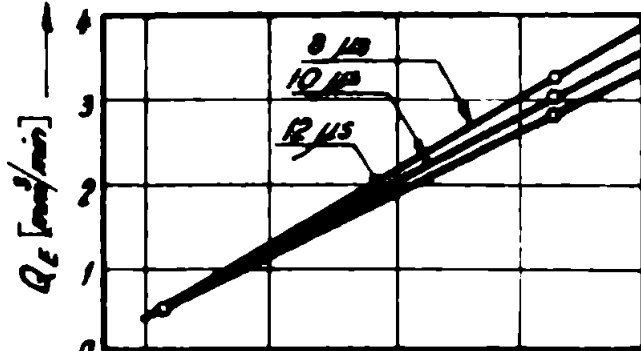
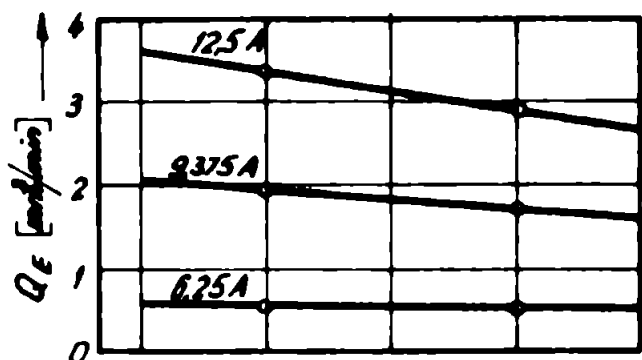
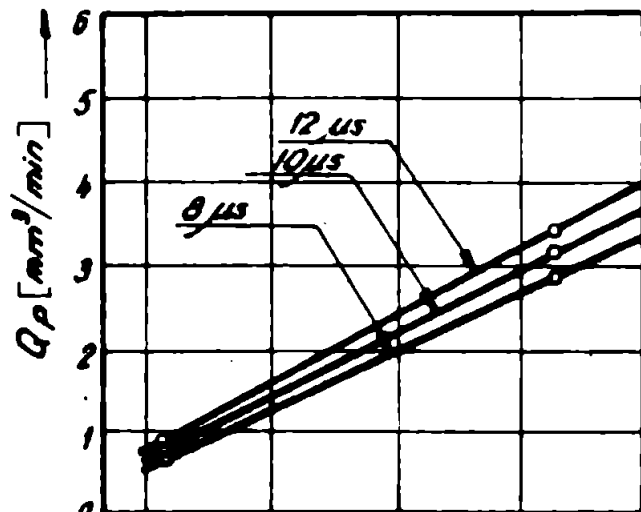
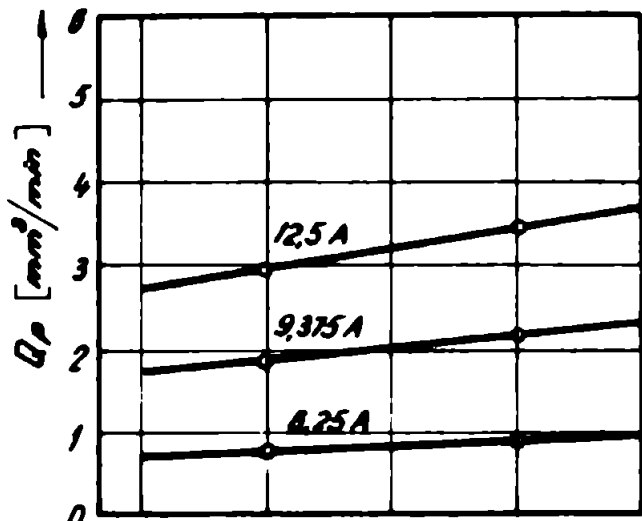
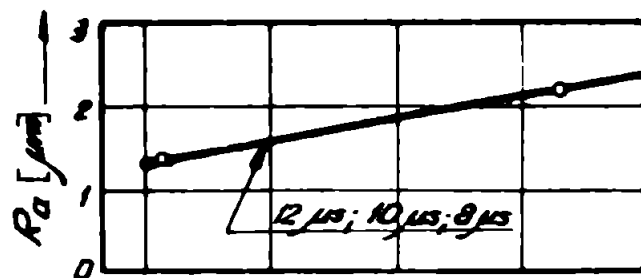
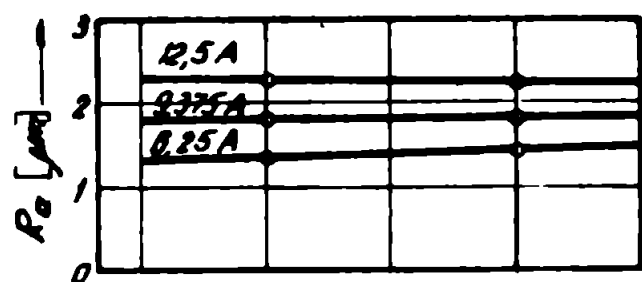


Fig. 7.4. Caracteristici tehnologice ale aliajelor dure G10-regim de finisare.

REGIM DE FINISARE

Materialul piesei: G40

Materialul electrodului: Cu

Polaritatea electrodului: \oplus

Presiunea de spălare: 0,1 bar

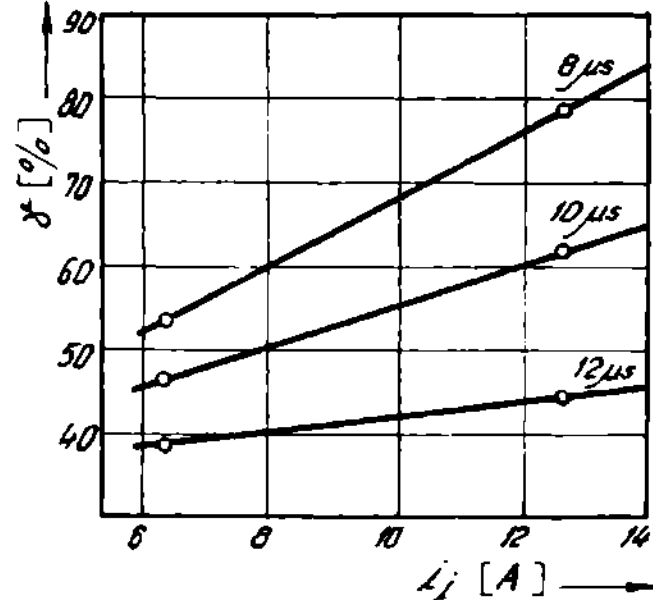
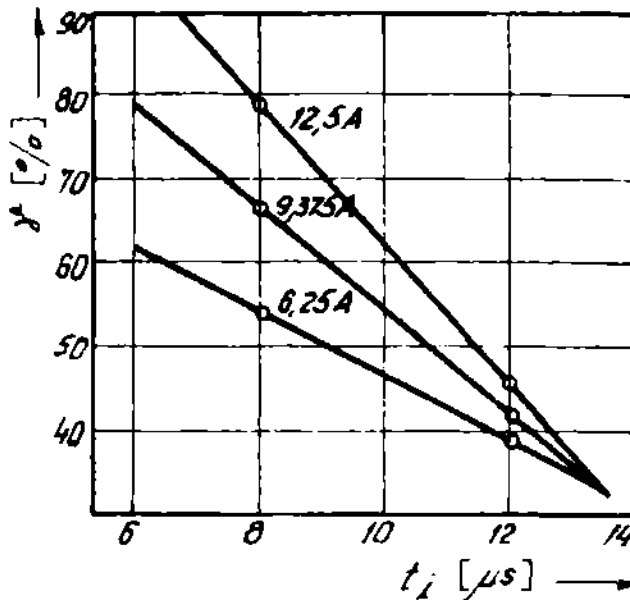
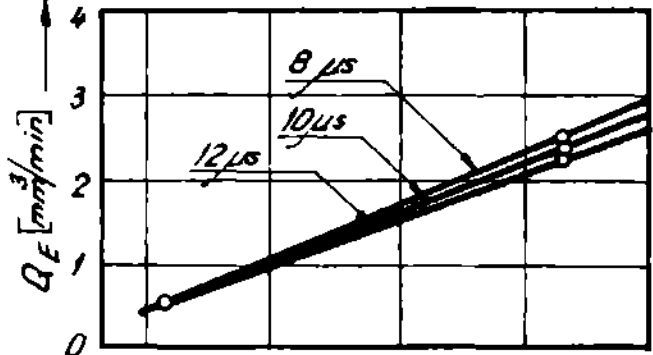
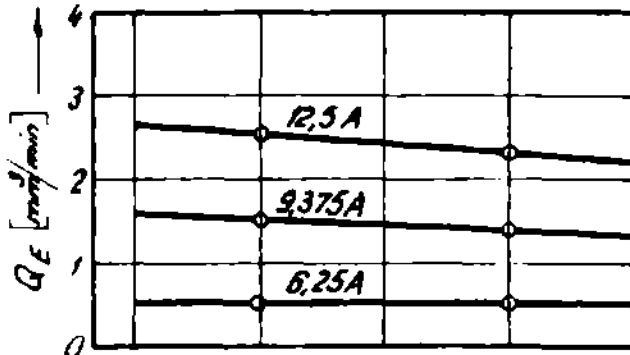
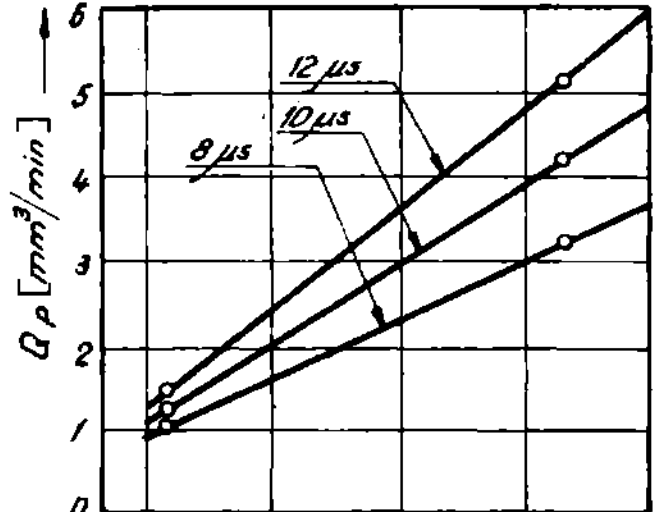
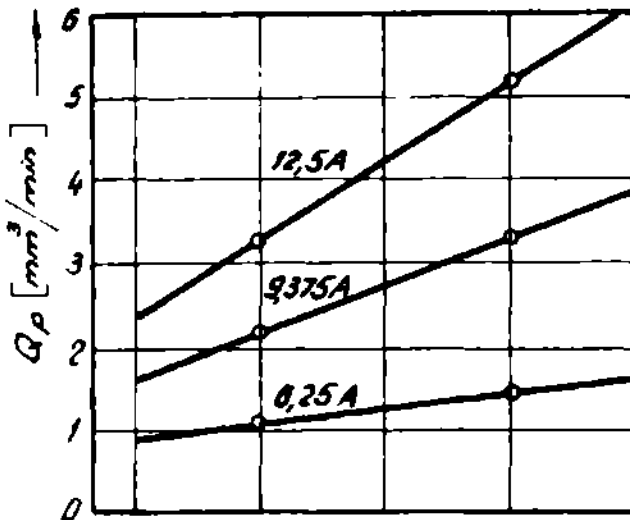
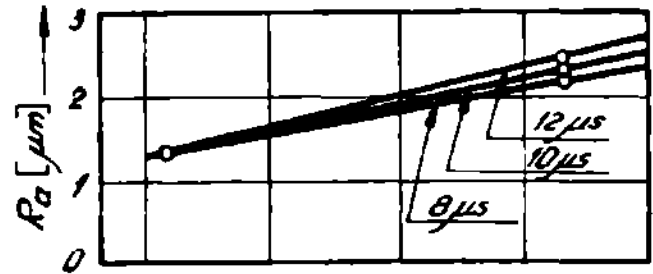
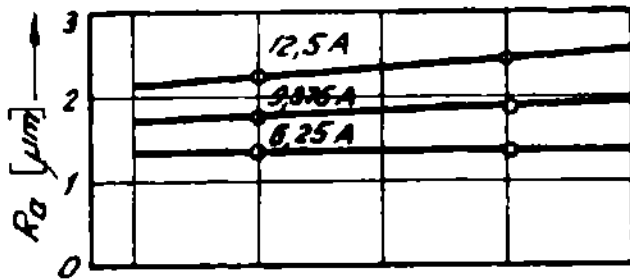


Fig.7.5. Caracteristici tehnologice ale aliajelor dure G40-
regim de finisare

REGIM DE FINISARE:

Materialul piesei: G 60
Materialul electrodului: Cu

Polaritatea electrodului: ⊕
Presiunea de spălare: 0,1 bar

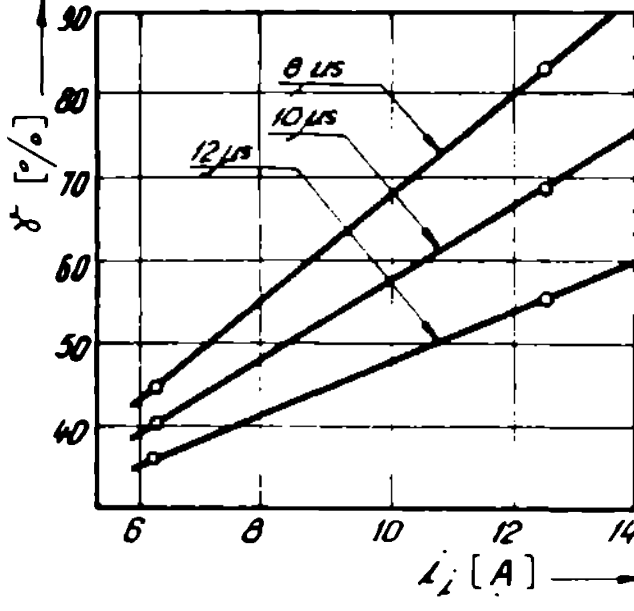
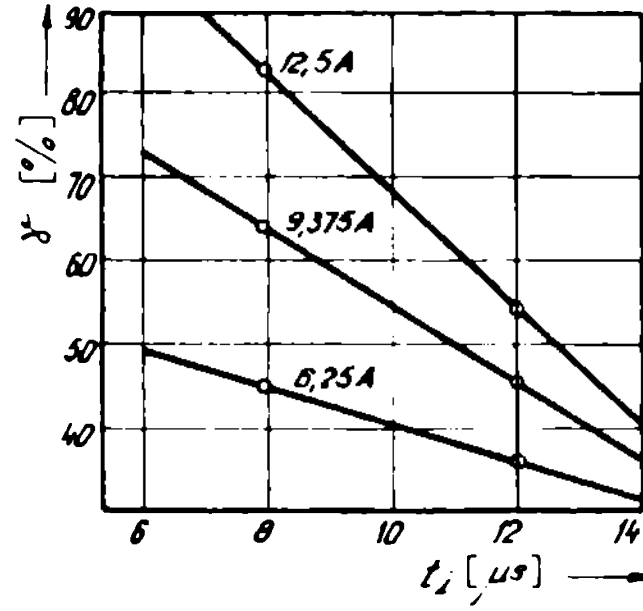
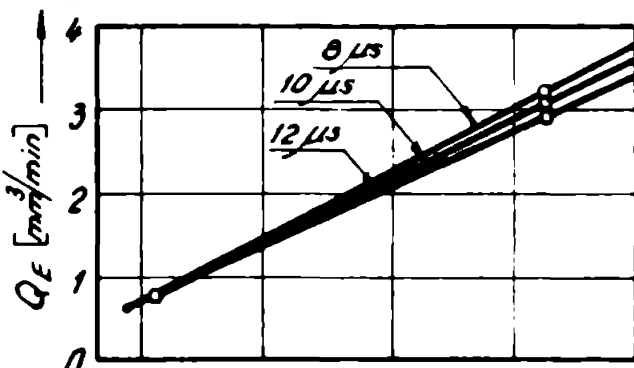
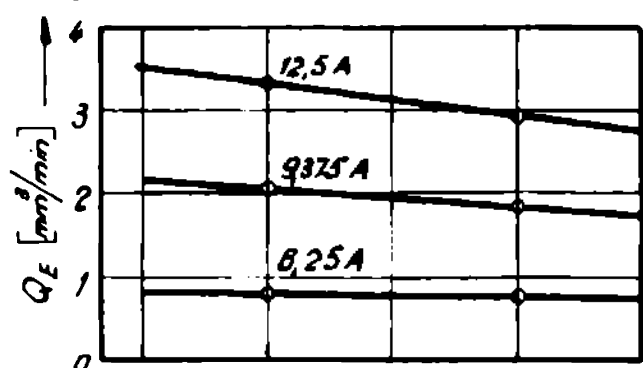
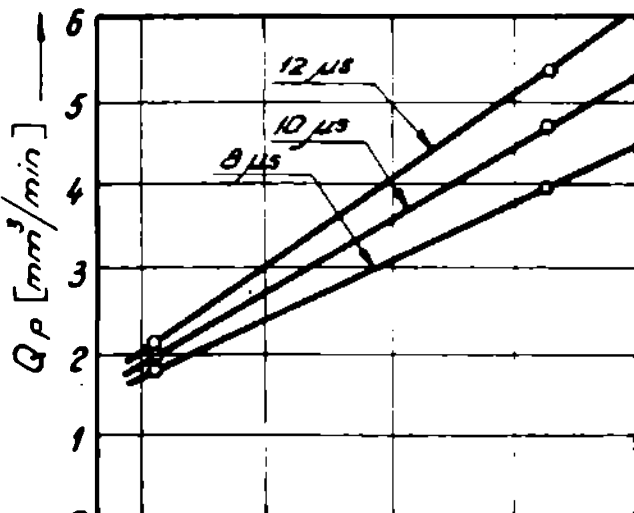
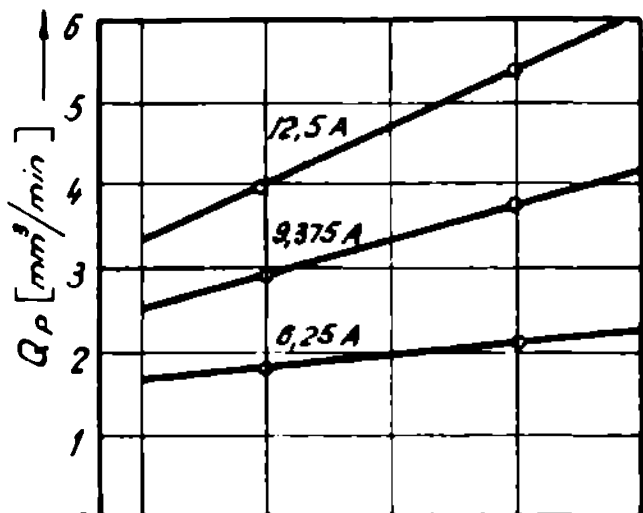
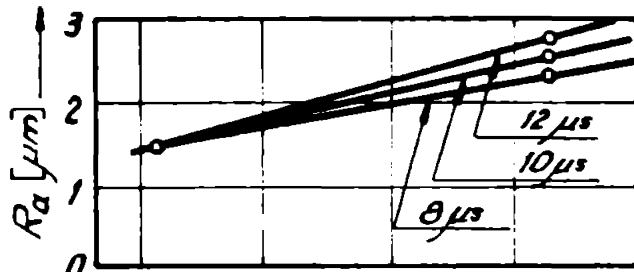
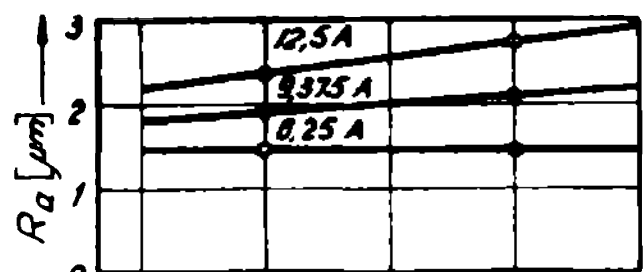


Fig.7.6. Caracteristici tehnologice ale aliajelor dure G60- regim de finisare

7.3. APRECIERI CU PRIVIRE LA PRELUCRABILITATEA ALIAJELOR DURE DIN GRUPE DE UTILIZARE G.

Din analiza graficelor tehnologice de lucru (fig.7.1...fig.7.6), se pot trage concluzii privind prelucrabilitatea aliajelor dure în general, cu referiri la cele din grupa de utilizare G, în particular.

Toate graficele au fost trasate pentru intervalele de variație ale parametrilor în care s-au obținut valori extreme pentru caracteristicile tehnologice urmărite. În aceeași idee s-au stabilit și parametri de lucru menținuți constanți în timpul prelucrării.

Analiza s-a întreprins separat pentru regimul de degroșare (fig.7.1, fig.7.2, fig.7.3) și regimul de finisare (fig.7.4, fig.7.5, fig.7.6) și cele trei sorturi de aliaje dure din grupa de utilizare G.

La prelucrarea aliajelor dure din sortul G40 în regim de degroșare, s-a lucrat cu electrodul sculă legat la polul negativ, față de toate celelalte situații când s-a utilizat o legare anodică. Inversarea a fost necesară pentru asigurarea condițiilor de stabilitate ale procesului.

Principala caracteristică tehnologică urmărită la prelucrarea în regim de degroșare este productivitatea.

La prelucrarea aliajelor dure din sortul G40 se remarcă o creștere a productivității cu creșterea energiei descărcării. Creșterea productivității cu creșterea duratei impulsului este mai lentă la trepte mai mici de curent ($i_1=25A$) comparativ cu treptele superioare de curent ($i_1=50A$) (fig.7.1)

Cu creșterea curentului descărcării productivitatea prelucrării crește, valorile mai mari fiind obținute pentru durate de impuls mai lungi ($t_1=190 \mu s$) (fig.7.1).

În cazul prelucrării aliajelor dure din sortul G40 și G60, la care electrodul sculă a fost legat la anod, se remarcă o scădere a productivității cu creșterea duratei impulsului, la aceeași valoare a curentului descărcării. Productivitățile mai mari se obțin pentru trepte de curent superioare (fig.7.2, fig.7.3).

Analizând productivitatea funcție de curentul descărcării, durata impulsului fiind parametru, se remarcă o creștere a productivității pentru valori mai mari ale curentului și durate de impuls mai scurte ($t_1=95 \mu s$) (fig.7.2, fig.7.3)

Analizând comparativ valorile obținute funcție de sortul aliajului dur prelucrat se remarcă o creștere a productivității cu creșterea conținutului de Co.

În cazul regimului de degroșare rugozitatea suprafeței prelucrate interesează sub aspectul informației necesare pentru prelucrarea ulterioară de finisare. Valearea rugozității suprafeței nu se modifică în mod hetărîter cu creșterea duratei impulsului, la aceeași valeare a curentului descărcării.

Cu creșterea curentului descărcării rugozitatea suprafeței prelucrate crește. Durata impulsului, considerată parametru, influențează în mod diferit rugozitatea funcție de polaritatea electrodului sculă (fig.7.1 comparativ cu fig.7.2, fig.7.3). La legarea catodică a electrodului sculă valori mai mari ale rugozității se obțin la durate lungi ale impulsului (fig.7.1), pe cînd în cazul legării anodice a electrodului sculă situația se inversează, impulsurile de durată mai scurte dau o rugozitate mai mare (fig. 7.2, fig.7.3).

Comparînd rugozitățile obținute la prelucrarea celor trei sorturi de aliaje dure cu același regim de lucru, se remarcă o creștere a rugozității suprafeței prelucrate cu creșterea conținutului de Co.

Modificarea polarității electrodului sculă nu influențează rugozitatea suprafeței prelucrate.

Usura electrodului sculă (Q_E) se comportă în același mod ca și productivitatea prelucrării (Q_P).

Comparînd usura electrodului sculă pentru cazul legării anodice (fig.7.2, fig.7.3), se remarcă o usură mai mică în cazul prelucrării aliajelor dure cu un conținut mai mare de Co.

Usura relativă este influențată într-o măsură foarte mare de polaritatea electrodului sculă. În cazul prelucrării aliajelor dure din sortul G10, electrodul sculă fiind legat la polul negativ, usura relativă (fig.7.1) are valori mult mai mari decît în cazul prelucrării aliajelor dure din sortul G40 și G60, la care s-a lucrat cu o legare anodică a electrodului (fig.7.2, fig.7.3).

În cazul legării electrodului sculă la polul negativ usura relativă crește cu creșterea duratei impulsului și curentul descărcării (fig.7.1). La legarea anodică a electrodului sculă situația se inversează (fig.7.2, fig.7.3).

Cu creșterea duratei impulsului, curentul descărcării fiind

parametru, uzura relativă scade. La analiza uzurii relative funcție de curentul descărcării, durata impulsului fiind parametru se constată o creștere a uzurii relative cu creșterea curentului, valorile mai mari fiind obținute la durate mai mici ale impulsului ($t_i = 95 \mu s$).

La prelucrarea aliajelor dure în regim de finisare principala caracteristică tehnologică urmărită este rugozitatea suprafeței prelucrate, care este direct proporțională cu energia descărcării.

În intervalul de variație a duratei impulsului ($t_i = 8 \dots 12 \mu s$) rugozitatea este cu atât mai mare cu cât treapta de curent aleasă drept parametru este mai mare (fig.7.4, fig.7.5, fig.7.6).

Cu creșterea curentului descărcării rugozitatea suprafețelor prelucrate crește, influența duratei impulsului luate ca parametru ne fiind semnificativă. În cazul prelucrării aliajelor dure din sortul G10, rugozitatea suprafeței prelucrate nu s-a modificat cu creșterea duratei impulsului (fig.7.4).

Analizând rugozitatea suprafeței prelucrate funcție de sortul de aliaj dur, se constată că valorile obținute sînt apropiate. Cu creșterea conținutului de Co se remarcă o creștere ușoară a rugozității suprafeței prelucrate.

Productivitatea prelucrării crește cu creșterea curentului descărcării și duratei impulsului. În intervalul de variație al duratei impulsului productivitatea crește cu creșterea curentului descărcării. La treapta de curent $i_i = 6,25 A$ productivitatea crește puțin cu creșterea duratei impulsului, în schimb la un curent de $i_i = 12,5 A$, creșterea este semnificativă. (fig.7.4, fig.7.5, fig.7.6).

Cu creșterea curentului descărcării productivitatea crește foarte mult, influența exercitată de durata impulsului este mai mică și funcție de sortul de aliaj dur prelucrat.

La prelucrarea aliajelor dure din sortul G10, productivitatea obținută pentru diferite trepte ale duratei impulsului luate ca parametru, are valori apropiate (fig.7.4). În cazul prelucrării aliajelor dure din sorturile G40 și G60, cu un conținut mai mare de Co, productivitatea crește cu creșterea duratei impulsului, considerat parametru (fig.7.6).

Uzura electrodului sculă scade cu creșterea duratei impulsului, pentru valori constante ale curentului descărcării. La valori mici ale curentului descărcării ($i_i = 6,25 A$) uzura electrodului sculă este aproximativ constantă indiferent de durata impulsului.

Cu oit curentul descărcării, luat ca parametru, crește ($i_1=12,5A$), uzura electrodului scade odată cu creșterea duratei impulsului (Fig.7.4, fig.7.5, fig.7.6).

Analizând uzura electrodului funcție de variația curentului descărcării, durata impulsului fiind parametru, se constată o creștere a uzurii cu creșterea curentului. Valori mai mici ale uzurii se obțin pentru durate mai lungi ale impulsului.

Uzura relativă scade cu creșterea duratei impulsului și scăderea curentului descărcării luat drept parametru. Cu creșterea curentului descărcării uzura relativă crește, valorile mai mari fiind obținute la durate scurte ale impulsului ($t_1=8 \mu s$) față de duratele mai lungi ($t_1=12 \mu s$).

Analizând uzura relativă funcție de sorturile de aliaje dure prelucrate, se constată că creșterea conținutului de Co determină o scădere a uzurii relative (fig.7.4 comparativ cu fig.7.5, fig.7.6).

În concluzie se poate aprecia că la prelucrarea prin eroziune electrică sortul aliajului dur influențează caracteristicile tehnologice obținute.

Productivitatea prelucrării aliajelor dure diferă în funcție de conținutul în Co, care modifică conductivitatea termică. Aliajele dure cu un conținut ridicat de Co având conductivitatea termică mai mică, se prelucrează mai intens, deoarece se reduc pierderile de căldură spre interiorul materialului.

Conținutul în Co a aliajelor dure influențează și uzura electrodului sculă. Astfel uzura relativă scade cu creșterea conținutului de Co.

La același regim de prelucrare sorturile de aliaje dure cu un conținut ridicat de Co prezintă o rugozitate puțin mărită comparativ cu celelalte sorturi.

Rugozitatea suprafețelor prelucrate crește cu creșterea energiei descărcării fiind influențată de parametrii reglabili, durata impulsului și curentul descărcării.

Schimbarea polarității electrodului sculă nu influențează rugozitatea suprafețelor prelucrate.

Cu creșterea duratei impulsului de curent scade uzura electrodului sculă. La durate lungi ale impulsului conductivitatea termică a electrodului sculă (în cazul analizat Cu), se pune mai bine în valoare, astfel încât căldura formată la suprafață se transmite în interiorul materialului.

Din punct de vedere al productivității prelucrării și uzurii electrodului sculă ar fi rațională prelucrarea aliajelor dure cu durate ale impulsului de curent $t_1 \leq 190 \mu s$.

La sorturile de aliaje dure cu un conținut mai mare în Co legarea electrodului sculă la anod asigură un proces stabil de prelucrare și conduce la obținerea unor rezultate mai bune din punct de vedere al productivității și uzurii.

În concluzie se poate aprecia că, rezultatele obținute și graficele trasate sînt în concordanță cu aspectele teoretice ale prelucrării aliajelor dure, cercetate și fundamentate în capitolele precedente, constituind o documentație utilă pentru tehnolog în alegerea parametrilor optimi ai procesului de prelucrare.

C A P I T O L U L 8

CONCLUZII GENERALE SI CONTRIBUTIILE ORIGI- NALE ALE LUCRARIII

Tema tratată în teza de doctorat, încearcă să rezolve într-o viziune completă problema prelucrării prin eroziune electrică a aliajelor dure în general și în particular a celor din grupa de utilizare G, pornind de la cercetarea fundamentală a aspectelor complexe ale proceselor electroerozive, pînă la rezolvarea unor probleme practice de mare interes, privind optimizarea tehnologiei de prelucrare. Apreciem că s-a reușit o interpretare unitară a rezultatelor, luîndu-se în permanență în considerare interdependența dintre factori, prin tratarea sistemică a fenomenelor complexe, care guvernează prelucrarea prin eroziune electrică.

Aberdarea tehnologiei de prelucrare s-a făcut într-o viziune originală, neîntîlnită în literatura de specialitate, bazată pe modelarea experimentală, realizată prin aplicarea statisticii matematice și analizei regresionale.

Principalele rezultate ale cercetării în care s-au adus contribuții originale sînt :

A. În domeniul cercetării fundamentale

1. Modelarea matematică a procesului de prelevare de material la prelucrarea electroerzivă, prin descrierea analitică a fenomenelor ce au loc în interstițiul tehnologic de lucru, la o descărcare singulară. Metoda analitică are la bază ecuația generală Fourier de transmitere a căldurii, adaptată condițiilor de contur aferente modelului geometric considerat. Se determină temperatura în centrul sursei de căldură și dimensiunile geometrice ale craterului, funcție de raza sursei de căldură și durata impulsului.

2. Elaborarea unui program de calcul, scris în limbaj Fortran, rulat pe un calculator FELIX - 0512, pentru evaluarea numerică a modelului matematic. Programul a fost astfel conceput încît să poată fi utilizat și la cercetarea fundamentală a altor perechi de materiale și parametri ai impulsului, cu condiția să fie montat discul cu biblioteca matematică a calculatorului

PELIX-CȘIȘ, la care se apelează pentru calculul funcțiilor Bessel și funcției eroare.

3. Evidențierea pe cale analitică și verificarea experimentală, a mecanismului prelevării de material în cazul prelucrării aliajelor dure în general și în particular a celor din grupa de utilizare G.

4. Fundamentarea din punct de vedere teoretic a concepției privind procesul de prelucrare prin eroziune electrică a aliajelor dure în general, cu referiri în particular la aliajele dure din grupa de utilizare G.

5. S-a introdus o ordine sistemică în studiul factorilor și parametrilor, care intervin la prelucrarea prin eroziune electrică, grupându-le în mărimi de intrare aferente utilajului tehnologic și spațiului de lucru, pe de o parte și mărimii de ieșire, care caracterizează piesa de prelucrat și electrodul sculă, pe de altă parte.

6. Stabilirea unei ierarhizări a influenței factorilor și parametrilor de intrare reglabili, care în final determină relațiile de ieșire ale sistemului prin valorile caracteristicilor tehnologice, pentru cazul particular al prelucrării aliajelor dure din grupa de utilizare G, prin metoda bilanțului aleatoriu. Prin aceasta s-a rezolvat o problemă, care în general la prelucrarea prin eroziune electrică nu este univoc elucidată.

7. Elaborarea unui program de calcul, scris în limbaj Fortran, rulat pe un calculator CORAL-4030, pentru aplicarea metodei bilanțului aleatoriu. Programul a fost astfel conceput încât să permită analiza concomitentă a influenței unui număr de 10 variabile independente, asupra unui număr identic de criterii de performanță, iar prezentarea rezultatelor se face tabelar.

8. Abordarea într-o manieră nouă a studiului tehnologiei de prelucrare prin eroziune electrică, bazat pe modelarea experimentală realizată prin aplicarea statistică matematice și analizei regresionale. În sistemul de experimentare programat statistic, valorile mai multor factori independenți au fost modificați simultan, iar efectele fiecăruia și cele ale interacțiunilor au fost determinate separat. La procedeele clasice de experimentare nu se pot sesiza interacțiunile dintre factori, cu toate că volumul de încercări este mult mai mare decât în cazul metodei statistice.

9. Evidențierea unor aspecte inedite ale fenomenelor fundamentale ale prelucrării electroerozive ale aliajelor dure în general și în particular a celor din grupa de utilizare G, pe baza analizei întreprinse prin microscopie optică. S-au stabilit factorii care determină adâncimea stratului fisurat și valorile limită necesare tehnologului la proiectarea procesului de prelucrare.

10. Elaborarea unei metode de calcul și stabilirea unui număr de 144 ecuații de regresie, pentru funcțiile de răspuns considerate, cele două regimuri de prelucrare, degroșare și finisare și sorturile de aliaje dure din grupa de utilizare G studiate. Pornind de la modelele matematice ale procesului de prelucrare, deduse sub forma unor polinoame, s-au determinat ecuațiile dreptelor de regresie aferente, care stau la baza calculului numeric al funcțiilor de răspuns și la trasarea graficelor de interdependență.

B. În domeniul cercetării aplicativ-tehnologice

1. Realizarea unui stand experimental, în vederea verificării modelului teoretic al procesului de prelevare de material, la prelucrarea electroerozivă. Standul conceput, sesizează și numără impulsurile de lucru din totalitatea descărcărilor electrice, care se succed în interstițiul tehnologic în procesul de prelucrare. Pe această cale s-a determinat efectul unui singur impuls de curent, asupra piesei de prelucrat sau electrodului sculă, în contextul suprapunerii și interacțiunii reciproce a fenomenelor din spațiul de lucru.

Standul experimental a fost astfel conceput, încât să fie utilizabil la studiul tehnologiei de prelucrare prin eroziune electrică și la testarea și studiul sistemelor de avans.

2. Elaborarea unei metode, pentru realizarea descărcărilor electrice singulare prin adaptarea unui circuit electric la generatorul de impulsuri comandate GEP-50P. Această metodă permite analiza și delimitarea strictă a acțiunii unei singure descărcări electrice, eliberată de interacțiunile complexe ale fenomenelor, care guvernează procesul de prelucrare. Adaptarea este ușor realizabilă, iar parametrii impulsului se pot stabili cu precizie prin posibilitățile de reglare existente pe generatorul de impulsuri.

3. Ordonarea variabilelor independente (parametri reglabili) ai procesului după amplitudinea efectului produs asupra criteriilor de performanță (caracteristicile tehnologice) analizate, pentru

regimul de degroșare și finisare, în cazul particular al prelucrării aliajelor dure din grupa de utilizare G. În acest mod s-au stabilit direct și concret, pentru tehnologii din producție, factorii cu influență principală și cei cu acțiune secundară, pentru fiecare caracteristică tehnologică în parte.

4. Stabilirea concretă a nivelelor caracteristice ale parametrilor de reglare, care determină maximizarea sau minimizarea funcțiilor de răspuns urmărite, în cazul particular al prelucrării prin eroziune electrică a aliajelor dure din grupa de utilizare G; elemente importante în proiectarea tehnologiei de prelucrare.

5. Exprimarea prin intermediul modelelor matematice, deduse pe baza analizei de regresie și verificate prin analiza de corelație, a dependenței între funcția de răspuns analizată și variabilele independente cu influență principală, în cazul particular al prelucrării aliajelor dure din grupa de utilizare G, în regim de degroșare și finisare. Pe baza modelelor matematice elaborate, din analiza interacțiunilor dintre variabilele independente și funcția de răspuns, tehnologii pot trage concluziile ^{necesare} proiectării unui proces de prelucrare.

6. Stabilirea influenței parametrilor reglabili ai procesului de prelucrare, privind modificările structurale și tendințele de apariție a microfisurilor la diferitele sorturi de aliaje dure din grupa de utilizare G, prelucrate prin eroziune electrică. Prin microscopie optică s-a analizat zona din imediata vecinătate a suprafeței prelucrate, pentru regimurile de lucru, care au determinat valori extreme ale funcțiilor de răspuns urmărite. Pe această bază tehnologul poate decide regimul de lucru aplicat, în funcție de scopul urmărit, în strânsă legătură cu proprietățile suprafeței prelucrate.

7. Elaborarea unor principii de optimizare a prelucrării prin eroziune electrică a aliajelor dure din grupa de utilizare G, utilizabile de tehnologii din producție, sub forma unor relații matematice pentru calculul valorilor funcției de răspuns și a unor drepte de regresie ce delimitează zona de optim. Graficele cu domenii optime de prelucrare, sînt prezentate pentru fiecare sort analizat din grupa de utilizare G, și regim de lucru (degroșare, finisare), cuprinzînd toate funcțiile de răspuns importante, necesare în practica industrială, pentru proiectarea unui proces tehnologic de prelucrare.

8. Rezultatele au fost valorificate parțial /248/ și se află în curs de aplicare în producție /249/, prin contractele de cercetare încheiate cu întreprinderea Electrotimig din Timișoara.

În încheiere, se poate aprecia că aplicarea rezultatelor teoretice desprinse din lucrare și a principiilor de optimizare propuse, reprezintă un mijloc avantajos pentru intensificarea și lărgirea domeniului de utilizare a procesului de prelucrare prin eroziune electrică a aliajelor dure în general și în particular a celor din grupa de utilizare G.

Este imperios necesar, să se acorde în practică, importanța cuvenită alegerii corespunzătoare a regimului de lucru în strînsă interdependență cu condițiile cerute de problema de prelucrare, în vederea sporirii eficienței tehnico-economice a procesului de prelucrare prin eroziune electrică.

Cercetările viitoare trebuie orientate atît spre componenta fundamentală cît și spre cea tehnologică a sistemului de prelucrare prin eroziune electrică. Modelul matematic al proceselor din interstițiul tehnologic de lucru, necesar în cercetarea fundamentală, trebuie dezvoltat prin cuprinderea fenomenelor, care au fost neglijate în actualul model. În ce privește componenta tehnologică, trebuie extinsă metodologia introdusă de prezenta lucrare de modelare experimentală, pe baza statisticii matematice și a analizei ^{regresionale}, care are avantaje nete față de metoda clasică de experimentare și reprezintă un instrument evoluat de înțelegere și studiu a interdependențelor complexe ale sistemului de prelucrare prin eroziune electrică.

Realizarea etapelor propuse, va asigura o valorificare superioară a rezultatelor cercetării științifice și activității productive din domeniul de prelucrare prin eroziune electrică, la care lucrarea de față și-a propus să aducă o modestă contribuție.

B I B L I O G R A F I E

Prescurtări:

ISEM - International Symposium for Electromachining.

CNTM - Conferința națională de Tehnologii Neconvenționale

CIRP - Collège Internationale pour la Recherche scientifique des techniques de Production Mécanique.

1. x x x " Directivele Congresului al XIII-lea al Partidului Comunist Român cu privire la dezvoltarea economico-socială a României în cincinalul 1986 - 1990 și orientările de perspectivă până în anul 2000"., Editura politică, București, 1984.
2. ACHIMESCU, N. " Studiul procesului de generare al formelor spațiale la prelucrarea prin eroziune electrică - aspecte geometrice și substanțiale", Tesă de doctorat, I.P. "Traian Vuia" Timișoara, 1983.
3. ACHIMESCU, N. " Sistemul de acțiune tehnologică la prelucrarea prin eroziune electrică", CNTM4, Timișoara, 1983, p.41-51.
4. ACHIMESCU, N., DRAGOMIR, E. "Aspecte caracteristice ale prelucrării prin eroziune electrică a carburilor metalice de tip G, Sesiunea de comunicări a cadrelor didactice I.P. "Traian Vuia", Timișoara, 1979.
5. ACHIMESCU, N., POPA, H. " Asupra procesului de generare a suprafețelor la prelucrarea prin eroziune electrică", CNTM3, Sibiu, 1982
6. ADLER, YU. P., MARKOVA, E. V., GRANOVSKY, YU. V. " The design of experiments to find optimal conditions", Mir Publishers, Moscow, 1975.
7. ALBINSKI, K. "Einfluss der Kenngrößen der elektrischen Entladungen auf den Funkeneroziven Metallabtrag", ISEM3, Wien, 1970.
8. ARHANGELISKY, V. N., KABANOVA, E. P. "Avtomatizatsiia planirovaniia naučnih isledovaniy", Izdatelstvo Nauka, Moskva, 1973.

9. BAKOWSKI, L. "Aufbauphase eines Funkenplasmas in Stickstoff", Dissertation, T.H. Darmstadt, 1982.
10. BARON, T., "Calitatea și fiabilitatea produselor", Editura didactică și pedagogică, București, 1976.
11. BARON, T. "Metode statistice pentru analiza și controlul calității produselor", Editura didactică și pedagogică, București, 1979.
12. BARON, T., KORKA, M., PECIOAN, E., STANESCU, M. "Statistică pentru comerț și turism", Editura didactică și pedagogică, București, 1981.
13. BARZ, E. "Strategien für die selbsttätige Optimierung des funkenerosiven Senkens", Dissertation, TH Aachen, 1976.
14. BADARAU, E. "Fizica descărcărilor în gaze", Editura Academiei RPR, București, 1957.
15. BADARAU, E., POPESCU, I. "Gaze ionizate; Descărcări electrice în gaze", Editura tehnică, București, 1965.
16. BENDER, F.K. "Einfluss Funkenerosion auf den Formenbau", Werkstatt und Betrieb 103(1970), Nr. 10.
17. BENDER, F.K., PAHL, D. "Wirtschaftlichkeitsfragen der funkenerosiven Raumformbearbeitung", ISKM3, Wien, 1970.
18. BENDER, F.K. "Spanabhebende Raumformbearbeitung konkurierend mit elektrisch abtragenden Fertigungsverfahren", Werkstatt und Betrieb 108(1975)1.
19. BENNETT, C.A., FRANKLIN, N.L. "Statistical Analysis in Chemistry and the Chemical Industry" John Wiley Sons, Inc., New-York; London-Sydney, 1967.
20. BEYER, O., GIRLICH, M.-J., ZSCHIESCHE, H.U., "Stochastische Prozesse und Modelle" BSB B.G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig, 1978.
21. BEYER, O., HACKEL, H., PIEPER, V., TIEDGE, J. "Wahrscheinlichkeitsrechnung und mathematische Statistik" BSB B.G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig, 1980.
22. BICKEL, E. "Die Bezugsstrecke oder Bezugslänge für die Rauheitsmessung", Werkstattstechnik 50(1960)6, p. 294-301.
23. BIESS, G., ERPURTH, H., ZEIDLER, G. "Optimale Prozesse und Systeme" BSB B.G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig, 1980

24. BRAUN, H.P. "Theoretische und experimentelle Untersuchungen zum Problem der quasistatischen Rissausbreitung in eigengespannten Zweikomponentenwerkstoffen", Dissertation, T H Karlsruhe, 1979.
25. BRUMA, H.M. "Nouvelles contributions a la physique de l'électro-érosion. Application aux machines électro-érosives de grande puissance". Bulletin de la Société française des Electriciens, Tome I, nr.12, 1960. p.840-847
26. CARTER, G.A., JERGAS, I. "Elektroden für die Funkenerosion", Werkstatt und Betrieb 113(1980)5, p.313-316
27. CARTIS, I. "Cercetări teoretice și experimentale asupra structurii, proprietăților fizice și rugozității suprafețelor prelucrate prin eroziune electrică", Teză de doctorat, I.P. "Traian Vuia" Timișoara, 1973
28. CRAUSESCU, D. "Tratarea statistică a datelor chimico-analitice" Editura tehnică, București, 1973.
29. CRAUSESCU, D. "Utilizarea statisticii matematice în chimia analitică", Editura tehnică, București, 1982.
30. CRAUSESCU, N., POPESCU, I. "Tehnologii neconvenționale" vol.I, Scrisul Românesc, Craiova, 1982.
31. CHILDERIC, B. "Materiale frittate, pătind fi utilizate ca electrozi la prelucrarea prin eroziune", Conferința firmei Ugin-Carbon, București, 1976.
32. CIORANESCU, N. "Tratat de matematici speciale" EDP București, 1963.
33. CIUCU, G., CRAIU, V. "Introducerea în teoria probabilităților și statistica matematică", EDP, București, 1971.
34. COANDA, V. "Contribuții teoretice și experimentale la studiul distribuției fluxului de căldură în focarele generatoarelor de abur", Teză de doctorat, I.P. "Traian Vuia" Timișoara, 1981.
35. CONRAD, H. "Impulsgeneratoren für elektroerosive Bearbeitung" Elektrik 28(1974)H6
36. CONRAD, H., SCHNEIDER, G., THURN, K. "Zur Optimierung des EDM-Prozesses", ISEM4, Bratislava, 1974, p.100-103
37. CONSTANTINESCU, I., GOLUMBOVICI, D., MILITARU, C. "Prelucrarea datelor experimentale cu calculatoare numerice - Aplicații din construcția de mașini", Editura Tehnică, București, 1980.

38. CRISTUINEA, C. "Contribuții la calculul tensiunilor și deformațiilor în cazul fluajului cu temperatură variabilă", Tesă de doctorat, I.P. "Traian Vuia", Timișoara, 1976.
39. CROOKALL, J.R., HEUVELMAN, C.J. "Electro-discharge machining - The state of the art" CIEP, nr.2, 1971. p.113-120.
40. CRSTICI, B., și col. "Matematici speciale", EDP, București, 1981
41. DEVENYI, M., TOT, L., BISTRON, C. "Keményfémek megmunkálása esikraforgósollással", Gép nr.11.1963.
42. DOMSA, A. "Tehnologia fabricării pieselor din pulberi metalice", Editura tehnică, București, 1966.
43. DRAGOMIR, E. "Stadiul actual al utilizării eroziunii electrice la prelucrarea carburilor metalice", Referat, I.P. "Traian Vuia" Timișoara, 1977.
44. DRAGOMIR, E., NANU, D. "Prelucrarea aliajelor dure sinterizate prin eroziune electrică utilizând generatoare de impulsuri comandate", Tehnologii noi de fabricație în construcția de mașini, Universitatea Galați, 1977, p.111-114.
45. DRAGOMIR, E., NANU, D. "Prelucrabilitatea prin eroziune electrică a materialelor dure sinterizate P30 și G20 elaborate în țară", Prelucrări la rece și la cald, sudură și încercări de materiale, I.P. "Traian Vuia" Timișoara, 1977, p.117-123.
46. DRAGOMIR, E. "Studiul prelevării de material la prelucrarea prin eroziune electrică a carburilor metalice", Referat, I.P. "Traian Vuia" Timișoara, 1978.
47. DRAGOMIR, E. "Cercetări cu privire la optimizarea prelucrării prin eroziune electrică a carburilor metalice", Referat, I.P. "Traian Vuia" Timișoara, 1978.
48. DRAGOMIR, E., JOSZAY, L. "Model matematic privind ordonarea parametrilor de influență ai procesului de prelucrare prin eroziune electrică, după amplitudinea efectului produs", CNTN3, Sibiu, 1982.
49. DRAGOMIR, E., IOSZAY, L. "Analiza regresională pe baza unui model matematic a parametrilor procesului de prelucrare dimensională prin eroziune electrică", CNTN3, Sibiu, 1982
50. DRAGOMIR, E. "Stabilirea unui program de calcul privind mecanismul prelevării de material la prelucrarea prin

- erosiune electrică", CNTN4, Timișoara, 1983, p.69-73.
51. DRAGONIR, E., BUNESCU, S., DUMA, T. "Analiza productivității prelucrării prin eroziune electrică a carburilor metalice de tip 01e prin metoda regresiei", CNTN4, Timișoara, 1983, p.251-255.
52. DRAGONIR, E., BUNESCU, S., DUMA, T. "Influența asupra productivității a parametrilor tehnologici ai prelucrării prin eroziune electrică a aliajelor dure sinterizate de tip 06o", A XXVII-a Sesiune de comunicări științifice în cinstea zilei metalurgistului, București, 1984
53. DRIMBER, D. "Asupra pregătirii specialiștilor în domeniul tehnologiilor neconvenționale", CNTN3, Sibiu, 1982, p.26-30
54. DRIMBER, D. "Asupra izvoarelor și resurselor științifice ale tehnologiilor neconvenționale", CNTN4, Timișoara, 1983, p.23-29.
55. DUMITRASCU, L., PATRUT, ST., STAN, ST. "Învățăm Fortran conversind cu calculatorul", Vol. I, II, Editura tehnică, București, 1981
56. DUMITRASCU, L., IOACHIM, A. "Tehnici de construire a programelor cu structuri alternative", Editura Academiei RSR, București, 1981
57. ENGELS, H.K.G. "Ein Beitrag zur Optimierregelung für das funken-erosive Senken", Dissertation, T.H.Aachen, 1975.
58. PISZ, M. "Wahrscheinlichkeitsrechnung und mathematische Statistik", VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin, 1976
59. POTBEV, N.K. "Tverdosplavne stamp i ih izgotovlenie elektroiskravim sposodom", Mașinostroitel, 1961, nr.12
60. POTBEV, N.K. "Ekonomicnosti izgotovlenia elektroiskrovim spolodom tverdosplavnih metalov i iastrumentov", Elektronnaia obrabotka materialov, 1962
61. FÖRSTER, K. "Beitrag zur Klärung der Abtragnechanismen beim funkenerosiven Drahtschneiden", Industrie, Anzeiger 102, nr.14, 1980, p.43-44
62. PRITZ, P. "Wärmeübergang und Fragmentation beim Kontakt einer begasten Schmelze mit Kühlflüssigkeit", Dissertation, Universität Hannover, 1981
63. PUNK, W. "Die funkenerosive Metallbearbeitung mit elektrischen Entladungen kleiner Energie und kurzer Dauer",

Dissertation, TH Carola-Wilhelmina zu Braunschweig,
1968

64. GAMONDI, G.B. "Lavorazioni tecnologica per elettroerosione",
Ingegneria meccanica, 1966 (9) Nr.6
65. GANSER, K. "Feinbearbeitung metallischer Werkstoffe durch
funkenerosives Senken", Dissertation, TH Aachen, 1961
66. GAVRILAS, I. "Tehnologii de prelucrare cu soule din materiale
dure și extradure", Editura tehnică, București, 1977
67. GAVRILAS, I., ș.a. "Electroerosion machining of the pressing
dies for pieces out of metallic carbide", CNTN2,
București, 1977, p.32-37
68. GAVRILAS, I. ș.a. "Dimensional and shape accuracy obtained by
electroerosion machining of the profiles drawing
dies", CNTN2, București, 1977, p.86-91
69. GHELIFAND, A.B., NOVGORODOV, A.S., POTEV, N.K. "Obrabotka tverdh
spiavov" Magis, 1963
70. GHEVONKIAN, G.G. "K voprosu ob iznose elektroda-instrumenta
pri elektroimpulsnom obrabotke", Elektrofiziceskie
i elektrohimiceskie metodi obrabotki materialov,
Brevan, 1966, p.77-95
71. GLÜCK, A. "Metode matematice in industria chimică", Editura
tehnică, București, 1971
72. GOGOASA, I. "Cercetări tehnologice privind posibilitățile de
extindere a procedeelor de prelucrare prin electro-
eroziune in industria ESR", CNTN2, București, 1977,
p.49-55
73. GORSKY, V.G., ADLER, YU.P., TALALAY, A.M., "Planirovanie promiș-
lenih eksperimentov", Metalurgia, Moskva, 1978
74. GRAY, A., MATHEWS, G.B. "Funcțiile Bessel și aplicațiile lor in
fizică", Editura tehnică, București, 1958
75. GRUNDSTENIKIS, I.A. "Laboratornīe raboti po statisticeskomu
modelirovaniu na IEM", Riga, 1982
76. HAAS, E. "Kopierfräsen im Vergleich zum Funkenerodieren",
Werkstatt und Betrieb 103(1970) 11, p.859-864.
77. HAMBURGER, L. "Introducere in teoria propagării căldurii.
Conducția prin solide", Editura Academiei RPR, 1956.
78. HARTKOPF, T. "Die Anwendung der Gradientenmethode bei der
Berechnung optimaler Lastflüsse", Dissertation,
TH Darmstadt, 1978

79. HERSCOVICI, P. "Materiale dure", Editura tehnică, București, 1970
80. HERSCOVICI, P. "Metale și aliaje refractare noi" Sinteză documentară, Centrul de documentare și publicații tehnice, București, 1970.
81. HERSCOVICI, P. "Procedee tehnologice de fabricare a pieselor prin sinterizare" Institutul național de informare și documentare științifică și tehnică, București 1973.
82. HEUVELMAN, C.J., HORN, B.L. "Review of cooperative work on EDM in STCE of CIRP", CIRP nr.2, 1974, p.213-217
83. HINNÜBER, J., RÜDIGER, O. "Neuere Verfahren der Metallbearbeitung insbesondere der Elektroerosion", Werkstatt und Betrieb 87 (1954) 2, p.53-57
84. JAHN, J. "Sequentieller Innerer-Punkt-Algorithmus zur Lösung nichtlinearer Optimierungsprobleme", Dissertation, TH Darmstadt, 1978
85. JAHNKE, E., EMDE, F. "Funktionentafeln mit Formeln und Kurven", Verlag B.G.Teubner, Leipzig-Berlin, 1928
86. JOHN, G., SCHARFENORT, U. "Grundlagen der technologischen Optimierung der elektroerosiven Senkbearbeitung", Dissertation, TH Otto von Guericke, Magdeburg, 1976
87. JUTZLER, W.I. "Zusammenhänge zwischen Einzelentladungen, Energieverteilung und technologischen Kenngrößen bei der elektroerosiven Bearbeitung", Diplomarbeit, TH Aachen 1976
88. JUTZLER, W.I., WERTHEIM, R. "Biegebruchfestigkeit funkenerosiv bearbeiteter Hartmetallproben" Industrie Anzeiger, 104(1982) Nr.100, p.36-37
89. KALDOS, F. "Characterizing of electric discharge machines by the metal removal rate, the relative volumetric electrode wastage surface", CNTN1, Timișoara, 1971, p. 67-76
90. KAMORKIN, A.N. "Primenenie elektroerozionaiia projivki dlia izgotovenia tverdosplavnih matrit", Vestnik Mashinostroeniia, 1959 nr.11
91. KAWAI, E., MUTSUZAKI, K. "The Abnormal Structures of the Surfaces of Alloys Eroded by Electrical Discharge Machining" Bull.the Japan Soc.of Prec.Engg.Vol.2, nr.4, 1968, p.296-302

92. KECES, V. "Complemente de matematici cu aplicații în tehnică"
Editura tehnică, București, 1981
93. KIEFFER, R., BENESOVSKY, F. "Hartmetalle", Springer Verlag, Wien,
New-York, 1965
94. KINOSHITA, N., FUKUI, M. "The optimum form of the current impulse
in EDM", Paper for Presentation at XXI General
Assembly of CIRP, 1971
95. KLEMM, W. "Über das Spannungsfeld eines schnelllaufenden Risses"
Dissertation, Universität Karlsruhe, 1977
96. KNOTEK, M., VOJTA, R., SEFC, J. "Metode statistico-matematice pen-
tru analizarea proceselor siderurgice", Institutul
de documentare tehnică, București, 1964
97. KOSSEK, L., RÖTHEL, F., GARBAJS, V. "Kennzeichen von Randzonen
beim funkenerosiven Bearbeiten", Fertigung 1, 1978
p.9-13
98. KÖNIG, W., KURR, R. "Grundlagen zur selbsttätigen Regelung
der funkenerosiven Bearbeitung", CNTMI, Timișoara,
1971, p.57-65
99. KÖNIG, W., WERTHEIM, R., WEISS, A. "Funkenerosive Bearbeitung von
Hartmetall", Westdeutscher Verlag GmbH, Opladen, 1974
100. KÖNIG, W., BARZ, S. "Systeme für die Prozessoptimierung bei der
funkenerosiven Bearbeitung", ISEM4, Bratislava 1974,
p.97-101
101. KÖNIG, W., WELLS, R., WERTHEIM, R., JUTZLER, W. I. "The Flow Fields
in the working gap with Electro Discharge Machining",
Annals of the CIRP Vol.25/1/1977, p.71-76
102. KRACHT, E. W. "Grundlagen der funkenerosiven Mehrkanalbearbei-
tung", Dissertation, TH Aachen, 1970
103. KRAMPITZ, R., HEYMANN, D. "Situația actuală și tendințele de dez-
voltare în domeniul prelucrării materialelor prin
electroeroziune", Construcția de mașini, vol. I, 1976
104. KROUNDYCHEPP, Y. "L'electro-erosion et les alliages durs
frittes dans les fabrications modernes", Bulletin
Technique de L'ATG, 1962, nr.4
105. KRUTH, J. P. "Adaptive control optimization of electro-discharge
machining" Dissertation, Katholieke Universiteit
Leuven, 1979
106. KURR, R., ODACIU, Gh., WERTHEIM, R. "Die Auswirkung der Energie-
verteilung auf Abtrag und Verschleiss bei der funken-
erosiven Bearbeitung", Industrie Anzeiger, 94(1972)31

107. KURR, R., "Grundlagen zur selbsttätigen Optimierung des funkenerosiven Senkens", Dissertation, TH Aachen, 1972
108. LANG, W. "Wirtschaftlichkeit und Besonderheiten der EDM - Anwendungen in verschiedenen Branchen und bei verschiedenen Dimensionen", ISEM4, Bratislava, 1974 p.137-138
109. LAZARENKO, B.R. "Sostoienie razvitia elektroiskrovoi obrabotki metallov za rubekom", Elektronnaia obrabotka materialov, 1957, nr.1
110. LAZARENKO, B.R. "Elektrodinamicheskaia teoria iskrovoi elektriceskoi erozii metallov", Elektronnaia obrabotka materialov, 1962.
111. LEITL, A.G. "Über den Mechanismus des Entladungsaufbaus in komprimierten Gasen", Dissertation, TH Darmstadt 1981
112. LIVSIT, A.L. "Elektroimpulsnaia obrabotka metallov", Mashinostroenie, Moskva, 1967
113. LOEBE, P. "Anschauungsunterricht in mathematischer Statistik", S.Hirsel Verlag, Leipzig, 1955
114. MAILLET, A. "Rentabilität der Funkenerosion im Formenbau", Werkstatt und Betrieb, 107 (1974)9, p.577-579
115. MANITIU, C., MEHLHORN, H. "Auswahl der optimalen elektrischen Arbeitsparameter für die elektroerosive Metallbearbeitung (EDM)", Fertigungstechnik und Betrieb 26 (1976)12, p.742-745
116. MANITIU, C. "Contribuții la teoria generală a stabilirii parametrilor de lucru la prelucrarea prin electroeroziune", CNTN2, București, 1977, p.38-47
117. MANITIU, C. "Electroeroziune factor de progres tehnic și economic", Editura științifică și enciclopedică, București, 1980
118. MARTY, C., WEILL, R. "Etude thermocinetique de l'electro-erosion. Recherche de parametres adimensionnels" Annals of the CIEP 24, 1975, p.131-134
119. MARTY, C. "Etude analytique de l'uzure de l'outil en electro-erosion" (Copie xerox)
120. MARTY, C. "Investigation of temperature surface in electro-discharge machining", (copie xerox)
121. MEHLHORN, H. "Mathematisch-physikalische Betrachtungen zur Mikrorisbildung der elektroerosiven Metallbearbeitung", Fertigungstechnik und Betrieb 23(1973)3 p.152-156

122. MIHAIL, R. " Introducere în strategia experimentării, cu aplicații din tehnologia chimică", Editura științifică și enciclopedică, București, 1976
123. MIHAILA, N. " Introducere în teoria probabilităților și statistica matematică", Editura didactică și pedagogică, București, 1965
124. MIHEEV, M. A. " Bazele transmiterii căldurii" Editura Energetică de stat, 1953
125. MIHOȘ, G., FIRESCU, D. " Statistică matematică", Editura didactică și pedagogică, București, 1966
126. MIHOȘ, GH., CIUCU, G., CRAIU, V. "Teoria probabilităților și statistica matematică", Editura didactică și pedagogică, București, 1970
127. MIHOȘ, GH., MICU, N. " Teoria probabilităților și statistică matematică" Editura didactică și pedagogică, București, 1980.
128. MIHOȘ, GH., URSEANU, V., URSIANU, E. "Modele de analiză statistică", Editura științifică și enciclopedică, București, 1982
129. MIRONOFF, N. " La electro erosion: sa nature physique et son emploi". Microtechnic, 19(1965)3,4,5 p.149-153, 171-177, 253-258.
130. MITKLEA, I. " Studiul metalelor", Lito I.P. "Traian Vuia", Timișoara, 1983
131. MOTOKI, M., HASHIGUSHI, K. "Energy Distribution of the Gap in Electric-Discharge-Machining" Annals of the CIRP, 14(1967), p.485-489
132. MUELLER, P. H., NEUMANN, P., STORH, R. "Tafeln der mathematischen Statistik", VEB. Fachbuchverlag, Leipzig, 1973
133. NALIMOV, V. V., CERNOVA, N. A. "Statisticheskie metody planirovaniia ekstremalnikh eksperimentov" Izdatelstvo Nauka, Moskva, 1965
134. NANU, A., NICHICI, A., POPA, H. " O nouă concepție asupra noțiunii de prelucrare dimensională prin eroziune electrică", CNTN 1, Timișoara, 1971, p.11-20
135. NANU, A., BUZULIUA, D. "Posibilități de optimizare a programării parametrilor electrici la prelucrarea prin eroziune electrică", CNTN 1, Timișoara, 1971, p.87-95

136. NANU, A., BUZULICA, D. "Criterii de optimizare a prelucrării prin eroziune electrică", CNTN 1, Timișoara, 1971, p.217-227.
137. NANU, A., NANU, D., DRAGOMIR, E. "Studiul prelucrabilității prin eroziune electrică a unor sorturi de carburi metalice elaborate de ICEM", Sesiune în cinstea zilei metalurgistului, București, 1976
138. NANU, A., "Perspectivele tehnologiilor neconvenționale în industrie", CNTN 2, București, 1977, p.1-8
139. NANU, A. "Tehnologia materialelor", EDP, București, 1977
140. NANU, A., MARCUSAN, A., DRAGOMIR, E., REVICZKY, A. "Cercetări experimentale cu privire la comportarea în exploatare a mașinii de prelucrat prin eroziune electrică tip ERO-1", Buletin științific și tehnic al I.P.Traian Vuia" Timișoara, Seria Mecanică, Tom 25(39), Fasc.1, 1980, p.137-141
141. NANU, A., NANU, D. "Prelucrarea dimensională prin eroziune electrică în câmp magnetic", Editura Facla, Timișoara, 1981
142. Nanu, A. "Tehnologii neconvenționale, prezent și perspectivă", CNTN 3, Sibiu, 1982, p.20-25
143. NANU, A. "Realizări în domeniul tehnologiilor neconvenționale în Republica Socialistă România", CNTN 4, Timișoara 1983, p.13-23.
144. NANU, A., DRAGOMIR, E., ACHIMESCU, N. "Stabilirea ordinii de influență a parametrilor reglabili asupra productivității prelucrării prin eroziune electrică a carburilor metalice de tip Glo", CNTN 4, Timișoara 1983, p.245-249
145. NANU, D., DRAGOMIR, E. "Studiul unor materiale indigene de electrozi pentru prelucrarea prin eroziune electrică a unor carburi metalice elaborate de ICEM", Sesiune în cinstea zilei metalurgistului, București, 1976
146. NANU, D., DRAGOMIR, E. "Prelucrarea prin eroziune electrică a aliajelor dure sinterizate", Sesiune de comunicări științifice dedicate Conferinței naționale a PCR, Sibiu, 1977
147. NANU, D. "Prelucrarea prin eroziune electrică în câmp magnetic", teză de doctorat, I.P.Cluj-Napoca, 1979.

148. NEGRU, L.D. "Transmiterea căldurii" Litografia I.P. Timișoara, 1981
149. NEGRU, L.D. "Contribuții la studiul schimbului de căldură la vaporizarea freonului 11", teză de doctorat, I.P. "Traian Vuia" Timișoara, 1982
150. NEKRASEVICI, I.G., BAKUTO, I.A. "Asupra problemei despre stadiul actual al reprezentărilor teoretice cu privire la eroziunea electrică a metalelor prin impulsuri de curent", Doklodi Akademii Nauk BSSR, 1961 Tom V, Nr.5
151. NICHICI, A. "Fenomene fundamentale la prelucrarea cu scînteii electrice, cu electrod oscilant", Teză de doctorat, I.P. Timișoara, 1970
152. NICHICI, A., "Tendințe actuale în modelarea proceselor de prelucrare prin eroziune electrică", CNTN 2, București, 1977, p.9-13
153. NICHICI, A. "Probleme ale modelării sistemelor" de prelucrare prin eroziune electrică", a II-a Conferință - Tehnologii noi în construcția de mașini, Galați, 1977.
154. NICHICI, A., CUCURUZ, C. "Evidențierea statistică a factorilor semnificativi la prelucrarea prin eroziune electrică pe mașina ELER-01", Comunicările primei sesiuni tehnico-științifice sătmărene, Satu Mare, 1979, p.26-30
155. NICHICI, A., ACHIMESCU, N., CUCURUZ, C. "Probleme ale aplicării planificării statistice a experiențelor în modelarea funcțiilor de răspuns ale sistemelor de prelucrare prin eroziune electrică", Probleme Tehnologice ale prelucrărilor mecanice în construcția de mașini, Iași, 1980, p.12-17
156. NICHICI, A., POPOVICI, V., NICA, M., ACHIMESCU, N., POPA H., PAULESCU, GH. "Prelucrarea prin eroziune în construcția de mașini", Editura Pacla, Timișoara, 1983
157. NICULESCU, ST. "Inițiere în FORTRAN", Editura tehnică, București, 1972
158. NICULESCU, ST. "Fortran, inițiere în programare structurată", Editura Tehnică, București, 1979.
159. OBACIU, GH. "Contribuții la studiul comportării cuplului de electrozi piesă-sculă la prelucrarea materialelor indigene cu impulsuri electrice", teză de doctorat, Universitatea din Brașov, 1969.

160. ORACIU, GH. "Contribuții la studiul distribuției energiei impulsului la prelucrarea electroerozivă", CNTN 1, Timișoara, 1971, p.171-185
161. ORRIG, H.W. "Grundlagen der Funkenerosiven Gesenkbearbeitung", Dissertation, TH Aachen, 1961
162. ORRIG, H.W. "Einsatz der elektrisch abstragenden Bearbeitungsverfahren in der Fertigung". Industrie-Anzeiger 96(1974)92.p.2061-2072
163. ONICESCU, O. "Probabilități și procese aleatoare" Editura științifică și enciclopedică, București, 1977
164. OPITS, H., SCHUMACHER, B., KRACHT, E. "Elektroerosive Bearbeitung", Westdeutscher Verlag GmbH, Köln und Opladen, 1969
165. PAHLITZSCH, G., RAFFLENBEUL, G. "Schleifen von Hartmetall beziehungsweise Hartmetallschneiden mit Diamant - Schleifscheiben", Werkstatt und Betrieb, 91(1958) Nr.5, p.249-257
166. PAHLITZSCH, G., VISSER, A., FUNK, W. "Der Polaritätseffekt beim Funken-Erodieren", Annals of the CIRP 16(1968), p.243-248
167. PAL, M.N., MISHRA, P.K., BHATTACHARYYA, A. "Optimization of circuit parameters of a relaxation circuit of EDM", CNTN 1, Timișoara, 1971, p.49-55
168. PANAITI, V., MUNTEANU, R. "Controlul statistic și fiabilitatea", Editura didactică și pedagogică, București, 1982
169. PANDIT, S.M., RAJURKAR, K.P. "Crater Geometry and Volume From Electro-Discharge Machined Surface Profiles by Data Dependent Systems". Jurnal of Engineering for Industry, Noember 1980, vol.102, p.289-295
170. PETERS, A. "Ein Grundlagenbeitrag zur Funkenerosion", Sonderdruck aus Industrie-Elektrik+Elektronik Nr.9. Nr.18/1970
171. PETRUS, O. "Programarea în Fortran, stil în programare". Editura Junimea, Iași, 1980
172. POPA, H., ACHIMESCU, N. "Procese și factori care determină uzura electrodului de prelucrarea prin eroziune electrică cu copierea formei", Buletinul științific și tehnic al I.P. "Traian Vuia", Timișoara, Seria mecanică, Tom 17(31), Fascicol 2, 1972, p.221-228.

173. POPA, H., PAULESCU, GH., NICHICI, AL. "Metodica proiectării proceselor tehnologice de prelucrare dimensională prin eroziune electrică". Cursuri postuniversitare: Construcția de mașini. Tehnologii neconvenționale în prelucrarea metalelor. I.P. Timișoara, 1972
174. POPA, H. "Influența metodelor de execuție ale electrozilor asupra caracteristicilor tehnico-economice ale prelucrării prin eroziune electrică cu copierea formei, Teză de doctorat, I.P. "Traian Vuia" Timișoara, 1980
175. POPOVICI, V., DRAGOMIR, E. "Aspecte ale prelucrării carburilor metalice prin eroziune electrică și complexă", Prelucrări la rece și la cald, sudură și încercări de materiale, I.P. "Traian Vuia", Timișoara, 1977, p.133-139
176. RANCU, N., TOVISSI, L. "Statistica matematică cu aplicații în producție", Editura Academiei Republicii Populare Române, București, 1963
177. RANCU, N., TOVISSI, L. "Analiza statistico-matematică a calității producției industriale", Editura științifică, București, 1964
178. REINHART, H. "Über das Schleifen von Hartmetall mit Diamantschleifscheiben", Werkstatt und Betrieb, 94(1961)Nr.8
179. REINHARDT, H.I. "Untersuchungen über den Zündmechanismus einer getriggerten Funkenstrecke", Dissertation, TU Berlin, 1982
180. RESA, I.D. "Probleme de statistică rezolvate pe calculator", Editura Facla, Timișoara, 1984
181. RHYNER, H. "Impulsgeräten für die elektroerosive Metallbearbeitung", Sonderdruck aus Technische Rundschau Nr.37, 39/1965
182. RIJIC, I.M., GRADSTEIN, I.S. "Tabele de integrale sume, serii și produse", Editura tehnică, București, 1955
183. ROCHE, A., CHILDERIC, P., PETITIMBERT, I., MATTEI, S., PERSICKE, H., Kaldos, P. "Le dielectrique et les materiaux constituant l'electrode et le piece en usinage par electro-erosion", ISEM 4, Bratislava, 1974, p.113-126
184. ROMAN, I. "Preocupări actuale și de perspectivă în domeniul tehnologiilor neconvenționale de prelucrare în construcția de mașini și dezvoltarea coordonată a

- acestora", CMTN 3, Sibiu, 1982, p.36-38.
185. ROMAN, I., GOGOANĂ, I., MANIȚIU, G. "Tehnologii neconvenționale de prelucrare în construcția de mașini", CMTN 4, Timișoara 1983, p.29-41
186. BOSCOLETT, E., BALBA, P., HOLDOVRANUȚE . "Programarea și utilizarea mașinilor de calcul și elemente de calcul numeric și informatică", EDP, București, 1980
187. KUMSIRKI, L.S. "Prelucrarea matematică a datelor experimentale" Editura tehnică, București, 1974
188. SACHS, L. "Statistische Auswertungsmethoden" Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, NewYork, 1972
189. SAVII, GH. "Studiu asupra prelucrabilității fontelor nodulare prin procedee electroerosive", Teză de doctorat, I.P. Timișoara, 1970
190. SAVII, GH., DRAGHICI, G. "Studiul statistic al influenței parametrilor procesului asupra indicilor tehnologici la prelucrarea microaleajelor prin eroziune electrică", Buletin științific și tehnic al I.P.Fr.Vuia "Timișoara, Seria Mecanică, Tom 23(37), Fascicole 2, 1978 p. 283-289
191. SACUIU, I., ZORILESCU, D. "Numere aleatoare, aplicații în economie, industrie și studiul fenomenelor naturale", Editura Academiei RSR, București, 1978
192. SALAGEAN, T. "Fenomene fizice și metalurgice la sudarea cu arcul electric a oțelurilor", Editura Academiei RSR, București, 1963
193. SCHIRHOLT, H. "Über den Abtragvorgang bei der funkenerosiven Bearbeitung und Forderungen an Impulsform und Regelinrichtungen der verwendeten Generatoren", Dissertation, TH Aachen, 1964
194. SCHMOHL, H.P. "Ermittlung funkenerosiver Bearbeitungs^{eigen}spannungen in Werkzeugstählen", Dissertation, TU Hannover, 1973
195. SCHMOHL, H.P. "Eingenspannungen in Werkzeugstählen durch funkenerosive Bearbeitung", VDI-Zeitschrift 115(1973) 17, p.1424-1427.
196. SCHULZE, H.P., ZACHARIAS, P., SCHIEDUNG, H. "Grundlagenuntersuchungen zur optimalen Energieausnutzung bei der Funkenerosion", Elektrik 35(1981)H8, p.427-428

197. SCHUMACHER, B. "Die verfahrensgerechte Planung und Ausführung von Erodierarbeiten", ISEM 4, Bratislava, 1974, p.113-117
198. SEIFFART, B., MANTZUFFEL, K. "Lineare Optimierung", BSB B.G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig, 1974
199. SNEDECOR, G.W. "Metode statistice aplicate în cercetările de agricultură și biologie", Editura didactică și pedagogică, București, 1968
200. SNOEYS, R., VAN DYCK, P. "Investigations of electrodischarge machining operations by means of thermo-matematical models", Annals of the CIRP, 20(1971), pag.35
201. SNOEYS, R., VAN DIJCK, P. "Plasma channel diameter growth affects stock removal in EDM", Annals of the CIRP 21, 1972, p.39
202. SOCEANȚU, A. "Programarea și utilizarea calculatoarelor" Vol. I, Lite. I. P. "Tr. Vuia" Timișoara, 1980
203. SONEA, I., MINOA, M. "Contribuții privind studiul structurii zonei superficiale la prelucrarea prin eroziune", CHTN 1, Timișoara, 1971, p.187-192
204. STANEK, I. "Einige Fragen der technologischen Kenngrößen der elektroerosiven Bearbeitung" Sonderdruck aus "Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Hochschule Ilmenau" Jahrgang 9(1963) Heft 5, p.713-720
205. STANEK, I. "Electromachining, development trends", ISEM 4, Bratislava, 1974, p.107-112
206. STANGE, K. "Angewandte Statistik - Zweiter Teil, Mehrdimensionale Probleme" Springer-Verlag, Berlin. Heidelberg New York, 1971
207. STEMPEL, G. "Gesinterte Verbundmetalle als Elektrodenwerkstoffe zur Funkenerosion (EDM)", Werkstatt und Betrieb 108 (1975) 5 p.281-284
208. STEMPEL, G. "Vergleichende Untersuchungen an gesinterten Verbundmetallen als Elektrodenwerkstoffe für die Funkenerosion", Vortrag auf den 4. Symposium European de Metallurgie des Poudres, 13-15.05.1975, Grenoble, p. 861-866
209. STUTE, G. "Ausnutzung elektrischer Entladungen zur Metallbearbeitung", Dissertation, TH Aachen, 1959
210. SARAFOV, P.I. "Utilizarea statisticii matematice în geologie", Editura tehnică, București, 1969.

211. TICHONOV, A.N., SAMARSKI, A.A., "Ecuațiile fizicii matematice", Editura Tehnică, București, 1956.
212. TIRON, M. "Prelucrarea statistică și informațională a datelor de măsurare", Editura tehnică, București, 1976
213. TIRON, M. "Analiza preciziei de estimare a funcțiilor aleatoare", Editura tehnică, București, 1981
214. TOMA, M., ODAGBESCU, I. "Metode numerice și subrutine", Editura Tehnică, București, 1980
215. TOTH-BITSKEY, M., POCSA, J. "Investigations into the elementary processes occuring in electric spark machining", Acta physica Academiae Scientiarum Hungaricae Tom XII, Fasc.1, 1960
216. TOVISSI, L., VODA, V.GH. "Metode statistice. Aplicații în producție", Editura științifică și enciclopedică, București, 1982
217. VAN DIJCK, F., SNOEYS, R. "Thermo-mathematical analysis for electro discharge machining operations", CNFN 1, Timișoara, 1971, p.21-38
218. VAN DIJCK, F., DUTRE, W. "Crater calculations in Electro-discharge machining" Wärme und Stoffübertragung, 6, (1973), nr.1
219. VAN DIJCK, F., DUTRE, W. "Heat conduction model for the calculation of the volume of molten metal in electric discharges", J.Phys.D: Appl.Phys., Vol.7, Printed in Great Britain 1974, p.899-910
220. VAN DIJCK, F., CROOKALL, I.R., HEUVELMAN, C.I., SNOYES, R. "Some results of physical research in EDM" ISEM 4, Bratislava, 1974, p.68-85
221. VAN DIJCK, F., SNOEYS, R. "A theoretical and experimental study of the main parameters governing the electro-discharge machining process", Mecanique nr.301-302, Jouvier-Pévrier, 1975
222. VEROMAN, V.I. "Vysokoccestotnaia elektroerozionnaia obrabotka metallov i tverdykh splavov" L.D.N.F.P., Leningrad, 1963, p.50
223. WERTHEIM, R. "Untersuchung der energetischen Vorgänge bei der funkenerosiven Bearbeitung als Grundlage für eine Verbesserung des Prozessablaufs", Dissertation, TH Aachen, 1975

224. WIENER, V., ISAIC-MANIU, A., VODA, V. "Aplicații ale rețelelor probabiliste în tehnică", Editura tehnică, București, 1983
225. WILLEY, P.C.T. "Parametrii procesului de prelucrare prin eroziune electrică", Buletin științific și tehnic al I.P.T., Seria Mecanică, Tom 17(31), Fasc.1/1972, p.81-91
226. WILLIAMS, B.M. "Theory of Electric Spark machining", Electrical Engineering 1952, vol.71, nr.3., p.257-260
227. WORTHING, A.G., GEPFNER, J. "Prelucrarea datelor experimentale", Editura tehnică, București, 1959
228. YULE, G.V., KENDALL, M.G. "Introducere în teoria statisticii", Editura științifică, București, 1969
229. ZIMANYI, I. "Interelectrode material transfer in EDM processes using controlled generators", ISEM 4, Bratislava, 1974, p.86-89
230. ZINGHERMAN, A.S. "Regarding the problem of the volume of molten metal during electrical erozion", Soviet Physics-Solid, 1-1959, p.255-260
231. ZINGHERMAN, A.S., LIVSIT, A.L. "O fizicescoi prirode elektroerozionnoi obrabotki metallov", IVUZ elektromehanika, 1959, nr.7, p.78-93
232. ZINGHERMAN, A.S. "Teplovie teorii elektriceskoi erozii metallov". IVUZ elektromehanika, 1960, nr.5, p.87-98
233. ZINGHERMAN, A.S. "Issledovanie protessa vidroga metalla prie elektriceskoi erozii" IVUZ, Elektromehanika, nr.1, 1962
234. ZINGHERMAN, A.S. "O mehanizme elektriceskoi erozii", IVUZ, Fizika, nr.1, 1963, p.20-..30
235. ZOLOTYCH, B.N. "O fiziceskoi prirode elektroizkrovoi obrabotki metallov". B.O.M.nr.1, 1957
236. ZOLOTYCH, B.N. "Grundlegende Fragen der phänomenologischen Theorie der Elektrofunkensbearbeitung von Profilen", XIV Internationales Wissenschaftliches Kolloquium, Heft 9, Feinbearbeitungstechnik, TH Ilmenau, 1963, p.45-59
237. ZOLOTYCH, B.N., MESCHTSCHERYAKOV, G.M. "Practical significance of the theory of electrodischarge machining in fluids", ISEM 4, Bratislava, 1974, p.65-67
238. x x x "Proposal of the CIRP, Working Group E; Machinability point 2.1.3. of the agenda dd 26 ianuary 1972-Cooperative research on Electro-Erosion machining

239. x x x "Proposal of the CIRP, Working Group E; Machinability of the agenda dd august 1974 - Cooperative Research on Electro Discharge Machining of Cemented Carbides"
240. x x x "Elektroerosive Bearbeitung - Begriffe, Verfahren, Anwendung", VDI Richtlinie 3400, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1975
241. x x x " Instrucțiuni de folosire pentru mașini de prelucrat prin electroeroziune ELER-01-GEP 50 F", Intreprinderea Electrotimiș, Timișoara
242. x x x AGIE Kunden - Schulung, Lesone - Locarno, 1978
243. x x x CHARMILLES - Gebrauchsanweisung für die Funkenerosionsmaschine. Tehnologie, Generatoren, Geneva, 1971
244. x x x "Tabliți funcții Besselia țeloga položitelinego indeca" Vol.12 Moskva, 1960
245. x x x "Tabliți funcții osiboc i ee pervih dvațati proizvodnih", Vol.33, Moskva, 1965
246. x x x "Tabliți nulei funcții Besselia", Vol.44, Moskva, 1967
247. x x x Manualul inginerului mecanic, TCM, Editura Tehnică, București, 1972
248. x x x "Studiul prelucrării dimensionale prin eroziune electrică a oțelurilor bogat aliate, elaborate în RSR, utilizate la fabricarea sculelor și matrițelor", Contract nr.27/1976, Intreprinderea Electrotimiș Timișoara
249. x x x "Optimizarea tehnologiilor de prelucrare pe mașini electroerozive cu electrod masiv tip ELER de serie, echipate cu noile generatoare de impulsuri GEP-MP", Contract nr.73/1985, Intreprinderea Electrotimiș Timișoara.