

MINISTERUL ÎNVĂȚĂMÎNTULUI ȘI ȘTIINȚEI
INSTITUTUL POLITEHNIC "TRAIAN VUIA" TIMIȘOARA
FACULTATEA DE MECANICĂ

Inginer DAN-MANIU DUȘE

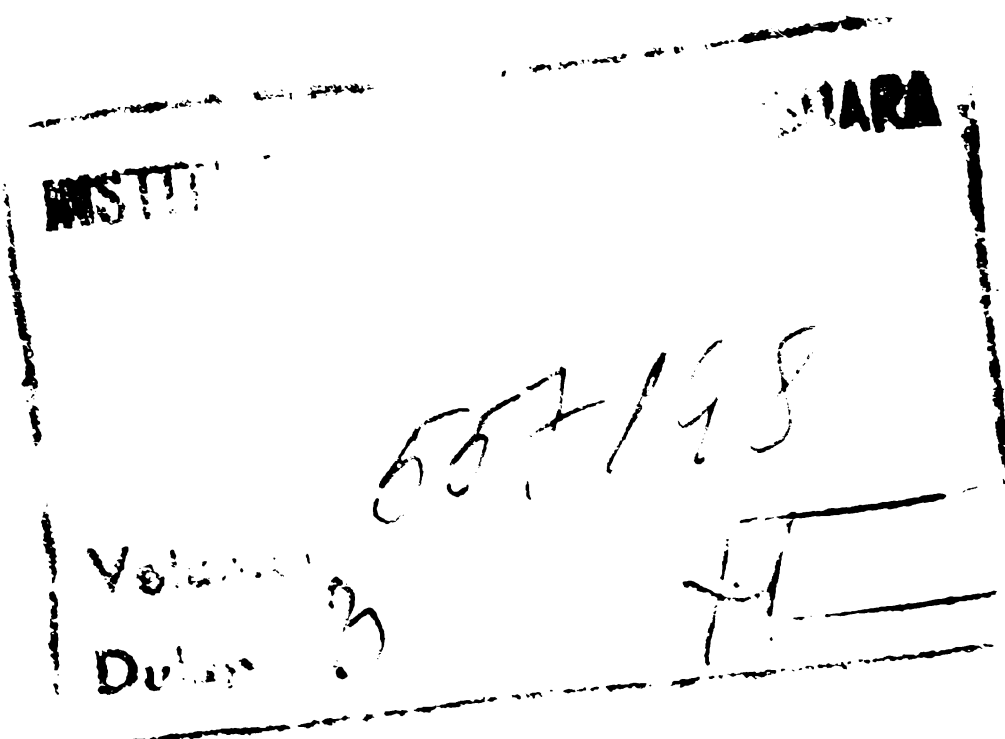
CONTRIBUȚII LA PRELUCRAREA DIMENSIONALĂ
PRIN EROZIUNE ELECTRICĂ CU RUPERE DE CONTACT

TEZA DE DOCTORAT

BIBLIOTECA CENTRALĂ
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"
TIMIȘOARA

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

TIMIȘOARA
1991



INTRODUCERE

Utilizarea, în procesul de transformare a materiei prime în produse finite, a unor noi tipuri de materiale cu caracteristici tehnico-funcționale și economice ridicate, impune pentru cercetarea științifică contemporană, elaborarea unor tehnologii noi de fabricație. În acest sens, se dorește ca aceste tehnologii, să se caracterizeze prin operativitate maximă și la nivel tehnic mondial, dat fiind faptul, că aceste aspecte, au implicații majore de ordin cantitativ și calitativ în obținerea unor economii însemnate de metal, energie și manoperă, asigurarea calității și competitivității produselor, și totodată, micșorarea costului fabricației. Activitatea inginerescă și în special a inginerilor tehnologi din construcția de mașini, este organizată în strânsă concordanță cu cerințele producției materiale. Știința materialelor, prin dezvoltarea corespunzătoare a cercetărilor aplicative și a celor fundamentale de perspectivă, ajută la producerea de noi tehnologii și echipamente tehnologice precum și la perfecționarea tehnologiilor existente. Pe linia acestor deziderate, la solicitarea Întreprinderii Metalurgica din Aiud, în anul 1982 autorul acestei lucrări a început activitatea de elaborare a studiului teoretico-experimental privind prelucrarea dimensională prin eroziune electrică cu rupere de contact a unor materiale metalice specifice întreprinderii, precum și a altor întreprinderi din sfera construcțiilor de mașini.

Dacă în legătură cu prelucrările dimensionale prin eroziune electrică se poate spune cu certitudine că există material bibliografic bogat și valoros, în ceea ce privește procedeul de prelucrare prin rupere de contact, datele existente - în literatura de specialitate la nivel mondial - sînt în multe cazuri insuficiente sau necorelate din diferite puncte de vedere. Mai mult, privind cercetarea procedeului, mai bogate în informații se prezintă cercetările tehnologice efectuate de diferiți cercetători, pe utilaje industriale concepute și realizate fără un studiu prealabil, urmărindu-se în cadrul lor doar implementarea industrială rapidă la

nivelul și la posibilitățile acestor utilaje industriale. Pe plan național, studiile referitoare la prelucrarea dimensională prin eroziune electrică cu rupere de contact, au început în cadrul Institutului politehnic "Traian Vuia" din Timișoara, facultatea de mecanică, catedra TCM. Și aici, cercetările, au avut un caracter preponderent tehnologic, justificat de activitatea contractuală a catedrei.

În acest context, tratarea temei a fost relativ dificilă, cu atât mai mult cu cât, pornind de la premiza aplicării în producție a cercetărilor, pe baza unor instalații realizate prin autodotare de către întreprinderi, cercetările au fost dirijate atât la nivelul tehnologiei de prelucrare cât și la nivelul utilajelor tehnologice industriale.

Ca urmare a faptului că, în domeniul prelucrărilor dimensionale prin eroziune electrică, cercetările (tematice și experimentale) sînt reduse, munca de culegere a informațiilor bibliografice a fost anevoioasă. În acest sens, au fost culese informații din biblioteca întreprinderii "Independența" din Sibiu, biblioteca universitară din Timișoara și Institutul național de informare și documentare din București. Au fost parcursе, începînd cu anul 1954 cînd a fost atestat documentar procedeul de prelucrare prin contact electric, revistele Tehnologhia i organizatîia proizvodstva (U.R.S.S.), Mașinostroemie(U.R.S.S.), Stali (U.R.S.S.), Metalurg (U.R.S.S.), Svarocinoe Proizvotsvo(U.R.S.S.), Stanki i Instrument (U.R.S.S.), Elektronnaia obrabotka materialov (U.R.S.S.), Porocnovaia Metalurghie (U.R.S.S), Werkstatt und Betrieb (Germania) și culegerile de articole de specialitate editate la Minsk, Leningrad și Moskova.

Lucrarea de față, constituie primul studiu sistematic al prelucrării dimensionale prin eroziune electrică cu rupere de contact din literatura tehnică românească. Această lucrare, își propune să fundamenteze bazele științifice și tehnologice ale procedurii de prelucrare prin eroziune electrică cu rupere de contact și să completeze, ca atare, anumite goluri existente în prezent în literatura de specialitate. Pe această linie, se înscrie evidențierea analitică a proceselor elementare de eroziune, a parametrilor și factorilor din proces și a surselor active din proces. Este de menționat aplicarea analizei dimensionale în studiul și proiectarea modelului de cercetare experimentală.

Cercetările experimentale efectuate, au permis verificarea și ca atare altestarea ipotezelor fundamentate teoretic, privind

procesele de încălzire, topire și expulzare și influența mărimilor fizice, a factorilor de material și a raportului de transformare a sursei de alimentare din proces.

Studiul sistemului tehnologic de prelucrare prin eroziune electrică cu rupere de contact, pune în evidență, pe baza unui studiu de sinteză **creativ**, funcțiile sistemului tehnologic de prelucrare și structura sa. În vederea operării cu mijloace electronice de calcul, s-a definit baza de date specifică și algoritmul de calcul al sistemului tehnologic de prelucrare.

Prin analiza procesului de prelucrare prin eroziune electrică cu rupere de contact, s-a urmărit determinarea tehnologiei de prelucrare. A fost conceput un vast program experimental, care a debutat prin determinarea parametrilor (factorilor) tehnologici majori. La analiza datelor experimentale, s-au utilizat metodele matematice, care, asigură un caracter științific cercetării. Prelucrarea și reprezentarea datelor, s-a efectuat utilizând mijloacele electronice de calcul.

Optimizarea procesului de prelucrare prin eroziune electrică cu rupere de contact, a avut ca scop determinarea extremelor funcțiilor obiectiv ale procesului (productivitatea prelucrării și consumul specific de energie electrică), stabilirea structurii și comenzii de conducere automată a procesului.

În analiza procesului de prelucrare și a sistemului tehnologic, în lucrare, s-au prezentat metodele de cercetare teoretică și experimentală utilizate, precum și o serie de observații și concluzii de strictă necesitate sectoarelor de prelucrare din cadrul întreprinderilor constructoare de mașini și întreprinderilor metalurgice.

Diferitele aspecte ale lucrării, s-au concretizat într-o serie de studii teoretice și experimentale și au fost prezentate la diverse sesiuni de comunicări științifice /9, 12, 25, 26, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76 / sau au făcut obiectul unor contracte de cercetare științifică / 126, 127, 128, 129/.

Tema a fost solicitată, la început, de Întreprinderea Metalurgică din Aiud, iar apoi cerută a fi aplicată și în cadrul întreprinderii "Independența" din Sibiu.

Rezultatele favorabile obținute în aplicarea industrială a procedurii, au permis continuarea colaborării cu aceste întreprinderi, colaborare materializată în alte două contracte de cercetare științifică, axate de această dată pe automatizarea și

optimizarea sistemului tehnologic eroziv. In cadrul acestor contracte de cercetare științifică, întreprinderile au contribuit cu experiența proprie , baza materială și cercetarea tehnologică la dezvoltarea temei. Ca urmare, autorul mulțumește pe această cale colectivelor de specialiști pentru ajutorul acordat.

Cu această ocazie, autorul mulțumește, de asemenea colegilor de la catedrele de Tehnologie mecanică de la Institutul politehnic "Traian Vuia" din Timișoara și Tehnologia construcțiilor de mașini de la Universitatea din Sibiu, care, au apreciat eforturile depuse pentru rezolvarea acestei tematici dând sugestii și asigurând condiții adecvate de cercetare.

Autorul adresează, și pe această cale, mulțumiri și exprimă profunđa prețuire și recunoștință conducătorului științific profesor universitar dr. docent în științe ing. Aurel Nanu, pentru îndrumarea permanentă și competentă în diferitele faze de elaborare ale lucrării.

Sibiu, 15.01.1991

Autorul,

C U P R I N S

NOTAȚII SI TERMINOLOGIE	12
CAPITOLUL 1. STADIUL ACTUAL AL PRELUCRĂRII DIMENSIONALE PRIN EROZIUNE ELECTRICA CU RUPERE DE CONTACT.	13
1.1. Principiul prelucrării dimensionale prin eroziune electrică cu rupere de contact.	15
1.2. Domenii de utilizare a prelucrării dimensionale prin eroziune electrică cu rupere de contact.	16
1.3. Utilajul tehnologic de prelucrare prin eroziune electrică cu rupere de contact.	19
1.4. Eficiența economică a prelucrării dimensionale prin eroziune electrică cu rupere de contact.	21
CAPITOLUL 2. CERCETARI TEORETICE SI EXPERIMENTALE LA PŘELUCRA- REA DIMENSIONALA PRIN EROZIUNE ELECTRICA CU RUPERE DE CÖN- TACT.	27
2.1. Procesele elementare de eroziune electrică cu rupe- re de contact	27
2.2. Surse active de proces	28
2.2.1. Contactul electric-sursă activă de proces.	29
2.2.2. Arcul electric nestaționar - sursă activă de proces	31
2.2.3. Mediul de lucru-sursă activă de proces	33
2.3. Parametrii și factorii care determină caracteristici- le tehnologice la prelucrarea dimensională prin eroziune electrică cu rupere de contact.	35
2.4. Stabilirea modelului de cercetare a procesului.	39
2.4.1. Aplicarea analizei dimensionale	40
2.4.2. Analiza indicilor de performanță specifici pro- cesului.	45
2.4.3. Modelarea fizică prin similitudine.	47
2.4.4. Proiectarea modelului	49
2.5. Verificarea ipotezelor teoretice prin cercetări ex- perimentale	55
2.5.1. Procese de încălzire topire și expulzare	56
2.5.2. Influența mărimilor fizice	59
2.5.3. Influența factorilor de material	61

2.5.4. Influența raportului de transformare a sursei de alimentare	63
2.6. Concluzii desprinse din analiza teoretică și experimentală	64
2.6.1. Mărimi specifice în proces	65
2.6.2. Mărimi specifice de comandă	66
CAPITOLUL 3. STUDIUL PRIVIND SISTEMUL TEHNOLOGIC DE PRELUCRARE PRIN EROZIUNE ELECTRICA CU RUPERE DE CONTACT	68
3.1. Funcțiile sistemului tehnologic de prelucrare	68
3.1.1. Structura spațiului de lucru elementar	69
3.1.2. Sistemul tehnologic de prelucrare	69
3.1.3. Funcția globală și funcțiile parțiale	71
3.2. Structura sistemului tehnologic	72
3.2.1. Progresul tehnic și evoluția sistemului tehnologic	72
3.2.2. Analiza informațiilor asupra soluțiilor constructiv-funcționale existente	74
3.2.3. Sinteza informațiilor	76
3.2.4. Selectarea tehnico-economică asistată de calculator a sistemului tehnologic	81
3.3. Baza de date impusă sistemului tehnologic	83
3.3.1. Baza de date a echipamentului de generare a agentului eroziv	84
3.3.2. Baza de date a echipamentului de formare finală și poziționare a agentului eroziv la suprafața obiectului de prelucrare	86
3.4. Proiectarea asistată de calculator a sistemului tehnologic de prelucrare	89
CAPITOLUL 4. DETERMINAREA TEHNOLOGIEI DE PRELUCRARE PRIN MODELAREA MATEMATICA A PROCESULUI DE PRELUCRARE DIMENSIONALA PRIN EROZIUNE ELECTRICA CU RUPERE DE CONTACT	93
4.1. Modelul experimental pentru determinarea tehnologiei de prelucrare	94
4.1.1. Structura modelului experimental	95
4.1.2. Măsurarea parametrului procesului	96
4.1.3. Baza de date a modelului experimental	98
4.2. Premodelarea	101
4.2.1. Alegerea variabilelor de stare și a parametrilor procesului	101
4.2.2. Selectarea parametrilor tehnologici	102
4.3. Modelarea matematică prin experimentul activ	105

4.3.1. Programul de experimentare.	106
4.3.2. Algoritmul de calcul și analiza modelului matematic.	108
4.3.3. Stabilirea ecuațiilor curbelor de regresie. . .	110
4.4. Programul de calcul și reprezentarea grafică a curbelor de regresie.	113
4.4.1 Programul de calcul pentru modelarea matematică. .	113
4.4.2. Reprezentarea grafică a ecuațiilor curbelor de regresie.	125
CAPITOLUL 5. CONTRIBUTII LA OPTIMIZAREA PROCESULUI DE PRELUCRARE DIMENSIONALA PRIN EROZIUNE ELECTRICA CU RUPERE DE CONTACT . . .	131
5.1. Funcția de optimizare.	131
5.1.1. Transformarea canonică a ecuației de regresie. .	132
5.1.2. Stabilirea regimurilor optimale.	133
5.1.3. Verificarea experimentală a regimurilor optimale.	137
5.2. Structuri de conducere optimală a procesului	138
5.2.1. Structura ansamblului de prelucrare	139
5.2.2. Structura utilajului de prelucrare.	140
5.2.3. Structura lanțului cinematic de avans și poziționare.	141
5.2.4. Structura lanțului cinematic de antrenare . . .	143
5.2.5. Structura interfeței de proces.	144
5.3. Comanda automată a procesului.	146
5.3.1. Comanda adaptivă a procesului	146
CAPITOLUL 6. APLICAREA INDUSTRIALA A REZULTATELOR CERCETARILOR .	149
6.1. Cercetări tehnologice desfășurate la Institutul de învățământ superior din Sibiu.	149
6.1.1. Stand pentru studiul debitării materialelor metalice prin procedeul EERC.	149
6.1.2. Câmpul de temperatură la debitarea prin procedeul EERC.	152
6.1.3. Modificări structurale la debitarea prin procedeul EERC.	155
6.2. Aplicarea procedeuului EERC la Intreprinderea "Metalurgica" din Aiud	160
6.3. Aplicarea procedeuului EERC la Intreprinderea "Independența" din Sibiu	166
CAPITOLUL 7. CONCLUZII	171
BIBLIOGRAFIE.	178

NOTAȚII ȘI TERMINOLOGIE

- A_a - aria aparentă de contact
- A_c - adaos de prelucrare
- AE - agent eroziv
- $A_{i,j}$ - matricea secțiunilor de prelucrare
- A_r - aria reală de contact
- a_{11}, a_{22} - coeficienți canonici
- $b_i, b_{i,j}$ - coeficienții ecuației de regresie
- C_a, C_i, C_t, C_v, C_w - clasele de precizie ale ampermetrului, transformatorului de măsură pentru curent, cronometrului, voltmetrului și wattmetrului
- D, d - diametru
- E_c - intensitatea câmpului electric
- EE - element de execuție
- EEEC - eroziune electrică cu rupere de contact
- EFF - echipament de formare finală a agentului eroziv
- EG"AE" - echipament de generare a agentului eroziv
- EP"OT", EP"OP" - echipament de poziționare a obiectului de transfer, a obiectului de prelucrat
- ES - electrod sculă
- e - sarcina electrică a electronului
- F - forța de apăsare
- H - duritatea materialului
- I - intensitatea curentului electric
- i - raportul de transmitere
- j - densitatea de curent
- K - scara derivată a modelului
- k - raportul de transformare a sursei de alimentare
- l - lungimea de prelucrare
- l_a - lungimea arcului electric
- l_{an} - lungimea zonei anodice
- l_c - lungimea coloanei
- l_k - lungimea zonei catodice
- L - inductivitatea proprie a circuitului electric

M - masă, modelul matematic
 $M_{i,j,k}$ - matricea modelului matematic
ML - mediul de lucru
MP - mașina de prelucrare
 $m_{i,j}$ - matricea perechii de materiale prelucrate
 m_{OP} - materialul obiectului de prelucrat
 m_{OT} - materialul obiectului de transfer
n - turația, număr de electroni, număr puncte de contact
OP - obiectul de prelucrat
OT - obiect de transfer
P - puterea activă în circuitul de sarcină, preț cost
p - presiunea de contact
 p_a - presiunea aerului
Q - cantitatea de căldură, productivitatea prelucrării
q - consum specific de energie electrică
R - rezistența electrică de contact
 R_a - rugozitatea ca abatere medie a profilului
 R_X - rezistența activă a circuitului electric
 r_0 - raza cercului real de contact
S - sursa de alimentare
SCA - sistem de comandă optimală
SCL - sistem cu comandă limitată
 $S_{i,j}$ - matricea sursei de alimentare
SLE - spațiu de lucru elementar
s - avansul de prelucrare
 s_l - avansul longitudinal
 s_t - avansul transversal
T - constanta de timp a circuitului electric, traductor de temperatură
TC, TF, TT, TU - traductoare de curent, forță, turație și tensiune
TDRC - diapazonul de graniță a tensiunilor de descărcare în arc la ruperea contactului electric
TDAI - diapazonul de graniță a tensiunilor de descărcare în arc intermitent
TDC - diapazonul de graniță a tensiunilor de descărcare în contact
TER - traductor electric rezistiv
t - durata menținerii procesului, adâncimea de prelucrare
 t_a - durata menținerii arcului electric
 t_c - durata menținerii contactului electric

- U - tensiune electrică
- U_a - căderea de tensiune pe arcul electric
- U_c - căderea de tensiune pe contactul electric
- U_n - tensiunea nominală de alimentare a circuitului electric
- U_p - tensiunea de proces
- U_z - uzura electrodului sculă
- U_{20} - tensiunea de mers în gol a sursei de alimentare
- V - volumul de material îndepărtat
- v - viteza relativă
- v_{ES} - viteza electrodului sculă
- v_{OP} - viteza obiectului de prelucrat
- v_{OT} - viteza obiectului de transfer
- $v_e, v_{e,i,j,k}$ - viteza, matricea vitezei de erodare
- $v_r, v_{r,i,j}$ - viteza, matricea vitezei relative
- W - energia consumată în proces, gradul de concordanță a părerilor specialiștilor
- X_K - rezistența reactivă a circuitului electric
- x_i, x_j - parametrii (factorii) tehnologici ai procesului
- y - funcția de răspuns a procesului
- α - scara fundamentală a intensității curentului
- $\delta_{OP}, \delta_{OT}, \delta_{ML}$ - material excedentar rezultat prin modificarea mărimilor de stare obiect de prelucrat, obiect de transfer și mediu de lucru
- Δ_{OP}, Δ_{OT} - microvolum de material din structura obiectului de prelucrat, obiectului de transfer
- $\Delta_{V_{i,j,k}}$ - matrice morfologică a sistemului tehnologic
- ε - eroare relativă maxim-possibilă
- λ - multiplicatorul lui Lagrange
- μ - scara fundamentală a maselor
- φ - coeficientul Prandl
- ρ - rezistivitatea materialului
- τ - scara fundamentală a timpului

1. STADIUL ACTUAL AL PRELUCRĂRII DIMENSIONALE PRIN EROZIUNE ELECTRICA CU RUPERE DE CONTACT

În ultimele șase decenii, prelucrările neconvenționale din industria constructoare de mașini s-au concretizat prin extinderea continuă a domeniului de aplicare. Ponderea cea mai mare (65 - 70%), revine metodelor tehnologice de prelucrare prin eroziune, datorită posibilităților tehnologice și economice și faptului că în ultimii 30 de ani, utilajul necesar a cunoscut o tendință specifică de evoluție, la nivelul structurilor moderne de fabricație.

Procedeele de prelucrare prin eroziune, permit prelucrarea materialelor independent de duritatea lor, fără un efort însemnat între sculă și piesă, indiferent de complexitatea formei geometrice.

Procedeul de prelucrare dimensională prin eroziune electrică cu rupere de contact, EERC, se încadrează în grupa procedeelelor de prelucrare erozivă alături de eroziunea electrică în impuls, eroziunea electrochimică, eroziunea chimică, eroziunea de radiații, eroziunea abrazivă, și eroziunea cavitațională. /19,46,58,64,65/.

De acest procedeu de prelucrare dimensională, s-au ocupat cercetători din diferite țări : din U.R.S.S., apoi din S.U.A., Germania iar în ultimii cincisprezece ani din România. Cercetarea procedeului s-a făcut sistematic. Au fost analizate aspectele fenomenologice, tehnologice și constructiv-funcționale ale procedeului și utilajelor de prelucrare aferente. În ansamblu, rezultatele și opiniile diferiților cercetători, sînt mult asemănătoare, mai mult, cercetările se împletesc asigurînd continuitate și eficiență în aplicarea industrială a procedeului.

Procedeul se aplică materialelor electroconductoare, este eficient din punct de vedere economic la prelucrarea materialelor termorezistente (termoconductibilitate relativ scăzută) și cu rezistență ohmică ridicată, /50,54,58,59,92/.

În anul 1957, procedeul de prelucrare, a fost aplicat la scară industrială pentru prima dată în U.R.S.S., la prelucrarea segmenților de șenilă pentru utilaje militare, industriale și agricole (oțel manganos), la prelucrarea bilelor de rulmenți de mari dimensi-

uni, la elice de nave maritime, etc. /19,58/.

Cinci ani mai târziu, G.F. Pronco, J.P. Dimitrieva și L.F. Negrimovski /77,92/, atestă importanța cercetărilor experimentale efectuate /50,54,59/. Astfel, s-au construit din motive tehnico-economice și organizatorice, utilaje de prelucrare prin modificarea mașinilor unelte clasice.

Începînd cu anii 1965, cercetările sînt extinse și la materiale electroconducătoare de tip fontă, și metale neferoase /116/, oțeluri obișnuite /117/ și oțeluri extradure cu rezistență ridicată la uzură și coroziune /95,118/, evidențiindu-se condițiile tehnologice de prelucrare optimă și nivelul de prelucrabilitate al diferitelor materiale.

În aceeași perioadă (anii 1965 - 1970), procedeul EERC, este aplicat industrial în S.U.A. prin construirea unor utilaje de mari dimensiuni, cu productivități ridicate, utilizate la realizarea construcțiilor metalice pentru reactoarele atomice /118/.

În anul 1978, ca urmare a cercetărilor efectuate la I.P. "T.V." Timișoara /78/, se realizează prima aplicație industrială românească în cadrul întreprinderii "Bărăganul" din Urziceni, la debitarea țevilor de aluminiu /81,83,84/.

A.E. Rudenko /97/ și V.A. Kupetkaia /55/ ocupîndu-se de recondiționarea pieselor din industria metalurgică, atestă oportunitatea utilizării procedeului în cadrul secțiilor de recondiționare la operații de prelucrare eboș și de semifinisare.

Cercetările experimentale desfășurate de tandemul V.N. Semenov - N.K. Foteev și A.S. Davîdov - V.I. Vitlin începînd cu anul 1980, au evidențiat caracterul complex al fenomenelor care au loc în proces /4,11,22,23,24,100,101,102,103,104,121/. Volumul informațional rezultat, a permis abordarea metodologică a studiului privind implementarea constructiv-tehnologică a procedeului EERC.

În țară, la Institutul de învățămînt superior din Sibiu, cercetările în domeniul prelucrării dimensionale prin procedeul EERC, au început în anul 1982, prin activitatea de cercetare contractuală a unui colectiv de cadre didactice din care face parte și autorul acestei lucrări. Ulterior (anul 1985), autorul și-a început perfecționarea post-universitară prin doctorat, în acest domeniu. Pe parcursul anilor, a abordat probleme legate de asigurarea tehnologiei și utilajelor de prelucrare /29,30,31,32,33,34,35,36,37,38,39,40,41,42,43,44,45,67,68,69,70,71,72,73,74,75,76/, în vederea implementării industriale a procedeului /126,127,128,129/.

1.1. Principiul prelucrării dimensionale prin eroziune electrică cu rupere de contact

Prelucrarea prin procedeul EERC, reprezintă o submulțime a metodelor tehnologice bazate pe acțiuni de rupere (dezmembrare, prelevare) a substanței, metode fundamentale în tehnologia construcțiilor de mașini /87/.

Prelevarea de material, are loc prin introducerea din exterior a unei cantități determinate de energie, în zona de prelucrare a suprafeței date. În timpul procesului de prelucrare, au loc interacțiuni cu substanța obiectului prelucrării, dezvoltându-se procese fizico-chimice și mecanice, cu rezultat final îndepărtarea materialului excedentar /46,64,65,78/.

Principial, prelucrarea se constituie prin dezvoltarea impulsurilor cu ajutorul unui electrod-sculă, ES, 1 în mișcare relativă față de obiectul de prelucrat, OP, 2 conectați la un circuit electric generator de energie 3, figura 1.1. Dezvoltarea impulsurilor,

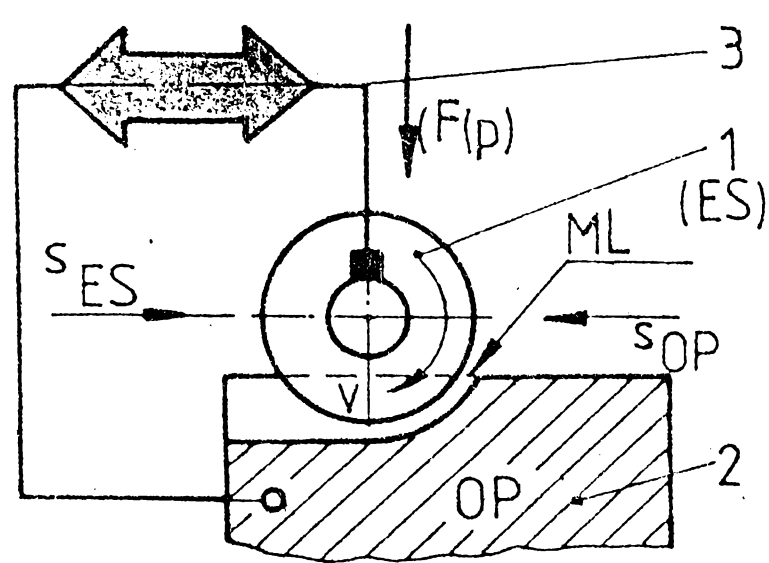


Fig.1.1. Schema procedurii EERC.

are loc în prezent pe cale mecanică, prin intermediul ES, care, execută rotații sau vibrații față de OP, mișcarea de avans, s , putând fi executată atât de OP cât și de ES /19,20,21,50,58,114/. Procesul este aerat sau udat în vederea localizării energiei de efect determinând formarea mediului de lucru, ML. Procesul prelucrării, se realizează prin acțiunea mecanică-viteza relativă a ES și/sau OP, care, se deplasează tangențial la suprafața OP și prin forța de apăsare, F , care asigură presiunea de contact, p . Contactul inițial, prin micro-nerregularitățile suprafețelor ES și OP, este definit din punct de vedere geometric de raportul A_r / A_a (A_r - aria reală de contact ; A_a - aria aparentă de contact) /9,26,68,71/. În aceste puncte, se dezvoltă densități de curent ridicate, care conduc la încălzirea pînă la atingerea temperaturii de topire a punctelor prin efectul Joule-Lenz /21,23,24,46,54,58,64,65,102,103,104/. Ulterior, datorită mișcării relative, punctele de legătură se rup dezvoltându-se arcul electric nestaționar, cu efect topirea și vaporizarea microvolumelor de material /19,21,23,24,54,102,103,104/. Realizarea unor alte contacte pe suprafața de interacțiune, localizate statistic, conduce la topirea de microvolumuri în toată zona de prelucrare.

Prelevarea de material, se produce datorită efectelor erozive, prin acțiuni termice și mecanice care apar la suprafața de contact.

Materialul excedentar este prelevat în stare plastifiată, topită sau vaporizată.

Modificarea corespunzătoare a energiei de efect (energie electrică) introdusă în spațiul de lucru, determină proporția de participare la îndepărtarea surplusului de material a unuia dintre procesele elementare de eroziune :

- erodare prin contact ;
- erodare prin arc electric.

Acțiunea mecanică (viteza relativă - v_r , presiunea de contact p), crează condițiile desfășurării proceselor elementare erozive, iar prin energia suplimentară introdusă, determină ruperi ale particulelor aflate în stare plastifiată și evacuarea produselor erozive.

Ponderea calitativă și cantitativă a prelevării de material, este dată de parametrii regimului electric (intensitatea curentului, tensiunea de alimentare, polaritatea curentului), parametrii mecanici ai procesului (presiunea specifică, viteza relativă) și mediul de lucru.

1.2. Domenii de utilizare a prelucrării dimensionale prin eroziune electrică cu rupere de contact

Din punct de vedere tehnologic procedeul EERC și-a găsit o largă răspîndire la operațiile de curățire, debavurare, demaseltare a unor piese specifice industriei metalurgice (lingouri, conuri, cupe, etc.) /47,58,77,95,97,122/, schema cinematică fiind concepută în funcție de suprafața de prelucrat, fig.1.2a, numărul și poziția ES 1, fiind dictată de configurația și gabaritul piesei de prelucrat 2. Cinematica adoptată în corelație cu lățimea ES, 1, acoperă suprafața de prelucrat, figura 1.2b.

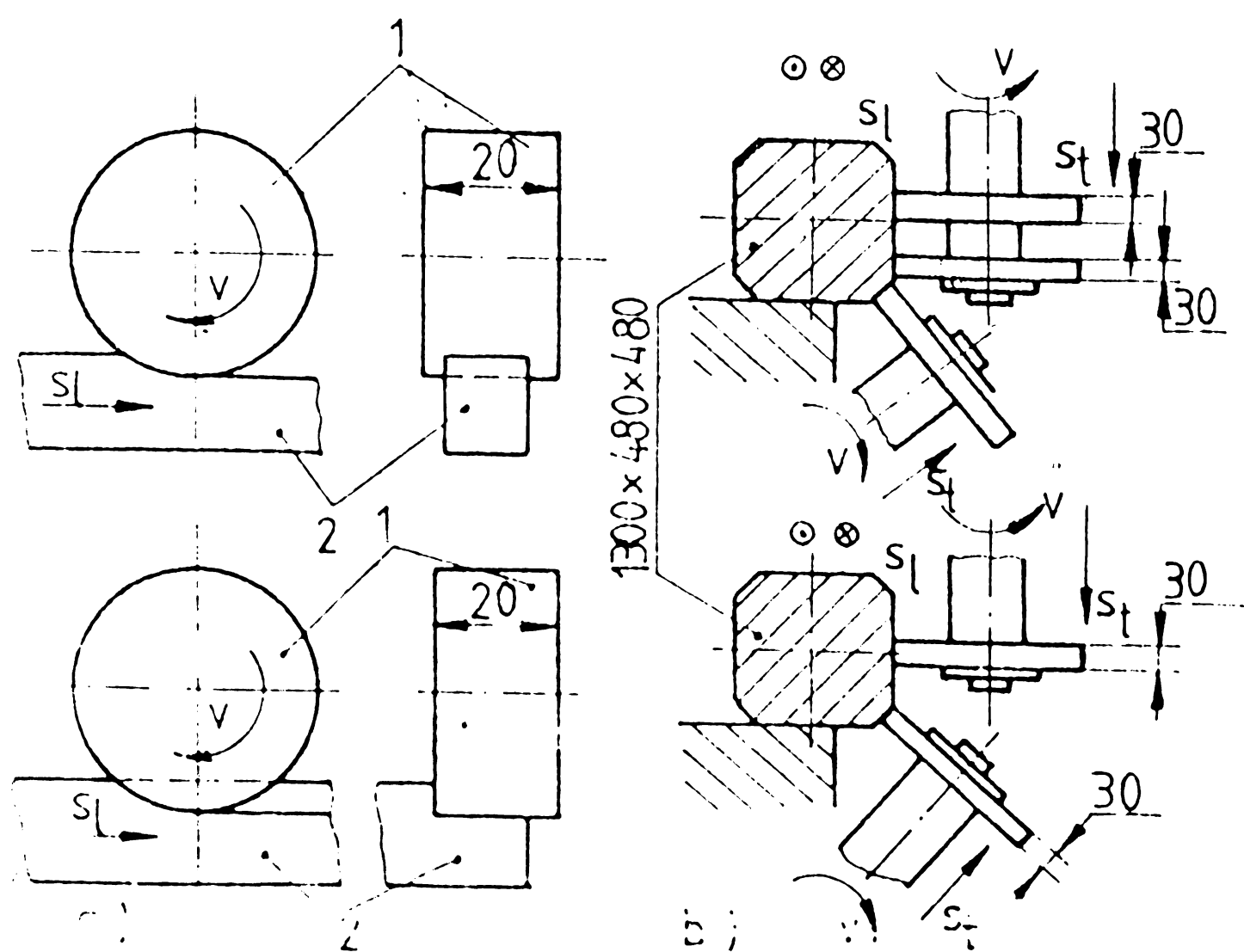


Fig.1.2. Schema cinematică de prelucrare a lingourilor și pieselor poliedrice /58/.

Debitarea, este a doua operație tehnologică la care s-a aplicat cu rezultate foarte bune procedeul EERC. În fapt, la această operație, procedeul asigură productivitatea maximă /59,80,85,115,116,117,118/.

Primele aplicații industriale, s-au efectuat cu electrozi sculă din grafit și răcire cu aer /8.20.21/, ulterior grafitul a fost înlocuit

cu oțel sau aluminiu /8,77,95,115,116,117/. Pentru o mai bună evacuare a produselor erozive, s-au conceput electrozi rotativi prevăzuți cu canale, 1, de dirijare a aerului comprimat în zona de prelucrare, fig.1.3a, /115/. Pentru eliminarea descărcărilor laterale, ineficiente din punct de vedere economic, aceste discuri, au fost căptușite cu un strat izolator electric, 2. La utilizarea electrozilor sculă din grafit, aluminiu și câteodată oțel, fig.1.3b, nu s-a practicat contactul între ES și OP. Aici, paralel cu sursa de alimentare, s-a folosit un oscilator (250.000 Hz/s, la o tensiune de 2500 V), care, asigură condiții de amorsare a arcului.

Datorită descărcărilor laterale, 3, care apăreau între pereții ES și a OP, s-a realizat izolarea electrică a ES prin aplicarea pe aceste suprafețe a unui strat protector 4 (lac de bachelită, clei de mică, etc.), fig.1.3c, ulterior realizându-se acoperiri izolator-abrazive 5, fig.1.3d. Aceasta, elimină neajunsurile amintite și determină procese de așchiere pe suprafața OP favorabile din punct de vedere tehnologic.

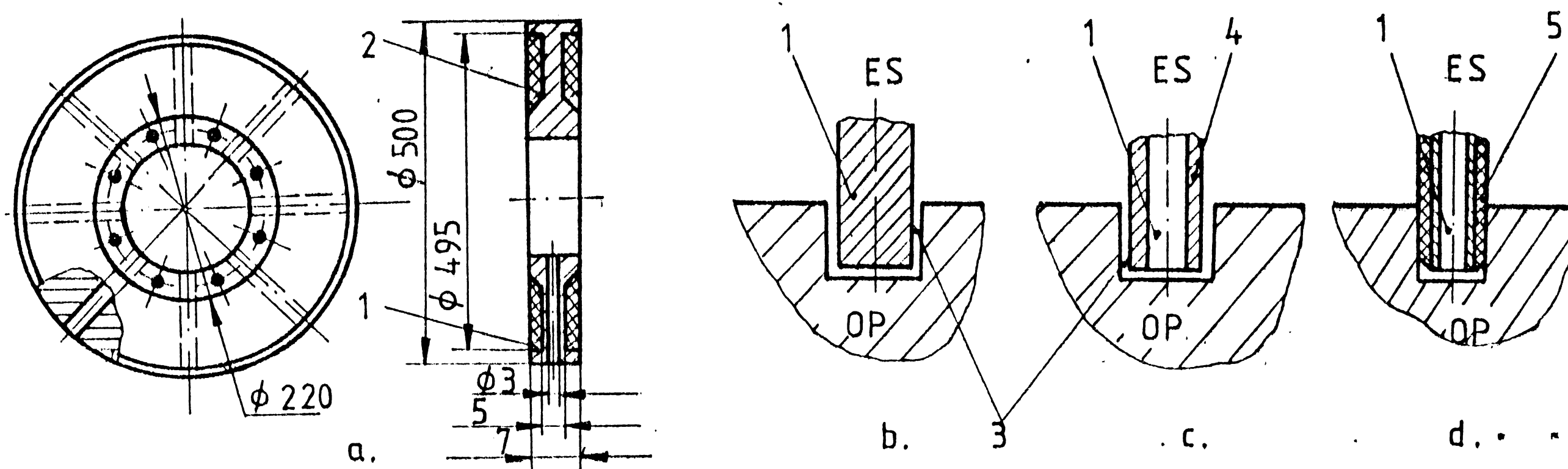


Fig.1.3. Electrode-sculă utilizat la operații de debitare /115/.

În forma sa stabilă, debitarea prin procedeul EERC, se desfășoară conform schemei din figura 1.4.a /117/, ES 1, este realizat din tablă de oțel, acoperit pe fețele laterale cu un strat izolator abraziv 2. În funcție de regimul tehnologic adoptat, au rezultat trei forme ale interstițiului tehnologic :

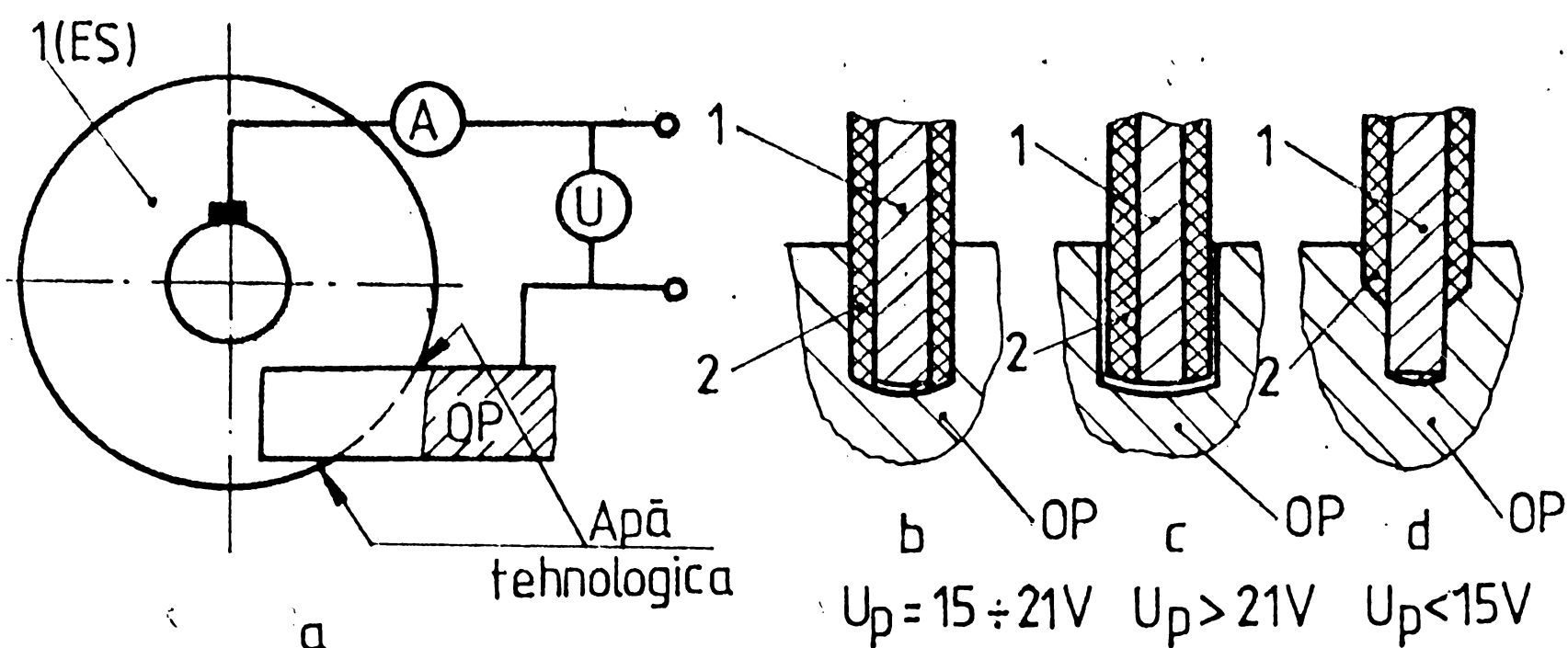


Fig.1.4. Schema operației de debitare prin procedeul EERC.

- fără contact între ES și OP, figura 1.4.b ;
- contact lateral prin stratul izolator - abraziv, figura 1.4.c ;

- contact lateral dur, care determină uzura stratului izolator abraziv, figura 1.4.d.

Variația tensiunii în proces, U_p , este determinată de presiunea specifică aplicată la suprafața de contact ES - OP. Productivitatea prelucrării, este maximă pentru ultimul caz, (fig.1.4.d), astfel încît se impune această variantă, ES - disc din oțel carbon obișnuit, de lățime redusă, răcit cu apă tehnologică, ca și variantă optimă pentru prelucrările de debitare / 8,78,79,85,116,117,118,119,120/.

Aplicarea procedeului EERC, s-a realizat și la generarea suprafețelor utilizîndu-se electrod rotativ, prin copierea formei suprafeței sau profilului electrodului /8,50,58,77,92,95,97,113,122/. Prelucrarea suprafețelor cilindrice se desfășoară conform schemei principale din figura 1.5.a, obținerea suprafețelor cilindrice sau profilate fiind determinată de forma și profilul ES, 1, aflat în interacțiune cu OP, 2, figura 1.5.b,c,d /50/.

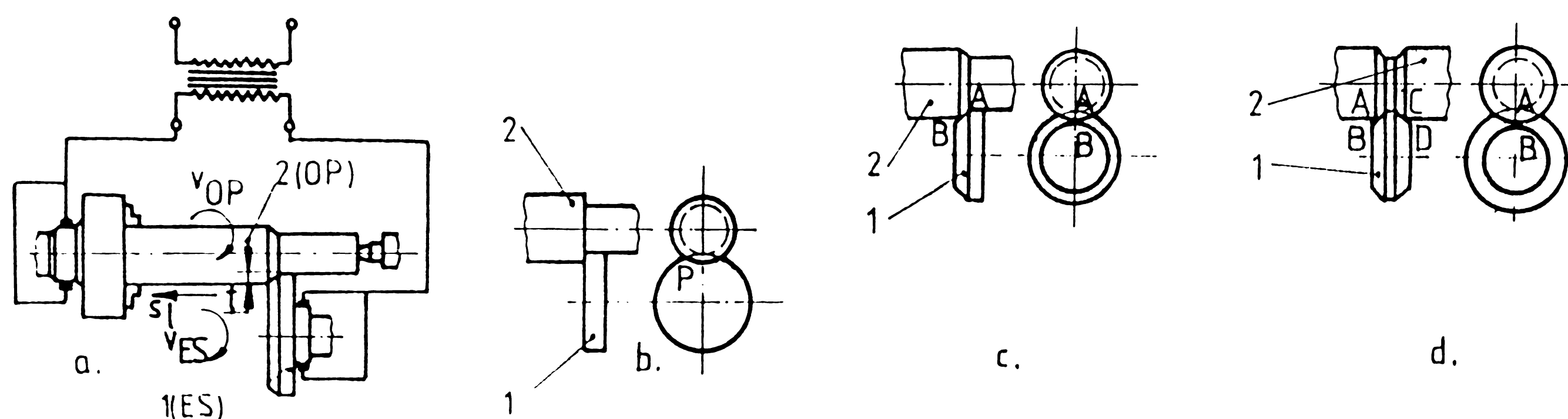


Fig.1.5. Schema procedeului EERC aplicată la generarea suprafețelor /50/.

Obiectul de prelucrare 2, execută o mișcare de rotație cu viteza periferică $v_{OP} < v_{ES}$ iar electrodul sculă, asigură avansul s_1 și adîncimea de prelucrare t . S-au determinat, condiții optime de prelevare a produselor erozive, la sensuri de rotație inverse ale OP față de ES.

Aplicațiile industriale sovietice, acoperă o gamă largă a operațiilor de prelucrare. S-au realizat, strunjiri de degresare și finisare utilizîndu-se electrozi sculă din discuri metalice late (grosimea de $40 \div 50$ mm), frezări cu electrozi sculă în formă de oală, rectificări de semifinisare, găuri și broșări a găurilor și cavităților cu profile complexe. Prelucrarea dimensională prin procedeul EERC, a fost aplicată și la operații de pregătire a semifabricatelor din tablă, în vederea sudării acestora (crăițuire) /8,21,47,50,55,58,77,92,97,113,114,120,122/. De asemenea, s-au obținut rezultate foarte bune în producția de reparații, la prelucrarea suprafețelor

reconstrucționate cu duritate ridicată /55,95,97/.

Materialele supuse prelucrării prezintă o varietate largă. Cercetările efectuate, au evidențiat posibilitatea aplicării procedurii cu eficiență bună la toate materialele electroconductoare cu temperatură de topire sub temperatura arcului electric.

Rezultate foarte bune s-au obținut la prelucrarea metalelor termorezistente, cu rezistență ohmică ridicată, metale și aliaje metalice cu duritate și tenacitate ridicată. Oțelurile inoxidabile austenitice și martensitice, oțelurile refractare, fonta, aluminiul și aliajele sale, aliaje dure de tip "relit" și "sarmait" prezintă prelucrabilitate ridicată. /4,8,20,50,58,59,77,95,113,115,116,117,118,120/.

1.3. Utilajul tehnologic de prelucrare prin eroziune electrică cu rupere de contact

Gama operațiilor tehnologice de prelucrare dimensională prin procedeul EERC realizate, a impus dotarea cu utilaje tehnologice adecvate. Utilajele, au evoluat deci din punct de vedere cinematic și organologic, conform metodei de generare a suprafețelor, configurației pieselor prelucrate și gabaritul acestora. Soluțiile constructive adoptate au avut ca punct de plecare următoarele :

- metoda de generare a suprafețelor, adecvată formei și dimensiunilor pieselor supuse prelucrării, condițiilor macro și micro geometrice impuse prelucrării ;
 - baza tehnico-materială disponibilă ;
 - nivelul de cunoștințe existent, fenomenologic și tehnologic ;
- Astfel, au fost concepute și realizate utilaje de prelucrare în două variante :
- mașini unelte transformate în mașini de prelucrare erozive ;
 - utilaje de prelucrare erozive .

Transformarea mașinilor unelte în mașini de prelucrare erozive, a fost facilitată de existența lanțurilor cinematice, capabile de a asigura generarea unor suprafețe complexe și de aspectul tehnico-economic favorabil. Acest moment, nu poate fi considerat ca o etapă definitivă în studiul dezvoltării utilajelor de prelucrare, ci mai degrabă, o perioadă de căutări în vederea certificării procedurii EERC, ca un procedeu nou, independent în dezvoltarea tehnologiilor de prelucrare neconvenționale.

Modificări impuse de specificul prelucrării erozive (aplicarea energiei electrice, introducerea lichidului de răcire, evacuarea produselor erozive), sînt accesibile - relativ simple - dar în timp

determină uzura rapidă a subansamblelor mașinilor unelte.

Performanțele tehnologice ale acestor mașini de prelucrare erozive, au fost determinate de parametrii funcționali, ai mașinii unelte modificate, sursei de alimentare cu energie electrică, sistemului de alimentare cu lichid de răcire și de posibilele combinații ale parametrilor amintiți.

În vederea generării suprafețelor de revoluție și a suprafețelor plane, s-au transformat mașini de strunjit, mașini de rectificat, mașini de găurit, mașini de frezat și mașini de rabotat /50, 58, 77, 92, 97, 122/.

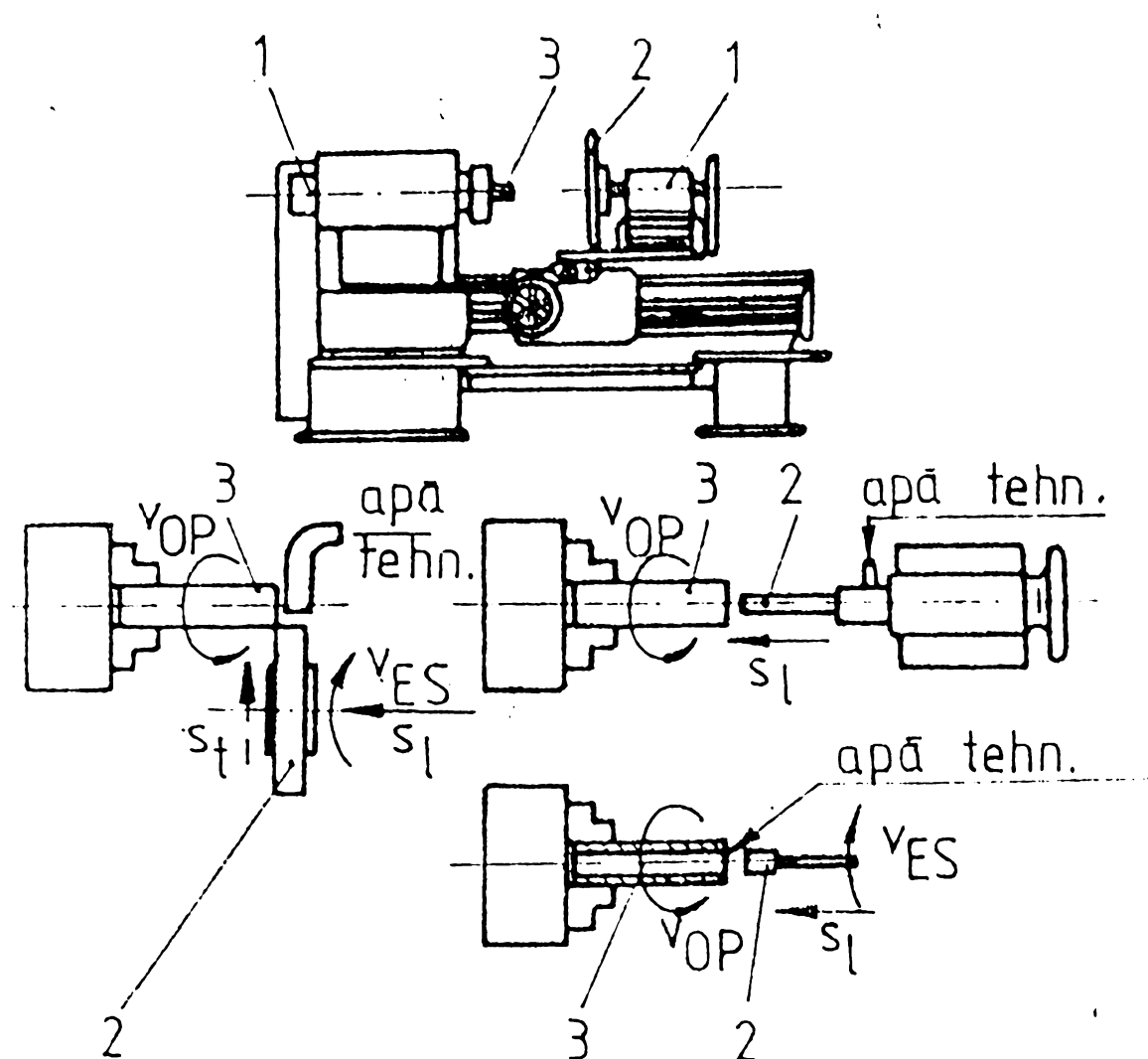


Fig.1.6. Schema cinematică de prelucrare pe mașina de strunjit. /92/.

La mașinile de strunjit transformate, fig.1.6 /92/, ES și OP, se pot fixa pe axul principal, păpușa mobilă sau suportul transversal. Alimentarea cu energie electrică se realizează prin receptorul 1, la nivelul ES, 2, și OP, 3. Lichidul de răcire (apă tehnologică), este dirijat în zona de prelucrare.

Schemele de prelucrare pot fi îmbunătățite, prin utilizarea unor dispozitive speciale, care, asigură deplasări spațiale sau mișcări de rotație.

Particularitatea principală a aplicării procedurii EERC în această etapă, este aceea că se pot executa prelucrări prin debitare, degroșare și finisare utilizând aceeași mașină - unealtă, cu unul sau mai mulți electrozi-sculă.

Independent de tipul mașinii-unelte transformate, s-a impus proiectarea și realizarea a două subansamble noi :

- instalație de receptare a curentului electric la ES și OP ;
- instalație de alimentare și colectare a lichidului de răcire și a produselor erozive în zona de prelucrare.

Primele utilaje de prelucrare prin procedul EERC, răspund criteriului operativității în proiectare, fiind rezultatul unei asimilări prin reproiectare la condițiile specifice date, ale unor utilaje cunoscute, de concepție nouă, cu performanțe sporite.

Astfel, la îndepărtarea stratului de suprafață al lingourilor (pieselor poliedrice) de dimensiuni mari (1300 x 400 x 480 mm), s-a realizat utilajul din figura 1.7./58/, prevăzut cu două capete de forță (C.F.1, C.P.2), pe care s-au montat electrozii sculă 1.

Lingoul 2, este orientat și fixat în dispozitivul de prelucrare 3, care, execută mișcarea de avans față de batiul 4.

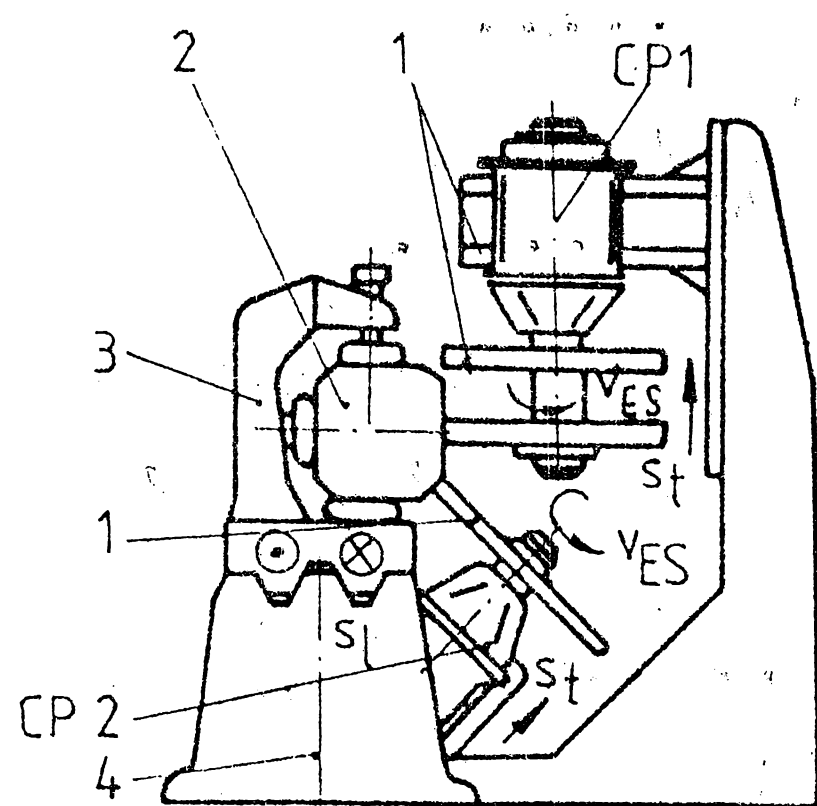


Fig.1.7. Utilaj pentru prelucrarea suprafeței al lingourilor /58/.

Aplicarea procedeului EERC la operațiile de debitare, a determinat apariția unor utilaje cu trăsături comune din punct de vedere funcțional, diferențiate de configurația piesei prelucrate. Utilajul de prelucrare realizat pentru debitarea profilelor, fig.1.8./115/, utilizează electrodul disc 1, la care mișcarea de rotație este asigurată prin transmisia 2, poziționarea profilelor asigurându-se pe masa mașinii de prelucrare prin dispozitivul de prindere 3, iar avansul, se realizează prin contragreutățile 4 și regulatorul de

tensiune 5. Răcirea electrodului disc și a profilului, se realizează cu aer comprimat, dirijat în zona de lucru prin canalele radiale ale electrodului disc.

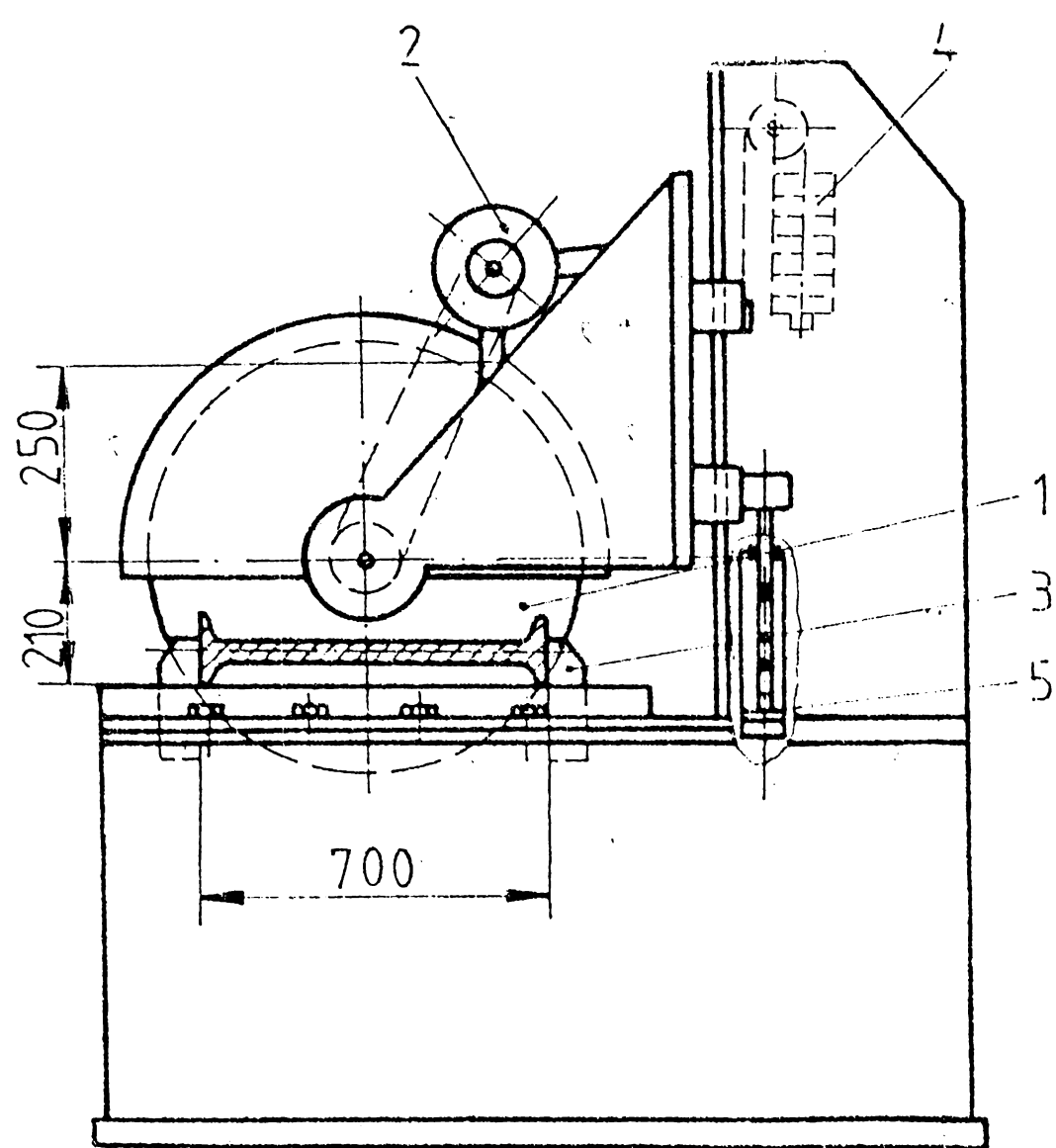


Fig.1.8. Utilaj de debitare a profilelor /115/.

Utilajele de prelucrare prezentate de literatura de specialitate /50, 58, 67, 70, 77, 81, 82, 92, 97, 112, 115, 122/, reflectă stadiul actual de dezvoltare al cercetărilor în domeniul cunoașterii constructiv-funcționale a procedeului EERC. Astfel, prin cumulara informațiilor privind eficiența economică a procedeului, este posibilă evidențierea direcțiilor de cercetare în vederea aplicării industriale a acestuia.

1.4. Eficiența economică a prelucrării dimensionale prin eroziune electrică cu rupere de contact

Parametrii tehnologici care caracterizează procesul de prelucrare prin eroziune electrică cu rupere de contact sînt :

- tensiunea de proces, U_p , diferențiată în trei domenii distincte /20, 21, 120/ ;

- mică 8.....12 /V/ ;

- mijlocie 12.....22 /V/ ;

- mare 22.....32 /V/ ;
- curent alternativ sau curent continuu /58,59,95,113,115/ ;
- intensitatea curentului electric, $I = 500.....25000$ A, /50, 54,59,61,77,115/;
- presiunea specifică dintre ES și OP, $p = (1.....10)$ MPa , /59,78,79,86,117/ ;
- și/sau densitatea de curent, $j > 5$ A/mm², /18,54,78,79,80, 92,94,95,116,117,118/ ;
- viteza relativă între ES și OP, $v = 10,.....50$ m/s, /4,20, 59,78,79,80,102/ ;
- răcirea cu jet de aer la $p_a = 5$ at, /61,77,115/ sau cu lichide (apă tehnologică, lichide anticorozive), /50,54,59,78,79,80, 94,97,102,113,118,120/ ;
- electrodul sculă, din oțel, alamă, aluminiu, fontă, de grosimi variabile, /20,50,58,78,95,115,118,120/ cu sau fără protecție laterală.

Sursele de alimentare utilizate sînt transformatoarele de sudură, convertizoarele de sudură /50,54,77,115/ și transformatoarele speciale /23,61,70,81,104/.

Materialele prelucrate prezintă o varietate largă, cu rezultate foarte bune din punct de vedere economic s-au prelucrat materialele termorezistente, cu rezistență ohmică ridicată, metalele și aliajele cu duritate și tenacitate ridicată, /4,8,20,50,58,59,77,95, 113,115,116,117,120/.

Curenții mari conduc la ideea unui procedeu de prelucrare consumator de energie, de aceea, s-au efectuat cercetări care au relevat un consum energetic rațional. Diferiții autori au exprimat eficiența economică prin diferiți parametri.

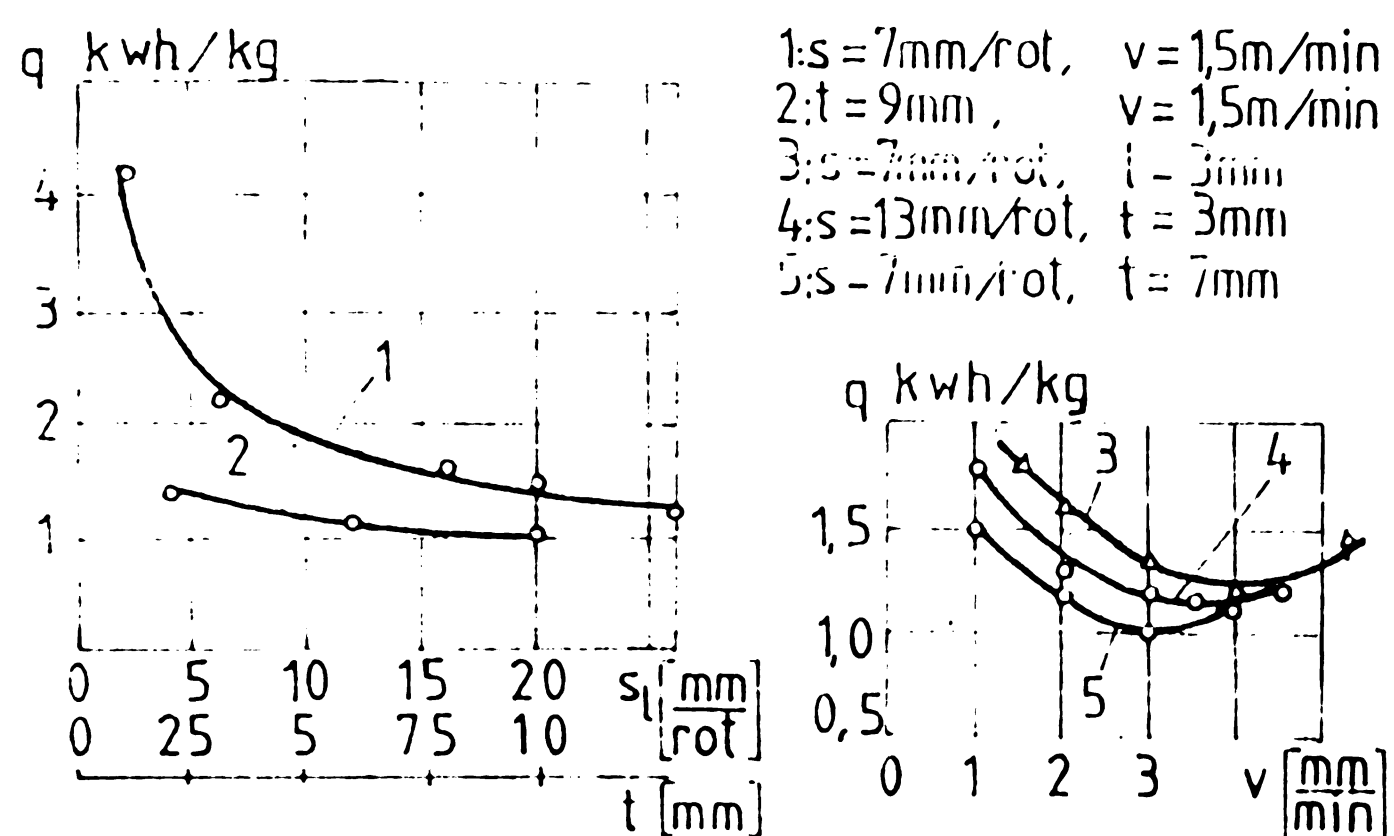


Fig.1.9. Dependența consumului specific de energie electrică de adîncimea de prelucrare, avansul longitudinal și viteza de rotație a piesei prelucrate /50/.

Consumul specific de energie electrică q /kWh/kg/, a fost analizat în funcție de avansul longitudinal, s_1 , adîncimea de prelucrare, t , și viteza de rotație, v , a OP. Rezultatele sînt prezentate în figura 1.9. /50/. Se remarcă, scăderea consumului specific de energie electrică odată cu creșterea adîncimii de prelucrare și a avansului longitudinal și existența unei zone optime a vitezei de rotație la valori cuprinse între

3 și 5 mm/min.

Productivitatea debitării, măsurată în unități de arie îndepărtată în unitatea de timp și consumul specific de energie electrică, au fost analizate în lucrarea /116/, la prelucrarea oțelului 10TiNiCr180, rezistent la coroziune, fig.1.10. Reprezentarea grafică a celor doi indicatori economici, reflectă creșterea productivității odată cu creșterea intensității curentului, respectiv,

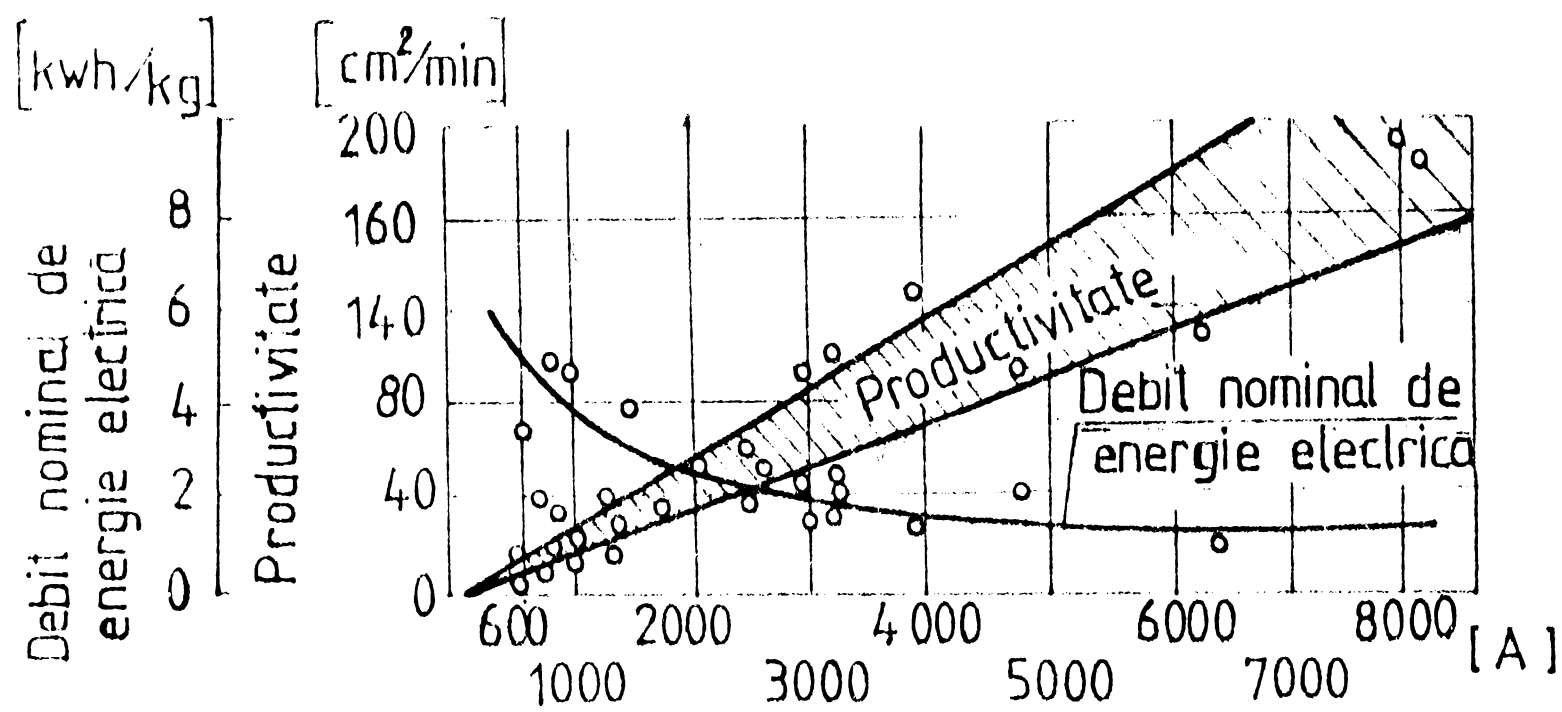


Fig.1.10. Dependența productivității prelucrării și a consumului specific de energie electrică de intensitatea curentului /116/.

scăderea consumului specific de energie electrică. Procedul EERC, este foarte economic la curenți mari de 3000 ÷ 9000 A, cu densitatea curentului cuprinsă între 5 ÷ 150 A/mm². Analiza economică efectuată în anul 1963 în lucrarea /115/ asupra procedeelor de prelucrare ne-

convențională la care este prezent arcul electric, a permis publicarea situației comparative din tabelul 1.1.

Tabelul 1.1 [115]

Tipul procesului	Operația	Oțelul prelucrat	V _l [kg/h]	s [mm/s]	q [kWh/kg]	U _z [%]
Debitarea cu arc electric și aer comprimat la c.c.	Debitarea la suprafață cu electrod de carbon.	moale (% C <<)	16,4	8,3	3,3	6,4
		10TiNiCr 180	21,4	10,7	2,5	4,9
	Debitare fracționară cu electrod de carbon.	moale (% C <<).	17,5	15,5	3,5	8,0
		inoxidabil	18,0	17,3	2,7	7,0
Debitarea cu arc electric și aer comprimat la c.a.	Debitare cu electrod rotativ.	moale (% C <<)	16,9	10,0	3	0,0
		inoxidabil	16,9	10,0	3	0,0
Debavurarea prin contact electric a pieselor turnate.	Debavurarea zalelor	r.u. (10% Mn, 1% Si)	80,0	78,5	1,5+2	0,0
	Debavurarea secțiunilor,	r.u. (10% Cr, 18% Ni, 2% Ti)	164	1000	1,5	0,0
	Debavurarea secțiunilor,	r.c. (0,3% Si, 0,3% Mn, 0,4 Cr, 4,5% W)	180	885	1,4	0,0
	Prelucrarea monstrelor	inoxidabil (25% Cr, 9% Ni)	212	167	1,25	0,0
		inoxidabil (25% Cr, 9% Ni, Ti)	450	36,8	1,17	0,0
Debitarea cu arc electric și apă la c.c.	∅ 60 cu disc de 2mm	OLC 45	8,6	2	6 ÷ 8	50
	∅ 160 cu disc de 2mm	OLC 45	4,8	0,2	6 ÷ 10	10
Debitare anodo-mecanică.	∅ 200 cu disc de 2mm	OLC 45	2,5	0,15	15	15
	∅ 200 cu disc de 0,8mm	OLC 45	2,1	0,5	10	15

r.u. - oțel rezistent la uzură, r.c. - oțel rezistent la coroziune

S-au evidențiat, consumul specific de energie electrică- q , viteza de tăiere, v_t , avansul la prelucrare - s , și uzura electrodului disc - U_z , la prelucrarea diferitelor materiale. Rezultate foarte bune s-au obținut prin aplicarea procedeului EERC la debavurarea unor repere din oțeluri rezistente la uzură și coroziune.

Aplicarea procedeului EERC în industria românească, a fost însoțită de primele cercetări experimentale de determinare a eficienței economice.

Cercetările desfășurate în cadrul întreprinderii metalurgice din Aiud, pe un utilaj industrial de debitare /68,70,126/, au evidențiat oportunitatea aplicării procedeului în secția de turnătorie de piese din oțeluri înalt aliate, (fig.1.11.). Rezultatele culese și prelucrate, indică scăderea timpului de debitare odată cu creșterea intensității curentului pentru toate cele cinci reprezentări grafice (curbele 1 - 5), corespunzătoare celor cinci secțiuni distincte debitate.

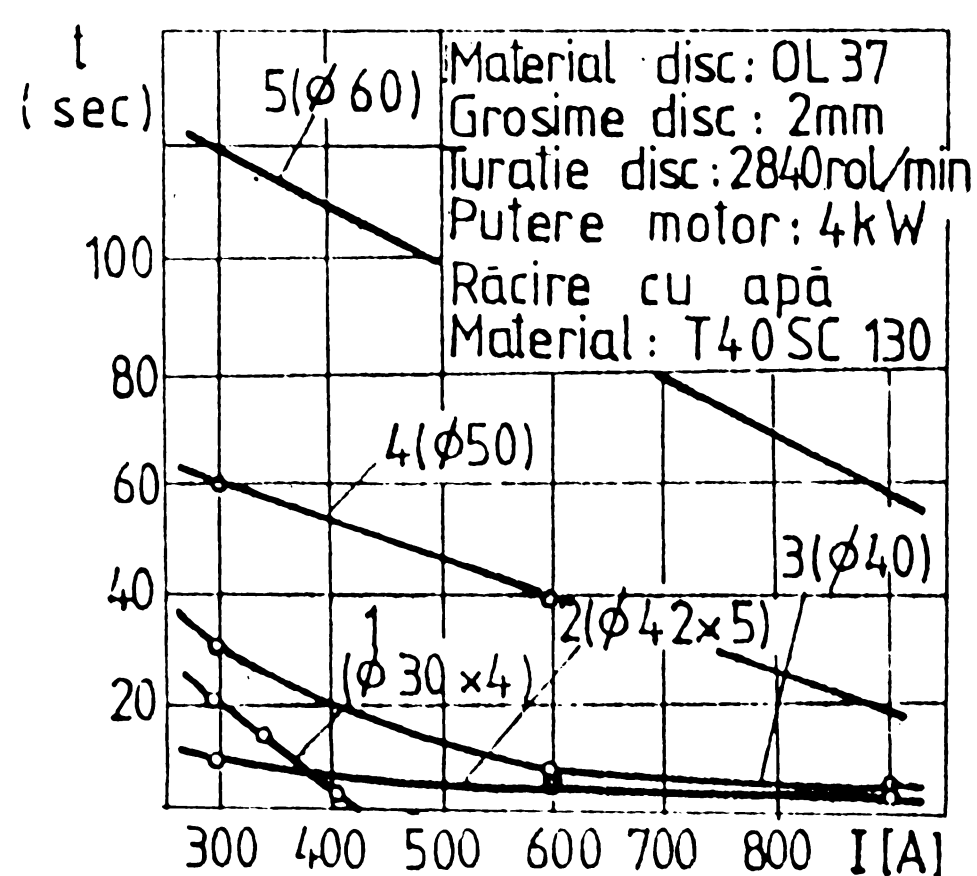


Fig.1.11. Dependenta timpului de debitare de intensitatea curentului.

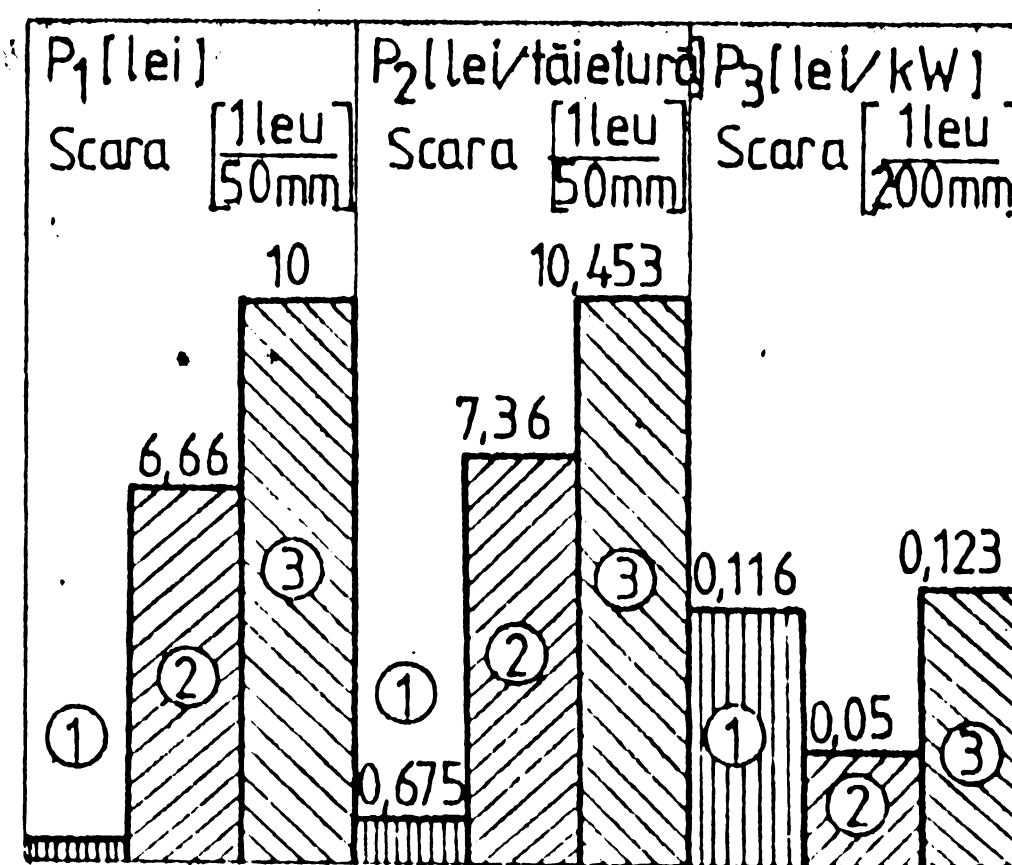


Fig.1.12. Eficiența economică a procedeului EERC.

Eficiența economică rezultată în urma introducerii procedeului în fluxul tehnologic al turnătoriei, a fost evidențiată în diagrama din figura 1.12., prin indicatorii economici P_1 - preț consum material, P_2 - preț cost /tăietură și P_3 - preț cost consum energie electrică, raportate la trei metode de prelucrare aplicate în întreprindere, 1 - procedeul EERC, 2 - debitarea cu freză disc, 3 - debitarea cu disc abraziv.

Aprecierea eficienței prelucrării a fost completată și cu aspecte conexe ale prelucrării :

1.- calitatea suprafeței prelucrate /4,8,21,50,55,58,59,77,95,113,116,117/, caracterizată prin rugozitatea suprafeței $R_a = 6,3 \dots 50 \mu m$, prin zona influențată termic cuprinsă între 0,6 - 5 mm în funcție de materialul prelucrat, prin creșterea durității

stratului superficial și prin apariția porilor și microfisurilor intergranulare, inițiate de la marginea prelucrată:

2.- uzura electrodului-sculă /4,21,47,92,115,118,119,120/, calitativ diferențiată în funcție de condițiile de prelucrare și de natura materialului din care a fost executat, iar cantitativ asigurată prin eficiența economică a procedeuului EERC ;

3.- tehnica securității muncii /8,76,97,122,127,128/, care, impune restricții severe de protecție fonică și vizuală a operatorului uman.

CONCLUZII

Cele trei subcapitole, privind domeniile de utilizare, utilajul tehnologic și eficiența economică a prelucrării dimensionale prin procedeul EERC, reflectă stadiul actual de dezvoltare al cercetărilor, în domeniul cunoașterii constructiv-tehnologice și fenomenologice a procesului.

Aplicarea industrială a prelucrării dimensionale prin eroziune electrică cu rupere de contact, presupune cunoașterea și eliminarea (parțială sau totală) a aspectelor care frânează aceasta. Informațiile sintetizate și prezentate în acest capitol, permit evidențierea restricțiilor existente în procesul aplicării industriale :

- desfășurarea și dirijarea fenomenelor fundamentale din proces ;

- definirea, corelarea și stabilirea ponderii de influență a parametrilor externi din proces ;

- extremizarea indicatorilor tehnico-economici, în special în cazul prelucrării materialelor metalice, cu caracteristici termofizice și mecanice ridicate ;

- diversificarea metodelor de prelucrare ;

- optimizarea constructivă a utilajelor de prelucrare.

Luând în considerare aspectele amintite, prelucrarea dimensională prin procedeul EERC, poate fi considerată ca o prelucrare erozivă în afirmare /8,20,21,29,46,47,50,53,54,59,64,67,77,79,92,95,115,116,119,126/, implementarea sa industrială fiind limitată de următoarele cauze :

- peste 60% din cercetările efectuate pînă în prezent urmăresc interdependența dintre anumiți parametri mecanici ai procesului (similar prelucrărilor clasice prin așchiere), cu indicatorii tehnologici de rentabilitate ai prelucrării /50,59,115,116,117,118,120/;

- prelucrabilitatea materialelor, ca problematică a cercetă-

rii, este abordată dezordonat sau unilateral, fără justificări de fond pentru nivelul ridicat sau scăzut al probelor efectuate, lipsa explicită a condițiilor experimentale de desfășurare /4,50,59,104,115/ completând neajunsurile deja evidențiate;

- rezultatele cercetărilor efectuate pe diferite utilaje industriale, au doar ca direcție de cercetare, optimizarea de suprafață a procesului prin eliminarea deficiențelor cinematice și constructiv funcționale, fără a sesiza aspectul secundar al cercetării desfășurate /92,95,115,116,117,119/ ;

- în țară se poate afirma că, în anumite sectoare industriale, există o rețineră în aplicarea procedeului EERC, datorită greutăților create în procurarea unei surse de alimentare adecvate și a tehnologiei de prelucrare.

2. CERCETARI TEORETICE SI EXPERIMENTALE LA PRELUCRAREA DIMENSIONALA PRIN EROZIUNE ELECTRICA CU RUPERE DE CONTACT

2.1. Procese elementare de eroziune electrică cu rupere de contact

Procesele elementare, se definesc și se formează în spațiul de lucru, privit la nivelul microneregularităților, prin suprafața de interacțiune a obiectului de transfer, OT, cunoscut în literatura de specialitate sub denumirea de electrod disc sau electrod sculă și de obiectul supus prelucrării, OP, figura 2.1. În timpul real de dezvoltare a procesului eroziv, se formează perechi distincte $\Delta_{OT} - \Delta_{OP}$, reprezentând contactele punctiforme ale microneregularităților celor două obiecte OP și OT, aflate în interacțiune. Aceste perechi, parcurg în ordine următoarele zone :

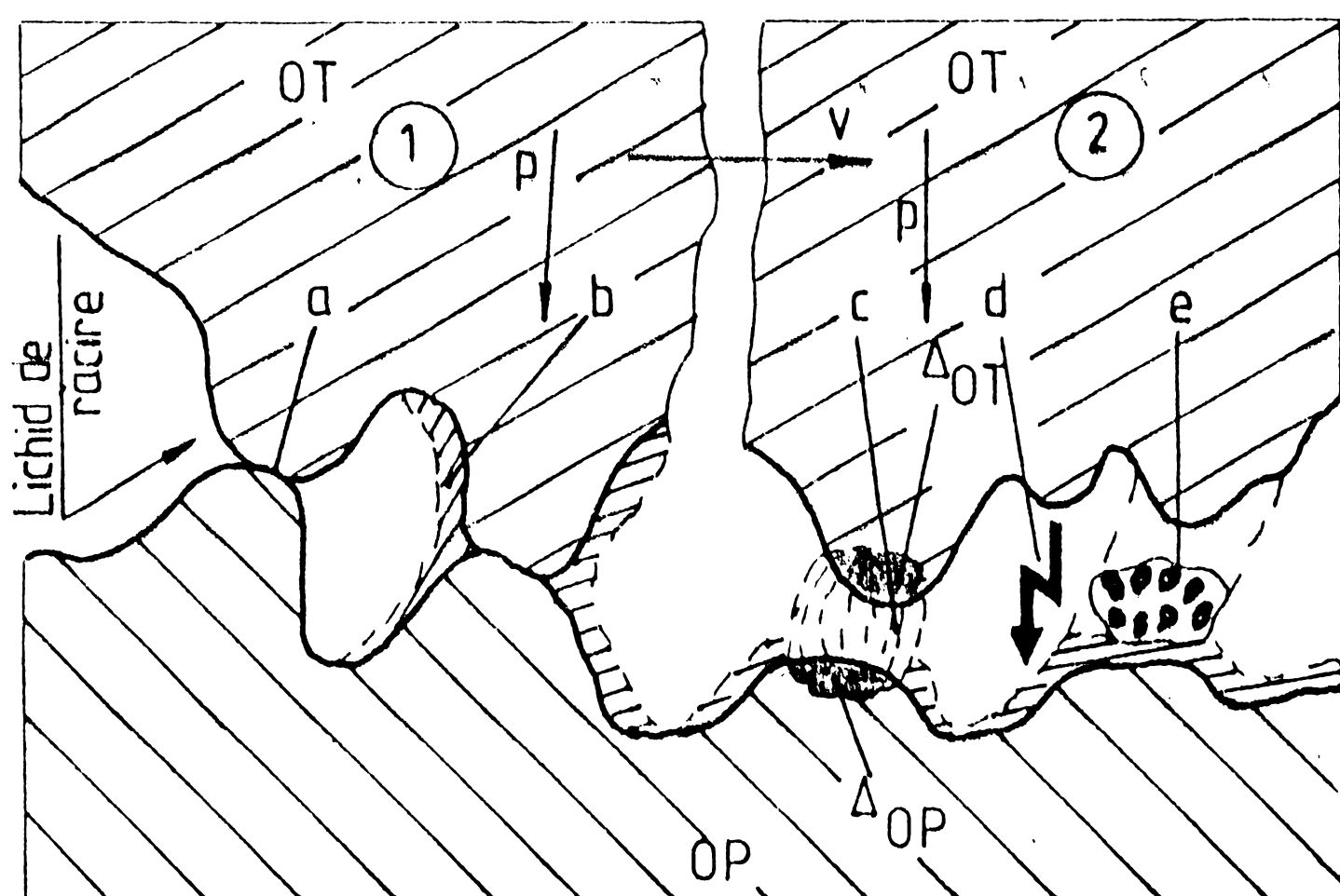


Fig.2.1. Structura spațiului de lucru.

următoarele procese elementare de erodare /51,59,71,102,104/ ;

1.- Aplicarea tensiunii de alimentare la suprafața de contact OT - OP, determină apariția unei diferențe de potențial, definită prin structura și caracteristica circuitului electric al sursei de alimentare. Sub acțiunea presiunii de contact, p, se stabilesc contacte de suprafață, a, cu o distribuție statistică între microneregularitățile suprafețelor OT și OP aflate în contact. În aceste puncte, are loc o creștere puternică a densității de curent și se degajă o cantitate mare de energie termică pe baza efectului Joule-Lenz (2.1.)/98/ ;

$$W = I R t \quad . \quad /J/ \quad (2.1)$$

dezvoltare a procesului eroziv, se formează perechi distincte $\Delta_{OT} - \Delta_{OP}$, reprezentând contactele punctiforme ale microneregularităților celor două obiecte OP și OT, aflate în interacțiune. Aceste perechi, parcurg în ordine următoarele zone :

- 1 - zona de scurt circuit ;
- 2 - zona de arc nestăționar;
- zona dielectrică.

Se consideră ca fiind reale

Energia termică dezvoltată și localizată în masa elementelor de volum (Δ_{OT} , Δ_{OP}), determină încălzirea pînă la temperatura de topire a materialelor aflate în contact./20,90/.

Prezența mediului de răcire, poate determina apariția unei pelicule de oxid, b, rezultate din interacțiunea metalului încălzit cu elementele de disociere din mediul de răcire folosit/53,61/.

Procesul dobîndește caracteristici dinamice și de continuitate prin acțiunea mecanică exercitată de OT și/sau OP, presiunea de contact și viteza relativă. În acest mod, sub acțiunea mecanică, are loc ruperea punților de contact creîndu-se condițiile apariției proceselor de eroziune electrică prin declanșarea descărcărilor electrice în arc nestaționar.

2.- Descărcările electrice în arc nestaționar, dezvoltate la nivelul punților de contact rupte, c, determină apariția fenomenelor termice, caracterizate de creșterea accentuată a temperaturii și deci topirea, chiar vaporizarea microvolumelor de material Δ_{OT} , Δ_{OP} , mai mari sau mai mici în funcție de caracteristicile curentului de alimentare și de condițiile de localizare a energiei de efect. Se asigură, astfel, prelucrarea de material și formarea unor noi punți de contact /8,11,20,50,59,61,94,95,113,120/.

În zonele învecinate microvolumelor de material topit, pot să apară descărcări electrice în impuls, d, prin străpungerea cu ușurință a peliculei de oxizi, formată și caracterizată de rigiditate dielectrică scăzută (grosime redusă) sau prin străpungerea zonelor cu impurități electroconducătoare.

Descărcările electrice amorțate, se caracterizează prin densități de curent ridicate ($10 \dots 2 \cdot 10^2 \text{ A/mm}^2$), cu durata cuprinsă între 10^{-3} și 10^{-5} s, dezvoltînd efecte termice a căror temperaturi sînt de ordinul $10^4 \dots 10^5$ K. Aceste temperaturi, provoacă topirea și vaporizarea microvolumelor de metal concomitent cu dezvoltarea unor procese chimice de disociere a elementelor din mediul de răcire.

Prin îndepărtarea volumelor de material sub formă de produse erozive, e, configurația suprafeței de contact se modifică, formîndu-se noi vîrfuri de contact. Mișcarea de avans, prin presiunea de contact, creează premisele formării de noi punți de contact generatoare prin mișcarea relativă dintre OT și OP de noi procese elementare erozive.

2.2. Surse active de proces

Prelucrarea dimensională prin eroziune electrică cu rupere de contact privită sub aspectul proceselor elementare, se caracteri-

zează prin efecte termice, mecanice și procese fizico-chimice determinate de acțiunea surselor de proces. Lucrări de specialitate au analizat teoretic și experimental, cantitativ și calitativ, legătura existentă între energia de efect introdusă în spațiul de lucru, și funcțiile obiectiv ale procesului EERC. Se confirmă prezența celor două procese elementare, a căror pondere și desfășurare este dependentă de formarea și dezvoltarea (evoluția în timp) a surselor active în spațiul de lucru /56/.

2.2.1. Contactul electric - sursă activă de proces

Contactul electric ca sursă termică de proces, începe în momentul realizării contactului fizic dintre microneregularitățile Δ_{CT} și Δ_{OP} . Cinematic, aceste contacte, sînt determinate de viteza relativă dintre cele două obiecte și de forța de apăsare (presiunea specifică), aplicată pe suprafața de contact.

Momentul inițial de contact, se caracterizează prin microdescărcări de contact, realizate de trecerea prin contacte a curentului la valori determinate de secțiunea de contact. Această secțiune este echivalentă unei rezistențe de contact, R , definită simplu pentru contactul punctiform prin /48/ :

$$R = \rho / 2r_0 \quad , \quad (2.2)$$

în care : ρ este rezistivitatea materialelor din care sînt constituite cele două semipunți;
 r_0 -raza cercului real de contact.

Forța de apăsare, determină la suprafața de contact o stare de solicitare la compresiune deformînd elastic și plastic monocontactul. Această forță, pentru microcontact, C_n , poate fi exprimată matematic prin relația /48/ :

$$F_n = \xi H \pi r_0^2 \quad , \quad (2.3)$$

în care : H - duritatea materialului semipunților ;
 ξ - coeficientul Prandl ($\xi = 0,2 \dots 1$) - ține cont de faptul că duritatea vîrfurilor de contact este mai mică decît duritatea măsurată microscopic.

Cu relațiile (2.2) și (2.3) se poate exprima rezistența de contact a unei microneregularități :

$$R = \rho \sqrt{\pi \xi H / F_n} / 2 \quad , \quad (2.4)$$

dependentă de rezistivitatea materialelor aflate în contact, duritatea și forța de apăsare aplicată.

Luînd în considerare aria reală de contact, A_r (care reprezintă totalitatea neregularităților micropunților conjugate), ca fiind dependentă direct de forța aplicată, F , prin relația (2.5), asimilată pentru deformații plastice la nivelul suprafețelor elementare de contact /88/ :

$$A_r = F / \varphi H \quad , \quad (2.5)$$

se poate exprima forța de apăsare aplicată :

$$F = \varphi H A_r = \varphi H n \pi r_0^2 \quad , \quad (2.6)$$

și, în final, se poate exprima rezistența de contact pentru un anumit moment al desfășurării procesului :

$$R = \rho / 2r_0 n = \rho \sqrt{\pi \varphi H / n F} / 2 \quad (2.7)$$

Cantitatea de căldură dezvoltată, se poate exprima prin parametrii electrice globali și prin condițiile de interstițiu /74/, conform relației :

$$Q = U_c I t_c = U_c^2 t_c / R \quad , \quad (2.8)$$

în care , U_c este căderea de tensiune pe contact ;

I - intensitatea curentului ;

t_c - durata menținerii contactului.

Luînd în considerare relația (2.7), se poate exprima cantitatea de căldură dezvoltată și dependența acesteia de parametrii procesului (2.9) :

$$Q = 2U_c^2 t_c / \rho \sqrt{\pi \varphi H / n F} \quad . \quad (2.9)$$

Numărul punctelor de contact este exprimabil prin relația (2.10) ;

$$n = (0,5 \dots 2,5) 10^{-5} H^{0,625} F^{0,2} \quad , \quad (2.10)$$

iar cantitatea de căldură dezvoltată în contact va fi exprimată prin relația (2.11) ;

$$Q = K U_c^2 F^{0,6} t_c / \rho H^{0,166} \quad , \quad (2.11)$$

în care , K este o constantă raportată la numărul punctelor de contact :

$$K = 2 \sqrt{(0,5 \dots 2,5) 10^{-5} / \pi \varphi} \quad . \quad (2.12)$$

Relația (2.11) , reflectă dependența cantității de căldură dezvoltată în semipunțile conjugate, pe durata de contact, de forța de apăsare, căderea de tensiune și caracteristicile electrice și mecanice ale materialului micropunților în contact.

Prin prezentarea proceselor elementare și a relației (2.11), se confirmă existența sursei termice prin contact electric, generatoare a temperaturilor de încălzire și topire localizate în vîrfurile microneregularităților de contact. Existența acestei surse termice, asigură apariția descărcărilor în arc electric de scurtă durată, prin ruperea microcontactului și dezvoltarea instantanee a arcului electric nestaționar.

Cantitatea de căldură introdusă de sursa termică în proces depinde de :

- duritatea materialului prelucrat și coeficientul ξ a lui Prandl, în raport invers proporțional ;
- forța de apăsare aplicată suprafeței de contact, în raport direct proporțional ;
- rezistivitatea materialului micropunțiilor de contact, în raport invers proporțional ;
- căderea de tensiune pe contact, în raport direct proporțional.

2.2.2. Arcul electric nestaționar - sursă activă de proces

Arcul electric nestaționar ca sursă termică de proces, reprezintă etapa a doua de desfășurare a proceselor elementare. Această etapă, se formează și se dezvoltă la ruperea contactului electric, cînd electronii liberi din zona periferică a metalului, au acumulat energia suplimentară datorată efectului termic de încălzire (efect Joule-Lenz), suficientă pentru a depăși necesarul energetic, W_0 , de părăsire a metalului /5,6/.

În continuare au loc procese clasice de formare a canalului conducător în cîmp electric între cele două microneregularități cu apariția microarcului, ionizare puternică (în prezența vaporilor de metal) și în final apariția plasmei termice în coloana de descărcare dependentă de condițiile locale și de lungimea arcului, l_a , /62,65,98/.

Variația lungimii canalului de descărcare determină modificarea parametrilor descărcării imprimînd fenomenului caracterul de impuls, delimitat în timp și spațiu de ruperea contactului (limita zonei de scurt-circuit) și de stingerea arcului (limita zonei de arc nestaționar).

Amorsarea descărcării electrice în impuls prin ruperea contactului, este dependentă de condițiile locale în care se realizează emisia termo-electronică (energia cîmpului electric, energia termică prin contact) și de proprietățile termofizice ale mediului

în care are loc procesul de ionizare.

Considerând schema circuitului electric de alimentare a microcontactului prin circuitul echivalent cu parametri concentrați R și L , se poate determina relația care exprimă tensiunea arcului electric /48/ :

$$U_a = U_n / (1 - e^{-t/aT}) \quad (2.13)$$

în care , U_n este tensiunea nominală de alimentare a circuitului echivalent ;

- R - rezistența proprie a circuitului;
- L - inductivitatea proprie a circuitului ;
- T - constanta de timp a circuitului, ($T = L/R$) ;
- t_a - durata arcului electric.

Tensiunea arcului electric, între microneregularitățile deschise, este întotdeauna mai mare decât tensiunea nominală a sursei, dacă $L = 0$, la un timp determinat de existența arcului electric. Valoarea tensiunii este suficient de mare pentru ca intensitatea câmpului electric în zona de contact, să asigure emisia autoelectronică, deci amorsarea descărcării în impuls.

Descărcarea electrică în impuls, se materializează inițial, prin apariția coloanei microcontactului (canal conducător) și ulterior datorită efectelor termice, prin apariția plasmei.

Plasma, se caracterizează prin temperaturi ridicate, conductibilitate electrică, temperatură constantă, în lungul axei coloanei și repartiție uniformă a sarcinilor electrice /5/. Această uniformitate existentă în lungul coloanei microcontactului și permite considerarea câmpului electric constant pe direcția axială:

$$E_c = ct \quad (2.14)$$

Luând în considerare lungimea de desfășurare a arcului, l_a , exprimată prin relația (2.15) și tensiunea pe arc ca fiind dată de căderile de tensiune parțiale ;

$$l_a = l_k + l_c + l_{an} = l_c \quad ; \quad (2.15)$$

$$U_a = U_k + U_c + U_{an} \quad , \quad (2.16)$$

în care ; l_k , l_c , l_{an} sînt lungimile corespunzătoare arcului electric (k - catod, c -coloană, an -anod) ;

- U_k , U_c , U_{an} , căderile de tensiune parțiale corespunzătoare arcului electric (k -catodică, c -coloană, an -anodică) , se poate determina dependența căderii de tensiune, U_c , de diferența de potențial, E_c , și lungimea coloanei arcului dacă curentul se menține constant :

$$U_c = f(E_c, l_c) \quad (2.17)$$

Energia dezvoltată la descărcarea în arc, se poate determina în funcție de tensiunea și intensitatea curentului /48/ :

$$W_a = \int_0^{t_a} U_a i dt \quad , \quad (2.18)$$

$$U_n = R i + L di/dt + U_a \quad . \quad (2.19)$$

Dacă în relația (2.18) se introduce relația (2.19), ce definește circuitul electric echivalent, rezultă ;

$$W_a = \int_0^{t_a} U_n i dt - \int_0^{t_a} R i^2 dt + L i_0^2 / 2 \quad . \quad (2.20)$$

Relația, exprimă dependența energetică a arcului de tensiunea nominală, intensitatea curentului și de energia magnetică acumulată de inductivitatea rețelei. La inductivități mari, se pot asigura descărcări cu arc electric de mare putere.

În timpul procesului de prelucrare prin procedeul EERC, încălzirea și evacuarea metalului la nivelul microneregularităților reprezintă rezultatul acumulării proceselor elementare, dependente direct de condițiile locale și de modul de repartiție a energiei între OT și OP. Parametrii impulsurilor (forma, amplitudinea, durata, energia), determină modificările intensității procesului eroziv.

2.2.3. Mediul de lucru - sursă activă de proces

Mediul de lucru, reprezintă alături de cele două surse termice prezentate anterior baza unor procese fizico-chimice, cu efect direct asupra stabilității procesului, mărind productivitatea, scăzând uzura, realizând în anumite situații o curățire a suprafeței prelucrate, menținând în intervalul de desfășurare a procesului parametrii electro-fizici ai impulsurilor, scăzând poluarea mediului și micșorând în final cantitatea de energie din descărcarea care se consumă în reacții chimice /11,54,59,61,94,95,100,116,120/.

Literatura de specialitate, prezintă diferite medii de lucru încercate și ulterior, utilizate în cadrul prelucrării prin procedeul EERC, evidențiind aspecte legate de comportarea acestora în timpul prelucrării /61/, rolul proceselor chimice /11/ și posibilitățile de utilizare a diferitelor medii de lucru în cazul regimurilor moi și dure de prelucrare /59/. S-au atins și aspecte le-

gate de modul de dispunere a fluxurilor generatoare de mediu /95/, prin soluții originale la nivelul sistemelor de alimentare, sau, de rolul pe care îl au în procesul de evacuare a produselor erozive și de răcire a OT și OP /94,100,140/. Nu s-au evidențiat aspectele fenomenologice ale efectelor determinate de mediu asupra procesului prelucrării.

Până în prezent, ca medii de prelucrare, au fost utilizate mediile aerate și mediile lichide:

- aer comprimat la presiunea de 5 at ;
- soluții apoase de caolină ;
- soluții apoase de NaNO_3 ;
- soluții apoase de emulsol la diferite concentrații ;
- apă tehnologică cu amestecuri anticorozive (sodă calcinată);
- apă tehnologică .

În prezent, practica industrială a validat cu precădere pe considerente tehnico-economice ca medii de lucru aerul comprimat și apa tehnologică. Ambele medii satisfac condițiile de prelucrare, cel de-al doilea fiind însă mult mai stabil, în special la regimurile dure, la care, procedeul de prelucrare prin procedeul EERC, este mai mult utilizat.

Din bibliografia de specialitate și cercetările desfășurate de autor, se desprind trei direcții principale de acțiune ale mediului de lucru /3,11,25,38/ :

- activarea fenomenului eroziv ;
- localizarea energiei de efect ;
- activarea proceselor de evacuare .

Activarea fenomenului eroziv, se datorează efectului termic al descărcării în impuls asupra mediului de lucru (aer, apă tehnologică) și asupra materialelor celor două obiecte OT - OP aflate în interacțiune.

În ordine sînt posibile următoarele procese :

- disocierea gazelor H_2 , O_2 , N_2 , și a apei, printr-un proces endoterm datorat temperaturilor ridicate în zona de prelucrare ;
- interacțiuni ale O_2 , H_2 , și CO cu metalul topit, determinînd formarea de oxizi (FeO , Fe_3O_4 , Fe_2O_3), generînd fisuri, pori și provocînd fierberea metalului ;
- reacții chimice de oxidare cu posibila formare a oxizilor insolubili (Fe_3O_4 , Fe_2O_3 , MnO , SiO_2 , Al_2O_3 , CrO_2 , TiO_2) ;
- dizolvarea gazelor în masa metalului topit, datorită temperaturilor ridicate și posibil și datorită cîmpului electric existent, cu rezultat final oxidarea suprafețelor OT și OP aflate în interacțiune, favorizînd posibile descărcări în impuls prin stră-

pungere, mărind rezistența de contact și formînd unele pelicule pasive de grosime redusă pe exteriorul picăturilor de metal expulzat urmînd eliminarea acestora prin imposibilitatea aderării (lipirii) la suprafața OP sau OT.

Localizarea energiei de efect, se asigură prin dirijarea fluxului generator de mediu pe suprafața OT și OP, de așa manieră și debit, încît, să determine menținerea conductibilității termice la nivelul microvolumelor aflate în interacțiune, pentru capacități calorice diferite ale metalului prelucrat. Soluțiile adoptate, prevăd răcirea abundantă pe o suprafață cît mai mare a OT și OP, prin utilizarea sistemelor deschise de evacuare a mediilor de lucru, încălzirea sau recircularea cu posibilități de răcire în cazul sistemelor închise / 29,34,38,40, 41,42,44,67,70,73,76/.

Activarea proceselor de evacuare se realizează prin :

- energia suplimentară introdusă de mediu și dirijată în sensul de evacuare adoptat cinematic, antrenînd particulele expulzate de material ;

- evacuarea rezultatelor descompunerii electrotermice a apei (gaze, vapori) și ale metalului topit, creînd condițiile inițiale de desfășurare a procesului.

Mediul de lucru prezentat, nu permite în totalitate evacuarea produselor erozive, deoarece o dată cu oxidarea și dirijarea externă a particulelor rezultate, prin topire, are loc și răcirea pînă la solidificare a unui volum de material erodat, formîndu-se bavuri cu înălțime variabilă pe suprafața OP. Cercetări efectuate în ultimii ani, au evidențiat efectul binefăcător al cîmpului magnetic la evacuarea produselor erozive, prin exploatarea forțelor electromagnetice care iau naștere în proces /100, 102, 104, 110/.

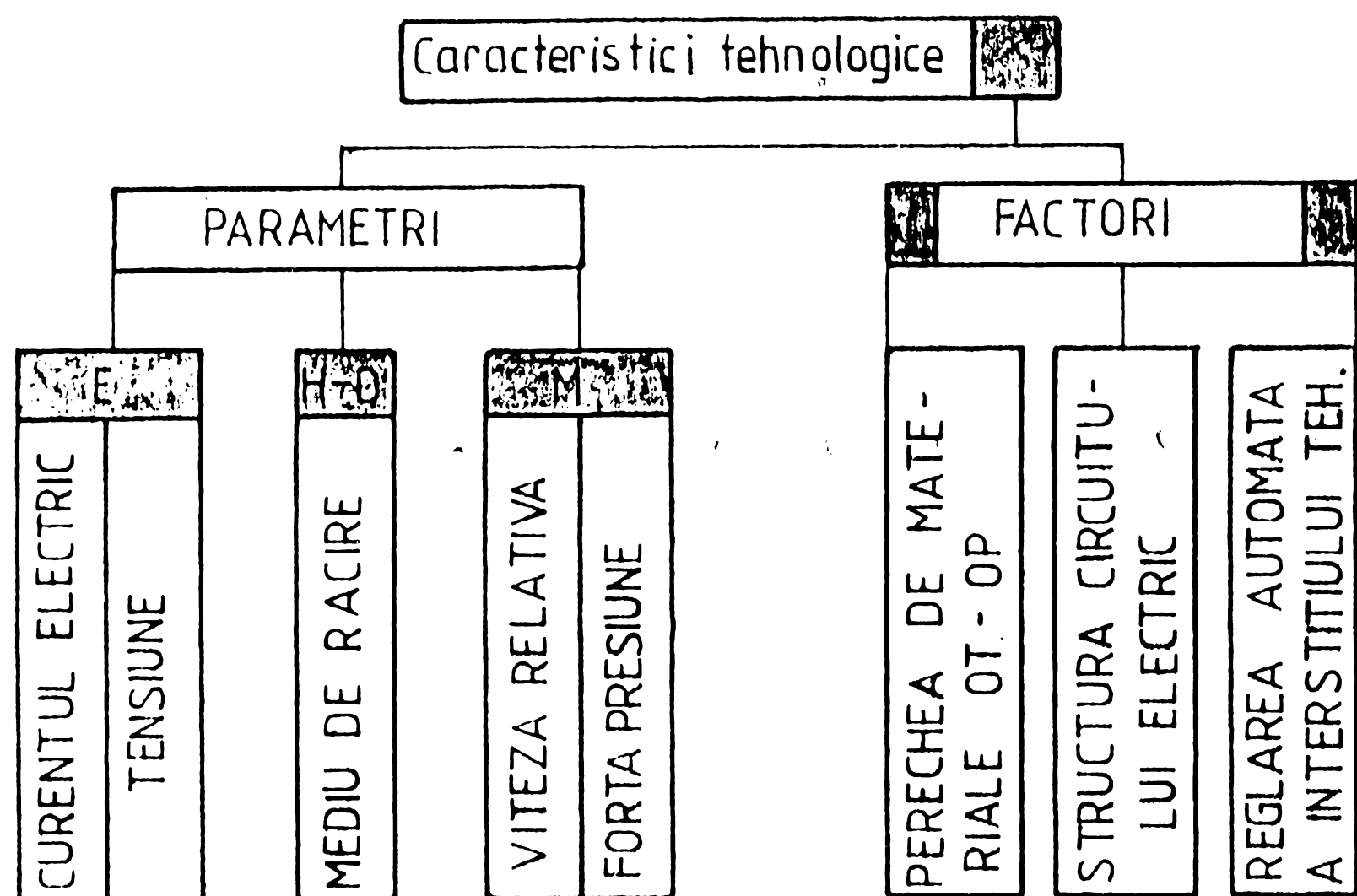
2.3. Parametrii și factorii care determină caracteristicile tehnologice la prelucrarea dimensională prin eroziune electrică cu rupere de contact

Studiul teoretic al proceselor elementare și a surselor active de proces la prelucrarea dimensională prin eroziune electrică cu rupere de contact, relevă existența unui proces complex dirijat și influențat de parametrii electrici și mecanici și de diferiți factori care acționează simultan și interdependent.

Mărimea și modul de variație al parametrilor și factorilor în desfășurarea proceselor elementare, determină efectul eroziv global, la nivelul ponderii proceselor elementare, a stabilității pro-

cesului și în final, la stabilirea caracteristicilor tehnologice (productivitate, consum specific, calitatea suprafețelor prelucrate, etc.).

Parametrii și factorii procesului de prelucrare prin procedeul EERC, pot fi grupați după natura lor și după modul în care influențează procesul prelucrării conform reprezentării din figura 2.2. Curentul electric, este menționat în toate lucrările de specialitate ca fiind



parametrul de bază al procesului. Raportînd acest parametru la suprafața de contact, rezultă mărimea specifică $j = I/S$, densitatea de curent, ca și parametru principal al procesului /54,94,95,113,116,

Fig. 2.2. Parametrii și factorii procesului. 117,118/.

Densități mici de curent, determină însă dezvoltarea unei cantități reduse de energie termică și deci, îndepărtarea unor microvolumuri reduse de pe suprafața OP. Este adevărat că în această situație și zona influențată termic este relativ scăzută, în dauna unei productivități reduse și uneori a unui consum specific mărit de energie electrică /19,43,44,78,79,80/.

Densități mari de curent (peste $20A/mm^2$), determină efecte termice pronunțate atât în timpul contactului cât și ulterior la descărcarea în arc nestaționară. În această situație, productivitatea crește foarte mult, consumul specific tinde spre valori optime, calitatea suprafeței și zona influențată termic, ZIT, a materialului prelucrat suportînd efecte negative /37,38,44,94,116,117/.

Tensiunea pe spațiu de lucru, este prezentată în toate lucrările de specialitate și reprezintă parametrul a cărui mărime determină stabilitatea procesului de prelucrare. Sînt prezentate trei domenii distincte de prelucrare în funcție de intervalul de variație a tensiunii ;

- mică 8.....12 /V/ ;
- mijlocie 12.....22 /V/;
- mare 22.....32 /V/ .

La tensiuni medii, ruperea contactelor parcurse de curenții

în scurt-circuit determină apariția arcului nestaționar cu efecte termice pronunțate. Echilibrul proceselor elementare, contact prin puncte-descărcare în arc, asigură stabilitate procesului de dezvoltare a energiei de efect (agentului eroziv) și de evacuare a produselor erozive /29,37,38,59,94,113,116,117,118,120,126,127/.

La tensiuni mici, interacțiunea dintre OT și OP se manifestă prin ruperea contactelor stabilite temporar. În această situație cantitatea de energie care se degajă este mică (2.....5% din energia de descărcare în arc), preponderența energetică datorându-se efectului de încălzire Joule-Lenz /29,37,38,120/.

Tensiunile mari în desfășurarea procesului, determină pondere ridicată descărcărilor în arc nestaționar însoțite de efecte termice pronunțate. Punctile de contact sînt formate din microvolumuri aflate la temperaturi apropiate de limitele de topire. În aceste condiții, formarea arcului, determină efecte termice materializate în topiri și vaporizări explozive de particule metalice /95,115,116,120,126,127,128/.

Natura tensiunii de alimentare și natura circuitului de alimentare (prin intermediul sursei de alimentare), pot influența unele caracteristici tehnologice cum ar fi productivitatea prelucrării și calitatea suprafeței prelucrate, deși cercetările prin filmări rapide și oscilografieri nu au evidențiat aspectul calitativ al acestora /95,113,115,116/.

Forța sau presiunea de contact, aplicată la nivelul suprafeței de contact dintre OT și OP, reprezintă parametrul mecanic de importanță majoră. În funcție de mărimea forței aplicate suprafeței în contact, se determină densitatea de curent, stabilitatea procesului, deci și caracteristicile tehnologice finale. Literatura de specialitate și cercetări desfășurate de autor, recomandă valori pentru presiune între (1...10) MPa /37,44,79,80,95,117/. Luînd în considerare caracteristica rigidă a sursei de alimentare, forța de apăsare determină în final tensiunea de proces și densitatea liniilor de curent.

Viteza relativă, sau în cele mai multe cazuri viteza periferică a OT, este cel de-al doilea parametru mecanic de importanță majoră. Acesta, determină și limitează în același timp energia de efect (puterea electrică în spațiul de lucru elementar), prin stabilirea duratei de contact și ulterior, imprimă caracterul de descărcare prin arc nestaționar /4,37,44,59,78,79,80/.

Vitezele mici, conduc la creșterea duratei de existență a microcontactelor, și deci la o creștere pronunțată a puterii electrice introduse (efect Joule-Lenz preponderent), din care însă o

mare parte, se pierde în masa celor două obiecte fără a fi utilă procesului de eroziune.

La viteze mari, durata de existență a microcontactelor scade, determinând creșterea numărului de punți de legătură în unitatea de timp, deci și creșterea productivității concomitent cu micșorarea rugozității și cu modificările termice din stratul de suprafață.

Definirea unui domeniu optim de variație a vitezei relative, este totuși impusă de stabilitatea procesului prin asigurarea echilibrului proceselor elementare.

Lichidul de lucru, este prin natura, compoziția, modul de aplicare și debit parametrul activ al procesului de prelucrare. Lichidul de lucru influențează desfășurarea procesului de prelucrare și caracteristicile tehnologice /50,54,59,67,61,78,79,80/.

Pentru regimuri ușoare ($I \leq 500$ A) de prelucrare, s-au utilizat soluții, sticlă solubilă ($1,3\text{g/cm}^3$) și jeturi de aer comprimat ($p = 5$ at), dezavantajoase însă datorită modificărilor suferite de soluții (creșterea vîscozității sticlei solubile la intensități peste 500 A) și imposibilității răcirii corespunzătoare a OT și OP și a evacuării produselor erozive (aer comprimat).

Pentru regimurile dure de prelucrare ($I > 500$ A), s-au utilizat și se utilizează soluții apoase de caolină (apă tehnologică, caolină, acid boric, borax), apă tehnologică cu adaosuri de săruri de natriu și potasiu, apă tehnologică cu amestecuri anticorozive (sodă calcinată) și apă tehnologică.

Utilizarea soluțiilor amintite, impune sisteme de recirculare a lichidului cu posibilitatea decantării, filtrării și răcirii acestuia. Se adaugă sisteme de barbotare pentru soluții apoase de caolină.

Factorii care influențează procesul și caracteristicile prelucrării, sînt componentele remarcate recent în cadrul cercetărilor efectuate și de autor /37,38/.

Majoritatea parametrilor prezentați, influențează desfășurarea proceselor elementare, pe cînd factorii, determină și influențează dezvoltarea proceselor elementare.

Structura (caracteristica) circuitului electric, constituie un factor cu pondere ridicată în procesul prelucrării determinînd posibilitățile de accentuare a caracteristicilor tehnologice.

Structura circuitului electric, a fost studiată în literatura de specialitate reliefîndu-se ponderea pe care o are asupra mecanismului de încălzire a metalului prin contact și în continuare, de topire prin arc electric nestaționar /20,53,54,59,77,94,104,116/.

Încălzirea microvolumelor de material aflate în contact, și ulterior topirea sau vaporizarea, fără a afecta termic masa OP, se poate realiza, dacă se transmite în acest strat o cantitate mare de energie într-un timp foarte scurt. Cu cât timpul de încălzire va fi mai scurt, cu atât cantitatea de căldură dezvoltată se va concentra în microvolumele de material la conductibilitate termică și capacitate calorică redusă la maxim a materialului (mediul de răcire).

Structuri inductive și caracteristici relativ rigide, asigură realizarea acestor condiții fără a fi necesare experimentarea unor surse de alimentare diferite sau introducerea parametrilor concentrați / 20,53,54,115,116/.

Perechea de materiale OT și OP, reprezintă un factor important în caracterizarea prelucrabilității materialelor, direcție de generalizare a procesului de prelucrare. Din cercetările efectuate, rezultă că prelucrarea de materiale poate dirija și optimiza caracteristicile tehnologice, în special prezentînd interes compoziția materialului OP /37,44,50,59,104,115/.

Reglarea automată a interstițiului tehnologic, determină cu pondere ridicată stabilitatea prelucrării, deci, reprezintă un mijloc eficient de dirijare și optimizare a procesului. Corelarea parametrilor electrici și mecanici în vederea urmării în timpul procesului de prelucrare a unei funcții obiectiv (productivitate maximă, consum specific de energie electrică minim sau rugozitatea suprafețelor minimă), se poate realiza prin reglajul automat al interstițiului tehnologic /35,36,39,40, 43,123/.

Chiar și în situația unei corelări parțiale a parametrilor procesului, reglajul automat al interstițiului tehnologic are repercursiuni foarte importante în modul de desfășurare a procesului și în realizarea caracteristicilor tehnologice /50,59,71,72, 75,76/.

2.4. Stabilirea modelului de cercetare a procesului

Cercetarea bibliografică prezentată în capitolul 1, evidențiază aspectul tehnologic al procedurii EERC. Sînt indicate mărimile fizice de intrare (independente) și cele de ieșire (dependente), fără a menționa, însă, legăturile existente între aceste mărimi.

În continuare, se prezintă cercetări desfășurate de autor, în vederea stabilirii legăturilor dintre mărimile fizice ale procedurii EERC, prin determinarea ecuației criteriale, utilizînd analiza dimensională /31,32/.

2.4.1. Aplicarea analizei dimensionale

Analiza dimensională, reprezintă o metodă de studiu a mărimilor care descriu fenomenele fizice, stabilind relații omogene dimensionale între variabilele măsurabile din aceste fenomene fizice [105, 111]. Cu ajutorul analizei dimensionale, au fost studiate diverse aspecte, prezentând interes deosebit la prelucrarea prin procedeul EERC, studiul privind stabilirea produselor de puteri fără dimensiuni, când, nu se dispune de ecuații care descriu fenomenul fizic, ci numai de variabile măsurabile, care, intervin în descrierea prelucrării (fenomenului fizic).

Mărimile care intervin la prelucrarea prin procedeul EERC și unitățile lor de măsură în sistemul internațional, sînt redate în tabelul 2.1 [30, 130].

Tabelul 2.1.

Nr. crt.	Mărimea	Unitatea de măsură	Simbolul	Dimensiunile unităților derivate	Obs.
1.	Intensitatea curentului	amperul	A	-	Mărimi fizice de intrare
2.	Tensiunea curentului	voltul	V	$\text{kg m}^2/\text{A s}^3$	
3.	Suprafața prelucrată	metrul pătrat	S	m^2	
4.	Forța de apăsare	newtonul	F	kg m/s^2	
5.	Viteza periferică	metrul pe secundă	v	m/s	
6.	Productivitatea prelucrării	masa, volumul, suprafața pe secundă	Q	kg/s m^3/s m^2/s	Mărimi fizice de ieșire
7.	Calitatea suprafeței prelucrate	metrul	R_a	m	
8.	Consumul specific de energie electrică	kilowattul oră pe kilogram	q	m^2/s^2	

Cunoscîndu-se mărimile fizice, fenomenul de prelucrare poate fi considerat, conform metodei Rayleigh, ca fiind proporțional cu un produs de puteri ale acestor mărimi. Impunînd condiția omogenității dimensionale a ambilor membri ai egalității obținute, rezultă un sistem de ecuații ale cărui soluții reprezintă exponenții mărimilor fizice. Dacă numărul mărimilor fizice care influențează fenomenul este mai mare decît numărul mărimilor fundamentale,

ecuația criterială, va cuprinde mărimi complexe adimensionale (invarianti) al căror număr este egal cu numărul mărimilor fundamentale.

În cazul când numărul mărimilor fizice din fenomenul cercetat este mai mare de cinci, la alcătuirea mai multor complexe adimensionale, se utilizează teorema Π ,

Funcția implicită care determină fenomenul de prelucrare prin procedeul EERC, este determinată de mărimile fizice de intrare : I - intensitatea curentului, U - tensiunea de alimentare, S - suprafața prelucrată, F - forța de apăsare, v - viteza relativă, și de mărimile fizice de ieșire, dintre care au fost alese, Q - productivitatea prelucrării, q - consumul specific de energie electrică :

$$f(q, I, U, S, v, F) = 0 \quad (2.21)$$

unde, prin cele $n = 6$ mărimi fizice, se înțeleg atât valorile lor numerice, cât și dimensiunile lor.

Unitățile de măsură fundamentale care intervin sînt : m, kg, s, și A, deci $k = 4$, ele respectînd cele două condiții impuse de teorema Π .

Conform teoremei Π , vor rezulta $n - k = 2$ mărimi complexe adimensionale determinabile prin teoria ecuațiilor algebrice liniare și omogene :

$$\Psi(\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_{n-k}) = 0 \quad (2.22)$$

Formula unică generală, prin care se pot exprima toți complecșii adimensionali, va avea deci următoarea formă :

$$\Pi = Q^{x_1} I^{x_2} U^{x_3} S^{x_4} v^{x_5} F^{x_6} \quad (2.23)$$

a cărei ecuație dimensională în S.I., poate fi exprimată în trei forme, în funcție de dimensiunile unităților derivate :

$$\Pi = (\text{kg/s})^{x_1} \text{A}^{x_2} (\text{kgm}^2/\text{A s}^3)^{x_3} (\text{m}^2)^{x_4} (\text{m/s})^{x_5} (\text{kg m/s}^2)^{x_6}; \quad (2.24)$$

$$\Pi = (\text{m}^3/\text{s})^{x_1} \text{A}^{x_2} (\text{kgm}^2/\text{A s}^3)^{x_3} (\text{m}^2)^{x_4} (\text{m/s})^{x_5} (\text{kg m/s}^2)^{x_6}; \quad (2.25)$$

$$\Pi = (\text{m}^2/\text{s})^{x_1} \text{A}^{x_2} (\text{kgm}^2/\text{A s}^3)^{x_3} (\text{m}^2)^{x_4} (\text{m/s})^{x_5} (\text{kg m/s}^2)^{x_6}. \quad (2.26)$$

Se mai adaugă a patra formă de exprimare, luînd în considerare eficiența economică, prin q - consumul specific de energie electrică :

$$f(q, I, U, S, v, F) = 0 \quad (2.27)$$

Complecșii adimensionali, vor avea forma dată de relația (2.28), cu dimensiuni ale unităților derivate rezultate din transformarea unității de măsură /kWh/kg/ :

$$\tilde{\Pi} = (m^2/s^2)^{x_1} A^{x_2} (kgm^2/A s^3)^{x_3} (m^2)^{x_4} (m/s)^{x_5} (kg m/s^2)^{x_6}. \quad (2.26)$$

Ecuatiile (2.24), (2.25), (2.26) și (2.28) se vor exprima în funcție de unitățile de măsură fundamentale adoptate.

Funcția $\tilde{\Pi}$, este adimensională, rezultă că exponenții unităților de măsură fundamentale adoptate m, kg, s, și A, se anulează, obținându-se sisteme de ecuații liniare și omogene.

Soluțiile acestor sisteme de ecuații reprezintă seriile de exponenți ai ecuațiilor (2.24), (2.25), (2.26), și (2.28), prin care, se exprimă complexii adimensionali ai procesului.

Rezolvarea sistemelor de ecuații algebrice liniare și omogene s-a efectuat utilizând programul de calcul, "P01", scris în limbaj Fortran - 77, sistem de operare RSX - 11M. Schema logică a programului se prezintă în figura 2.3.

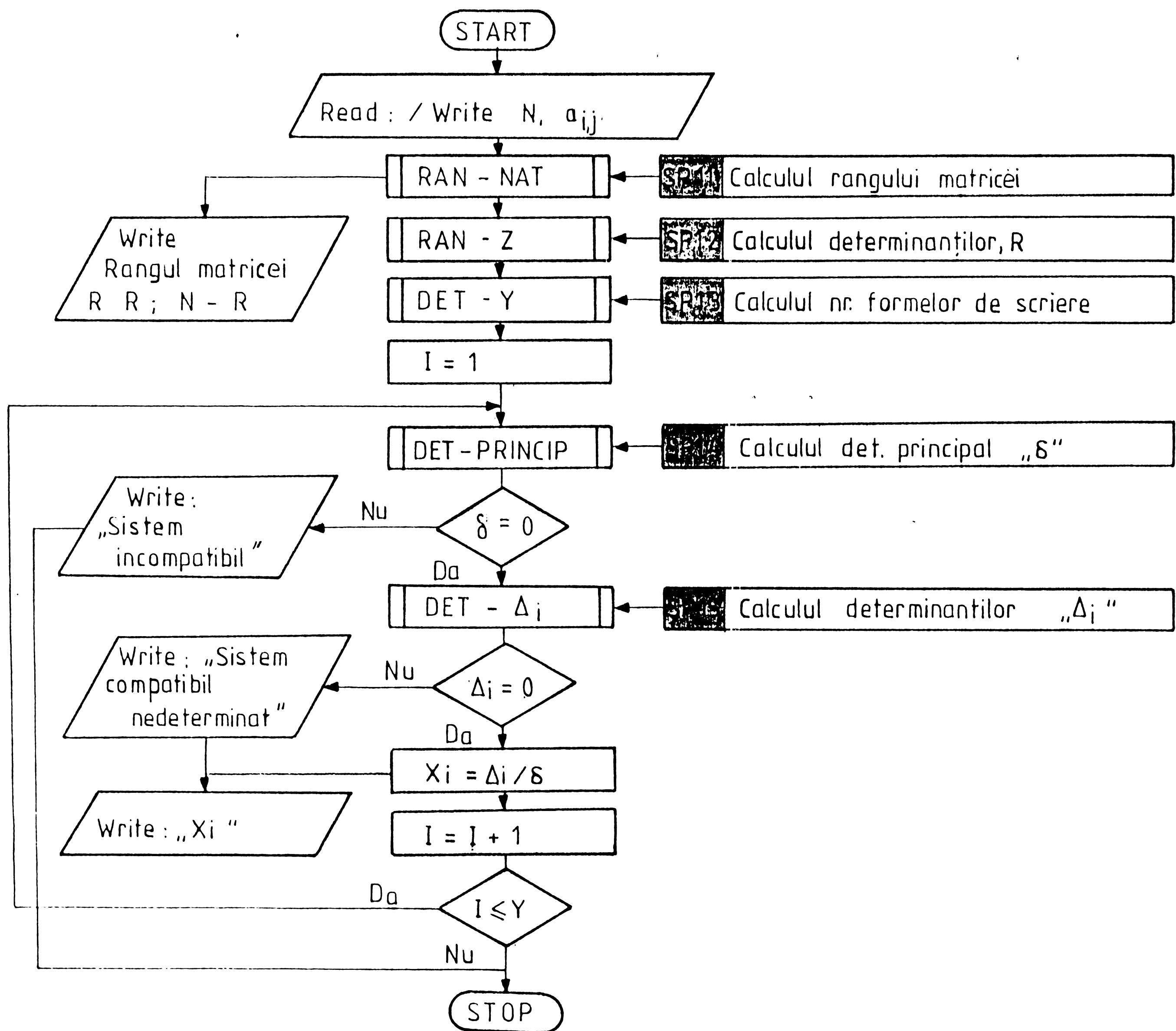


Fig.2.3. Schema logică a programului P01.

Datele inițiale necesare determinării exponenților mărimilor fundamentale și derivate sînt reprezentate de :

- numărul mărimilor fizice analizate, N ;
- coeficienții mărimilor fizice, a_{ij} , rezultați din sistemul ecuațiilor dimensionale în S.I.

Programul de calcul cuprinde cinci subprograme :

- SP 1.1, calculul rangului matricii sistemului liniar omogen, R ;
- SP 1.2, calculul determinanților de ordinul R, egali cu zero, Z ;
- SP 1.3, calculul numărului formelor de scriere a matricii dimensionale, Y ;
- SP 1.4, calculul determinatului principal pentru varianța I de combinare a mărimilor fizice ;
- SP 1.5, calculul determinațiilor, Δ_i , specifici variantei I de combinare a mărimilor fizice.

Pentru cele Y forme de scriere a matricii dimensionale, se calculează și se tipăresc valorile x_i ale exponenților mărimilor fizice.

Au rezultat, patru cazuri distincte de forme (formule) de scriere a criteriilor (invariantilor) cuprinse în tabelele 2.2, 2.3, 2.4 și 2.5.

Tabelul 2.2

Cazul I		Productivitatea prelucrării		Q / kg/s /
Nr. crt.	Combinatia	Forma de scriere a criteriilor (invariantilor)		
		Π_1	Π_2	
1.	Q, I, U, S	$\sqrt{Qv^2/UI}$	F/\sqrt{QIU}	
2.	Q, I, U, F	SF^2/QIU	v	
3.	I, U, S, v	Qv^2/UI	vF/UI	
4.	I, U, S, F	QUI/F^2	vF/UI	
5.	U, S, v, F	vF/Q	vF/IU	
6.	Q, I, S, v	IU/Qv	F/Qv	
7.	Q, I, S, F	UI/F^2	Qv/F	
8.	Q, U, S, v	Qv^2/IU	F/Qv	
9.	Q, U, S, F	F^2/QUI	Qv/F	
10.	I, S, v, F	Qv/F	IU/vF	

Tabelul 2.3

Cazul 2		Productivitatea prelucrării		Q / m ³ /s /
Nr. crt.	Combinatia	Forma de scriere a criteriilor (invariantilor)		
		$\tilde{\Pi}_1$	$\tilde{\Pi}_2$	
1.	Q, I, U, S	Sv/Q	QF/IUS	
2.	Q, I, U, v	Sv/Q	vF/UI	
3.	Q, I, U, F	SIU/QF	Fv/IU	
4.	I, U, S, v	Q/Sv	vF/UI	
5.	I, U, S, F	QF/IUS	vF/UI	
6.	U, S, v, F	Q/Sv	UI/Fv	
7.	Q, I, S, F	IUS/QF	vS/Q	
8.	Q, U, S, F	IUS/QF	vS/Q	
9.	Q, U, v, F	UI/Fv	Sv/Q	
10.	Q, I, v, F	UI/Fv	Sv/Q	
11.	I, S, v, F	Q/Sv	UI/F	

Tabelul 2.4

Cazul 3		Productivitatea prelucrării		Q / m ² /s /
Nr. crt.	Combinatia	Forma de scriere a criteriilor (invariantilor)		
		$\tilde{\Pi}_1$	$\tilde{\Pi}_2$	
1.	Q, I, U, S	$v\sqrt{S/Q}$	$QF/UI\sqrt{S}$	
2.	Q, I, U, v	v^2S/\sqrt{Q}	vF/UI	
3.	Q, I, U, F	U^2I^2S/Q^2v^2	Fv/UI	
4.	I, U, S, v	$Q/v\sqrt{S}$	Fv/UI	
5.	I, U, S, F	$QF/UI\sqrt{S}$	Fv/UI	
6.	U, S, v, F	$Q/v\sqrt{S}$	UI/vF	
7.	Q, I, S, F	$UI\sqrt{S}/QF$	\sqrt{Sv}/Q	
8.	Q, U, S, F	\sqrt{SUI}/QF	\sqrt{Sv}/Q	
9.	Q, U, v, F	UI/vF	$S\sqrt{v/Q^2}$	
10.	Q, I, v, F	UI/Fv	Sv^2/Q^2	
11.	I, S, v, F	$Q/v\sqrt{S}$	UI/Fv	

Tabelul 2.5

Cazul 4		Consum nominal de energie electrică $q/m^2/s^2/$	
Nr. crt.	Combinatia	Forme de scriere a criteriilor (invariantilor)	
1.	q, I, U, S	v/\sqrt{q}	$F\sqrt{q}/UI$
2.	I, U, S, v	q/v^2	vF/UI
3.	I, U, S, F	qF^2/U^2I^2	Fv/UI
4.	U, S, v, F	q/v^2	UI/Fv
5.	q, I, S, F	$UI/F\sqrt{q}$	v/\sqrt{q}
6.	q, U, S, F	$UI/F\sqrt{q}$	v/\sqrt{q}
7.	I, S, v, F	q/v^2	UI/vF

2.4.2. Analiza indicilor de performanță specifici procesului

Mulțimea factorilor și parametrilor care influențează evoluția procedurii EERC sub aspect tehnologic, determină dificultăți mari la elaborarea unui sistem unitar de aproximare a indicatorilor de performanță.

În aceste condiții, se recomandă corelarea judicioasă a regimului de lucru cu particularitățile suprafeței de prelucrat /87/, manifestându-se tendința utilizării indicilor de performanță exprimați prin productivitatea prelucrării, $Q/m^3/s/$ și prin consumul specific de energie electrică, $q/kWh/kg/$.

Urmărind rezultatele aplicării analizei dimensionale la fenomenul fizic de prelucrare, pentru cei doi indicatori de performanță cantitativi, productivitatea prelucrării, Q , și consumul specific de energie electrică, q , se constată existența în ambele cazuri a trei complecși adimensionali distincți, a căror combina-re determină fiecare combinație în parte.

Productivitatea prelucrării, $Q/m^3/s/$, cuprinde 11 combinații formate din complecși adimensionali : Q/Sv , (Sv/Q) ; QF/IUS , (IUS/QF) ; vF/UI , (UI/vF) .

Rezultă în felul acesta trei combinații posibile a câte doi complecși adimensionali :

$$\psi (Q/Sv, vF/UI) = 0 ; \quad (2.29)$$

$$\psi (Q/Sv, QF/UIS) = 0 ; \quad (2.30)$$

$$\psi (QF/UIS, vF/UI) = 0 . \quad (2.31)$$

Se observă că, dintre cele trei ecuații obținute, prezintă interes deosebit relațiile (2.29) și (2.31), în care, productivitatea prelucrării, Q , se situează separat de viteza v și de raportul

F/I în câte un criteriu. Curbele de productivitate pentru un anumit tip de material prelucrat, sînt date de relațiile (2.33) și (2.35):

$$Q/Sv = f(vF/UI) \quad , \quad (2.32)$$

în care, la $S = ct$, $U = ct$, $v = ct$, rezultă :

$$Q = f(F/I) \quad , \quad (2.33)$$

respectiv :

$$QF/UIS = f(vF/UI) \quad , \quad (2.34)$$

în care, la $S = ct$, $U = ct$, rezultă :

$$Q = f(v) \quad , \quad (2.35)$$

Consumul specific de energie electrică, $q/kWh/kg$, cuprinde la rîndul său, 7 combinații formate din complecși adimensionali: q/v^2 , (v^2/q) ; qF/UI , (UI/qF) ; vF/UI , (UI/vF) . Cele trei combinații posibile formate din câte doi complecși adimensionali, sînt redată de relațiile (2.36), (2.37) și (2.38) :

$$\Psi (q/v^2, vF/UI) = 0 \quad ; \quad (2.36)$$

$$\Psi (q/v^2, \sqrt{q}F/UI) = 0 \quad ; \quad (2.37)$$

$$\Psi (\sqrt{q}F/UI, vF/UI) = 0 \quad . \quad (2.38)$$

Pentru această determinare prezintă interes relațiile (2.36) și (2.38), în care, consumul specific de energie, se regăsește în mod separat, de aceeași parametri, viteza v , și raportul F/I , în câte un criteriu. Consumul specific de energie electrică, poate fi reprezentat grafic în aceleași condiții ca și productivitatea, prin relațiile (2.40) și (2.42) :

$$q/v^2 = f(vF/UI) \quad , \quad (2.39)$$

în care , la $U = ct$, $v = ct$, rezultă :

$$q = f(F/I) \quad , \quad (2.40)$$

respectiv;

$$qF/UI = f(vF/UI) \quad , \quad (2.41)$$

în care, la $U = ct$, $F/I = ct$, rezultă :

$$q = f(v) \quad : \quad (2.42)$$

Curbele se determină pe cale experimentală, prin încercări pe modele, într-un sistem de coordonate adimensionale pentru orice valori ale parametrilor procesului.

2.4.3. Modelarea fizică prin similitudine

Modelarea, reprezintă metoda de studiere a fenomenelor fizice, în cadrul căreia, se efectuează experimente asupra unui "model experimental", iar rezultatele, se transformă asupra "modelului fizic". Pe baza rezultatelor obținute, pe model, se poate prevedea comportarea, evoluția, modelului fizic. Pe baza rezultatelor obținute pe modelul experimental, se prevede comportarea modelului fizic în condițiile de lucru industriale. Transferarea rezultatelor obținute pe modelul experimental, asupra modelului fizic, nu trebuie să exprime în mod obligatoriu o egalitate directă între parametrii modelului experimental și ai modelului fizic, ci este suficient, să se obțină modul de calcul al parametrilor modelului fizic /2,16,111/.

În procesul modelării trebuie respectate două principii :

- experimentul pe model trebuie să fie simplu, mai rapid, mai economic decât experimentul pe modelul fizic ;
- se impune cunoașterea modalității de calcul a parametrilor modelului fizic pe baza experimentului făcut pe modelul experimental.

Pentru ca fenomenul reprodus pe modelul experimental să fie absolut identic cu fenomenul de pe modelul fizic, se impune existența similitudinii geometrice și a tuturor mărimilor fizice care intră în structura fenomenului studiat /111/.

Menținerea aceluiași valori maxime pe modelul experimental și pe modelul fizic, constituie proprietatea fundamentală a criteriilor de similitudine, definite pentru procesul de prelucrare prin procedeul EERC, prin ecuațiile criteriale pentru cei doi indicatori de performanță, productivitatea prelucrării și consumul specific de energie electrică, /31,32/.

Pentru ca fenomenul fizic al prelucrării să fie asemenea pe modelul experimental și modelul fizic, se impun condiții de unicitate asemenea, iar invarianții deduși din aceste condiții trebuie să aibă aceleași valori pe cele două modele. Condițiile de unicitate ale procedurii sînt :

- energia de efect, generatoare și întreținătoare a agentului eroziv (tensiunea de amorsare a arcului nestaționar prin ruperea unui contact electric, densitatea de curent) ;
- mișcarea relativă mecanică (viteza relativă de formare finală a agentului eroziv și evacuarea produselor erozive) ;
- mediul de lucru (mediu oxidant, localizarea energiei de efect) ;

- comanda poziției OT - OP (forța de apăsare și intensitatea de curent).

Aceste condiții de unicitate separă procesul de prelucrare prin procedeul EERC din totalitatea proceselor posibile de definit prin ecuațiile criteriale stabilite /33/.

Dintre cele trei ecuații criteriale determinate, în cazul productivității prelucrării, Q, prezintă interes relațiile (2.29) și (2.31).

Rezultă legea modelului, exprimată prin relații între scări corespunzătoare celor două ecuații criteriale adoptate:

$$\begin{cases} K_Q = K_S K_V & ; \\ K_V K_F = K_U K_I & ; \\ K_Q = K_U K_I K_S / K_F & ; \\ K_V K_F = K_U K_I & . \end{cases} \quad (2.43)$$

Numărul scărilor arbitrare fiind patru, se impune alegerea valorilor pentru acestea, funcție de specificul fenomenului fizic. Se alege, $K_V = 1$, pentru a asigura formarea finală a agentului eroziv (descărcarea în arc nestaționar), $K_U = 1$, pentru a determina tensiunea de amorsare a arcului nestaționar prin ruperea microcontactului și $K_j = 1$, unde K_j , este scara densității de curent, în vederea asigurării energiei de efect.

Sistemul de ecuații ia următoarea formă :

$$\begin{cases} K_Q = K_S & ; \\ K_F = K_S = \alpha & ; \\ \zeta = \sqrt{K_S} & , \end{cases} \quad (2.44)$$

în care, α , este scara fundamentală a intensității curentului din proces ;

ζ - scara fundamentală a timpului ;

K - scara derivată, corespunzătoare mărimii derivate ;

Primele două ecuații din sistem, reflectă legătura, egalitatea scărilor, K_F , K_S , α , K_Q , adoptate și dependența scării productivității de alegerea uneia din aceste scări. A treia relație, permite determinarea experimentală a productivității prin scara timpului, raportată la aceeași alegere.

Consumul specific de energie electrică, q, este definit de ecuațiile criteriale (2.36) și (2.38).

Legea modelului se exprimă tot prin relații între scări (2.45), corespunzătoare celor două ecuații criteriale adoptate;

$$\left\{ \begin{array}{l} K_q = K_V^2 \quad ; \\ K_V K_F = K_U K_I \quad ; \\ \sqrt{K_q} = K_U K_I / K_F \quad ; \\ K_V K_F = K_U K_I \quad . \end{array} \right. \quad (2.45)$$

Numărul scărilor arbitrare este același cu cel de la determinarea anterioară, productivitatea prelucrării.

Sistemul de ecuații, ia următoarea formă :

$$\left\{ \begin{array}{l} K_q = 1 \quad ; \\ K_F = K_S = \alpha \quad ; \\ Z = K_S \quad . \end{array} \right. \quad (2.46)$$

Ecuațiile din sistem reflectă independența consumului specific de energie electrică de scările K_F , K_S , α , egalitatea acestor scări, permite determinarea experimentală a consumului specific prin scara timpului, raportată la aceeași alegere și scara maselor (2.47), determinată prin explicitarea scării derivate a tensiunii sau a forței de apăsare :

$$\mu = K_S^{3/2} \quad (2.47)$$

în care μ , este scara fundamentală a maselor de material îndepărtat în proces.

2.4.4. Proiectarea modelului

Proiectarea modelului experimental necesar studiului procedeului, prezintă două aspecte distincte /34/ :

- proiectarea sursei de alimentare cu energie electrică ;
- proiectarea standului experimental.

Proiectarea sursei de alimentare cuprinde în principal determinarea parametrilor care definesc sursa de alimentare, element determinant în generarea și întreținerea energiei de efect din proces. Elementele de referință sînt :

$$\left\{ \begin{array}{l} K_U = U_n / U_m = 1 \quad ; \\ K_F = F_S = \alpha \quad ; \\ K_j = j_n / j_m = 1 \quad , \end{array} \right. \quad (2.48)$$

în care, prin indicele "n", se definește mărimea fizică normală (pe modelul fizic), iar prin indicele "m", mărimea fizică modelată (pe modelul experimental). Relația (2.48) asigură calculul parametrilor sursei.

Tensiunea de prelucrare a modelului experimental, U_m , trebuie

să fie egală cu tensiunea de prelucrare, U_n , pe modelul fizic, la fel și densitatea de curent j_m , pe model, egală cu densitatea normală j_n , din proces.

Alegerea scărilor forței, suprafeței (ariei de contact) și a curentului are ca punct de plecare stabilirea mărimii intensității curentului impusă sursei de alimentare. Datorită caracteristicilor procedurii EERC (intensități de curent pînă la 25 KA), /120/, a lipsei unor surse standardizate pentru proces, cît și a greutăților întâmpinate la cuplarea acestor tipuri de surse în rețeaua de alimentare a laboratoarelor de cercetare, se impune alegerea prioritara a parametrului intensitatea curentului.

Se adoptă valori pentru scara intensității curentului, de așa manieră încît să existe posibilitatea cuplării sursei de alimentare pe rețeaua de alimentare existentă;

$$K_I = I_n / I_m = \alpha \quad . \quad (2.49)$$

Mențiunea densității de curent, j_m , la valori similare densității normale, j_n , de pe modelul fizic, impune determinarea corespunzătoare a secțiunilor prelucrate, utilizînd valoarea adoptată pentru scara curentului electric și valorile recomandate ca fiind optime pentru densitatea curentului din proces.

Proiectarea standului experimental, cuprinde în fapt, determinarea parametrilor ce caracterizează modelul experimental de prelucrare. Si în acest caz elementele de referință sînt reprezentate de sistemul de ecuații :

$$\left| \begin{array}{l} K_U = 1 \\ K_V = 1 \\ K_F = K_S = \alpha \\ K_j = 1 \end{array} \right. \quad ; \quad (2.50)$$

relații din care, se deduc parametrii modelului experimental de prelucrare.

Scara intensității curentului, α , adoptată anterior, asigură determinarea mărimilor forței de prelucrare și a suprafeței de prelucrare (2.51), (2.52) :

$$\left| \begin{array}{l} K_F = F_n / F_m = \alpha \end{array} \right. \quad ; \quad (2.51)$$

$$\left| \begin{array}{l} K_S = S_n / S_m = \alpha \end{array} \right. \quad . \quad (2.52)$$

Viteza relativă, care asigură mișcarea relativă mecanică de proces, este aceeași cu viteza reală de pe modelul fizic.

Presiunea specifică, p , definită de raportul forței și a suprafeței de prelucrare, se menține pe modelul experimental și pe mo-

delul fizic aceeași.

$$p = F/S, \quad K_p = F_F/K_S = 1 \quad . \quad (2.53)$$

Parametrii caracteristici adoptați, respectă condițiile de unicitate enunțate, iar invarianții deduși, sînt aceiași pe cele două modele.

Pentru punerea în evidență a influenței pe care forma de variație în timp a mărimilor electrice o are asupra procesului, s-a prevăzut alimentarea cu energie atît în curent alternativ (la frecvența rețelei), cît și în curent continuu pulsator. Sursa de alimentare proiectată în acest scop, conține un transformator monofazat, de construcție specială și un redresor de putere (fig . 2.4), /34/.

Performanțele sursei sînt determinate în principal de construcția transformatorului. Tinînd cont de scările de similitudine adoptate, la proiectarea transformatorului, s-a urmărit realizarea parametrilor electrice, pe modelul experimental, în concordanță cu valorile considerate în prezent tipice pentru procesul real,

luînd în considerare atît tensiunea corespunzătoare limitei descărcărilor în arc intermitent - arc la ruperea contactului electric cît și variația raportului reactanță X/rezistență R /104/. S-a avut în vedere totodată, obținerea unor game suficient de largi de variație pentru parametrii electrice. Stabilitatea procesului, s-a asigurat prin caracteristica externă de tip căzător a transformatorului.

Transformatorul proiectat, este de tipul cu bobină deplasabilă. Caracterul căzător al caracteristicii externe, s-a asigurat prin adoptarea unei valori reduse a parametrului tensiune/spiră și prin geometria înfășurărilor.

Înfășurarea secundară, este prevăzută cu o priză, obținîndu-se astfel două valori pentru raportul de transformare (10,875 și 14,5).

Modificarea caracteristicii externe, se obține prin deplasarea axială a înfășurării primare față de cea secundară, cu efect asupra impedanței de scurt-circuit. Mecanismul de deplasare, modifică distanța între cele două înfășurări în domeniul 20 mm ÷ 150 mm.

Transformatorul, este alimentat de la rețea, cu 220 V/50 Hz și are următoarele caracteristici :

- tensiunea secundară la mers în gol ; 15 V și 20 V ;
- curent minim de scurt-circuit ; 200 A ;
- curent maxim la scurt-circuit ; 760 A ;

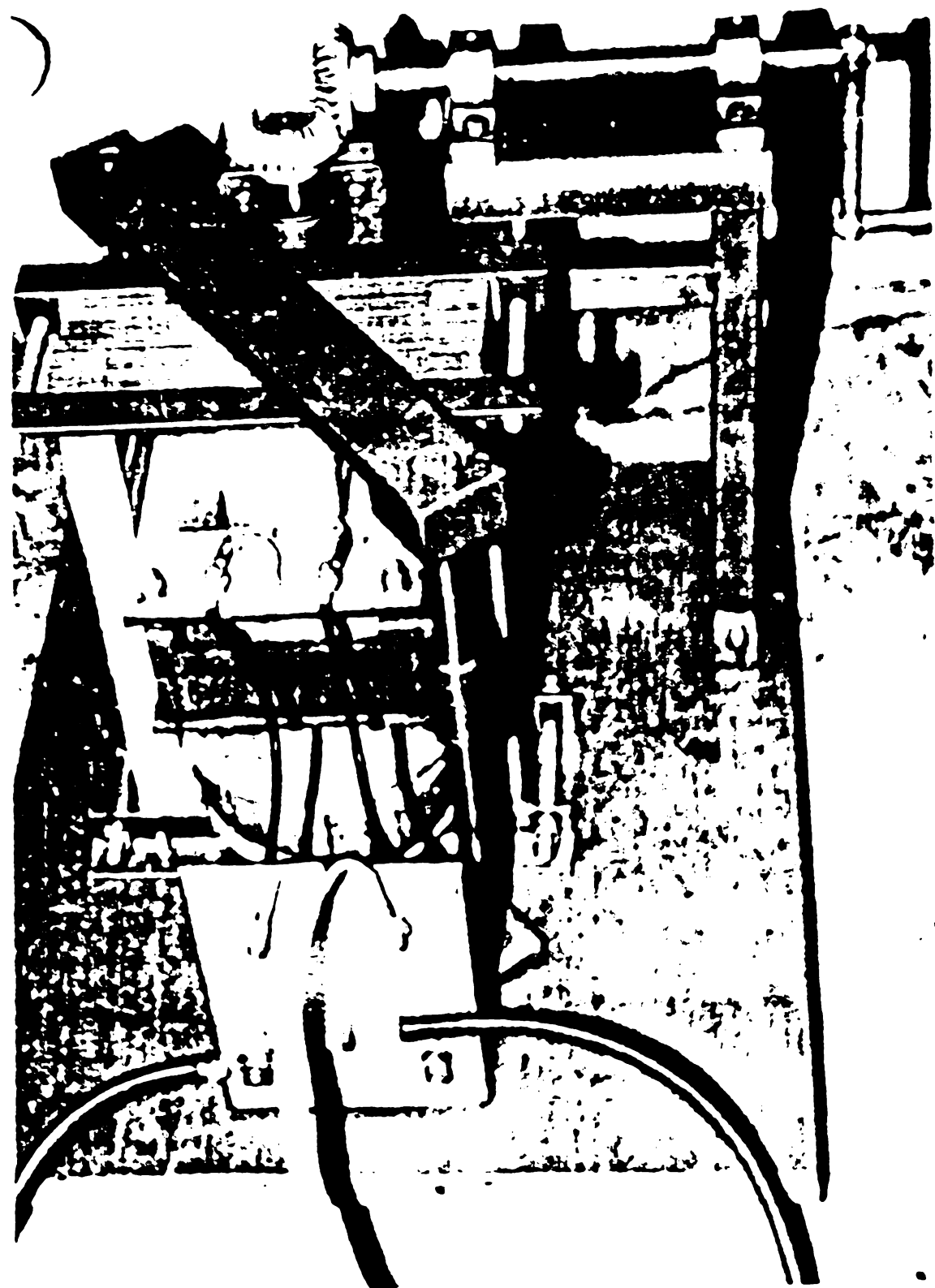


Fig. 2.4. Sursa de alimentare.

- gama de modificare a curentului de scurt-circuit; $G_{SC} = I_{SCmax}/I_{SCmin} = 3,8$.

Conductorii înfășurărilor sînt dimensionați pentru funcționare în regim intermitent cu $DA = 15\%$.

Puterea aparentă, absorbită din rețea, este de 7,5 KVA - la sarcină maximă și de 12 kVA în scurt-circuit. Caracteristicile externe ale transformatorului, au fost determinate experimental și sînt prezentate în figura 2.5. Pornind de la aceste caracteristici s-a determinat domeniul de modificare a curentului secundar în sarcină prin deplasarea înfășurării primare, la valori constante ale tensiunii secundare (8V..15V). Gama de modificare a curentului sarcină, la tensiunea constantă, are valoarea medie :

loarea medie :

$$G_S = I_{max}/I_{min} = 2,75.$$

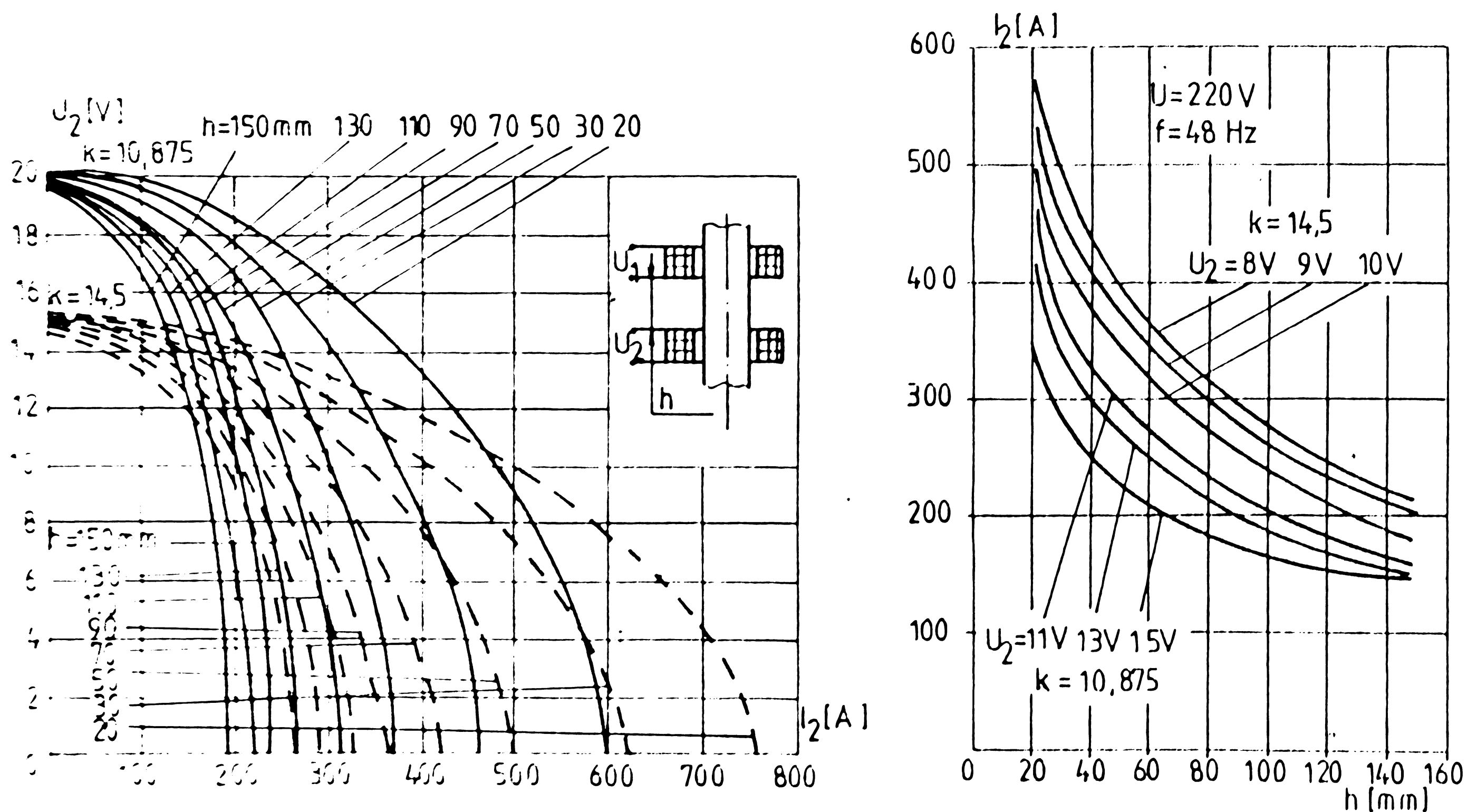


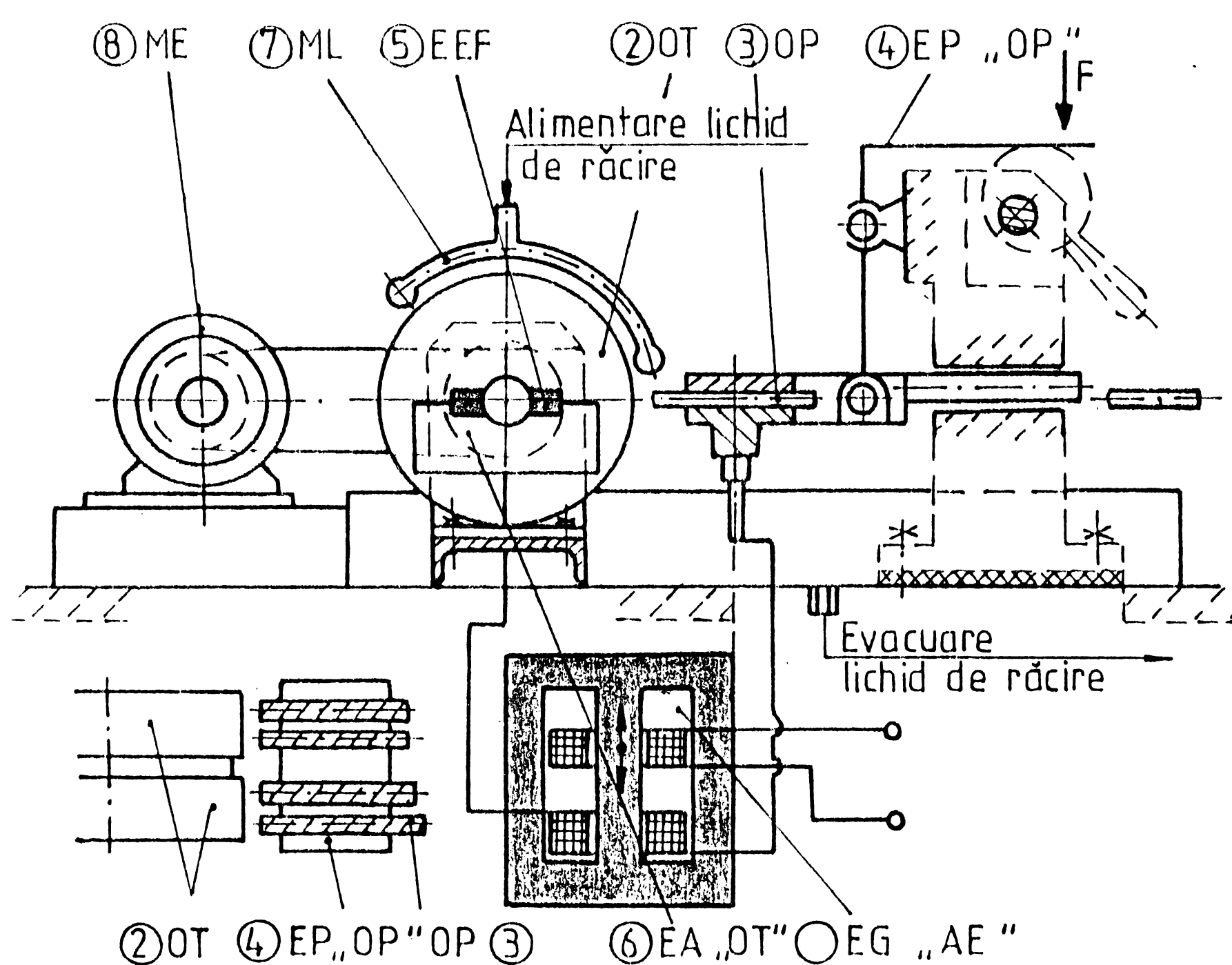
Fig. 2.5. Caracteristicile externe și domeniul de modificare a curentului secundar în sarcină.

Pentru tensiuni de sarcină cuprinse între $8V \div 15V$ curentul de sarcină poate fi modificat între $190A \div 590A$. Pentru o secțiune prelucrată $S = 19,6 \text{ mm}^2$, se obține domeniul de modificare a densității de curent :

$$I = 9,7 \text{ A/mm}^2 \dots 30 \text{ A/mm}^2 .$$

Domeniul, poate fi extins inferior prin alimentarea transformatorului cu tensiune redusă (folosind un autotransformator).

Modelul experimental, cuprinde ca principale subansamble de bază următoarele (fig.2.6) :



- 1.- sursa de alimentare sau echipamentul de generare a agentului eroziv, EG "AE";
- 2.- Obiectul de transfer, OT ;
- 3.- Obiectul de prelucrare, OP ;
- 4.- echipamentul de poziționare a obiectului de prelucrare, OP 3, EP "OP";
- 5.- echipamentul de formare finală a agentului eroziv, EFF ;
- 6.- echipamentul de antrenare a obiectului de transfer, OT 2, EA "OT" ;

Fig. 2.6. Schema modelului experimental.

7.- sistemul de asigurare a mediului de lucru, ML .

Parametrii constructivi-funcționali ai standului experimental (fig.2.7), au fost determinați utilizând ecuația criterială a fenomenului fizic și modelarea fizică prin similitudine.

Corelând legea modelului cu elementele specifice sursei de alimentare, conform relațiilor (2.54), se determină parametri de bază ai standului experimental (2.55) :

$$\begin{cases}
 K_V = 1 & , \\
 K_F = K_S = \alpha = 5 & , \\
 K_p = K_j = 1 & , \\
 U_n = 10 \dots 30 \text{ V} & , \\
 v_n = 20 \dots 50 \text{ m/s} & , \\
 j_n \geq 5 \text{ A/mm}^2 & .
 \end{cases}
 \tag{2.54}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} v_m = 20 \dots 50 \text{ m/s} , \\ S_m \geq 5 \text{ mm}^2 , \\ F_m \geq 5 \text{ N} , \\ P_m \geq 1 \text{ MPa} . \end{array} \right. \quad (2.55)$$

Standul experimental (fig.2.7) , cuprinde subansamble de bază prezentate și în cadrul modelului experimental. Viteza relativă

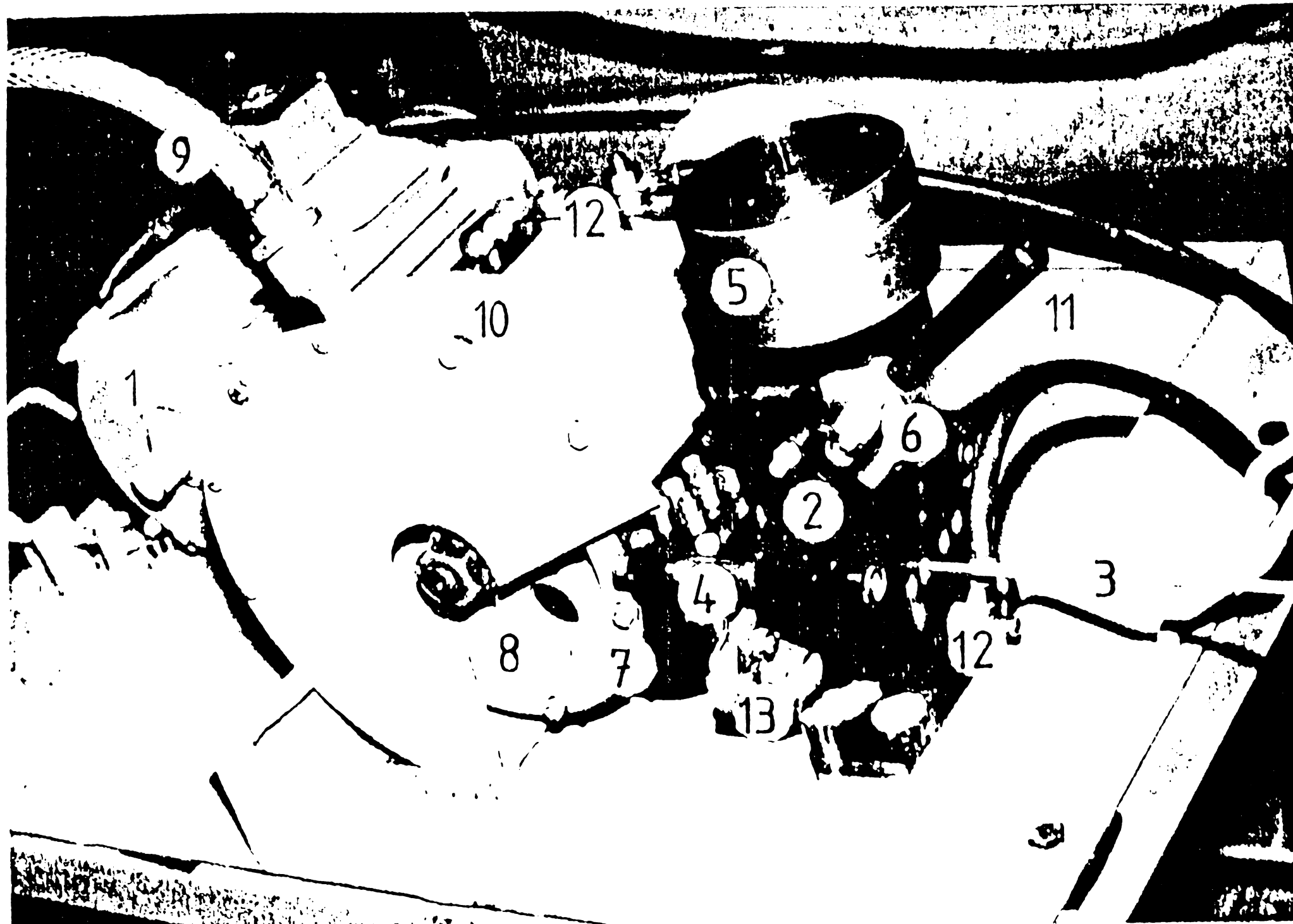


Fig. 2.7. Standul experimental SE - ol.oo.

dintre OT și OP este generată de motorul electric (c.a. 1, în trepte, definite pe domeniul prescris și transmisă la OT prin intermediul unui arbore, montat în două lagăre de rostogolire. Echipamentul de formare finală, asigură transmiterea densității de curent prin periile colectoare în contact cu arborele.

Echipamentul de poziționare a obiectului de prelucrat, 2, asigură orientarea și fixarea OP, 3, și determină dezvoltarea avansului de lucru prin generarea presiunii specifice de contact.

Secțiunea de prelucrare a OP a fost adoptată în trei trepte (8,29 ; 16,39 ; 24,88 mm²), corespunzătoare celor trei dimensiuni standardizate prelucrate.

Obiectul de prelucrat, se deplasează axial pe coloanele de ghidare 4, acționat de greutatea etalon 5, generatoare de presiune specifică. Revenirea după prelucrare, sau în caz de accident, se realizează prin excentricul circular 6.

Obiectul de transfer 7, este configurat prin două inele , montate pe flanșa 8, componentă a echipamentului de antrenare a obiectului de transfer.

Alimentarea și distribuția lichidului de activare și răcire, se realizează prin conducta 9 și distribuitorul din interiorul carcasei 10. Colectarea și evacuarea lichidului, se realizează prin baia de proces 11.

Legătura cu echipamentul de generare a agentului eroziv se asigură prin bornele 12 și distribuitorul 13.

Soluțiile constructive adoptate, au avut în vedere mediul de lucru coroziv (protecție anticorozivă), izolarea electrică și transmiterea unor curenți electrici cu densități ridicate.

2.5. Verificarea ipotezelor teoretice prin cercetări experimentale

Studiul surselor active existente în procesul de prelucrare prin procedeul EERC, și realizarea modelului experimental, au permis analiza efectelor manifestate în proces la suprafața de interacțiune obiect de transfer - obiect de prelucrare, /38/.

Cercetările s-au desfășurat pe modelul experimental în următoarele condiții :

- obiectul de transfer, oțel OL 42, sub forma a două inele montate pe suportul axului de antrenare ;

- obiectul de prelucrare, sub forma unor vergele cilindrice, cu diametrul de \varnothing 2,5 ; \varnothing 3,25 ; și \varnothing 5 mm, din două materiale oțel înalt aliat , E. Cr18Ni8Mn6x și fontă, EF.NiFeB ;

- mediul de lucru, apă tehnologică în circuit deschis, dirijată atât pe suprafața OT și OP cât și în zona de prelucrare ;

- forța de apăsare (presiunea de contact), aplicată direct la suprafața de contact, prin greutatea etalonate, montate pe sistemul de avans al OP , domeniul de variație cercetat : $F = 10,06 \dots 10^5$ N cu posibilitatea urmăririi efectului din 10 în 10 newtoni ;

- tensiunea și intensitatea curentului, la valori rezultate de pe cele patru caracteristice externe ale sursei și de pe cele două rapoarte de transformare $K = 10,875$ și $14,5$ pentru patru distanțe dintre înfășurări $h = 0, 40, 80$ și 120 mm;

- viteza relativă a obiectului de transfer, în patru trepte de turații, realizate prin fulia axului de antrenare, $v = 13,0, 19,6, 26,1$ și $31,0$ m/s .

Pentru vizualizarea și înregistrarea rezultatelor cercetării s-a utilizat microscopul "Carl Zeiss" Jena , osciloscopul catodic cu două spoturi de 25 MHz E 01.09, multimetrul analogic MF - 35 și ceasul electric cu precizie de 0,01 s și domeniul de măsurare de 20 s.

Considerând schema cinematică de prelucrare ca un factor important în cercetare, modelul experimental realizat, elimină prin sistemul de avans transversal al OP pe suprafața OT posibilitatea

dezvoltării impulsurilor laterale.

Poziția de contact OT - OP, a fost determinată sub nivelul axei orizontale realizându-se astfel dirijarea forțelor mecanice și electrodinamice în sensul acțiunii câmpului gravitațional.

Alimentarea cu energie electrică, s-a realizat pentru diapazonul de graniță a tensiunilor de descărcare în arc la ruperea contactului electric, TDRC, și a tensiunilor de descărcare în arc intermitent, TDAI, pentru U_p / U_{20} cuprins între 0,8...0,6 pentru rapoarte de transformare (10,8, 14,5), în care, U_p reprezintă tensiunea de proces, iar U_{20} tensiunea de mers în gol a sursei de alimentare.

Pentru localizarea energiei de efect la suprafața OT - OP, electrodul-sculă a fost conceput și realizat dimensional și structural, astfel încât să prezinte rezistență ohmică generală maximă și conductibilitate termică scăzută (masă relativ mare, umectată abundant).

2.5.1. Procese de încălzire, topire și expulzare

Procesele de încălzire topire și expulzare reprezintă rezultatul existenței și acțiunii surselor active la prelucrare, cu efect direct (dimensional și structural) asupra OP și OT, aflate în interacțiune /38/.

Încălzirea, se datorează efectului Joule-Lentz dezvoltat în punctele de contact, cu efect termic atât la suprafața OP cât și la suprafața OT. Încălzirea are loc pînă la nivelul temperaturilor de topire a materialelor, localizarea ei pe suprafața de contact fiind asigurată și controlată de mărimile fizice I, U, F, v din proces și de bilanțul termic asigurat de mediul de lucru.

Prelucrările efectuate pe cele două materiale, Cr18Ni8Mn6 și FeNi, au permis evidențierea în componența produselor erozive a unor fîșii de grosime redusă (0,03..0,3 mm), îndepărtate de pe suprafața OP după încălzirea materialului pînă la temperaturi de topire (figura 2.8, figura 2.9).

Efectul mecanic al procesului a asigurat ruperea acestora din structura materialului mamă și evacuarea în baia de proces. Fîșiile formate, poartă urmele efectului termic de încălzire și a efectului mecanic de rupere din structura materialului OP,

Frecvența apariției fîșiilor în componența produselor erozive este favorizată de creșterea curentului electric și de utilizarea rapoartelor U_p / U_{20} , la valori situate spre limita inferioară a domeniului ($U_p / U_{20} \rightarrow 0,6$). De asemenea, creșterea vite-

zei relative determină formarea foliilor erozive, chiar mai mult, configurează forme de ciupercă profilului OP la forțe de apăsare mari (peste 50 N).



Fig.2.8. Fîșii rezultate la prelucrarea oțelului înalt aliat (Cr18Ni8Mn6X), scara 5 : 1.



Fig.2.9. Fîșii rezultate la prelucrarea fontei (FeNiB), scara 5 : 1.

Topirea și vaporizarea, apare la suprafața de contact OT - OP, datorită efectului Joule-Lentz și dezvoltării descărcărilor în arc nestaționară la ruperea contactelor electrice parcurse de curent. Si în acest caz, efectul termic, se manifestă la suprafața OT și OP, determinînd dezvoltarea temperaturilor de topire și vaporizare în coloana arcului de descărcare.

Topirea și vaporizarea, s-a evidențiat în componența produselor erozive prin existența unor forme sferice de dimensiuni diferite (ϕ min = 0,01 mm) asemenea picăturilor de material topit. Suprafața exterioară (cămașa picăturilor topite) este de culoare închisă ca rezultat direct al formării oxizilor de proces. Oxidarea picăturilor este rezultatul direct al interacțiunii metalului topit sau vaporizat cu mediul de lucru (apa tehnologică). Caracteristicile oxidante se datorează reacțiilor endoterme dezvoltate prin temperaturile ridicate ale plamei arcului (fig.2.10, fig.2.11) .

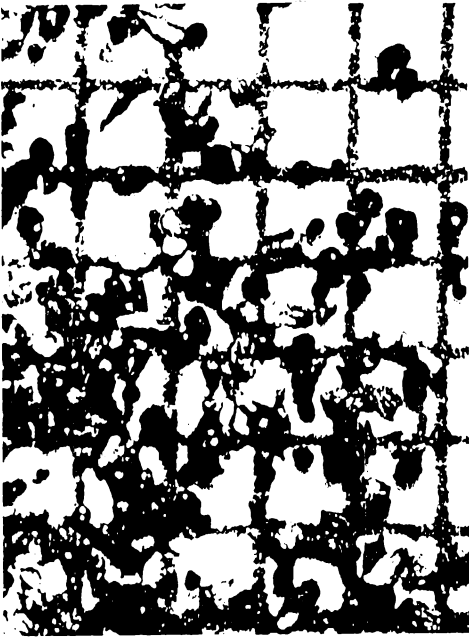


Fig.2.10. Forme sferice rezultate la prelucrarea oțelului înalt aliat (Cr18Ni8Mn6X), scara 5 : 1.



Fig.2.11. Forme sferice rezultate la prelucrarea fontei (FeNiB), scara 5 : 1.

Prevența apariției formelor sferice în componența produselor erozive și dimensiunile acestora, sînt direct legate de ponderea descărcărilor de contact, DRC, cînd procesul are loc la tensiuni apropiate tensiunilor de amorsare a arcului ($U_p/U_{20} \rightarrow 1$), determinînd o pondere accentuată efectelor de topire și vaporizare. Adăugînd la acestea, densități mari de curent, au rezultat forme sferice cu dimensiuni variabile ($\varnothing 0,01 \dots \varnothing 1 \text{ mm}$).

Vitezele relative ridicate și forțele de apăsare mari, favorizează apariția formelor sferice de dimensiuni reduse. Explicația posibilă este legată de timpii prea scurți de formare și dezvoltare a arcului nestaționar pe de o parte, iar pînă de altă parte, forțele de apăsare mari, determină pentru sursa de alimentare utilizată în cercetare, deplasarea raportului U_p/U_{20} spre valori sub 0,6, cînd efectul de îndepărtarea materialului este preponderent prin fîșii. De altfel la viteze mari ($v > 31 \text{ m/s}$), crește numărul descărcărilor pentru o jumătate de perioadă ($T_n/2$).

Expulzarea materialului încălzit, topit și vaporizat de la suprafața de interacțiune OP - OT, s-a realizat pe direcția câmpului gravitațional, ca efect direct al forțelor electrodinamice, forțelor mecanice (centrifuge) și surplusului energetic introdus.

mediul de lucru (presiunea apei tehnologice).

Expulzarea, este îmbunătățită de creșterea vitezei relative și a debitului de apă. În această situație, cresc forțele mecanice și surplusul energetic. Se asigură astfel, răcirea rapidă a picăturilor de metal printrîmpinîndu-se lipirea la materialul mamă prin pelicula de oxid pe contur și prin dezechilibrul termic de masă.

Expulzarea materialului excedentar, este activată de utilizarea judicioasă a efectului sursei active, generator de forțe electrodinamice.

2.5.2. Influența mărimilor fizice, mecanice și electrice

Fenomenele complexe care au loc în spațiul de lucru la prelucrarea prin procedeul EERC, sînt direct influențate de mărimile fizice, mecanice și electrice reprezentate de forța de apăsare, presiunea specifică, viteza relativă și tensiunea de lucru, /37,38/.

Forța de apăsare, a fost luată în considerare pe domeniul 10.....110 N.

Oscilografierile realizate la prelucrarea oțelului înalt aliat Cr18Ni8Mn6x, la viteza relativă de 19,1 m/s au evidențiat următoarele :

- la forțe mici - mijlocii (10.....50N), apar 1....5,6 descărcări în arc (au existat și probe cu o singură descărcare) distribuite simetric în ambele semiperioade ;

- la forțe mari (70.....110N), numărul descărcărilor crește la 5....10 descărcări pe o semiperioadă distribuite analog și pe a doua semiperioadă (alternanța negativă a tensiunii).

Pe domeniul de variație analizat, forța de apăsare determină tensiunea de proces, pentru cele două rapoarte de transformare ale sursei și pe curbele caracteristice ale acestora (fig.2.12.).

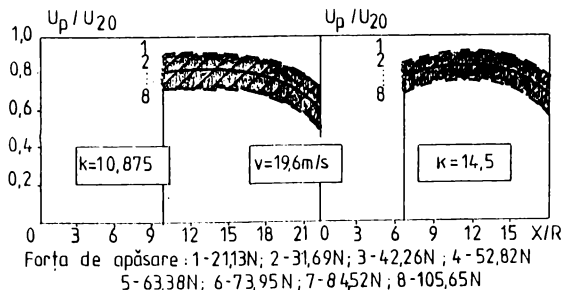


Fig.2.12. Dependența formelor descărcării din proces de variația forței de apăsare.

Pentru ambele rapoarte de transformare k_1, k_2 la valori mici-medii ale forței de apăsare rezultă o dezvoltare a proceselor în domeniul tensiunilor de descărcare în contact, T D C, cu rapoarte U_p / U_{20} cuprinse în domeniul 0,8.....0,9. Valori mari ale forței

de apăsare mențin procesul la optimul de prelucrare, definit de domeniul tensiunilor de descărcare în arc la ruperea contactului electric, TDRC, - domeniul tensiunilor de descărcare în arc continuu, TDAC. Raportul U_p / U_{20} , se situează în acest al doilea caz în domeniul 0,6...0,8, iar raportul inductanță, X , rezistență, R , ale circuitului electric de alimentare X_k / R_k , tinde în ambele cazuri ale raportului de transformare spre valori ridicate ($X_k / R_k > 15$).

Dependența tensiune de proces - forță de apăsare, $U-F$, este liniară în totalitatea cercetărilor efectuate (fig.2.13), unghiul de pantă fiind mai mare la curbele caracteristice puternic căzătoare ($h = 120$ mm) ale raportului de transformare $k = 10,875$. De asemenea, viteza relativă determină creșterea unghiului de pantă prin creșterea numărului descărcărilor pe o semiperioadă.

Dependența intensitate de curent - forță de apăsare, $I-F$, identică cu dependența densitate de curent - presiune specifică, $j-p$; este liniară pe curbele caracteristice puternic căzătoare ($h = 120,80$ mm), o dată cu apropierea de punctul de zero (distanțe mici între cele două înfășurări), manifestându-se tendința de stabilizare a valorilor intensității curentului, eventuala creștere a curentului fiind posibilă doar prin aplicarea unor forțe de apăsare mai mari ($F > 100$ N).

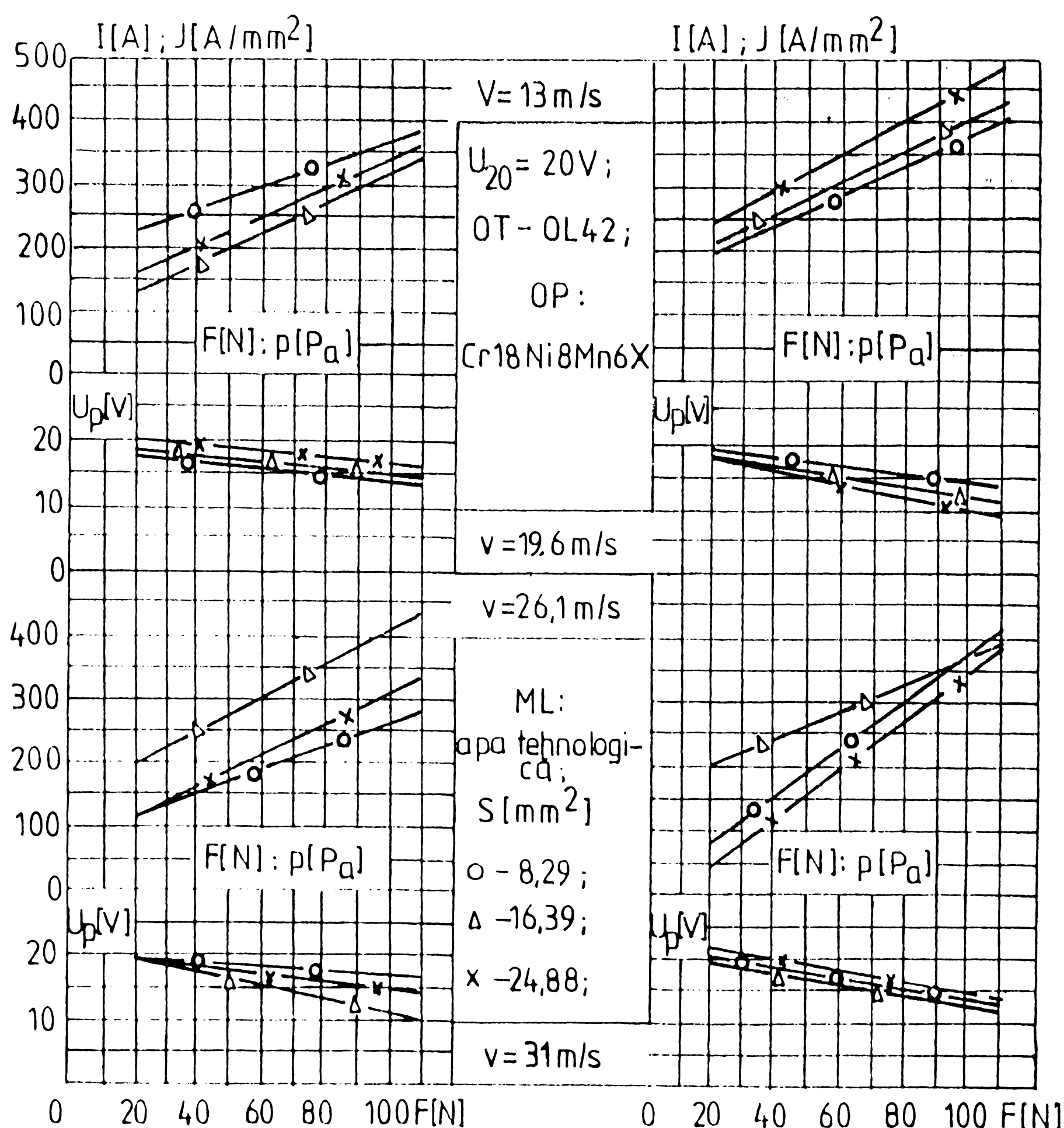


Fig.2.13. Dependența intensității curentului și a tensiunii din proces de forța de apăsare.

La aceste dependențe, viteza relativă, determină creșterea unghiului de pantă o dată cu deplasarea ei spre valori ridicate ($v > 30$ m/s). Pe aceleași curbe caracteristice, creșterea vitezei relative determină apariția unor curenți mai mari în toate cazurile analizate. Explicația fenomenologică este legată și în acest caz de creșterea numărului descărcărilor o dată cu deplasarea vitezei relative spre valori de 30 m/s.

Ca efect direct al aplicării forțelor

de apăsare și luînd în considerare efectul rezultat al acestora asupra caracteristicilor sursei de alimentare și asupra OP, au rezultat cei doi parametri de proces :

- densitatea de curent $j/A/mm^2$;
- presiunea specifică p/Pa / :

Pentru cercetările efectuate domeniul de variație s-a situat pentru densitatea de curent $j \in (4,019 \dots 60,31) A/mm^2$, iar pentru presiunea specifică $p \in (0,8 \dots 12,06) MPa$.

Dependența $j-p$, este identică cu dependența $I-F$ (fig.2.13), în schimb trebuie menționat aspectul legat de valorile diferențiate existente la secțiuni diferite ($\circ - 8,29 mm^2$, $\Delta - 16,39 mm^2$, $\times - 24,88 mm^2$) și menținerea unor densități și presiuni constante la anumite valori ale intensității și tensiunii pe aceeași curbă caracteristică a unui raport de transformare.

Viteza relativă, mărime fizică mecanică în proces, a fost analizată în corelație directă cu celelalte mărimi fizice de proces. Trebuie adăugate rezultatele oscilografierilor realizate la viteze diferite :

- la viteze mici (10...20 m/s) și forțe medii, numărul descărcărilor în arc a fost de 5...10 descărcări pe semiperioadă ;
- la viteze mai mari de 30 m/s și forțe la același nivel, numărul descărcărilor a crescut la 10...15 descărcări pe semiperioadă, avînd ca bază explicația logică a creșterii numărului punctelor aflate în contact.

2.5.3. Influența factorilor de material

Alături de mărimile fizice din proces o influență majoră o prezintă natura materialului prelucrat. În cadrul cercetărilor desfășurate, influența factorilor de material a fost studiată în condițiile prezentate anterior, luînd în considerare același material pentru OT - OL 42 , pentru OP au fost alese : un oțel înalt aliat Cr18Ni8Mn6X și o fontă FeNiB. S-au efectuat determinări pentru trei secțiuni distincte, viteza relativă $v = 19,6 m/s$ și mediul de lucru - apa tehnologică, /37/.

Studiul comparativ al celor două tipuri de materiale a relevat următoarele aspecte :

- fenomenele de încălzire, topire, evaporare și expulzare sînt identice din punct de vedere calitativ rezultînd folii și forme sferice de erodare, (fig. 2.14, fig.2.15.);

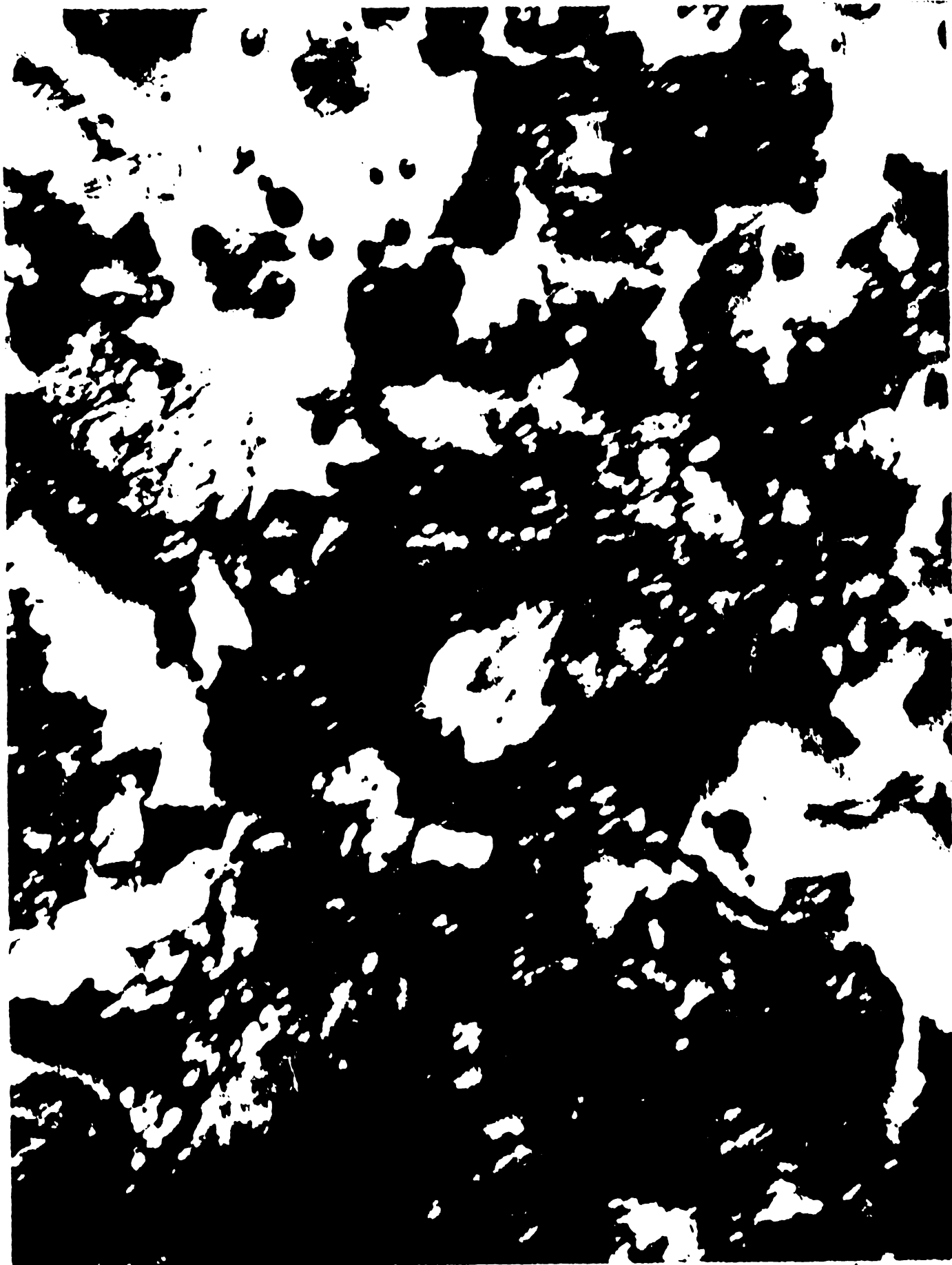


Fig.2.14. Forme erozive la prelucrarea oțelului înalt-aliat (Cr18Ni8Mn6X), scara 5 ; 1.



Fig.2.15. Forme erozive la prelucrarea fontei (FeNiB), scara 5 ; 1.

- influența mărimilor fizice electrice și mecanice, este identică sub raport calitativ existînd diferențe din punct de vedere cantitativ, (fig.2.16) ;

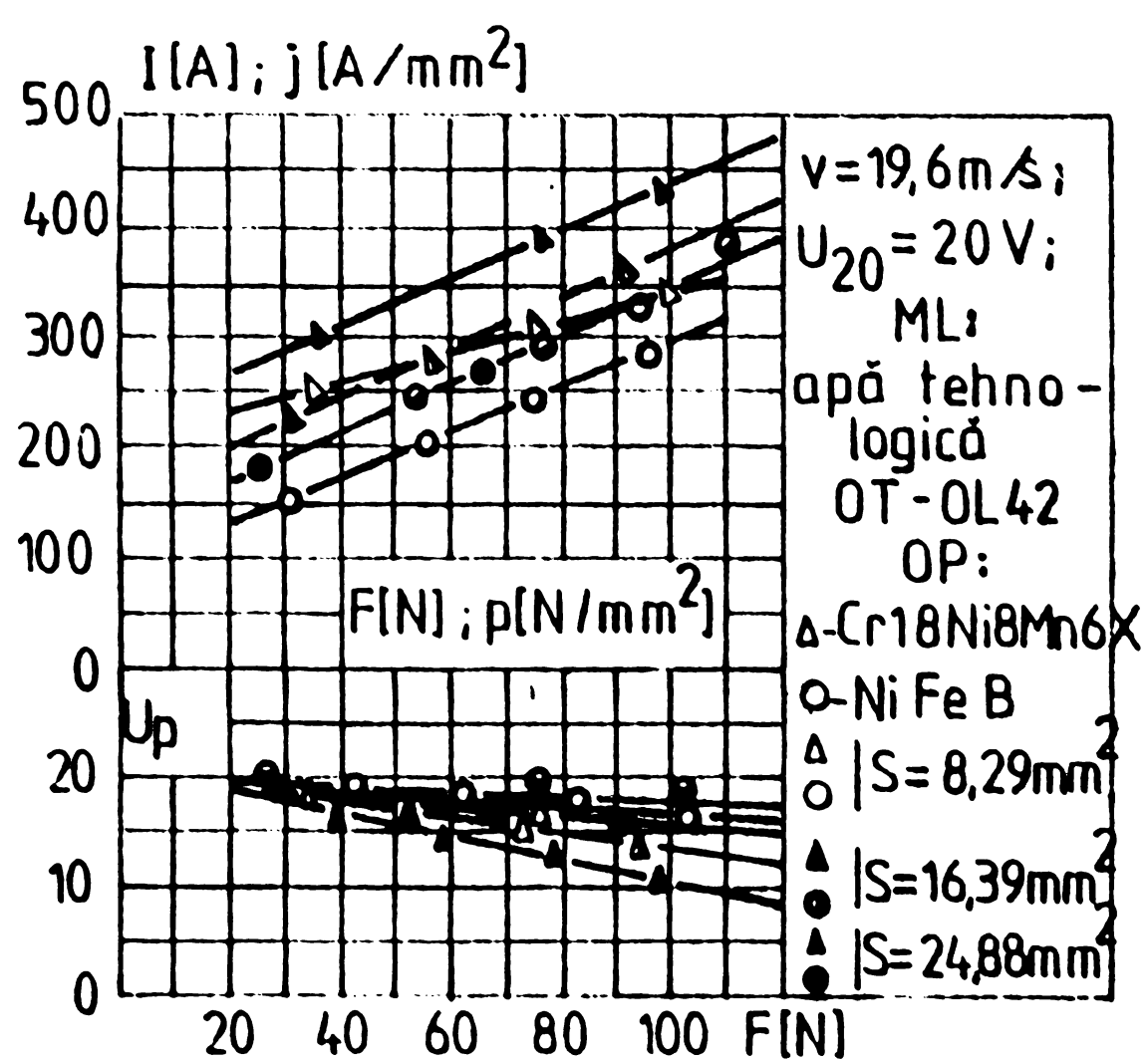


Fig.2.16. Variația intensității curentului și tensiunii din proces de natura materialului prelucrat.

- pentru același domeniu de variație a forțelor de apăsare, pe curbele caracteristice ale raportului de transformare ($k = 10,875$), tensiunea în proces la prelucrarea fontei, se situează la valori superioare tensiunii de prelucrare a oțelului înalt aliat. Corespunzător, intensitatea curentului rezultată la prelucrarea fontei, se situează sub nivelul valorilor de prelucrare a oțelului înalt aliat. Explicația fenomenului este direct legată de cantitatea de căldură dezvoltată prin contact. Duritatea, rezistivitatea

fontei fiind diferită de cea a oțelului înalt aliat, la aceleași

valori ale forței de apăsare se ușurează procesul de prelevare a materialului prin dezvoltarea unor cantități mai mari de căldură;

- aspectul energetic pozitiv evidențiat se confirmă pentru cele trei secțiuni cercetate și pe curbele caracteristice utilizate.

2.5.4. Influența raportului de transformare a sursei de alimentare

Sursa de alimentare utilizată prezintă două rapoarte de transformare $k = 10,875$ cu tensiunea de mers în gol $U_{20} = 20$ V și $k = 14,5$ cu tensiunea de mers în gol de $U_{20} = 15$ V.

Studiul comparativ al influenței rapoartelor de transformare, s-a efectuat pentru viteza relativă $v = 19,6$ m/s, OT - OL 42, OP-Cr18Ni8Mn6X, mediul de lucru - apa tehnologică, pe cele patru curbe caracteristice ($h=0, 40, 80, 120$ mm), figura 2.17, /37/.

Determinările, au fost efectuate pentru trei secțiuni distincte, rezultatele comparative fiind sintetizate în următoarele concluzii :

- fenomenele de încălzire, topire, evaporare și expulzare, sînt identice calitativ ;

- influența forței de apăsare sub raport calitativ, este identică, sub aspect cantitativ, determină unghiuri de pantă mult mai reduse, necesitînd pentru parcurgerea întregu-

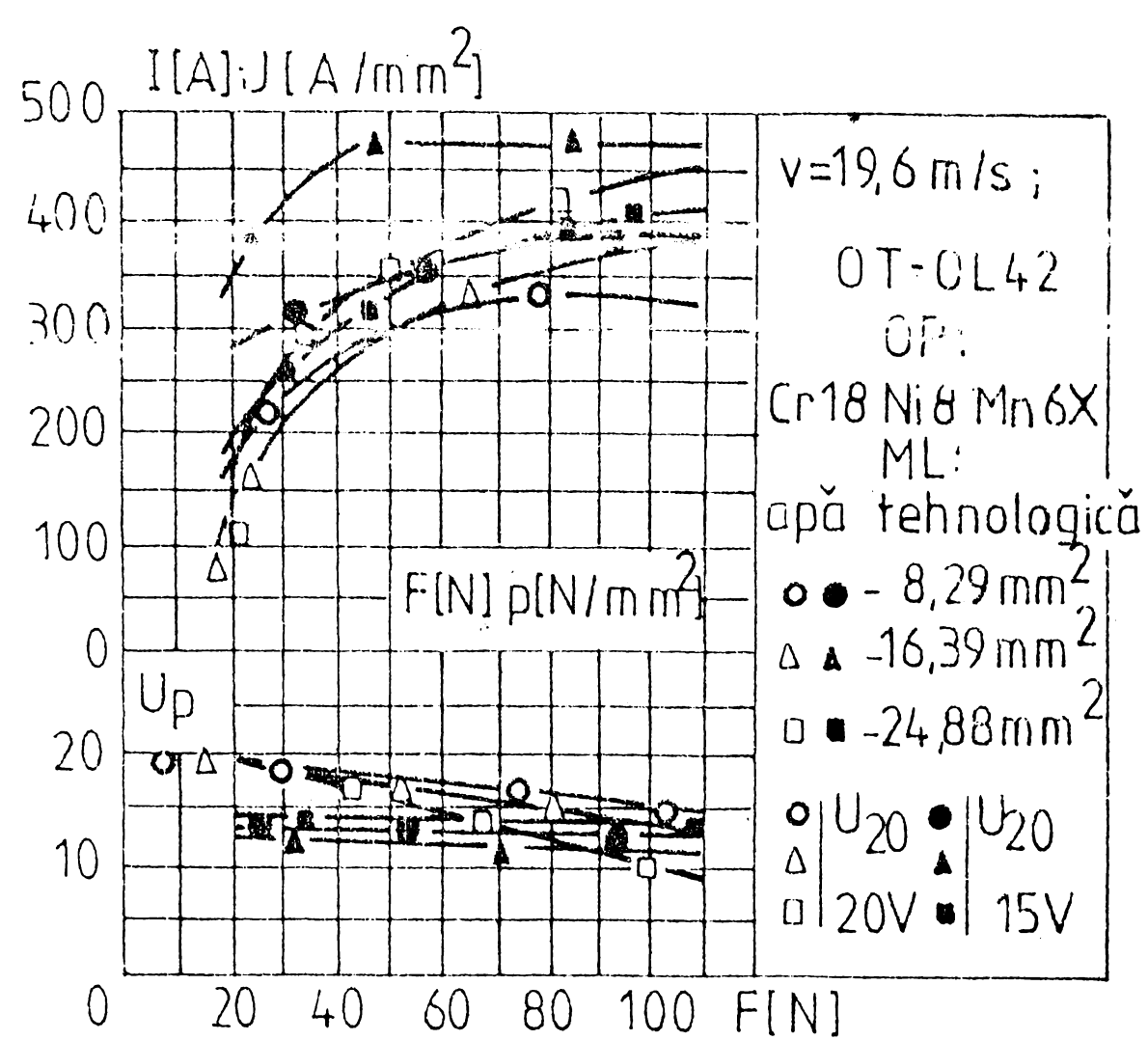


Fig.2.17. Variația intensității curentului și a tensiunii din proces de tensiunea de mers în gol a sursei de alimentare.

lui domeniu de variație a raportului U_p / U_{20} valori superioare ale forței de apăsare $F \in (80 \dots 300)$ N ;

- pentru domeniul de variație a forțelor studiat, s-au obținut valori mult mai ridicate (circa 50.....100 %) ale curentului electric, pe caracteristica cu rigiditate ridicată ($h = 0$ mm), la care, în ambele cazuri studiate, se manifestă tendința de saturație de curent motivată poate prin lipsa unor forțe de apăsare mai mari de 110 N ;

- ambele rapoarte de transformare, asigură desfășurarea optimă a procesului $U_p / U_{20} \in (0,6 \dots 0,8)$ la valori ridicate ale raportului rezistență reactivă / rezistență activă a circuitului electric secundar al sursei de alimentare ;

- paralelismul curbelor de dependență tensiune de proces-

forță de apăsare, prezintă distanțe foarte mici între cele trei secțiuni distincte și accentuează dependența procesului de presiune specifică și densitatea de curent, pentru curbele de caracteristică puternic căzătoare ($h = 120, 80$ mm). Pentru curbele caracteristice aproximativ rigide ($h = 40, 0$ mm), dependența scade tinzând spre anulare.

2.6. Concluzii desprinse din analiza teoretică și experimentală

Prelucrarea dimensională prin eroziune electrică cu rupe-re de contact, constă în prelevarea de material, sub forma unor produse erozive de pe suprafața semifabricatului (obiectului de prelucrat supus prelucrării).

Obiectivul principal al acțiunii tehnologice, este generarea suprafețelor unei piese definită prin condițiile tehnice (con-diții dimensionale, condiții de formă și poziție reciprocă a supra-fețelor, calitatea suprafeței prelucrate).

Pentru generarea prin procedeul EERC a suprafețelor pie-sei, este necesară, atât dezvoltarea unor procese fizico-chimice spe-cifice, predominant termice și mecanice, cât și continuarea desfăș-gurării proceselor amintite pînă la îndepărtarea totală a cantită-ții de material ce reprezintă adaosul de prelucrare.

Principalele etape ale generării suprafețelor prin proce-deul EERC sînt :

- dezvoltarea proceselor elementare de eroziune, prin ru-perea localizată și deplină a legăturilor interatomice dintre mate-rialul excedentar și materialul de bază al obiectului de prelucrat;
- eliberarea continuă a suprafeței prelucrate de deșeuri-le tehnologice (produse erozive) rezultate anterior ;
- deplasarea spațială a coordonatelor procesului elemen-tar de eroziune, în concordanță cu obiectivele prelucrării.

Prelucrarea are loc în sistemul tehnologic de prelucrare format din :

- sursa de alimentare ;
- echipamentul tehnologic de prelucrare.

Sursa de alimentare, influențează procesul prin parametrii electrici, tensiunea și intensitatea (densitatea) curentului aplicate la suprafața de contact OT - OP.

Echipamentul tehnologic de prelucrare, influențează procesul prin parametrii forța (presiunea) manifestată la nivelul suprafeței de contact OT - OP, prin viteza relativă dintre OT și OP, și prin

lichidul de lucru.

Alături de parametri enumerați , procesul de prelucrare, este influențat și de o serie de factori reprezentând structura circuitului electric, perechea de materiale și reglarea automată a interstițiului tehnologic.

2.6.1. Mărimi specifice în proces

Identificarea și exprimarea modului de desfășurare a procesului de prelucrare prin eroziune electrică cu rupere de contact, permite evidențierea mărimilor specifice din proces /10,125/.

Se consideră procesul de prelucrare ca o funcție Y de o serie de variabile x_1, x_2, \dots, x_n :

$$Y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (2.56)$$

Componentele vectoriale de intrare x_i sînt reprezentate de obiectul prelucrării (secțiunea de prelucrare, masă, material, configurație), obiectul de transfer (dimensiuni, masă, material, precizie dimensională, configurația părții active), utilajul de prelucrare (precizie, rigiditate, forța de apăsare, viteza relativă, mediul de lucru, etc), și sursa de alimentare (tensiunea de mers în gol, polaritatea alimentării, natura circuitului electric, etc):

$$x_i = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in X \subset \mathbb{R}^n \quad (2.57)$$

Procesul de prelucrare în sine, poate fi caracterizat printr-o funcție generală Y , care, să ia în considerare toate aspectele procesului :

$$Y = \sum_{i=1}^n y_i, \quad Y \subset \mathbb{R}^n \quad (2.58)$$

În cazul prelucrării prin procedeul EERC, nu se recomandă folosirea unei funcții generale Y , ci a unor funcții unice, care, caracterizează parțial procesul, prin câte un indicator măsurabil cum ar fi : productivitatea prelucrării, consumul specific de energie electrică și calitatea suprafeței prelucrate. Aceste funcții, y_1, y_2, y_3 , sînt rezultatul procesului de prelucrare .

Procesul, este perturbat de o serie de factori, care, se manifestă în sistemul tehnologic de prelucrare (vibrații, surse termice, forței inerțiale, mase variabile, oscilații ale tensiunii de alimentare, frecare, jocuri în cupele cinematice) și în procesul de prelucrare (uzura obiectului de transfer, neomogenitatea materialului, adausul aleator de prelucrare, variațiile den-

sității materialului) :

$$p \in (p_1, p_2, \dots, p_n) \in P \quad (2.59)$$

2.6.2. Mărimi specifice de comandă

Desfășurarea stabilă a procesului de prelucrare prin eroziune electrică cu rupere de contact, se realizează prin capacitatea sistemului tehnologic de prelucrare de a menține interstițiul tehnologic de prelucrare la valori optime.

Deoarece accesul direct la măsurarea interstițiului tehnologic este practic imposibil, se impune obținerea unor semnale din proces cu suficiente informații privind evoluția în timp a acestuia. În aceste condiții, se poate acționa asupra procesului, în vederea conducerii acestuia în domeniul de stabilitate maximă.

Cercetările teoretice desfășurate, au relevat existența în proces a următoarelor mărimi de comandă : tensiunea și intensitatea (densitatea) curentului, forța de apăsare (presiunea de contact) și viteza relativă.

În ceea ce privește aspectul calitativ, cercetările desfășurate pe modelul experimental al prelucrării în condițiile de desfășurare indicate la subcapitolul 2.5, în domeniul diapazonului tensiunilor (TDRC - TDAI), deci a forțelor de apăsare $F \in (60 \dots 110 \text{ N})$, au relevat următoarele aspecte (fig.2.18), /39/ :

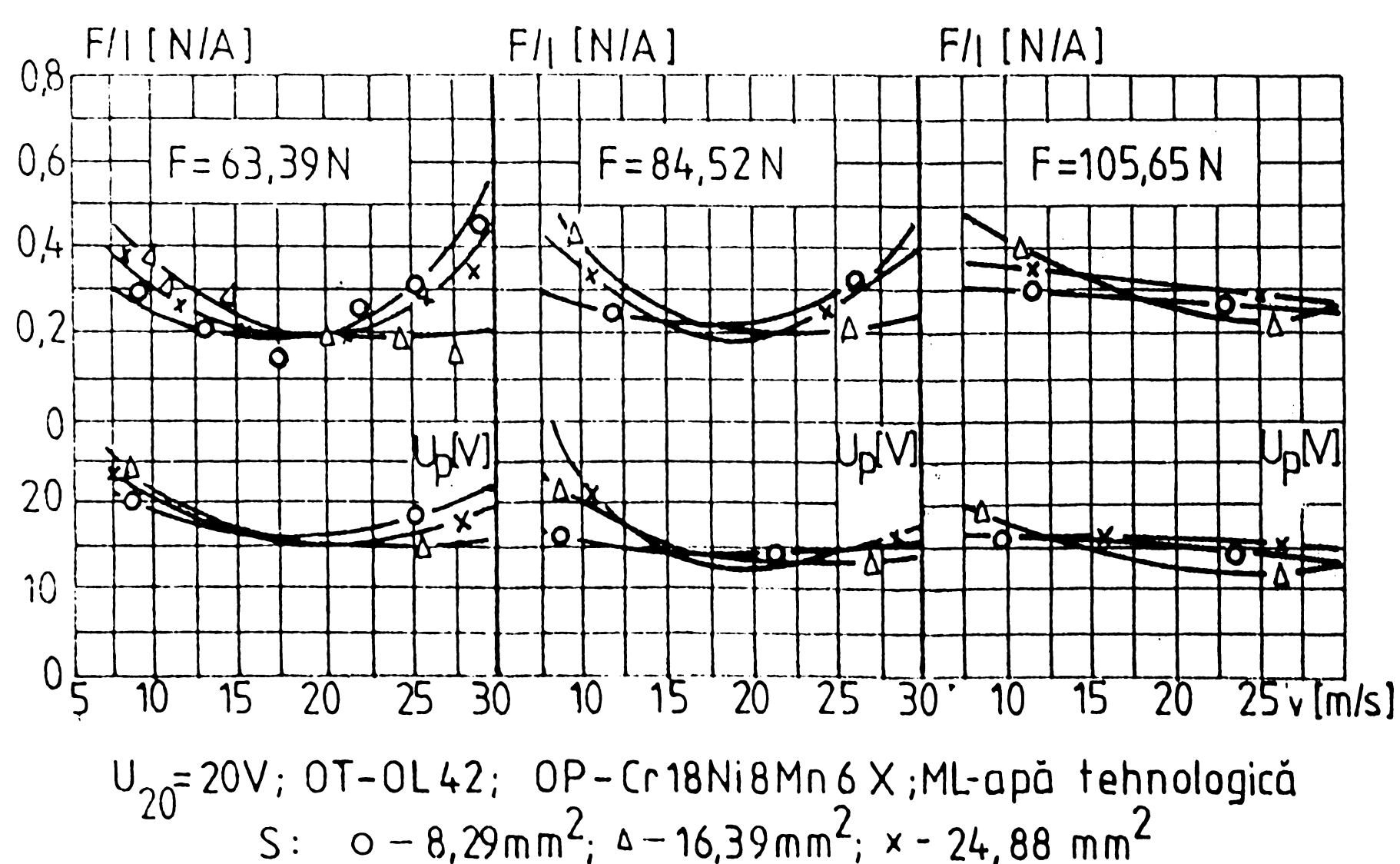


Fig.2.18. Dependența raportului forța de apăsare/intensitatea curentului de viteza relativă.

pantei curbelor caracteristice ;

- pentru cele trei secțiuni de prelucrare cercetate, optimul ($F/I - v$), se deplasează sensibil spre viteze superioare odată cu

- pentru raportul de transformare $k=10,875$, pe toate curbele caracteristice, se determină zone de prelucrare optime, cu dependențe prin raportul forța de apăsare/intensitatea curentului și viteza relativă ($F/J - v$) ;

- punctele de optim, se deplasează spre viteze relativ mari ($v > 20 \text{ m/s}$), odată cu creșterea forței de apăsare și cu scăderea

creșterea secțiunii, mai ales la forțe de apăsare mari și caracteristici cu pantă redusă;

- optimul dependenței, se manifestă întotdeauna în zona tensiunilor de proces reduse, cu rapoarte ale rezistenței reactive/rezistența activă, ridicate ($X_K / R_K > 20$, anexă).

Creșterea influenței cantitative și calitative a mărimilor de comandă din proces și existența unui model matematic obținut prin una sau mai multe tehnici de modelare, permite optimizarea procesului tehnologic de prelucrare prin procedeul EERC.

3. STUDIUL PRIVIND SISTEMUL TEHNOLOGIC DE PRELUCRARE PRIN EROZIUNE ELECTRICA CU RUPERE DE CONTACT

3.1. Funcțiile sistemului tehnologic de prelucrare

Prelucrarea prin eroziune electrică cu rupere de contact, reprezintă o submulțime a metodelor tehnologice bazate pe acțiuni de rupere (dezmembrare) a substanței, metode fundamentale în tehnologia construcțiilor de mașini.

Prelucrarea dimensională (cu îndepărtare de material), se desfășoară prin introducerea din exterior a unei cantități determinate de energie, în zona de prelucrare a suprafeței date. În timpul procesului de prelucrare, au loc interacțiuni cu substanța obiectului prelucrării, energia introdusă suferind transformări cantitative și calitative, cu rezultat final, dezvoltarea etapelor constructive ale dinamicii procesului elementar de îndepărtarea materialului excedentar :

- activarea ;
- ruperea localizată și deplină a legăturilor interatomice dintre materialul excedentar și materialul obiectului prelucrării.

Purtătorii de energie în cadrul prelucrării, sînt agenții erozivi, cu rolul de a transfera la suprafața obiectului prelucrării a fluxului de energie, capabil să declanșeze prin interacțiune, procese elementare de îndepărtare de material /87/.

Energia introdusă de agentul eroziv la suprafața obiectului prelucrării generată de un sistem extern (sursă de alimentare), determină procesele elementare cu caracter discontinuu, cumulativ și progresiv.

Agentul eroziv în cadrul prelucrării, este reprezentat de efectul cumulat al arcului electric nestaționar la ruperea contactelor electrice stabilite temporar prin OT și OP. Energia transferată de la utilaj, prin agentul eroziv, la suprafața de prelucrare, este de natură termică, mecanică și chimică. Elementele purtătoare sînt electronii și ionii, iar distribuția energiei prin agentul eroziv la nivelul suprafeței prelucrate, se realizează prin contacte punctiforme ale microneregularităților. Procesul este determinat temporal de impulsuri, prin mișcarea relativă a OT și/sau OP.

3.1.1. Structura spațiului de lucru elementar

Structura spațiului de lucru elementar la prelucrarea prin procedeul EERC, are configurația din figura 3.1. În procesul prelucrării, agentul eroziv, AE, se formează la nivelul suprafeței OP și OT. Mediul de lucru, ML, este supus unor transformări fizico-chimice (încălzire, vaporizare, reacții oxidante, etc.), datorită interacțiunii acestuia cu AE. În aceste condiții, se formează spațiul de lucru elementar, SLE, delimitat în spațiul procesului de către suprafețe de interacțiune cu OT, OP și ML, /35/.

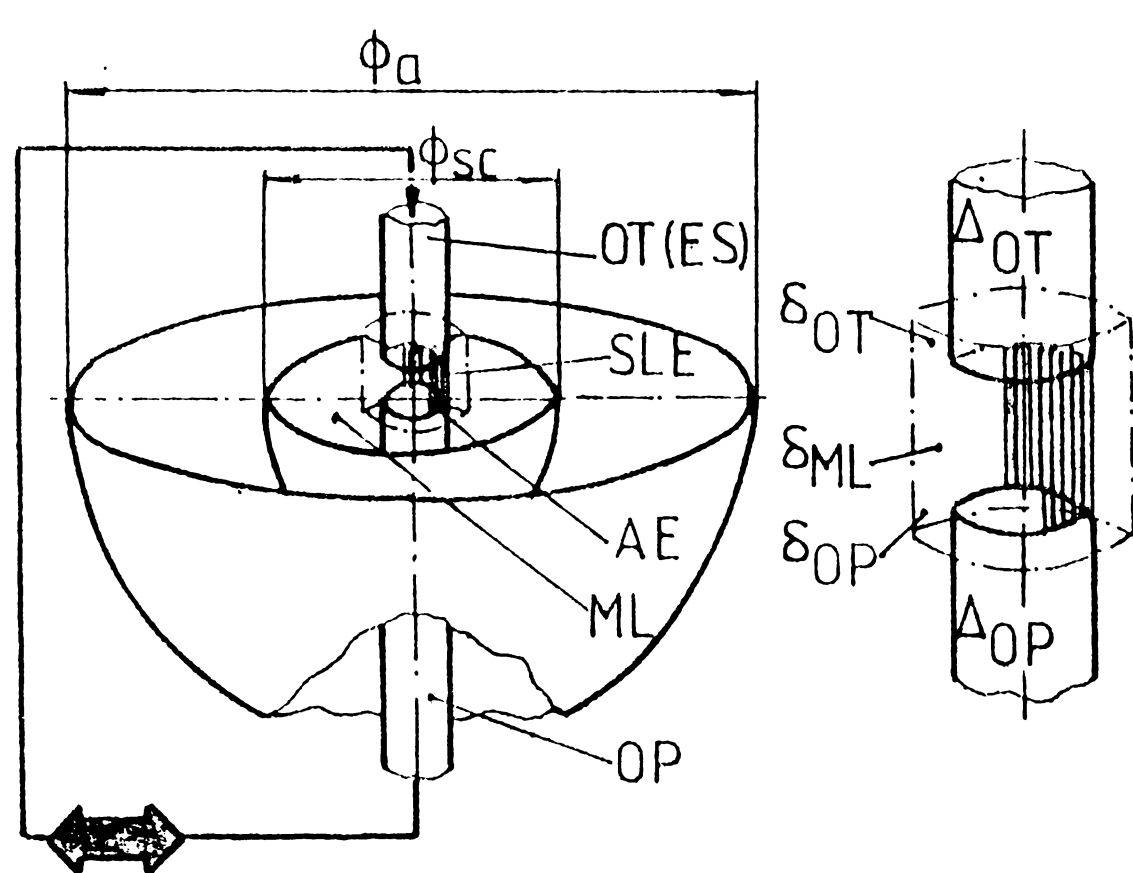


Fig.3.1. Schema spațiului de lucru elementar.

Spațiul liber dintre OT și OP, se definește ca un interstițiu caracterizat prin trei zone distincte :

- zona de scurt-circuit (ϕ_{sc}) ;
- zona de arc nestaționar (ϕ_a) ;
- zona dielectrică.

În timpul procesului, fiecare pereche $\Delta_{OT} - \Delta_{OP}$ trece succesiv prin zonele enumerate. Prelucrarea are loc printr-un schimb de energie și masă între AE și celelalte elemente constitutive ale SLE.

Energia AE, se transformă în energie de efect (termică, mecanică și chimică), care, se consumă prin realizarea de modificări ale mărimilor de stare ale OP (δ_{OP}), OT (δ_{OT}) și ML (δ_{ML}), îndepărtarea materialului excedentar și apariția unor modificări fizico-chimice, ireversibile, în porțiunile limitrofe zonei unde a fost îndepărtat materialul excedentar.

Evacuarea deșeurilor rezultate în afara zonei de interacțiune, se realizează prin introducerea unei energii suplimentare, transmisă particulelor prin OT, aflat în mișcare relativă față de OP.

Interacțiunile AE - OT și AE - ML, determină efecte nedorite ale prelucrării, prin, uzura OT și modificarea proprietăților ML.

3.1.2. Sistemul tehnologic de prelucrare

Analiza spațiului de lucru elementar relevă structura principală a sistemului de constituire a agentului eroziv :

- echipament de generare a agentului eroziv, EG"AE" ;
- echipament de formare finală și poziționare a agentului eroziv la suprafața obiectului prelucrării.

Echipamentul de formare finală și poziționare a agentului ero-

ziv la suprafața obiectului prelucrării, se materializează prin mașina de prelucrat, MP, și prin următoarele subansamble :

- echipamentul de formare finală a agentului eroziv, EFF ;
- echipamentul de poziționare a OP și OT, EP"OT", EP"OP".

Legăturile existente între echipamente și elemente, definesc sistemul tehnologic de prelucrare, figura 3.2. /35,36/.

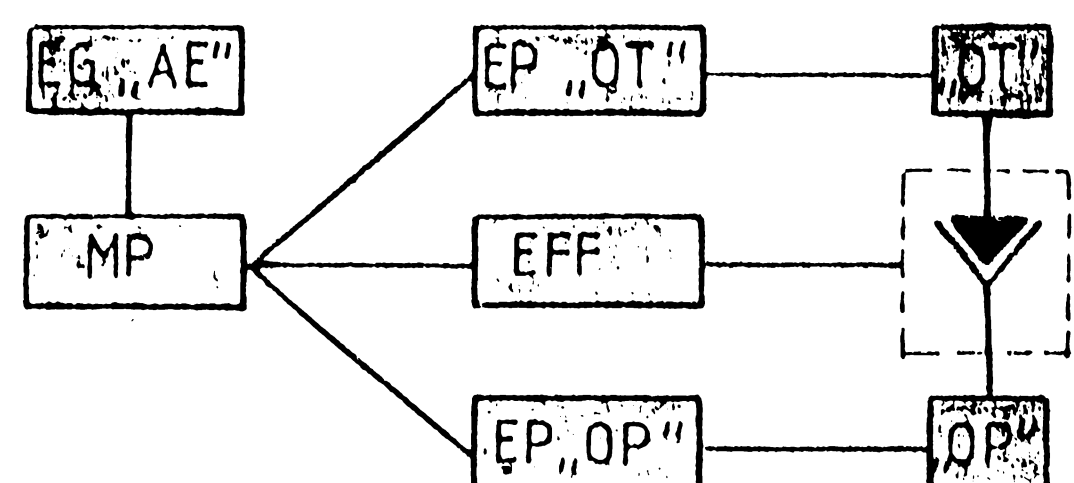


Fig. 3.2. Sistemul tehnologic de prelucrare.

Mișcarea relativă între OT și OP este factorul determinant la formarea și ruperea permanentă a microcontactelor perechi $\Delta_{OT} - \Delta_{OP}$ și la evacuarea materialului erodat din spațiul de lucru. Mișcarea relativă, poate fi obținută în diferite variante, în funcție de mișcările posibile ale OT și OP. Mișcarea rela-

tivă între OT și OP, este realizată de MP, poziția relativă fiind stabilită prin sistemul de poziționare a OP și/sau OT, EP"OP", EP"OT

Mașina de prelucrare și cele două sisteme amintite, formează blocul mecanic al utilajului. Funcțiile rol îndeplinite de partea mecanică sînt :

- antrenarea OT și/sau OP ;
- asigurarea ansamblului de lucru și poziționarea OT și OP, corespunzător necesităților procesului de prelucrare ;
- asigurarea lichidului de răcire în interstițiul tehnologic cu formarea mediului de lucru ;
- aplicarea energiei electrice la nivelul OT și OP, în vederea formării finale a AE ;
- asigurarea normelor de protecția muncii.

Componenta blocului mecanic cuprinde elemente clasice similare cu cele utilizate la mașinile de prelucrare prin așchiere , la care, se adaugă elementele specifice, baia de proces, dispozitive de conectare, izolații electrice aferente alimentării cu energie electrică.

Construcția blocului mecanic reprezintă factorul determinant al posibilităților tehnologice ale unui utilaj de prelucrare. Echipamentul de generare a agentului eroziv, este reprezentat de sursa de alimentare, care, asigură energia electrică necesară procesului și îndeplinește următoarele funcții :

- adaptarea energiei furnizate de rețeaua de alimentare la cerințele utilajului de prelucrare (modificarea tensiunii, intensității și eventual al frecvenței) ;
- asigurarea unor curenți necesari menținerii densității de

curent optim pentru secțiuni variabile ale OP.

Obiectul de transfer, este un element component al sistemului tehnologic de prelucrare, care, asigură prin forma sa constructivă și prin poziția sa în raport cu obiectul prelucrării, transmiterea informației asupra stării finale a agentului eroziv.

Obiectul de prelucrare, este obiectul muncii supus prelucrării de pe suprafața cărui se îndepărtează adausul de prelucrare.

3.1.3. Funcția globală și funcțiile parțiale

Pe baza studiului spațiului de lucru elementar și a legăturilor din sistemul tehnologic de prelucrare, se poate defini funcția globală a sistemului tehnologic de prelucrare prin eroziune electrică cu rupere de contact : introducerea și generarea într-un spațiu tehnologic dat a procesului eroziv, în vederea prelucrării de material. Prin aceasta, se realizează prelucrarea suprafețelor unei piese, în condițiile tehnice stabilite de documentație.

Realizarea acțiunii de prelucrare este condiționată de viabilitatea funcțiilor parțiale ale sistemului tehnologic :

- introducerea energiei de efect, ca sursă generatoare și de întreținere a agentului eroziv ;
- realizarea mișcării relative, în scopul de a asigura formarea finală a agentului eroziv și evacuarea produselor erozive ;
- asigurarea mediului de lucru ;
- asigurarea comenzii de poziționare a OP și OT .

Introducerea energiei de efect, are ca scop, generarea și întreținerea proceselor de transformare fizico-chimică și geometrică a suprafețelor de prelucrat. Efectul realizat este termic și chimic, rezultând prin transformarea energiei primare în AE, acesta se transmite la OP prin intermediul unei zone de interacțiune, cu caracter punctiform.

Prin mișcarea relativă mecanică, se formează echipamentul de formare finală a agentului eroziv. Obiectul de transfer, asigură prin construcția și poziția sa în raport cu obiectul prelucrării, transmiterea informației asupra stării finale a agentului eroziv.

Echilibrul procesului de prelucrare, este asigurat de echilibrul dinamic creat de mișcarea relativă, între procesul de prelucrare și procesul de evacuare a produselor erozive.

Formarea mediului de lucru, asigură condițiile necesare formării și desfășurării proceselor de prelucrare a materialelor, la suprafețele piesei. Din considerente tehnologice (productivitatea prelucrării, calitatea suprafețelor prelucrate), se impune introducerea unor surse suplimentare de energie, în vederea activării

procesului (intensificarea procesului de evacuare a produselor eroziunii) și a stabilizării la valori optime din punct de vedere energetic a acestuia.

Comanda poziției OT - OP, are rolul de a genera, prelucra și transmite informații necesare desfășurării acțiunii de prelucrare. Comanda poziției, se poate realiza prin elementul de poziționare, la nivelul OT, EP"OT", sau la nivelul OP, EP"OP", exercitând și un rol de control asupra energiei transmise agentului eroziv. Se asigură reglajul parametrilor energetici ai AE (densitatea de curent, presiune specifică, timp de desfășurare arc), localizarea micro și macroscopică a acțiunii erozive, pe suprafețele de prelucrat ale piesei.

3.2. Structura sistemului tehnologic

3.2.1. Progresul tehnic și evoluția sistemului tehnologic

Urmărind evoluția progresului tehnic, în general și a unui subdomeniu al său, utilajele de prelucrare, în special, cercetătorul este preocupat de a-și forma o concepție încheiată, sistemică, care, să-i evidențieze structura și legile de dezvoltare ale sistemului tehnologic de prelucrare (utilaje de prelucrare și elemente componente). În acest context, se încearcă prin aceasta chiar și prefigurarea unor tendințe de viitor.

Progresul tehnic stă la baza sporirii eficienței economice, a creșterii economice însăși în domeniul abordat, cel al prelucrărilor neconvenționale.

Apare o întrebare normală : cum se reușește ca progresul tehnic să fie eficient, când cercetările asupra mecanismului acestuia ocupă o pondere așa de mică în ansamblul activităților economice și sociale ?

Răspunsul se găsește în elementele de continuitate și stabilitate, care, dăinuie de-a lungul generațiilor de sisteme tehnice /57/. "Selecția unor elemente stabile, dotate cu însușiri deosebite de eficiență în raport cu acțiunea mediului" /57/, constituie un principiu general al proceselor evolutive ale sistemelor.

Apropiind evoluția lumii tehnice de cea organică, cercetătorul Herbert Simon scria : "...aici apar, pe intervale de timp foarte scurte, diferite combinații. Acelea care se dovedesc stabile servesc de material nou construcțiilor ulterioare." Tocmai informația privind stabilitatea unora sau altora dintre configurații, face posibilă selecția ; așa se explică viteza evoluției.

Transmiterea de-a lungul timpului a formelor intermediare

stabile, are loc printr-un proces istorico-genetic analog cu genetica biologică.

Ideea comparării evoluției lumii vii cu cea tehnică, nu este de dată recentă, ea a preocupat pe mulți cercetători, dar faptul că nu s-a ținut seama de deosebirile de esență dintre cele două domenii, a făcut ca rezultatele să nu fie satisfăcătoare.

Principiul "combinației" amintit anterior își găsește expresia în principiul "modularității" - principiul general al tehnicii, strâns legat de caracterul său genetic.

Se poate spune că tehnica modernă este o tehnică modulară, astfel orice proces, sistem tehnologic de prelucrare sau utilaj, este o combinație de elemente dispersate /13,49,63/.

Si la noul tip de prelucrare prin procedeul EERC, cu utilaje specifice, se regăsesc multe elemente comune cu celelalte utilaje de prelucrare convenționale și neconvenționale (sistemul de generare a suprafețelor, sistemul de prindere a OT, etc.), conturându-se o modularizare a acestora.

Acest principiu, duce la accentuarea continuă a specializării, aplicându-se și la procese de creație spirituală și reprezintă una din sursele eficienței progresului tehnic.

În tehnică, combinarea este opera unor inventatori, care, trebuie să identifice posibilitatea combinării și problemele care se ridică. Combinarea este supusă procesului de selecție.

În combinații, există la un moment dat principii tehnologice dominante, care, difuzează cu celelalte preexistente, așa cum sînt în prezent principiile electronicii. Aceste principii, se combină cu cele existente, pentru că, dacă sistemul tehnologic s-ar schimba din temelii, dintr-o dată, el s-ar zgudui puternic încît existența sa ar fi pusă sub semnul întrebării.

Unele părți ale sistemului tehnologic dăinuie mai mult decît sistemul în sine, menținîndu-se părțile de producție care le fabrică, în timp ce sistemul de ansamblu se schimbă, are loc de fapt, selecția.

Caracterul modular permite tocmai această mișcare treptată, produsul părților poate continua în timp ce ansamblul se schimbă sau fabricația ansamblului se continuă printr-o înlocuire succesivă a modelelor.

Deci, sistemele noi, se pot dezvolta pe baza resurselor pe care le crează cele ce se mențin, aceasta constituind o mare sursă de economii.

Eficiența fizică a progresului tehnic trebuie căutată în ca-

racterul "genetic" al sistemului tehnologic al societății.

Pentru economisirea de energie, se caută ca introducerea procedurii EERC, să permită prelucrarea materialelor metalice cu un necesar de energie mai mic decât celelalte procedee amintite.

Modificările necesare nu se pot obține fără un cost suplimentar, care constă în înlocuirea energiei cu cercetarea. Cercetarea are ca produs informația. Generarea informației este un proces costisitor, iar productivitatea mediului uman, în ceea ce privește informația nouă, este limitată. Așa apare necesitatea economisirii informației, care se încearcă a fi rezolvată prin transfer între ramuri și prin tipizare.

Starea și distribuția informației joacă un rol foarte important. În tehnică, varietatea se obține din combinația simplităților, o soluție complicată este treptat resimplificată /91, 96, 124/.

Numărul mare de componente scade siguranța în funcționare.

Aplicând matricea morfologică a ideilor la componentele utilajului de prelucrat prin EERC se pot determina o serie de noi structuri de utilaje, de unde și tendințe de dezvoltare bogate.

3.2.2. Analiza informațiilor asupra soluțiilor constructiv-funcționale existente.

Utilajele de prelucrare prezentate în subcapitolul 1.3, (fig. 1.6, fig. 1.7 și fig. 1.8) pot fi considerate utilaje reprezentative din punct de vedere a structurii lor. Activitatea de cercetare desfășurată poate fi caracterizată ca o etapă de "proiectare de rutină" /7/, în care fazele de informare și de analiză inginerescă a soluțiilor existente au avut ca scop alegerea soluției optime dintre cele cunoscute și, deci, s-a concretizat prin reproiectarea unor mașini-unelte clasice în vederea realizării tehnologiilor de prelucrare propuse (fig. 3.3.).

Cele trei utilaje au parcurs etapele de "proiectare de rutină" parțial sau total, precum se reflectă în bibliografia lucrărilor științifice sau referate în care au fost prezentate.

Această activitate de "proiectare de rutină", s-a realizat în țara noastră prin traducerea tehnicii mondiale la nivel național, însoțită de redimensionări, înlocuiri de materiale și tehnologii, adaptări la normele și standardele românești, /81, 70/, fig. 1.8. Proiectarea prototipului industrial a fost precedată de un prototip experimental /66, 67/, supus unei game largi de încercări.

După încercarea prototipului experimental (analiza parametrilor geometrici și a celor constructiv-funcționali), pe baza ob-

PROIECTAREA DE RUTINA		Fig1.6[92]	Fig1.7[58]	Fig1.8[15]	[81]	[70]
1	Informare asupra solutiilor constructiv functionale existente	NU	NU	NU	DA	DA
2	Sistematizarea informatiilor	NU	NU	NU	DA	DA
3	Analiza inginerească a solutiilor existente	NU	NU	NU	DA	DA
4	Alegerea solutiei optime	NU	NU	NU	DA	DA
5	Formularea temei de proiectare (reproiectare)	-	DA	DA	DA	DA
6	Proiectare	-	DA	DA	DA	DA
7	Prototip experimental	DA	NU	NU	DA	DA
8	Experiment	DA	NU	NU	DA	DA
9	Proiectare prototip industrial	NU	DA	DA	DA	DA
10	Incercare, omologare	NU	DA	DA	DA	DA

servării

și ana-

liziei pe

viu, s-a

trecut

la pro-

iectarea

prototi-

pului in-

dustrial

/70,126/,
pentru

Fig.3.3. Fluxul proiectării de rutină.

condiții-

le concrete ale întreprinderii. Fazele de încercare, omologare, s-au desfășurat în cadrul întreprinderii beneficiare /131/.

Utilajele tehnologice prezentate, reflectă stadiul de dezvoltare al cercetărilor anilor 1965 - 1985. Informațiile au fost sintetizate și prezentate prin caracteristicile tehnice ale câtorva utilaje, reprezentative din țară și străinătate.

Informațiile prezentate, au permis evidențierea restricțiilor existente sub aspectul concepției structurale, impunându-se abordarea unor metode creative de cercetare-proiectare.

În acest scop, a fost adoptată în continuare ca metodă de cercetare "proiectarea creativ științifico-inginerească", diferențiată de "proiectarea de rutină" din primele faze de analiză și sistematizare a informațiilor /7/.

Dacă la proiectarea de rutină, analiza soluțiilor noi existente are ca scop stabilirea celei optime și formularea pe această bază a temei de proiectare - reproiectare, proiectarea creativă-inginerească, are drept scop evidențierea lipsurilor generale din domeniul respectiv, pentru a putea formula tema de creație tehnică prin care să se elimine aceste lipsuri.

Pentru pregătirea creației tehnice, specifică proiectării inginerești, analiza inginerească a soluțiilor existente este însoțită de elaborarea diagramei și a matricii morfologice a ideilor pentru realizarea unor noi combinații de parametri.

Utilizând metodele de elaborare a ideilor, cercetătorul, realizează noua soluție, pe care o supune apoi analizei inginerești. După concluzii favorabile ale analizei inginerești și în urma experimentării modelului, se reformulează tema de proiectare propriu-zisă. Fluxul sintezei utilajelor de prelucrare prin procedeul EERC, începe cu o informare asupra soluțiilor constructiv-funcționale

existente (reviste, brevete, articole de specialitate, etc.), tabelul 3.1.

Tabelul 3.1

SURSA DE INFORMARE		REFERIRE BIBLIOGRAFICA
1	Articole de specialitate	[19,20,29,50,53,58,67,70,77,81,82,83,84,92,95,97,100,104]
2	Brevete	[47,55,114,119,122]
3	Reviste, referate, recenzii	[54,56,59,66]
4	Tratate, manuale	[10,12,13,14,46,49,63,87,93]
5	Standarde	_____

3.2.3. Sinteza informațiilor

Pe baza analizei surselor de informare efectuată, s-a trecut la sinteza informațiilor, adică, la stabilirea criteriilor de clasificare, la clasificare și la elaborarea diagramei și matricilor morfologice a ideilor.

Cercetarea efectuată, a avut în vedere analiza detaliată a cinci componente considerate în prezent componentele dinamice ale utilajelor de prelucrare prin procedeul EERC /35,36/ :

- sistemul de reglare a interstițiului tehnologic ;
- sistemul de generare a suprafețelor ;
- sistemul de poziționare OT - OP ;
- batiul mașinii de prelucrare ;
- sistemul de protecție fonică și vizuală .

Pentru vizualizarea soluțiilor constructiv-funcționale rezultate s-au conceput diagrame de idei , diagramele au fost concepute pentru fiecare componentă dinamică prezentată anterior.

Pentru sistemul de reglare a interstițiului tehnologic, diagrama ideilor are configurația din figura 3.4.

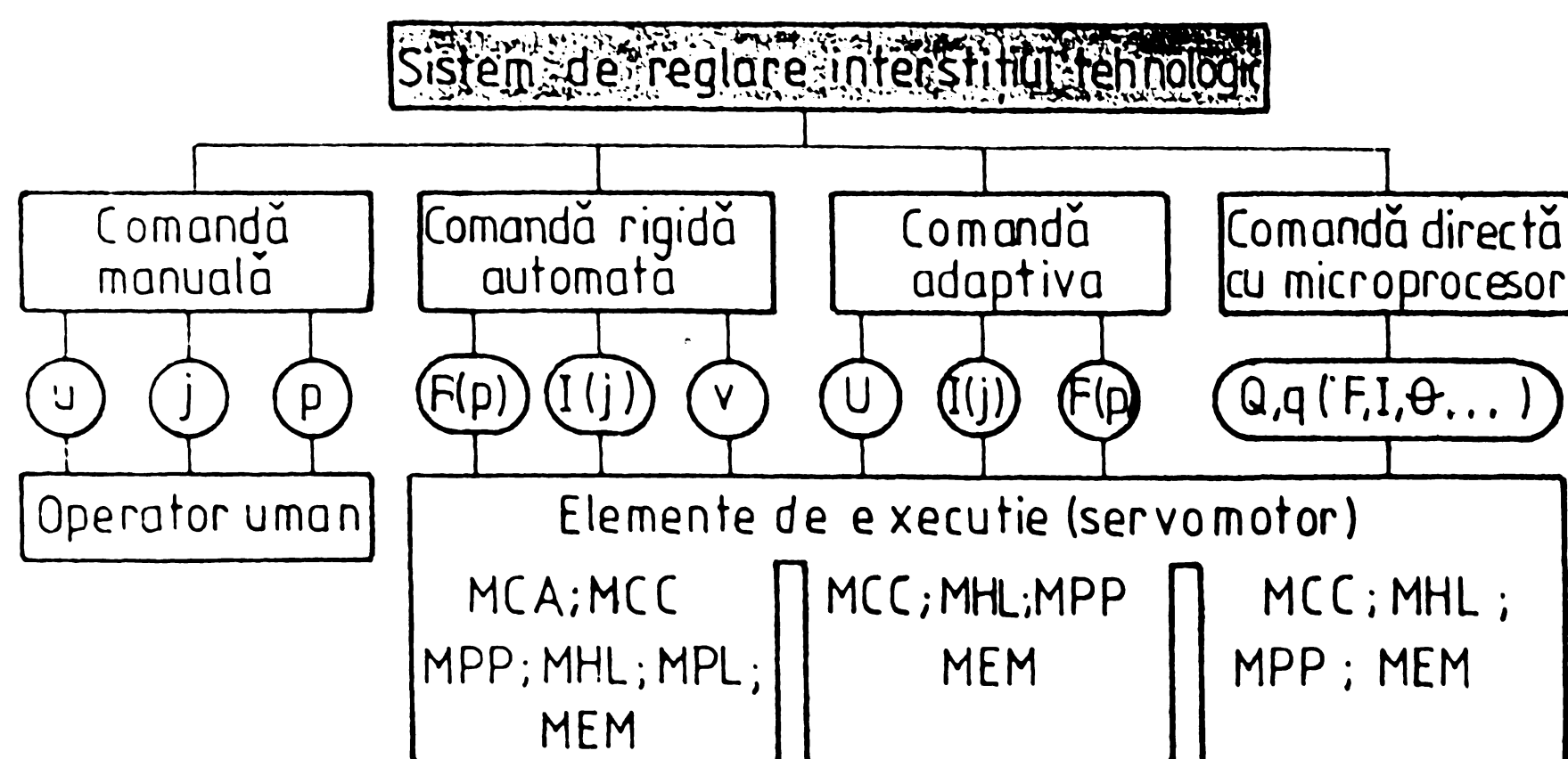


Fig.3.4. Diagrama ideilor pentru sistemul de reglare a interstițiului tehnologic.

Diagrama cuprinde domeniul de prim rang considerat, comanda procesului iar ca subdomeniu elementul de execuție. Aceste elemente, pot acționa asupra unuia din parametrii procesului sau asupra mai multor parametri printr-o funcție de răspuns/12/.

Pentru realizarea matricii morfologice s-au luat în considerare trei criterii de clasificare ;

- comanda avansului de lucru :
 - i = 1 - comandă manuală ;
 - 2 - comandă automată ;
 - 3 - comandă program (adaptivă) ;
 - 4 - comandă în timp real (microprocesor) ;
- parametrul urmărit în proces :
 - j = 1 - tensiunea de lucru, U ;
 - 2 - intensitatea (densitatea) curentului, I(j) ;
 - 3 - forța de apăsare (presiunea de contact), F(p) ;
 - 4 - viteza relativă , v ;
 - 5 - funcție obiectiv, productivitatea, Q, consumul specific de energie electrică, q, etc ;
- elementul de execuție :
 - k = 1 - motor curent alternativ, MCA ;
 - 2 - motor curent continuu, MCC ;
 - 3 - motor electric pas cu pas, MPP ;
 - 4 - motor hidraulic liniar, MHL ;
 - 5 - motor pneumatic liniar, MPL ;
 - 6 - motor electromagnetic, MEM ;
 - 7 - operator uman .

Așa cum rezultă din figura 3.4, apar $4 \times 5 \times 7 = 140$ soluții posibile , unele cunoscute și utilizate - figura 1.6 /92/, figura 1.7 /58/, figura 1.8 /115/, /81/ și /70/, altele necunoscute, utilizabile sau neutilizabile din punct de vedere tehnic.

Similar, s -a efectuat analiza următoarelor două componente de structură dinamică, sistemul de generare a suprafețelor (fig. 3.5) și sistemul de poziționare OT - OP (fig.3.6).

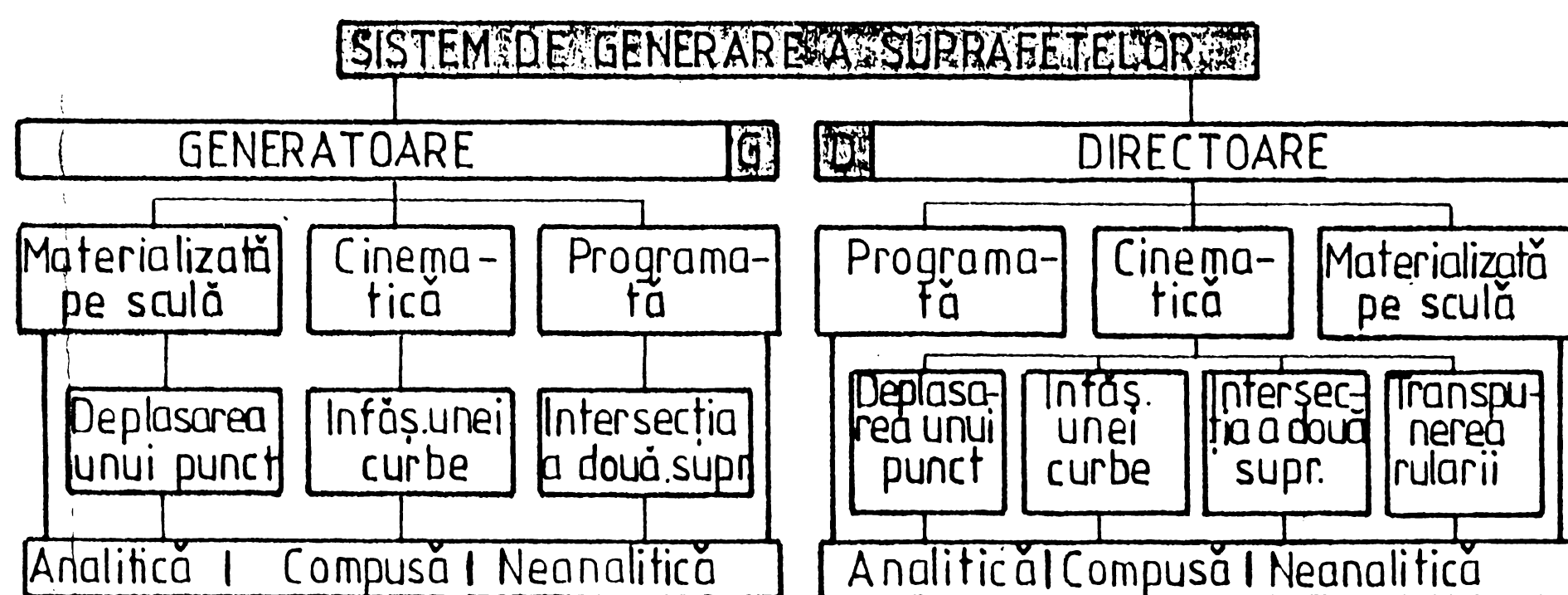


Fig.3.5. Diagrama ideilor pentru sistemul de generare a suprafețelor.

Matricea morfologică a fost concepută utilizându-se cercetările desfășurate privind codificarea și clasificarea mașinilor-unelte pe baza lanțurilor cinematice. Se consideră piesa de prelucrat ca un corp solid, limitat

de una sau mai multe suprafețe componente, în general distincte, în totalitatea lor determinând suprafața piesei. Matematic suprafața

este considerată ca o pânză fără grosime, separînd două spații distincte, fără să aparțină niciunuia /16/.

Suprafața teoretică generată, poate fi obținută prin deplasarea unei curbe în spațiu, prin formarea locului geometric al pozițiilor succesive ale curbei generatoare, G, în timpul deplasării sale, un punct oarecare al acesteia descriind curba directoare, D.

Element	k	Directie
OT	1	W_x
	2	W_y
	3	W_z
OP	4	W_x
	5	W_y
	6	W_z

Fig.3.6. Diagrama ideilor pentru sistemul de poziționare OT-OP.

Sistemul de poziționare OT - OP, se poate realiza prin deplasarea celor două elemente componente ale sistemului tehnologic pe direcțiile x, y, z, cu avansuri de poziționare w_x, w_y, w_z .

Tinînd seama de modalitățile de realizare a curbelor generatoare, G, directoare, D, și poziționare OT - OP, s-a alcătuit matricea morfologică a ideilor, care, evidențiază un număr de $15 \times 18 \times 6 = 1620$ cazuri matematic posibile de generare și poziționare

a suprafețelor.

Sistemul pentru agentul de răcire, figura 3.7, cuprinde domeniul - modul de alimentare, subdomeniul - agentul de răcire utilizat.

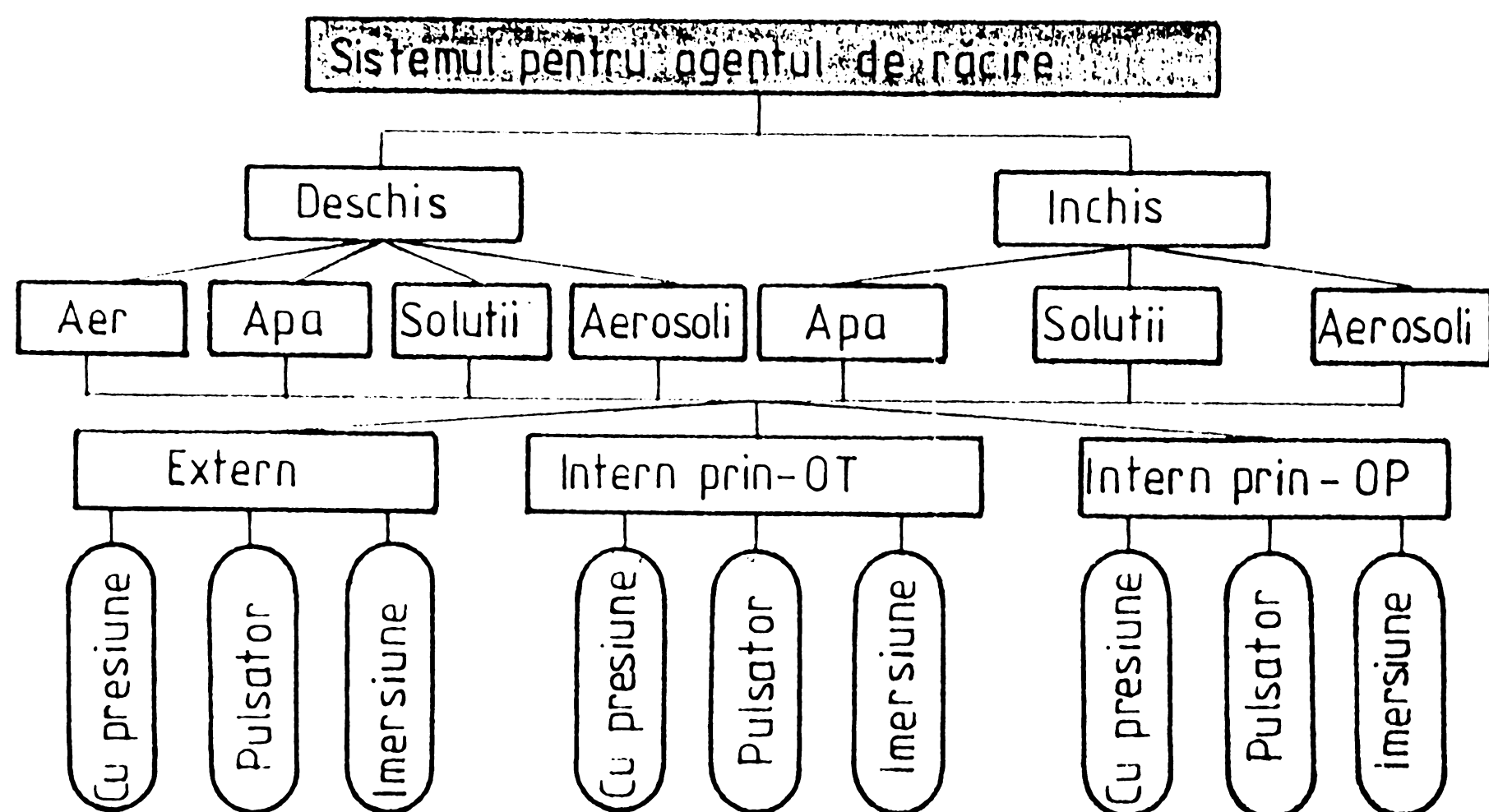


Fig.3.7. Diagrama ideilor pentru agentul de răcire.

La elaborarea matricei morfologice s-au utilizat următoarele criterii de clasificare :

- natura sistemului de alimentare :

- i = 1 - deschis;
- 2 - închis ;

- agentul de răcire utilizat :

- j = 1 - aer ;
- 2 - apă ;
- 3 - soluții apoase ;
- 4 - aerosoli ;

- modalitățile de introducere a agentului de răcire :

- k = 1 - 4 - 7 - cu presiune continuă ;
- 2 - 5 - 8 - pulsator ;
- 3 - 6 - 9 - în imersiune ;

extern, intern

prin OT, intern prin OP.

Se evidențiază un număr de $2 \times 4 \times 9 = 72$ cazuri tehnice

posibile.

Batiul mașinii de prelucrare, figura 3.8, are la bază domeniul - forma, subdomeniul - tehnologii de fabricare, la care bineînțeles, se va ține seama de materialele utilizate /13/.

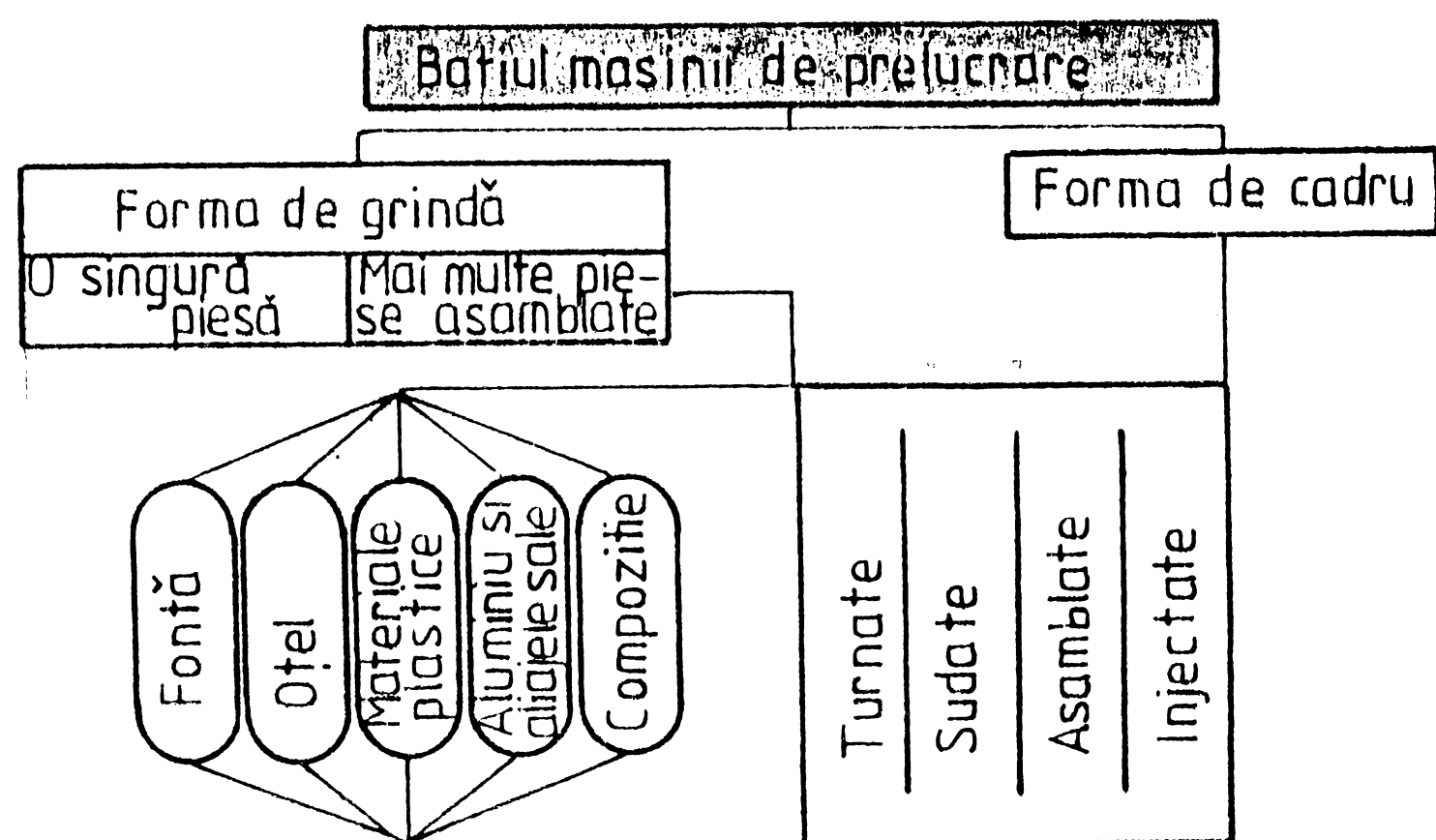


Fig. 3.8. Diagrama ideilor pentru batiul mașinii de prelucrare.

- j = 1 - turnare ;
- 2 - sudare ;
- 3 - asamblare ;
- 4 - injectare ;
- materiale utilizate la fabricare ;
- k = 1 - fontă ;
- 2 - oțel ;
- 3 - materiale plastice + insertii metalice ;
- 4 - aluminiul și aliajele sale ;
- 5 - compozite .

Se disting în acest caz un număr de $3 \times 4 \times 5 = 60$ cazuri tehnic posibile.

Ultima componentă dinamică analizată o reprezintă sistemul de protecție fonică și vizuală, avînd la bază următoarele criterii de clasificare ;

- modalitățile de etanșare a agentului de răcire ;
- i = 1 - apărătoare dirijată ;
- 2 - baie de proces ;
- 3 - incintă de lucru ;
- modalitățile de protecție fonică :
- j = 1 - protecție operator ;
- 2 - atenuare zgomot prin rigidizări ;
- 3 - panouri absorbante ;
- 4 - îmbîcsire ;
- 5 - cameră fonică ;
- modalitățile de protecție vizuală ;

Matricea morfologică, a fost construită avînd la bază trei criterii de clasificare :

- forma constructivă a batiului :

i = 1, 2, - formă de grinzi, dintr-o singură piesă, mai multe piese asamblate ;

3 - formă de cadru ;

- tehnologia posibilă de fabricare :

- k = 1 - protecție individuală ;
- 2 - panouri de protecție ;
- 3 - cameră obscură .

In acest ultim caz, au rezultat un număr de $3 \times 5 \times 3 = 45$ cazuri tehnice posibile .

Criteriile de clasificare, în cazul utilajului tehnologic de prelucrare prin procedeul EERC, s-au dedus pe baza componentelor dinamice, în accepțiunea prezentată în figura 3.9.

COMPONENTELE DINAMICE ALE UTILAJULUI TEHNOLOGIC		MATRICEA IDEILOR	CRITERII DE CLASIFICARE A COMPONENT. DINAMICE	
1	Sistemul de reglare a interstitiului tehnologic	$M_{1,1} = [\Delta_{1ijk}]$ $i,j,k=1..nmp$	$i=1,2..4$	Comanda utilajului
			$j=1,2..5$	Marimea reglată
			$k=1,2..7$	Elemente de exec.
2	Sistemul de generare și poziționare a supraf.	$M_{2,2} = [\Delta_{2ijk}]$ $i,j,k=1..nmp$	$i=1,2..18$	G Generarea
			$j=1,2..15$	D suprafetelor
			$k=1,2..6$	Poziționarea OT-OP
3	Sistemul masinii de prelucrare	$M_{3,3} = [\Delta_{3ijk}]$ $i,j,k=1..nmp$	$i=1,2,3$	Forma construct.
			$j=1,2..4$	Tehnolog. de fabric.
			$k=1,2..5$	Mater. utilizate
4	Sistemul pentru agentul de răcire	$M_{4,4} = [\Delta_{4ijk}]$ $i,j,k=1..nmp$	$i=1,2$	Sistemul de alim.
			$j=1,2..4$	Agentul de răcire
			$k=1,2..9$	Modalit. de introd.
5	Sistemul de protecție fonică și vizuală	$M_{5,5} = [\Delta_{5ijk}]$ $i,j,k=1..nmp$	$i=1,2,3$	Modalități de etans.
			$j=1,2..5$	Protecție fonică
			$k=1,2,3$	Protecție vizuală

Existența interdependenței dintre componentele dinamice ale utilajului tehnologic și criteriile de clasificare ale acestora, este marcată prin matricile morfologice $M_{1,1}, M_{2,2}, \dots, M_{5,5}$ care, pot fi prezentate într-o formă generală, astfel

Fig.3.9. Structura dinamică a utilajului tehnologic.

$$\begin{aligned}
 M_{1,1} = / \Delta_{1,i,j,k} / \left| \begin{array}{l} i = 1 \dots n \\ j = 1 \dots m \\ k = 1 \dots p \end{array} \right. , \quad M_{2,2} = / \Delta_{2,i,j,k} / \left| \begin{array}{l} i = 1 \dots n \\ j = 1 \dots m \\ k = 1 \dots p \end{array} \right. , \dots \\
 M_{5,5} = / \Delta_{5,i,j,k} / \left| \begin{array}{l} i = 1 \dots n \\ j = 1 \dots m \\ k = 1 \dots p \end{array} \right. \quad .
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

Semnificația fizică a celor cinci matrice morfologice, este cuprinsă în cele cinci componente dinamice ale utilajului tehnologic. Cu certitudine, numărul componentelor dinamice, nu este fixat la cinci și în viitor există posibilitatea creșterii, sau de ce nu, a descreșterii numărului componentelor dinamice pentru procedeul EERC.

In matricile prezentate, elementele i, j, k, corespund criteriilor de clasificare pentru fiecare componentă dinamică a utilajului tehnologic, iar domeniul de variație ($i = 1, 2, \dots, n$, $j = 1, 2, \dots, m$,

Tabelul 32

C	Fig.1.7[58],Cod	Fig. 1.8[15],Cod	[81],Cod	[70],Cod
$\Delta 1_{ijk}$	C.rigidă avansul de lucru MCA	Ç.automată tensiune MHL	C.automată tensiune MCC	C.manuală tensiune operat.uman
$\Delta 2_{ijk}$	depl.punct. analitica fix-OP	depl.punct. analitica fix-OP	depl.punct. analitica fix-OP	depl.punct. analitica fix-OP
$\Delta 3_{ijk}$	grinzi ans turnare fontă	grindă sudare otel	grindă sudare otel	grindă sudare otel
$\Delta 4_{ijk}$	deschis apa extern	deschis aer int. prin OP	deschis apa extern	deschis apa extern
$\Delta 5_{ijk}$	aparatori dir. pr. operator pr.individ	aparatori dir. pr. operator pr.individ.	baie pr. operator pr.individ.	baie pr. operator pr.individ.

$k = 1, 2 \dots p$), caracterizează numărul nivelelor posibile adoptate pentru fiecare criteriu luat în considerare. Se generează în acest mod un număr mare de variante de utilaje de prelucrare, definit prin combinațiile posibile din fie-

care matrice :

$$\Delta V_{i,j,k} \begin{cases} V = 1 \dots 5 \\ i, j, k = 1, 2 \dots n, m, p. \end{cases} \quad (3.2)$$

Tinând seama de componentele dinamice ale utilajului tehnologic se formează V_r variante rezultate :

$$V_r = \prod_{v=1}^5 / \Delta V_{i,j,k} / \quad (3.3)$$

în care :

$$r = C_{(ixjxk)}^J \quad (3.4)$$

In matricile (3.1), semnificația fizică a elementelor $\Delta V_{i,j,k}$ este redată în tabelul 3.2, pentru utilajele reprezentative din literatura de specialitate care definesc stadiul actual al utilajelor tehnologice.

3.2.4. Selectarea tehnico-economică asistată de calculator a sistemului tehnologic

Numărul foarte mare de variante V_r , impune operarea cu mijloace electronice de calcul în vederea analizei tuturor variantelor existente. Analiza atentă a fiecărei matrice morfologice, relevă existența unor soluții cunoscute și utilizate, pe de o parte, pe de altă parte, existența altor soluții necunoscute utilizabile sau neutilizabile.

În acest sens, se impune deci, selectarea variantelor din punct

de vedere tehnic și economic, testarea componentelor dinamice ale sistemului tehnologic prin proiectarea și experimentarea prototipului (varianta tehnico-economică acceptată) rezultat (fig. 3.10).

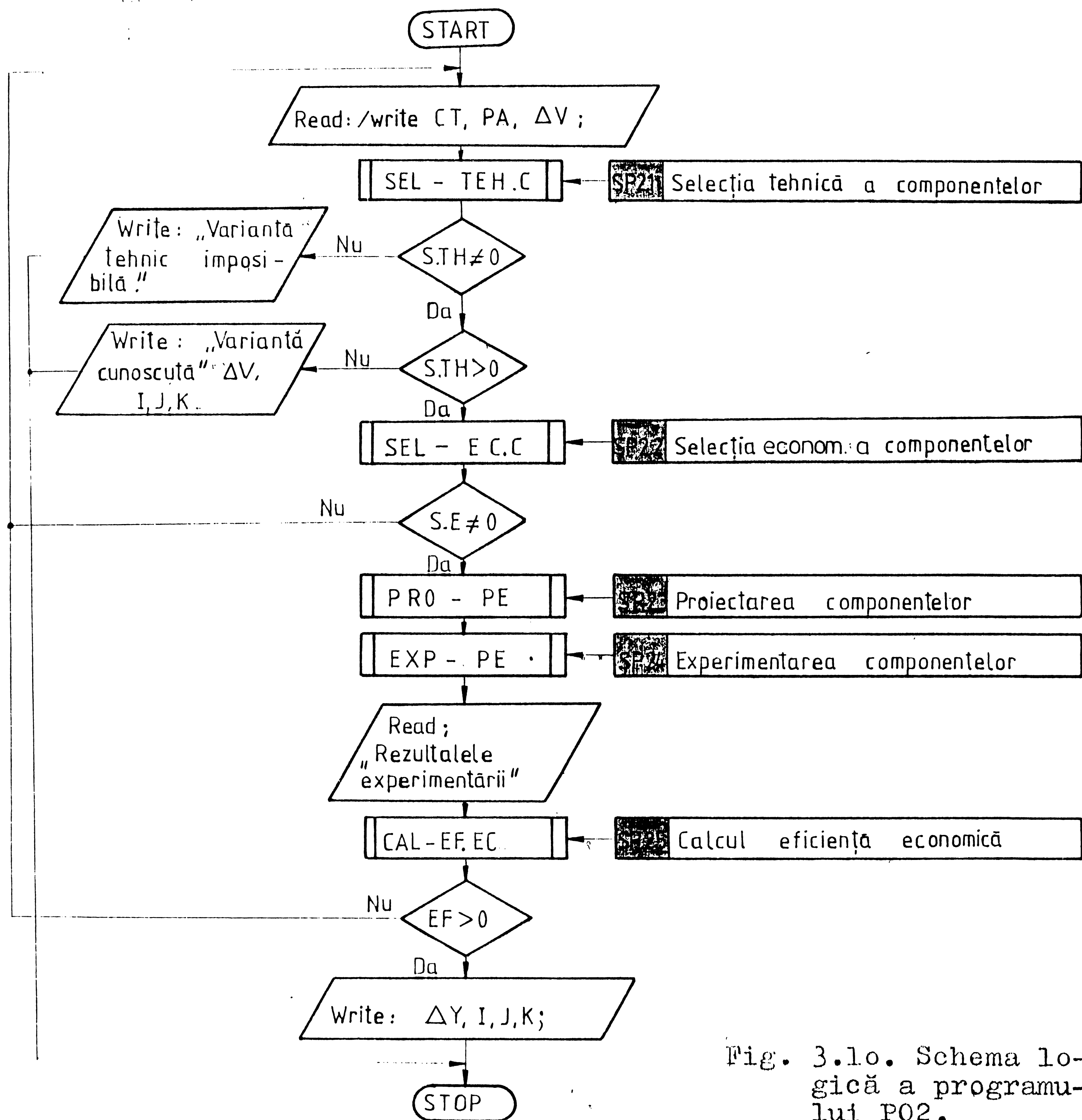


Fig. 3.10. Schema logică a programului P02.

Datele inițiale necesare selectării tehnico-economice a componentelor dinamice ale utilajului tehnologic, sînt reprezentate de :

- condițiile tehnice prescrise în desenul de execuție al piesei, CT ;

- producția anuală preconizată, PA ;
- matricele morfologice specifice componentelor dinamice ale utilajului tehnologic, ΔV .

Programul de calcul cuprinde cinci subprograme SP 21....SP 25 ;

- SP 2.1, Selecția tehnică a componentelor noi, tehnic posibile, de variantele cunoscute și de cele necunoscute dar în prezent teh-

nic imposibile ;

- SP 2.2, selecția economică a componentelor dinamice, printr-o analiză atentă a costului, în contextul posibilităților de realizare constructivă și tehnologică actuală ;

- SP 2.3, proiectarea constructivă a prototipului tehnologic ;

- SP 2.4, experimentarea componentelor dinamice și introducerea rezultatelor experimentării în program în vederea prelucrării lor ;

- SP 2.5, calculul eficienței economice pe prototip .

În final, sînt tipărite soluțiile constructive rezultate prin testarea tehnico-economică.

3.3. Baza de date impusă sistemului tehnologic

Cercetarea științifică în domeniul tehnologiilor neconvenționale, urmărește în principal studiul fenomenelor care au loc în sistemul tehnologic al prelucrării prin eroziune (electrică și electrochimică, chimică abrazivă ultrasonică, etc.), precum și aspecte legate de integrarea rezultatelor la tehnologiile de prelucrare în sistemele de producție ale întreprinderilor /28/.

Cercetarea științifică cuprinde ca unitate indispensabilă studiile teoretice și cercetarea experimentală.

Studiile teoretice efectuate în prezenta lucrare, au ca scop direct, stabilirea interdependenței dintre diferiții parametri ai procesului eroziv și a legilor care stau la baza fenomenelor utilizînd aparatul matematic și realizările științei în domeniul fizicii și tehnologiei materialelor, (vezi capitolul 2).

Cercetările experimentale desfășurate au urmărit două aspecte majore :

- verificarea adevărului ipotezelor și teoriilor care au stat la baza studiilor referitoare la procesele cercetate ;

- investigarea unor fenomene neaccesibile pe cale teoretică datorită complexității acestora și datorită necunoașterii în suficientă măsură a unor legi care determină evoluția fenomenului cercetat.

Cercetările în domeniul tehnologiilor neconvenționale au vizat în principal două aspecte ;

- sistemul tehnologic de prelucrare (elementele sistemului) ;

- procesele care au loc în sistemul tehnologic (stabilirea regimului de prelucrare, prelucrabilitatea materialelor).

Complexitatea sistemului tehnologic și a proceselor care au

loc în acest sistem, impun pondere ridicată cercetării experimentale, aale certă de obținere a unor rezultate satisfăcătoare necesare utilizării și perfecționării tehnologiilor și echipamentelor tehnologice neconvenționale.

Prelucrarea rapidă și eficientă a unui volum mare de informații în cadrul cercetării experimentale, impune întocmirea pentru domeniul cercetat a bazei de date. Se înțelege prin bază de date a sistemului tehnologic de prelucrare, mulțimea centralizată de date, organizată în scopul optimizării prelucrării acestora în contextul studiului sistemului tehnologic și a proceselor care au loc în sistem.

Datele necesare întocmirii bazei de date specifice procesului de prelucrare prin eroziune electrică cu rupere de contact, sînt direct legate de elementele sistemului tehnologic, definite prin cele două echipamente de bază:

- echipamentul de generare a agentului eroziv (sursa de alimentare) ;

- echipamentul de formare finală și poziționare a agentului eroziv la suprafața de prelucrat (utilajul tehnologic).

Prezentarea matricială a informațiilor (caracteristicilor) sistemului tehnologic, facilitează prelucrarea datelor prin matrici boolene citite de mijloacele electronice de calcul.

3.3.1. Baza de date a echipamentului de generare a agentului eroziv, EG"AE"

Sursa de alimentare, se caracterizează prin domeniul tensiunilor și al intensităților de curent generatoare de energie de efect, la suprafața de interacțiune OT - OP /43/.

Literatura de specialitate recomandă surse de alimentare inductive, caracterizate de caracteristici externe rigid-coborîtoare, care, pot determina în proces tensiuni de $8 \div 32$ V și curenți care asigură densități de curent ridicate ($j > 5$ A/mm²).

Astfel de surse, pot fi caracterizate prin tensiunea de mers în gol, U_{20i} și de intensitatea curentului, I_{2j} , deci tocmai prin caracteristica externă, $S_{i,j}$.

Unei surse de alimentare oarecare i , se poate asocia în aceste condiții o matrice denumită, matricea sursei de alimentare :

$$\left. \begin{aligned} /S_{i,j} / &= \frac{U_{2oi}}{I_{2j}} \\ i &= 1 \dots n \\ j &= 1 \dots m \end{aligned} \right| = \begin{vmatrix} S_{1,1} & S_{1,2} & \dots & S_{1,m} \\ S_{2,1} & S_{2,2} & \dots & S_{2,m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{n,1} & S_{n,2} & \dots & S_{n,m} \end{vmatrix}, \quad (3.5)$$

În care, liniile $i = 1 \dots n$, corespund domeniului tensiunilor de mers în gol U_{2oi} , iar coloanele $j = 1 \dots m$, corespund domeniului intensităților de curent I_{2j} , determinat prin diapazonul tensiunilor de proces pe caracteristicile externe ale sursei. În matricea (3.5), semnificația elementelor $S_{i,j}$ este aceea a unor rapoarte dintre tensiunile de mers în gol ale sursei de alimentare și intensitățile rezultate prin diapazonul tensiunilor de proces.

Transpunerea domeniului tensiunilor de proces, U_p , se realizează prin diapazonul tensiunilor TD(AI - RC), definit matematic de relația (3.6) :

$$\left. \begin{aligned} \frac{U_{pi}}{U_{2oi}} &= (0,6 \div 0,9) \\ i &= 1 \dots n \end{aligned} \right|, \quad U_{2oi} = \frac{U_{pi}}{0,6 \div 0,9} \quad (3.6)$$

$$U_{pi} \in /12 \div 32 \text{ V}/$$

Tensiunea de proces U_{pi} , se adoptă astfel încît să asigure energia de efect, generatoare și întreținătoare a agentului eroziv. Cercetările desfășurate, au relevat domeniul optim cuprins între 12 și 32 V.

Determinarea domeniului intensităților de curent $I_{2j} \in /I_{2min} \div I_{2max} /$, se realizează prin aria maximă de prelucrare A_{max} și domeniul densităților de curent ;

$$\left. \begin{aligned} J_j &= \frac{I_{2j}}{A_{max}} \\ J_j &\geq 5 \text{ A/mm}^2 \end{aligned} \right| j = 1 \dots m, \quad I_{2j} = A_{max} \cdot J_j \quad (3.7)$$

În vederea operării cu mijloace electronice de calcul, matricea poate fi pusă sub formă :

$$\left. \begin{aligned} /S_{i,j} / \\ i &= 1 \dots n \\ j &= 1 \dots m \end{aligned} \right| = \begin{vmatrix} 1 & 1 \dots 1 \\ 1 & 0 \dots 1 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & 0 \dots 1 \end{vmatrix}, \quad (3.8)$$

În care, s-a notat cu 1 prezența raportului $\frac{U_{2o}}{I_2}$ și cu 0 absența

acesteia în cadrul sursei de alimentare. Valorile rapoartelor $\frac{U_{2oi}}{I_{2j}}$, se pot memora grafic sau analitic în subrutine (memorii auxiliare) ale calculatorului, prin date sub formă de diagrame, tabele, legi de variație, etc.

3.3.2. Baza de date a echipamentului de formare finală și poziționare a agentului eroziv la suprafața obiectului de prelucrare, EFF.

Utilajul de prelucrare, este caracterizat de viteza relativă pe care o generează între OT și OP. Acest parametru, este determinant în asigurarea stabilității procesului și asigură echilibrul dintre procesele elementare erozive. Utilajului de prelucrare, i se poate asocia o matrice, denumită matricea vitezei relative v_r :

$$\left. \begin{matrix} /v_{ri,j} / \\ i = 1 \dots n \\ j = 1 \dots m \end{matrix} \right\} = \begin{vmatrix} v_{r1,1} & v_{r1,2} & \dots & v_{r1,m} \\ v_{r2,1} & v_{r2,2} & \dots & v_{r2,m} \\ \vdots & & & \\ \vdots & & & \\ v_{rn,1} & v_{rn,2} & \dots & v_{rn,m} \end{vmatrix}, \quad (3.9)$$

în care, liniile $i = 1 \dots n$, corespund vitezei de rotație sau frecvenței de vibrație a OP, iar coloanele $j = 1 \dots m$, corespund vitezei de rotație sau frecvenței de vibrație a OT. În această matrice, semnificația elementelor $v_{ri,j}$ este aceea a mărimii vitezei relative, care, respectă restricția fenomenologică de desfășurare a procesului eroziv, determinând și limitarea în timp a energiei de efect (putere electrică), în spațiu de lucru elementar, prin stabilirea duratei de contact și ulterior imprimarea caracterului de descărcare prin arc nestăționar.

$$v_{ri,j} \in /10 \dots 50 \text{ m/s} / \quad (3.10)$$

Si această matrice, poate fi pusă sub forma :

$$\left. \begin{matrix} /v_r i,j / \\ i = 1 \dots n \\ j = 1 \dots m \end{matrix} \right\} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & \dots & 1 \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & & & \\ \vdots & & & \\ 0 & 1 & \dots & 1 \end{vmatrix}, \quad (3.11)$$

în care, s-a notat cu 1 - prezența vitezei relative pe mașina de prelucrare și cu 0 - absența vitezei relative pe aceeași mașină de prelucrare.

Alături de parametrii enumerați, baza de date, trebuie să cuprindă și perechea de materiale OT și OP, factor determinant în caracterizarea prelucrabilității procedeului de prelucrare prin procedeul EERC /43/.

Perechii de materiale OT și OP utilizate în proces, i se poate asocia matricea materialelor definită prin :

$$/m_{i,j}/ = \frac{m_{OTi}}{m_{OPj}} \left| \begin{array}{l} i = 1 \dots n \\ j = 1 \dots m \end{array} \right. \left\| \begin{array}{cccc} m_{1,1} & m_{1,2} & \dots & m_{1,m} \\ m_{2,1} & m_{2,2} & \dots & m_{2,m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ m_{n,1} & m_{n,2} & \dots & m_{n,m} \end{array} \right\|, \quad (3.12)$$

în care, liniile $i = 1 \dots n$, corespund materialelor OT recomandate de literatura de specialitate pentru procesul EERC, iar coloanele $j = 1 \dots m$, corespund materialelor OP, posibil de prelucrat. Semnificația elementelor $m_{i,j}$ este aceea a unor rapoarte perechi de materiale m_{OT} / m_{OP} , care respectă următoarele recomandări :

- m_{OT} , materiale cu rezistență ohmică scăzută (conductibilitate electrică ridicată), alamă, aluminiu, fontă, oțel obișnuit ;
- m_{OP} , sînt materialele supuse prelucrării, se poate completa aici recomandarea privind materialele cu nivel de prelucrabilitate ridicată, materiale termorezistente (termoconductibilitate relativ scăzută), cu rezistență ohmică ridicată (oțeluri înalt aliate, oțeluri manganoase, fontă, etc).

Matricea perechii de materiale OT și OP, poate fi pusă sub forma :

$$/m_{i,j}/ \left| \begin{array}{l} i = 1 \dots n \\ j = 1 \dots m \end{array} \right. = \left\| \begin{array}{cccc} 1 & 1 & \dots & 0 \\ 1 & 0 & \dots & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 \end{array} \right\|, \quad (3.13)$$

în vederea operării cu mijloace electronice de calcul. În această matrice, s-a notat cu 1 prezența perechii de materiale OT și OP și cu 0, absența perechii de materiale OT și OP, datorată nivelului scăzut de prelucrabilitate a tandemului de materiale.

Valorile rapoartelor m_{OT} / m_{OP} pot fi memorate grafic sau analitic, prin asocierea unei valori numerice cuprinse în domeniul $0 \div 1$, corespunzător nivelului de prelucrabilitate.

Pentru o sursă de alimentare dată și pentru un utilaj de prelucrare considerat, se poate întocmi o matrice specifică, ce definește o formă nouă de exprimare tehnologică - viteza de erodare, v_e :

$$v_{eijk} = \left(\frac{F_i}{I_{2j}} \right)_k \quad \left| \begin{array}{l} i = 1 \dots n \\ j = 1 \dots m \\ k = 1 \dots p \end{array} \right. = \left\| \begin{array}{cccc} v_{e1,1} & v_{e1,2} & \dots & v_{e1,m} \\ v_{e2,1} & v_{e2,2} & \dots & v_{e2,m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{en,1} & v_{en,2} & \dots & v_{en,m} \end{array} \right\|, \quad (3.14)$$

în care, liniile $i = 1 \dots n$, corespund valorilor forțelor de apăsare F_i , care determină prin domeniul presiunilor specifice p_i , diapazonul tensiunilor în proces. Coloanele $j = 1 \dots m$, corespund intensităților de curent rezultate pe curbele caracteristice ale sursei de alimentare. Adâncimile $k = 1 \dots p$, corespund tensiunilor de mers în gol a sursei de alimentare, tensiuni determinate prin relația (3.6).

Determinarea domeniului forțelor de apăsare $F_i \in [F_{\min} \div F_{\max}]$, se realizează prin aria maximă de prelucrare A_{\max} și domeniul presiunilor specifice :

$$\left| \begin{array}{l} p_i |_{i=1 \dots n} = \frac{F_i}{A_{\max}}, \quad F_i = A_{\max} \cdot p_i \\ p_i = [1 \dots 10] \text{ M Pa} \end{array} \right. \quad (3.15)$$

Determinarea valorilor intensității curentului I_j , se realizează prin intersecția curbelor caracteristice ale sursei de alimentare $h_{i,j}$ cu tensiunile de proces U_{pi} ;

$$\left| \begin{array}{l} h_{i,j} = f_{i,j}(U, I) \\ U_{pi} = [12 \div 32] \text{ V} \end{array} \right| \quad \left| \begin{array}{l} i = 1 \dots n \\ j = 1 \dots m \end{array} \right. \quad (3.16)$$

În matricea vitezei de erodare, semnificația elementelor $v_{ei,j,k}$ este aceea a unor rapoarte forță de apăsare / intensitate de curent, $(F_i / I_j)_k$, determinate pentru tensiunile de mers în gol ale sursei de alimentare.

În vederea operării cu mijloace electronice de calcul matricea vitezei de erodare poate fi pusă sub forma ;

$$\left| \begin{array}{l} v_{ei,j,k} \\ i = 1 \dots n \\ j = 1 \dots m \\ k = 1 \dots p \end{array} \right. = \left\| \begin{array}{cccc} 1 & 1 & \dots & 1 \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 0 & \dots & 1 \end{array} \right\|, \quad (3.17)$$

în care, s-a notat cu 1 - prezența raportului $(F_i / I_j)_k$ în sistemul tehnologic dat și cu 0, absența raportului amintit. Valorile raportului pot fi memorate grafic sau analitic, prin curbe definite de

coordonatele $(F_i - I_j)_k$.

Rezultatul oricărei prelucrări, prin procedeul EERC, cu o sursă de alimentare și un utilaj tehnologic dat, într-un sistem tehnologic dat, poate fi apreciat printr-un indicator tehnic - economic.

Se poate deci defini pentru sistemul tehnologic dat o matrice spațială a modelelor matematice :

$$\begin{array}{l} / M_{i,j,k} / \\ \begin{array}{l} i = 1 \dots n \\ j = 1 \dots m \\ k = 1 \dots p \end{array} \end{array} \quad (3.18)$$

în care, liniile $i = 1 \dots n$, corespund criteriului de apreciere a prelucrabilității procedurii de prelucrare, coloanele $j=1 \dots m$, corespund caracteristicilor sistemului tehnologic dat, iar adâncimile $k = 1 \dots p$, corespund perechii de materiale $m_{i,j}$ analizate. Semnificația elementelor $M_{i,j,k}$ este aceea a unor modele matematice pentru indicatorii tehnico-economici cunoscuți, determinați într-un sistem tehnologic dat $(S_{i,j}; v_{e i,j}; v_{r i,j})$, pentru perechi de materiale $m_{i,j}$.

Si această matrice, poate fi pusă sub forma unei matrici booleene, în vederea operării cu mijloace electronice de calcul. S-a notat cu 1, prezența modelului matematic și cu 0, absența modelului matematic, pentru sistemul și procesul tehnologic dat.

Existența bazei de date pentru un proces tehnologic dat, permite adoptarea deciziei de prelucrare a unui semifabricat oarecare de serie $A_{i,j}$ în ordinea următoare :

1, dacă nu există modelul matematic al prelucrării, se aleg parametrii tehnologici de proces, în limitele recomandate de literatura de specialitate, cu respectarea restricțiilor fenomenologice amintite ;

2, dacă există modelul matematic, este posibilă optimizarea parametrilor tehnologici de proces, în cadrul sistemului tehnologic existent.

3.4. Proiectarea asistată de calculator a sistemului tehnologic de prelucrare

Proiectarea asistată de calculator se impune în cele trei cazuri în care se urmărește determinarea sistemului tehnologic de prelucrare prin eroziune electrică cu rupere de contact. Aceste cazuri sînt :

1 - se preconizează aplicarea procedurii EERC în cadrul tehnologiilor de uzinare ;

2 - există aplicații industriale ale procedurii EERC în cadrul tehnologiilor de uzinare ;

3 - se urmărește extinderea și optimizarea aplicațiilor industriale ale procedurii EERC în cadrul tehnologiilor de uzinare.

Datele necesare proiectării sistemului tehnologic sînt reprezentate de ansamblul condițiilor tehnice prescrise în desenul de execuție al piesei. Acestea sînt :

- materialul piesei ;
- dimensiuni și toleranțe dimensionale ;
- condiția de formă geometrică și toleranțe de formă geometrică ;
- condiții de poziție reciprocă și toleranțe de poziție reciprocă ;
- calitatea suprafeței.

Aceste informații se impun a fi completate cu date privind operația la care se va aplica procedura EERC.

Cele două surse de informații determină datele inițiale ;

- materialul piesei, m_{op} ;
- secțiunea de prelucrare, A ;
- condițiile cinematice de generare a suprafeței (suprafețelor).

Proiectarea sistemului tehnologic de prelucrare, se poate realiza în aceste condiții în baza programului de calcul P 03. Schema logică a programului se prezintă în figura 3.11. Acesta, a fost conceput astfel ca evenimentele importante ale calculului matematic să fie tipărite pentru verificare și interpretare.

Programul de calcul P 03 cuprinde 12 subprograme SP 3.1... ..SP 3.12 care relevă gradul ridicat de complexitate a analizei tehnologice efectuate. Logica de desfășurare este relevată în continuare prin conținutul subprogramelor:

- SP 3.1, determinarea și întocmirea bazei de date ;
- SP 3.2, determinarea materialului obiectului de transfer (OT) utilizînd informațiile din baza de date ;
- PR, verificarea prelucrabilității materialului piesei utilizînd baze de date ;
- SP 3.3, verificarea tipurilor de surse de alimentare existente prin analiza comparativă a parametrilor sursei cu cele din baza de date ;

- SA, SP 3.4, proiectarea sursei de alimentare utilizând informațiile din baza de date ;

- SP 3.5, verificarea existenței utilajului tehnologic prin analiza parametrilor utilajului cu cele din baza de date ;

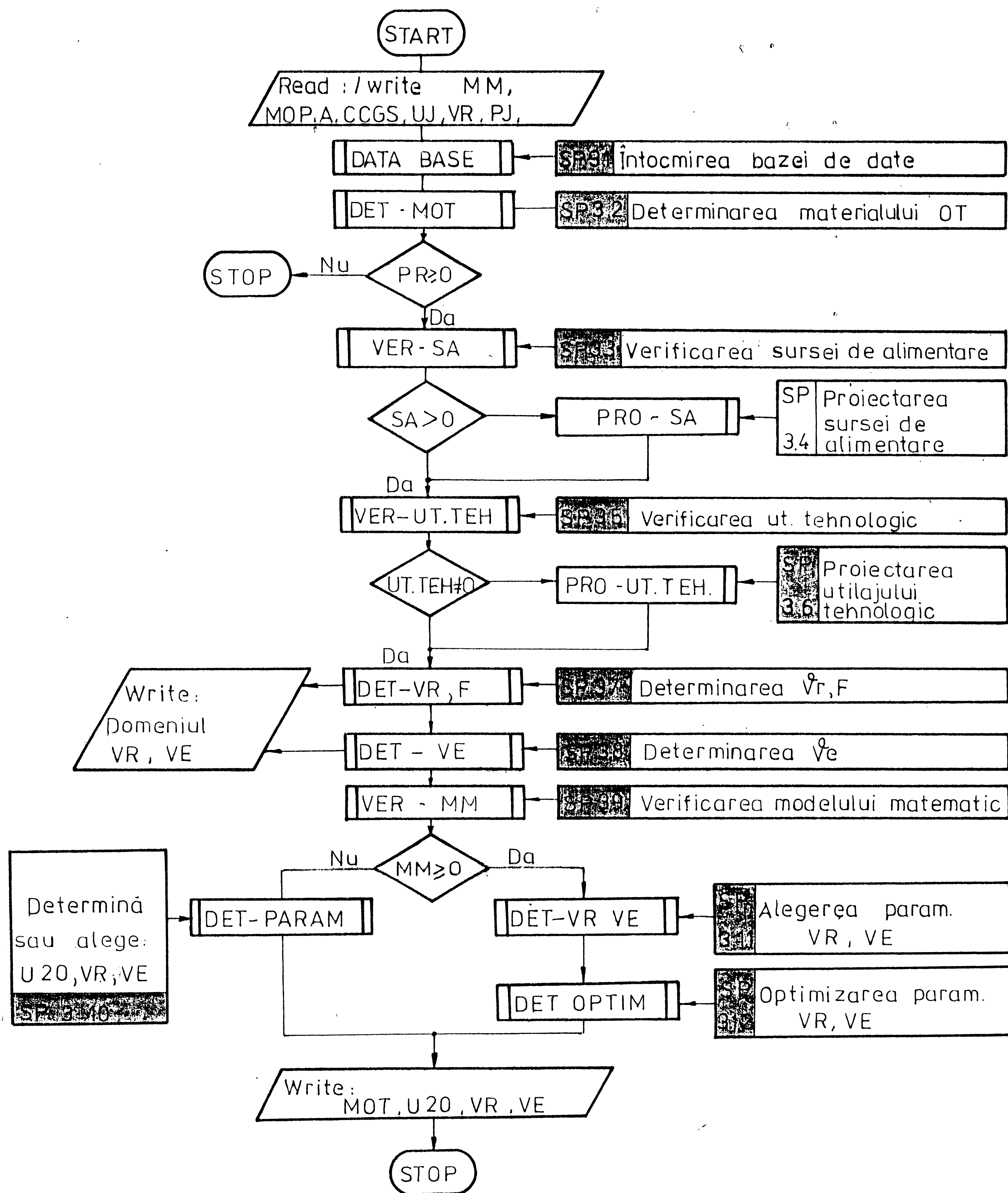


Fig. 3.11. Schema logică a programului P03 .

- UT - TEH, SP 3.6, proiectarea utilajului tehnologic;
- SP 3.7, determinarea vitezei relative, forței de apăsare, realizabile pe utilajul proiectat sau existent ;
- SP 3.8, determinarea vitezei de erodare utilizând baza de date, sursa de alimentare și utilajul tehnologic, tipărirea domeniului de variație a VR, VE ;
- MM, SP 3.9, verificarea existenței modelelor matematice de prelucrare prin procedeul EERC ;
- SP 3.10, în lipsa modelului matematic, alegerea tensiunii de mers în gol a sursei U_{20} , vitezei de erodare VE și vitezei relative VR ;
- SP 3.11, în prezența modelului matematic alegerea parametrilor vitezei de erodare VE și vitezei relative VR ;
- SP 3.12, optimizarea parametrilor tehnologici, viteza de erodare VE și viteza relativă VR.

4. DETERMINAREA TEHNOLOGIEI DE PRELUCRARE, PRIN MODELAREA MATEMATICA A PROCESULUI DE PRELUCRARE DIMENSIONALA PRIN EROZIUNE ELECTRICA CU RUPERE DE CONTACT.

Modelarea, reprezintă metoda de studiere a obiectivelor (proceselor) tehnologice, în cadrul căreia, se experimentează asupra unui model fizic iar rezultatele cercetării se transpun cantitativ asupra modelului real. Astfel, pe baza rezultatelor obținute pe modelul fizic, se prevede cantitativ comportarea modelului real, în condițiile de lucru industriale. Transferarea rezultatelor obținute pe modelul fizic, asupra modelului real, nu va exprima în mod obligatoriu o egalitate directă între parametrii originalului și ai modelului, ci este suficient să se obțină regulile de calcul a parametrilor originalului /106/.

În procesul modelării se impune respectarea a două principii :

- experimentul pe modelul fizic trebuie să fie mai simplu, mai rapid, cu alte cuvinte mai economic, decât experimentul pe modelul real ;

- trebuie cunoscută modalitatea de calcul a parametrilor pe modelul real, pe baza studiilor făcute pe modelul fizic. Nerespectarea acestui principiu, împiedică valorificarea rezultatelor cercetării, chiar dacă aceasta a fost realizată în condiții foarte bune.

Modelul matematic se formează după definirea modelului fizic, pe baza reprezentărilor fizice, printr-o descriere cantitativă a acestuia, prin totalitatea structurilor matematice, ecuații, inegalități, precum și tabele grafice, etc. Această descriere este de fapt definiția modelului matematic, al obiectului supus cercetării.

Utilizarea tehnicii de calcul, este considerată ca o modalitate de modelare, ce poartă denumirea de modelare matematică. Alături de ea, modelarea fizică, se bazează pe identitatea sau asemănarea fizică dintre model și original, iar la baza construcției modelului stau legile similitudinii.

Cele două metode de modelare nu trebuie opuse una alteia, ci dimpotrivă, în diferitele etape ale rezolvării cercetării, se apelează consecutiv la ordinea care se dovedește mai eficientă.

Pentru modelarea procesului de prelucrare prin procedeul

EERC, s-a adoptat varianta utilizării metodelor statistice, de prelucrarea datelor experimentale culese. Acestea, conferă eficiență ridicată procesului de cercetare, în contextul complexității procesului tehnologic de prelucrare, datorat unei lipse acute de informații din literatura de specialitate, privind modelul matematic al procesului.

Se parcurg etapele:

- proiectarea modelului experimental ;
- întocmirea bazei de date a modelului experimental ;
- premodelarea, prin experiment preliminar, rezultând informații apriorice despre proces ;
- modelarea propriu-zisă prin experimentul factorial, urmată de prelucrarea datelor experimentale, cu rezultat direct obținerea ecuației care definește modelul matematic al procesului.

4.1. Modelul experimental pentru determinarea tehnologiei de prelucrare

Cercetarea experimentală a fenomenului fizic la prelucrarea prin procedeul EERC, a evidențiat justetea aplicării analizei dimensionale și a teoriei similitudinii, prin definirea invarianțelor (coeficienților adimensionali), /31,32/ și a legii modelului, /33,34/.

Condițiile de unicitate specifice prelucrării prin procedeul EERC impuse, separă procesul de prelucrare de totalitatea proceselor de definit prin ecuațiile criteriale rezultate. -

Legea modelului, reflectă dependența celor doi indicatori tehnico-economici, productivitatea- Q și consumul specific de energie electrică- q , de cele două mărimi specifice din proces, viteza de erodare, v_e , viteza relativă, v_r , și perechea de materiale, $m_{0q} - m_{0p}$.

Cercetările experimentale efectuate de autor, sub raport calitativ, au evidențiat cu tărie viabilitatea legii modelului, atât pentru productivitatea prelucrării, cât și pentru consumul specific de energie electrică /37,38,39/.

În vederea determinării cantitative a dependenței celor doi indicatori tehnico-economici, de parametrii și factorii procesului, s-a conceput modelul experimental de prelucrare.

La proiectarea modelului experimental, s-au respectat cu rigurozitate funcțiile și structura utilajelor de prelucrare prin procedeul EERC /35,36/, și s-au luat în considerare rezultatele cercetărilor efectuate pentru studiul surselor termice din procesul eroziv.

4.1.1. Structura modelului experimental

Modelul experimental, component al echipamentului de formare finală și poziționare a agentului eroziv, a fost conceput, structurat și proiectat în vederea determinării parametrilor funcționali, rezultați din ecuația criterială a fenomenului fizic și a legii modelului (2.50), (2.55), /41,42/:

- viteza relativă dintre OT și OP , $v_r = 10 \dots 50$ m/s ;
- densitatea de curent $j \geq 5$ A/mm² ;
- presiunea specifică $p = (1 \dots 10)$ MPa ;
- suprafața de prelucrare $S \geq 5$ mm² ;
- tensiunea de proces $U_p = 12 \dots 32$ V .

Obiectul de prelucrare 1, sub forma unor vergele cu secțiune circulară, riguros constantă, este poziționat prin echipamentul EP"OP" 2, față de obiectul de transfer 3, figura 4.1. Ansamblul

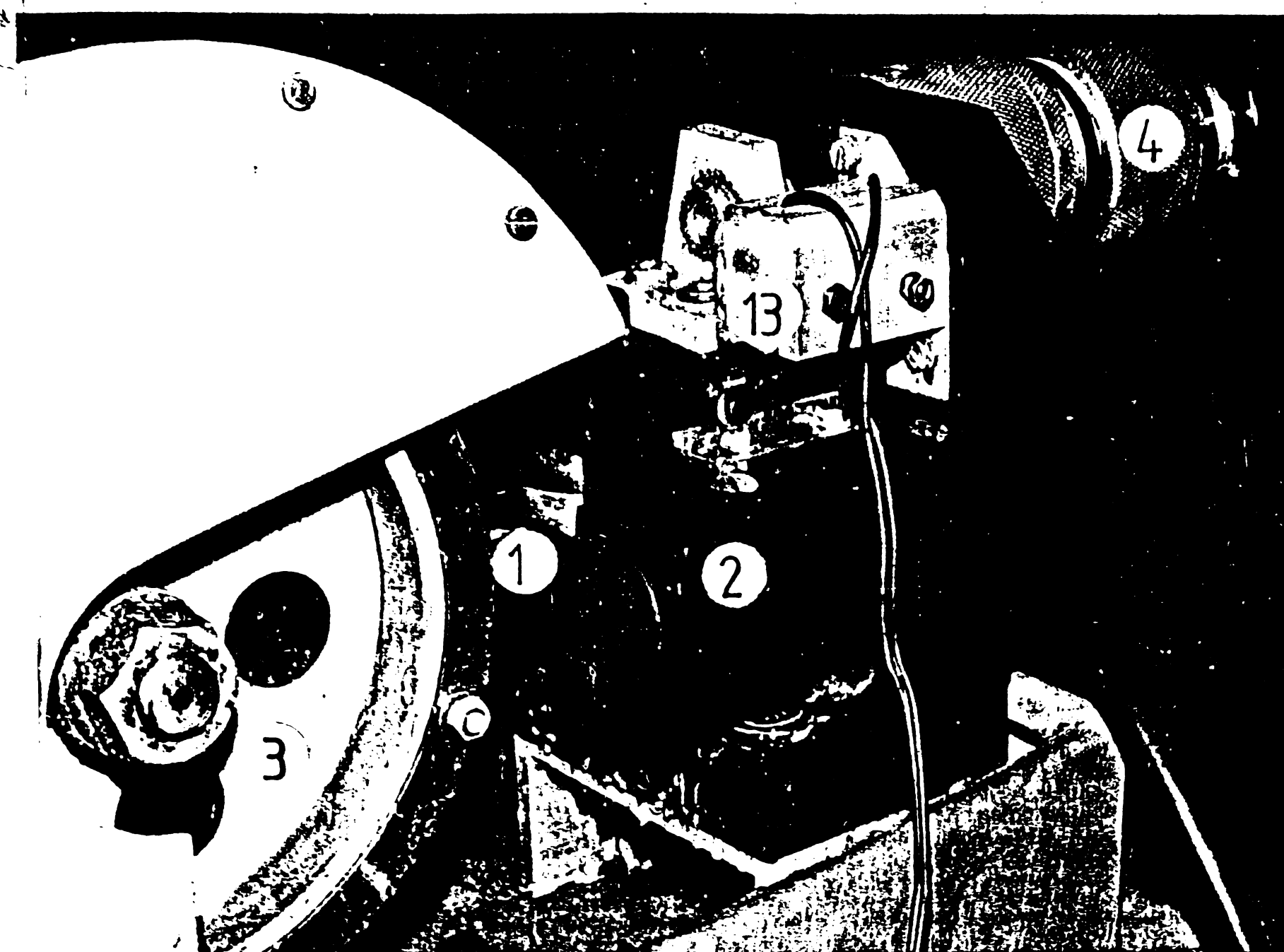


Fig.4.1. Subansamblul echipamentului de poziționare a obiectului de prelucrare.

format de echipamentul EP"OP", execută mișcarea de avans, prin intermediul a două casete cu bile, pe coloane de ghidare. Forța de apăsare (presiunea specifică) din proces, este asigurată de motorul hidraulic 4, acționat prin greutatea etalonate M, (fig.4.2.). Echipamentul EFF 5, asigură transmiterea energiei de efect, la suprafața de contact OT - OP și realizează domeniul vitezei rela-

tive, prin motorul de curent 6 și prin transmisia în trepte și curelele trapezoidale 7. Energia de efect, se transmite la echipamentul EFF, prin blocul electric 8 (cablu flexibil, eclise, șurub de legătură). Izolarea electrică, se asigură prin plăci și bușe izolatoare. Echipamentul EG"AE" (sursa de alimentare) 9, este format dintr-un transformator monofazat cu bobină deplasabilă, caracteristică externă căzătoare, /34/.

Sistemul de asigurare a mediului de lucru, cuprinde carcasa de alimentare 10 și baia de proces 11. Sistemul de măsurare, este

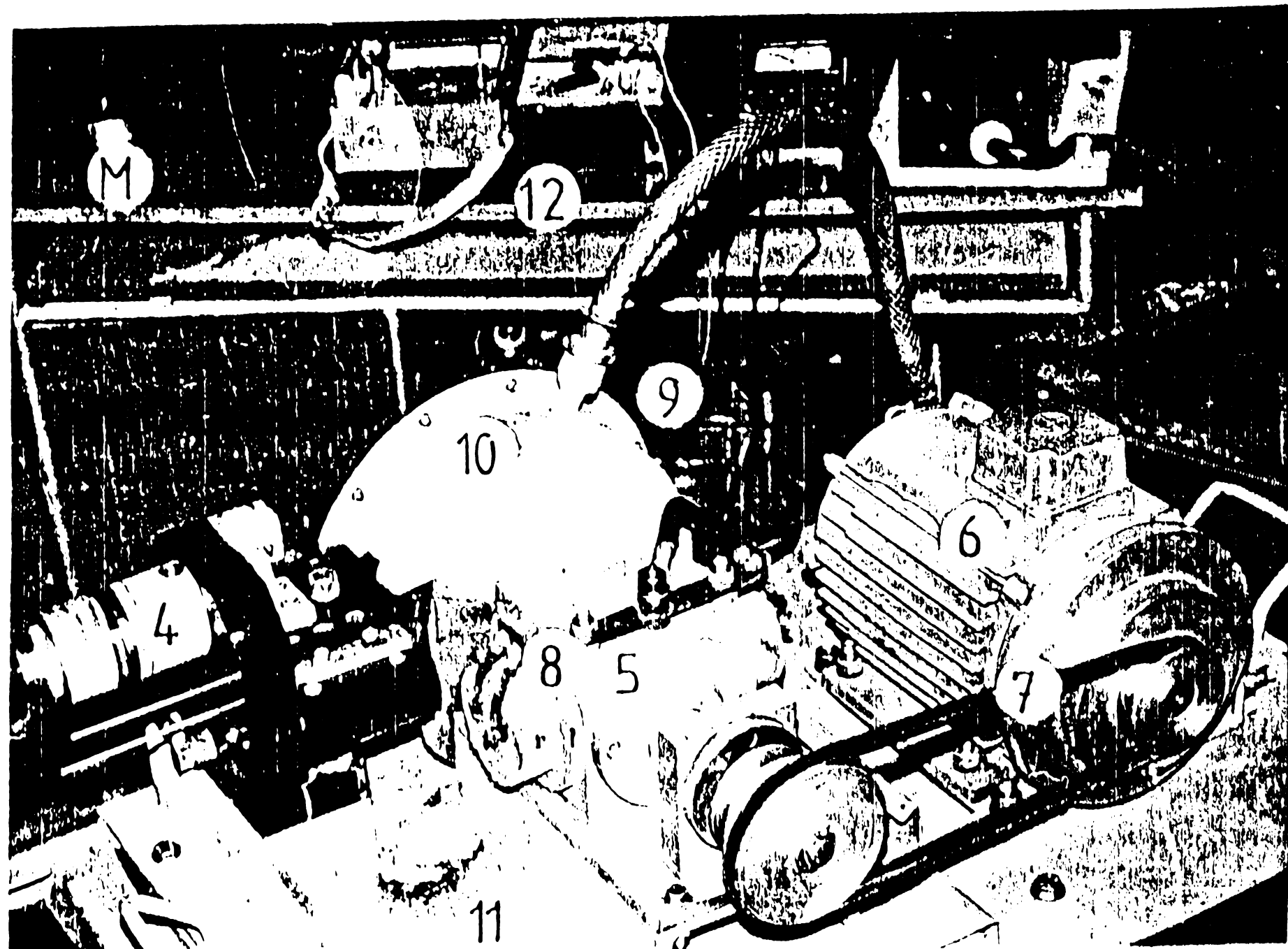


Fig.4.2. Vedere de ansamblu a modelului experimental.

4.1.2. Măsurarea parametrilor procesului

Sistemul de măsurare, folosit pentru determinarea parametrilor procesului, este realizat prin lanțurile de măsurare, aferente modelului experimental (fig.4.3.), /41,42/. Se folosesc următoarele aparate de măsură :

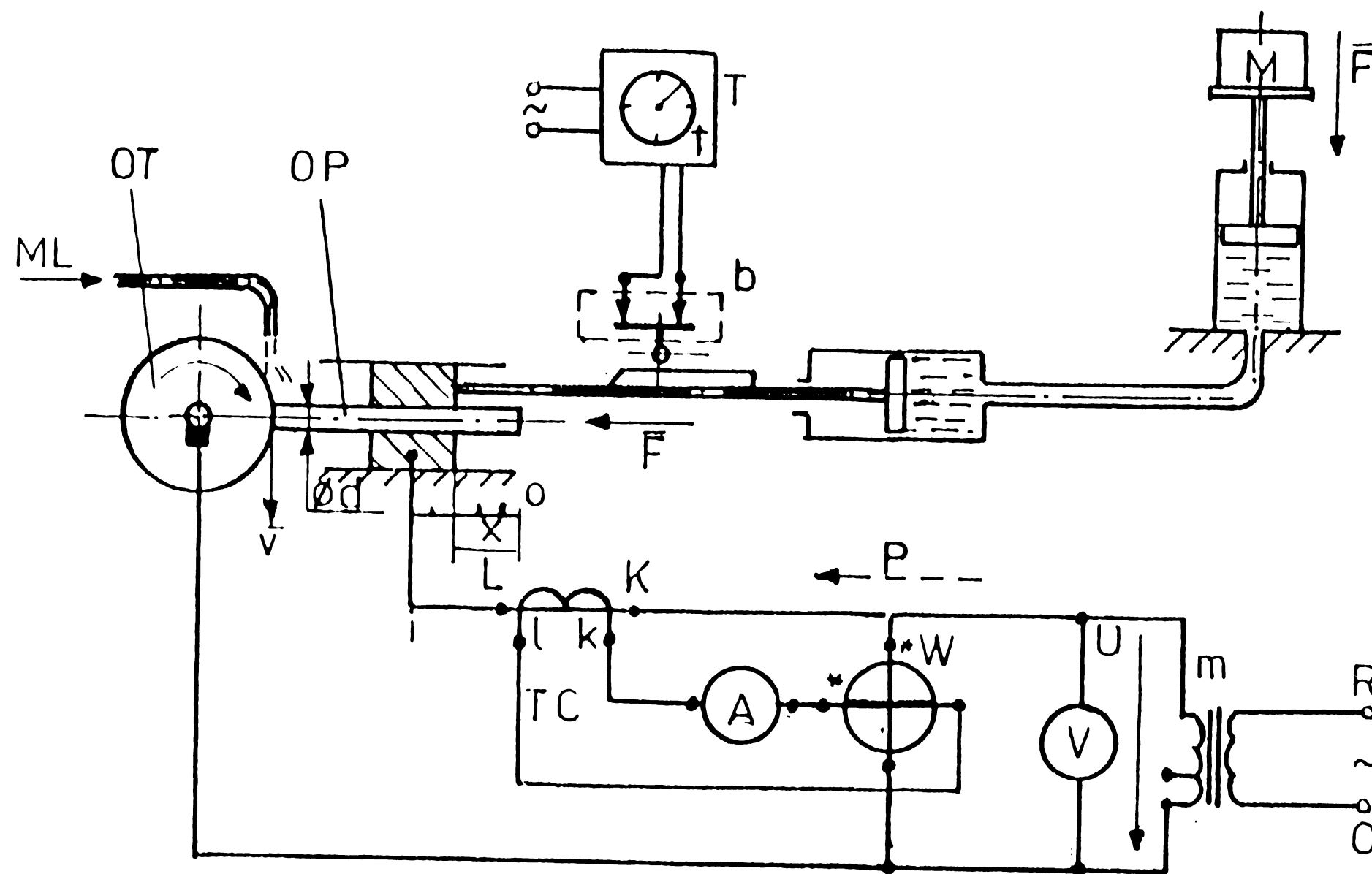


Fig.4.3. Schema de măsurare a parametrilor procesului.

- T, cronometrul electric tip PELE-EAW, clasa de precizie $C_t = 1$;
- TC, transformator de măsură pentru curent tip SH-6, clasa de precizie $C_i = 0,2$;
- A, ampermetru feromagnetic tip AP-52, clasa de precizie $C_a = 1$;
- W, wattmetru electrodinamic tip D-61, clasa de precizie $C_w = 0,5$;
- V, voltmetru feromagnetic tip VP-51, clasa de precizie $C_v = 1$.

Sînt luați în discuție următorii parametri :

- I, intensitatea efectivă a curentului în proces ;
- M, masa calibrată care generează forța de apăsare ;

format din traducători 13 și aparate de măsură 12. Soluțiile constructive adoptate, corespund mediului de lucru coroziv, densităților de curent și presiunilor specifice recomandate.

- P, puterea activă în circuitul de sarcină ;
- t, durata procesului ;
- l, lungimea OP prelucrată ;
- d, diametrul OP ;
- n, turația OT ;
- U_{20} , tensiunea de mers în gol a sursei ;
- W, energia consumată în proces ;
- V, volumul de material îndepărtat ;
- v_r , viteza relativă dintre OT și OP ;
- Q, productivitatea prelucrării;
- q, consumul specific de energie electrică în proces.

Erorile maxim-possibile, care însoțesc parametrii determinați prin calcul, se evaluează în conformitate cu metodologia specifică măsurărilor indirecte.

Productivitatea prelucrării, este definită de raportul dintre volumul de material îndepărtat în unitatea de timp, și se exprimă prin relația :

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{15\pi d^2 l}{t} \quad \text{/mm}^3\text{/min/} \quad .(4.1)$$

Productivitatea este afectată de eroarea absolută maxim posibilă dată de relația :

$$Q_{\max} = \left| \frac{\partial Q}{\partial d} \Delta d_{\max} \right| + \left| \frac{\partial Q}{\partial l} \Delta l_{\max} \right| + \left| \frac{\partial Q}{\partial t} \Delta t_{\max} \right|, (4.2)$$

în care Δd_{\max} , Δl_{\max} , Δt_{\max} sînt valorile absolute, maxime, cu care se determină mărimile d, l și t.

Eroarea relativă maxim-possibilă, este ;

$$\varepsilon_{Q_{\max}} = \frac{\Delta Q_{\max}}{Q} 100 \quad \text{/%/} \quad , (4.3)$$

în care, $\varepsilon_{Q_{\max}}$, este eroarea relativă maxim-possibilă, iar ΔQ_{\max} , este eroarea absolută maxim posibilă.

Cu cele trei relații (4.1), (4.2), (4.3), se explicitează relația de calcul a erorii relative maxim-possibile ;

$$\varepsilon_{Q_{\max}} = 100 \left(\frac{\Delta l_{\max}}{l} + 2 \frac{\Delta d_{\max}}{d} \right) + C_t \frac{t}{t_n} \quad \text{/%/} \quad , (4.4)$$

în care, t_n și C_t , reprezintă domeniul și clasa de precizie ale cronometrului electric T.

Consumul specific de energie electrică, este definit de puterea electrică consumată pentru îndepărtarea unui volum de material, este exprimat analitic prin relația :

$$q = \frac{4}{\pi} \frac{k_i P_w t}{l d^2} \quad /J/mm^3 / \quad , (4.5)$$

în care, k_i , este raportul transformatorului de curenți TC, iar P_w , reprezintă puterea indicată de wattmetrul W.

Utilizând relații de tipul (4.2) și (4.3) se determină eroarea relativă maxim-probabilă :

$$\epsilon_{qmax} = C_i + C_w \frac{P_{wn}}{P_w} + C_t \frac{t_n}{t} + 100 \left(\frac{\Delta l_{max}}{l} + 2 \frac{\Delta d_{max}}{d} \right) \% , (4.6)$$

în care, C_i , este clasa de precizie a transformatorului de curenți TC, iar C_w și P_{wn} , reprezintă clasa de precizie și domeniul wattmetrului W.

Analiza celor două relații (4.4) și (4.6), indică modalitățile de diminuare a erorilor de măsurare.

Pentru domeniul de variație al mărimilor P_w , t , l , d , pe modelul experimental descris, cu utilizarea rațională a aparatelor de măsură prezentate, au rezultat erori de măsurare cuprinse în limitele : $\epsilon_Q = 1 \dots 5\%$ și $\epsilon_q = 1,5 \dots 13\%$, acceptate de cercetarea experimentală, /106/.

4.1.3. Baza de date a modelului experimental

Formarea bazei de date a modelului experimental, are ca scop bine definit, determinarea modelului sau a modelelor matematice care caracterizează procesul de prelucrare, pentru cei doi indicatori tehnico-economici, productivitatea prelucrării și consumul specific de energie electrică, /43/.

În acest sens, pentru sistemul tehnologic definit de sursa de alimentare și de modelul experimental, se pot forma matricele asociate, cu luarea în considerare a restricțiilor impuse.

Sursa de alimentare, este definită de tensiunile de mers în gol, U_{20i} și domeniul intensităților de curenți, determinat de diapazonul tensiunii de proces, U_{pi} , (fig. 4.4).

Acestei surse de alimentare, i se asociază, matricea sursei de alimentare :

$$/S_{i,j}/ = \frac{U_{20i}}{I_{2j}} \quad \left| \begin{array}{l} i = 1, 2 \\ j = 1, 2 \dots 8 \end{array} \right. = \left\| \begin{array}{cccccccc} S_{1,1} & S_{1,2} & \dots & S_{1,8} \\ S_{2,1} & S_{2,2} & \dots & S_{2,8} \end{array} \right\| \quad , (4.7)$$

în care, liniile $i = 1, 2$, corespund tensiunilor de mers în gol, iar coloanele $j = 1, 2 \dots 8$, corespund domeniului intensităților de cu-

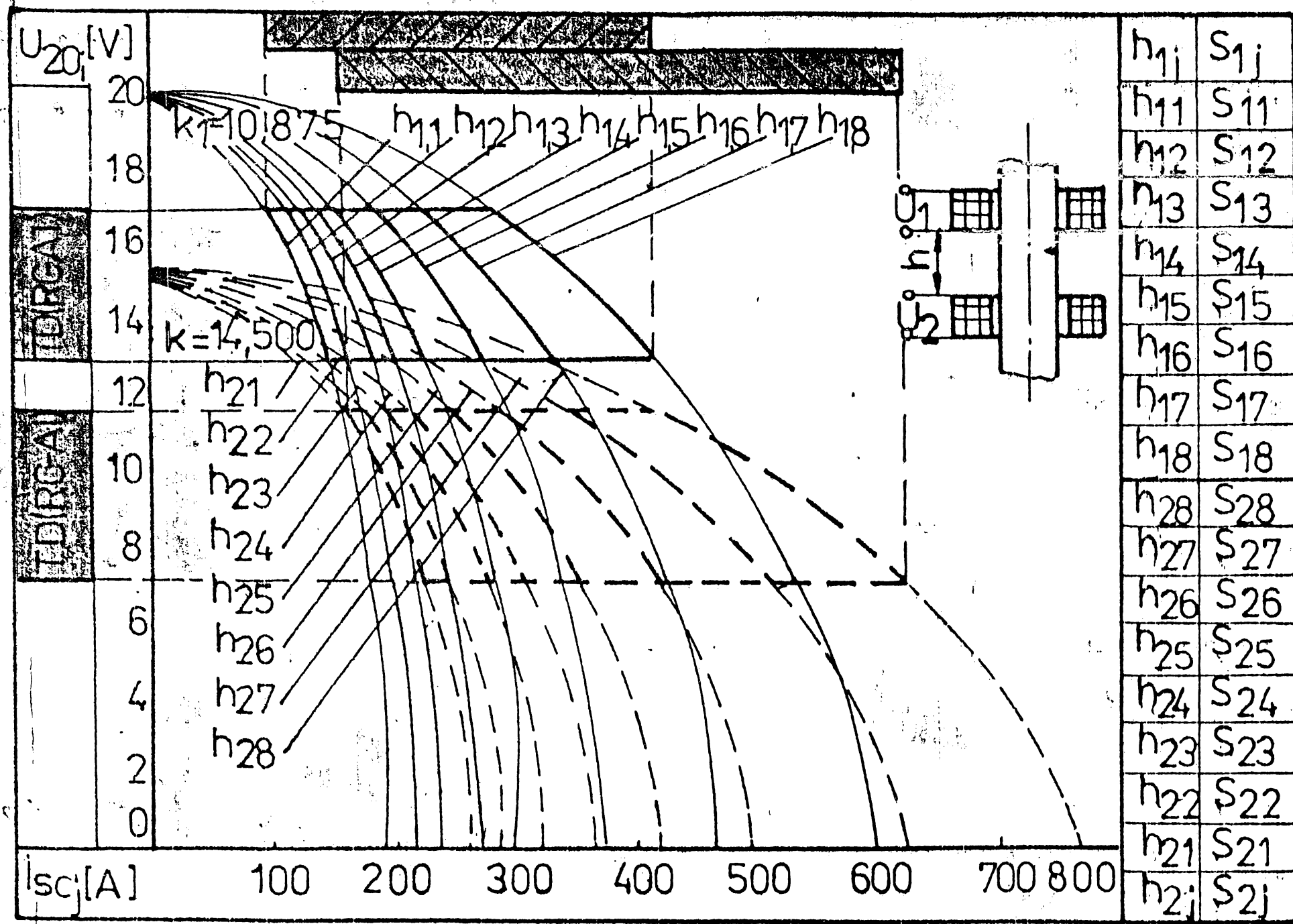
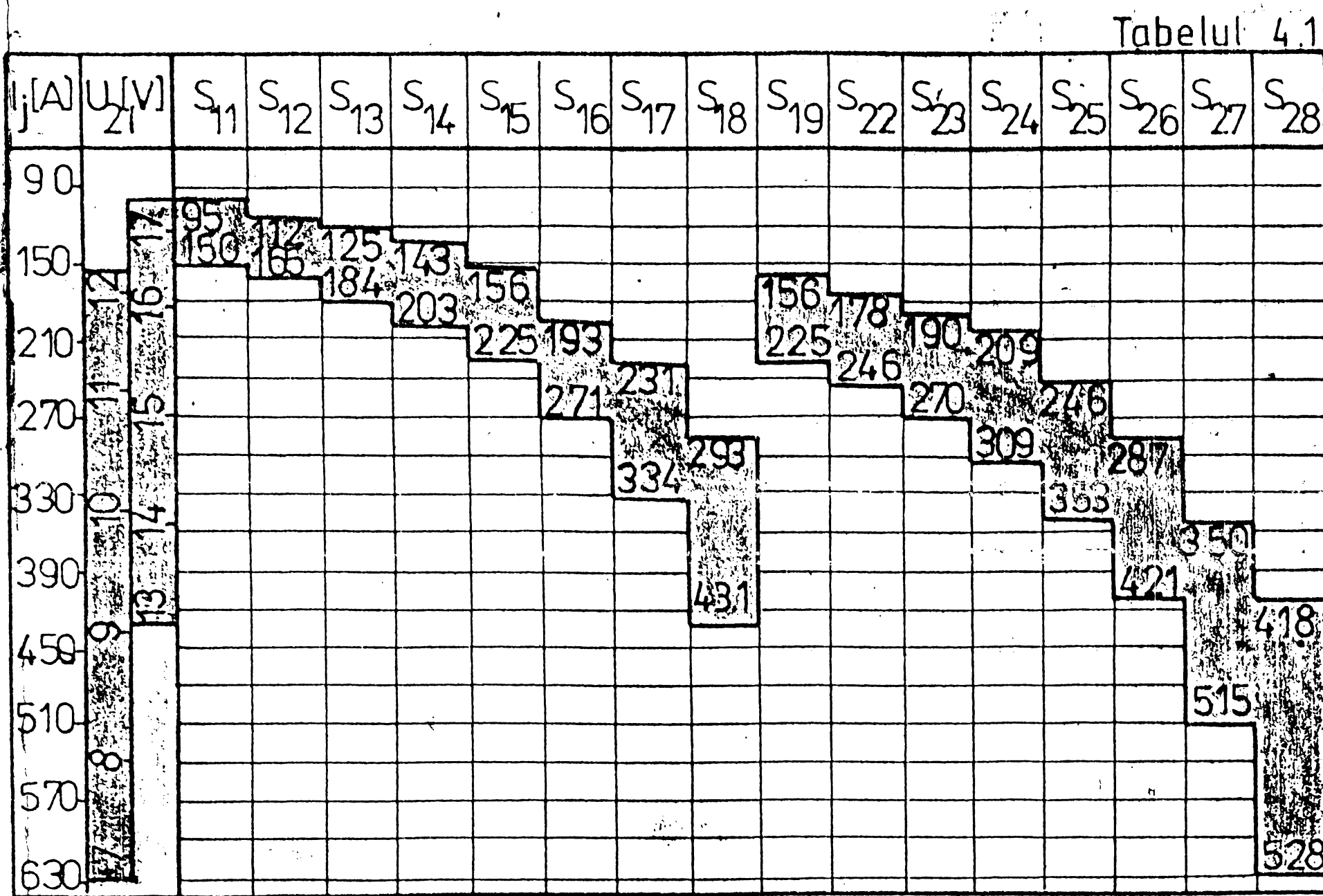


Fig. 4.4. Diagrama curbelor caracteristice ale sursei de alimentare.

în arc intermitent TD (RC-AI), deci pentru un raport U_p / U_{20} cuprins între 0,6 0,9, pentru ambele rapoarte de transformare k_1, k_2 . Modelul experimental, permite prelucrarea unor secțiuni variabile, realizate cu ajutorul unor vergele circulare cu diametrul $d=3,25; 4; 5$ mm.



Tabelul 4.2

Aria A_{ij} [mm ²]				
Nr OP	Φ_{OP}	3,25	4	5
OP	j	1	2	3
1E	1	8,29	12,56	19,63
2E	2	16,59	25,13	39,26
3E	3	24,87	37,69	58,90
4E	4	33,16	50,24	78,53

$$/A_{i,j} / \quad i=1 \dots 3 \quad j=1 \dots 4 \quad = \begin{vmatrix} A_{1,1} & A_{1,2} & A_{1,3} \\ A_{2,1} & A_{2,2} & A_{2,3} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ A_{4,1} & A_{4,2} & A_{4,3} \end{vmatrix} \quad (4.8)$$

rent, prin diapazonul tensiunilor de proces, tabelul 4.1. Pe baza datelor din tabel, se pot forma și ulterior memora, elementele matricii sursei de alimentare. Alimentarea cu energie electrică a procesului, se realizează pentru diapazonul de graniță a tensiunilor de descărcare în arc la ruperea contactului electric-descărcare

Astfel prin prelucrarea a una, două, trei sau patru secțiuni simultan, a rezultat domeniul ariilor de prelucrare (tabelul 4.2). Pe baza datelor din tabel, pentru complectarea bazei de date, se poate forma matricea secțiunilor de prelucrare:

În această matrice, s-au definit secțiunile $A_{i,j}$, care pot fi prelucrate pe modelul experimental, în care liniile $i=1..3$, reprezintă diametrul secțiunilor prelucrate iar coloanele $j=1..4$, reprezintă numărul secțiunilor prelucrate.

Luând în considerare secțiunile $A_{i,j}$ și diapazonul tensiunilor de proces U_{pi} , s-au determinat forțele de apăsare F_i , prin greutatea etalonate, aplicate la diferite nivele.

Valorile forțelor de apăsare F_i rezultate, verifică restricțiile impuse de presiunea specifică din proces:

$$F_i = 96; 119; \dots; 407 \text{ /N/}$$

$$i = 1..15$$

Forțele de apăsare F_i și curenții electrici de proces I_j , permit definirea matricei "viteza de erodare" :

$$\left/ v_{e i,j} \right/ \begin{matrix} i=1..15 \\ j=1..16 \end{matrix} = \begin{vmatrix} v_{e1,1} & v_{e1,2} & \dots & v_{e1,16} \\ v_{e2,1} & v_{e2,2} & \dots & v_{e2,16} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ v_{e15,1} & v_{e15,2} & \dots & v_{e15,16} \end{vmatrix}; (4.9)$$

În care liniile $i=1..15$, corespund forței de apăsare F_i , iar coloanele $j=1..16$, corespund curenților rezultați pe curbele caracteristice $S_{i,j}$, din tabelul 4.1. Semnificația fizică a elementelor $v_{e i,j}$, este aceea a perechilor de valori, sub formă de rapoarte F_i / I_j , rezultate pentru sursa de alimentare și pentru modelul experimental.

Viteza relativă dintre OT și OP, realizabilă pe modelul experimental, este definită prin poziția staționară a OP (pentru $i=1$, $v_{OP} = 0$) și prin posibilitățile de variație a vitezei periferice v_{OT} , în 12 trepte:

$$v_{ri,j} \left| \begin{matrix} i=1 \\ j=1..12 \end{matrix} \right. = 6; 10; 18; 20; 22; 26; 30; 34; 38; 42; 46; 50 \text{ /m/s/}$$

Matricea vitezei relative dintre OT și OP, se constituie în forma dată de relația (4.10) :

$$\left/ v_{ri,j} \right/ \begin{matrix} i=1 \\ j=1..12 \end{matrix} = \begin{vmatrix} v_{r 1,1} & v_{r 1,2} & \dots & v_{r 1,12} \end{vmatrix} \quad (4.10)$$

În care semnificația fizică a elementelor $v_{ri,j}$, este aceea a vitezelor relative, realizate în modelul experimental.

Perechile de materiale OT-OP, luate în considerare în vederea cercetării, sînt cuprinse în tabelul 4.3. Liniile $i=1..6$, reprezintă materialele propuse cercetării, coloanele $j=1,2,3$, cores -

Tabelul 4.3

$m_{OT_j} \backslash m_{OP_i}$						
	1	2	3	4	5	6
Otel	0,7	0,7	0,75	0,8	0,8	0,9
Alamă	0,9	0,9	0,95	0,95	0,95	0,75
Fonta	0,8	0,8	0,85	0,7	0,7	0,75

pund materialelor utilizate pentru OT. Perechile de materiale cuprinse în tabelul 4.3, respectă recomandările cuprinse în literatura de specialitate. Cu datele din tabelul 4.3, se poate construi matricea perechii de materiale :

$$/m_{i,j}/ \left| \begin{array}{l} i = 1 \dots 6 \\ j = 1 \dots 3 \end{array} \right. = \begin{vmatrix} m_{1,1} & m_{1,2} & \dots & m_{1,6} \\ m_{2,1} & m_{2,2} & \dots & m_{2,6} \\ m_{3,1} & m_{3,2} & \dots & m_{3,6} \end{vmatrix}, \quad (4.11)$$

în care, liniile $i = 1 \dots 6$, corespund liniilor $1 \dots 6$, iar coloanele $j = 1 \dots 3$, corespund coloanelor $1 \dots 3$ din tabelul 4.3.

In matricea (4.11), semnificația elementelor $m_{i,j}$, este aceea a coeficienților nivelului de prelucrabilitate a perechilor de materiale OT -OP rezultați din cercetările efectuate în cadrul întreprinderii "Metalurgica" din Aiud /131/.

4.2. Premodelarea

Modelarea matematică a unui proces tehnologic oarecare, deci și a procesului de prelucrare prin procedeul EERC, se poate realiza prin metode statistice, fiind parcurse în acest caz două etape.

Prima etapă denumită "premodelarea", se realizează pe baza experimentului preliminar, în vederea obținerii de informații apriorice :

- variabilele de stare și parametrii procesului ;
- limitele de existență și intervalele de variație ale parametrilor (factorilor) procesului ;
- stabilirea erorii experimentale.

Etapa a doua denumită "modelarea", se realizează pe baza experimentului clasic sau factorial. Prelucrarea datelor experimentale, conduce la ecuația sau ecuațiile modelului matematic al procedurii EERC.

4.2.1. Alegerea variabilelor de stare și a parametrilor procesului

Prima etapă a premodelării, este reprezentată de selectarea variabilelor de stare și a parametrilor (factorilor), care, vor intra în structura modelului procesului.

La alegerea variabilelor de stare trebuie respectate următo-

rele condiții :

- să aibă o caracteristică catitativă (să poată fi măsurată);
- să fie o măsură directă, nemijlocită, a eficienței procesului ;
- să fie eficientă, din punct de vedere statistic, adică, să aibă pe cât posibil, o dispersie cât mai mică, în timpul experimentării.

La alegerea parametrilor (factorilor) trebuie satisfăcute următoarele condiții :

- să fie reglabil, pe modelul cercetat ;.
- să se cunoască precizia de măsurare (suficient de înaltă).

Variabilele de stare alese, sînt reprezentate de :

- productivitatea prelucrării, $Q/m^3/s$;
- consumul specific de energie electrică, $q/kWh/kg$.

Parametrii (factorii) procesului stabiliți, sînt :

- tensiunea de proces, U_2/V ;
- intensitatea curentului, I_2/A , densitatea de curent, $j/A/mm^2$;
- forța de apăsare, F/N , presiunea specifică, p/P_a ;
- viteza relativă dintre OT și OP ;
- perechea de materiale OT - OP ;
- polaritatea alimentării cu energie electrică.

4.1.2. Selectarea parametrilor tehnologici

A doua etapă a premodelării, este reprezentată de selectarea parametrilor (factorilor), prin obținerea de informații din experimentul preliminar. In această etapă, informația poate fi obținută prin trei modalități :

1- din literatura de specialitate, prin aprecierea rezultatelor efectuate asupra unor obiective analoge, precum și pe baza experienței specialiștilor tehnologi care lucrează în domeniul respectiv ;

2- din încercările de punere în funcționare a modelului procesului (volumul de informații este relativ scăzut) ;

3- prin realizarea "experimentului de selecționare", cu un număr relativ mic de determinări, după un plan "suprasaturat" de experimentare.

In cadrul experimentului preliminar, la prelucrarea prin procedeul EPRC, au fost parcurse ambele etape, obținerea informației fiind asigurată prin parcurgerea modalităților 1 și 3, în ordinea crescătoare numărului de ordine.

Stadiul inițial de cercetare a procesului de prelucrare prin

procedeu EERC, l-a reprezentat studiul materialelor publicate în țară și în străinătate.

Prelucrarea volumului de informații rezultate, permite aprecierea numărului și rolului parametrilor (factorilor) în proces. S-a utilizat metoda corelației de rang, rezultând influența parametrilor (factorilor) procesului asupra variabilelor de stare.

Tabelul 4.4

[Zvorul inform. Nr. Bibl.]	Factori X _i i,j=1...7							Obs.	
	F(P)	J(j)	Vr	MOF	U	+/-	MOF	Q	q
1 [4]	9	7	7,5	6,5	4	1	3	*	
2 [8]	4	7,5	4	2	3	4,5	2	*	
3 [50]	9	1	7	1	2	1	4		*
4 [58]	4,5	3,5	3,5	1,5	2	1,5	2	*	*
5 [59]	2,5	8	6,5	2	3	4	4,5	*	*
6 [77]	3,5	3,5	4,5	2	2	3	1	*	
7 [80]	8	9	7,5	2	2	3,0	1	*	*
8 [95]	4,5	4,5	4,5	2	2	3,0	1	*	
9 [115]	9	7,5	3	3	2	2	3	*	*
10 [116]	4,5	8,5	2	1	2	3	3	*	*
11 [117]	7,5	8	2,5	2	3	2,5	3	*	*
12 [118]	2,5	6,5	2,5	2	2	2,5	3	*	
13 [120]	3,5	4	2,5	2	2	2,5	3	*	
14 [123]	9	8	7	2	2	2,5	1	*	
$\sum_{i=1}^k X_{ij}$	81	86,5	68,5	31	33	36,0	34,5		
d _j	25	30,5	12,5	-25	-23	-20	21,5		
d _j ²	625	930,25	156,25	625	529	400	462,25		

Matricea ordonării factorilor (tabelul 4.4), conține elemente x_{i,j}, în care liniile i = 1...k, corespund factorilor analizați iar coloanele j = 1...m, corespund referirilor bibliografice analizate. Semnificația fizică a elementelor x_{i,j}, este aceea a ranguri, atribuite de fiecare specialist factorilor analizați. Media aritmetică generală pe rânduri este dată de relația (4.12) :

$$a = 1/2 m \cdot k(k+1) \quad (4.12)$$

iar suma pătratelor abaterilor de la această medie, va fi dată de relația (4.13) :

$$\sum_{j=1}^k d^2_j = \sum_{j=1}^k \left(\sum_{i=1}^m x_{ij} - a \right)^2 \quad (4.13)$$

Pentru a aprecia gradul de concordanță a părerilor specialiștilor, se utilizează coeficientul de concordanță, W. Dacă părerile specialiștilor sînt perfect concordante W = 1, în caz contrar W = 0. Coeficientul de concordanță, este dat de relația (4.14) :

$$W = \sum_{j=1}^k d^2_j / \left(\sum_{j=1}^k d^2_j \right)_{\max} = (12 \sum_{j=1}^k d^2_j) / m^2(k^3 - k) \quad (4.14)$$

Pentru cercetarea efectuată, coeficientul de concordanță, a rezultat la valoarea de 0,68, considerat corespunzător. Rezultatele ordonării factorilor, sînt prezentate în figura 4.5. Se remarcă factorii situați deasupra liniei punctate :

- x₂, intensitatea curentului I/A/, densitatea de curent j/A/mm²/ ;
- x₁, forța de apăsare F/N/, presiunea specifică p/Pa/ ;

- x_3 , viteza relativă dintre OT și OP, /m/s/.

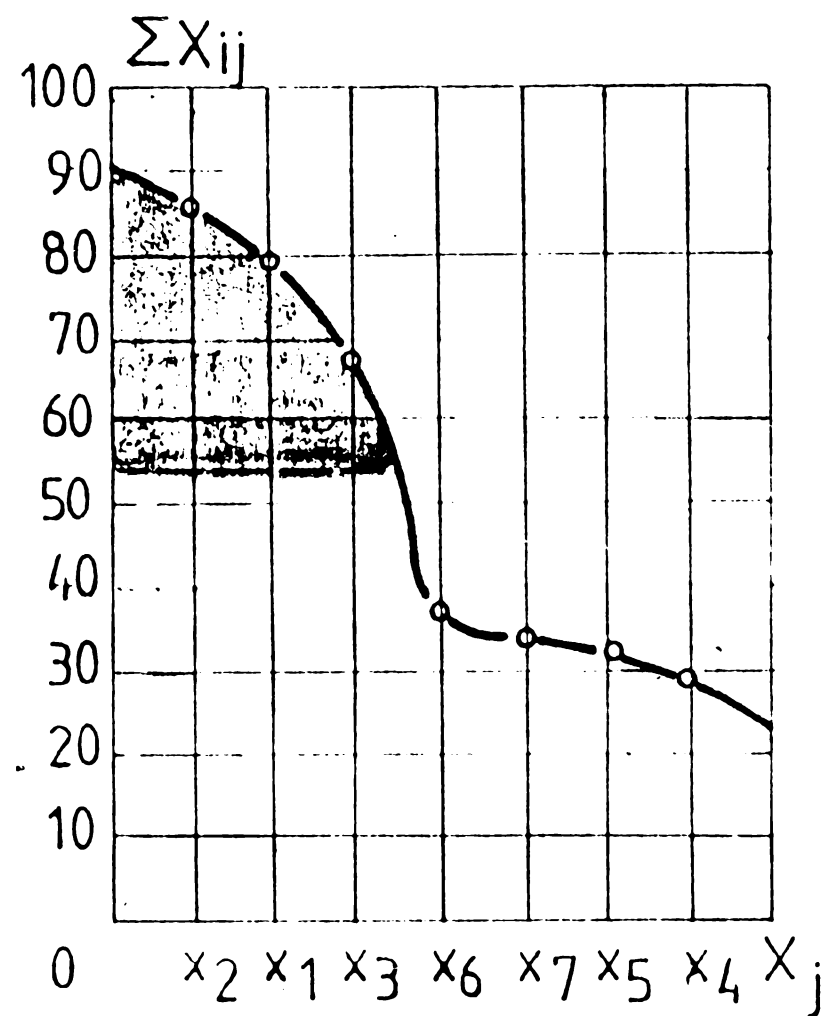


Fig. 4.5 Histograma ordonării factorilor.

Acești factori, sînt considerați ca avînd o influență semnificativă asupra procesului, iar restul factorilor, au o influență foarte mică. Pentru determinarea limitelor de existență și a intervalelor de variație ale parametrilor selecționați, s-au efectuat cercetări pe modelul experimental. S-a urmărit, în cadrul acestor cercetări, "stabilitatea procesului", în domeniul limitelor de variație ale intensității curentului, ale forței de apăsare și ale vitezei relative. Experiențele s-au efectuat pe secțiuni de prelucrare diferite, pe curbe caracteristice diferențiate și cu perechi de materiale diferite /44/.

Rezultatele cercetărilor, au fost exprimate prin presiunile specifice din proces $p_{i,j}$, densitățile de curent $j_{i,j}$ la diferite viteze relative $v_{r,i,j}$, tabelul 4.5.

Tabelul 4.5

presiunea specifica p [MPa]; densitatea de curent j [A/mm ²]																					
$v_{r,ij}$ [m/s]	$v_{r,12}=10$						$v_{r,13}=18$			$v_{r,16}=26$			$v_{r,18}=34$			$v_{r,10}=42$			$v_{r,12}=50$		
	P_{ij}			$S_{16} : m_{21}$		S_{26}	$S_{16} m_{21}$		S_{26}	$S_{16} m_{21}$		S_{26}	$S_{16} m_{21}$		S_{26}	$S_{16} m_{21}$		S_{26}	$S_{16} m_{21}$		S_{26}
	P_{i4}	P_{i7}	P_{i3}	A_{12}	A_{13}	m_{41} A_{31}	A_{12}	A_{13}	m_{41} A_{31}	A_{12}	A_{13}	m_{41} A_{31}	A_{12}	A_{13}	m_{41} A_{31}	A_{12}	A_{13}	m_{41} A_{31}	A_{12}	A_{13}	m_{41} A_{41}
57	38	48	8,9	7,4	4,0	8,3	6,3	5,4	7,7	4,8	4,3	7,4	5,6	4,2	6,3	4,9	4,5	6,6	5,2	3,9	
71	47	60	10,5	7,6	5,6	9,7	0,5	5,9	8,0	5,5	4,8	8,0	6,6	4,7	7,1	6,0	4,6	7,3	6,4	3,9	
85	57	72	11,8	8,2	7,7	10,9	7,3	6,1	8,1	6,4	5,4	8,6	7,6	5,5	7,7	6,8	4,8	8,1	7,5	5,6	
99	66	84	13,7	8,7	9,1	12,7	7,5	6,5	9,0	6,7	6,2	9,8	8,2	5,7	8,9	7,4	5,4	9,2	7,9	6,2	
113	75	96	14,4	9,0	9,78	13,5	8,0	7,2	9,8	7,4	6,2	11,0	8,7	5,9	10,5	7,8	6,7	11,0	8,4	7,1	
126	84	107	15,1	9,6	10,0	14,0	8,8	8,1	10,5	7,4	6,6	12,6	9,4	6,2	11,0	8,2	7,1	11,6	9,0	7,3	
134	89		15,7	10,1		14,8	9,2		10,8	8,2		14,4	9,8		14,3	9,4		13,2	9,6		
148	99		16,3	10,7		15,6	10,3		11,7	8,8		15,3	10,3		15,2	10,1		14,2	10,0		
	108			11,3			10,8			9,4			10,5			10,4			10,4		
Obs.	proces stabil						proces stabil			proces stabil			proces stabil			aschiere zgomot			aschiere pronunțată zgomot puternic		

$v_{r,ij}$ - viteza relativă dintre OP și OT; $p_{ij} = \frac{F_{ij}}{A_{ij}}$; $j_{ij} = \frac{I_{ij}}{A_{ij}}$; m_{ij} - perechea de materiale OP-OT; A_{ij} - aria OP; $v_{e,ij} = F_{ij}$ - forța de apăsare [N]; j_{ij} - intensitatea curentului [A]

Se remarcă, respectarea restricțiilor fenomenologice impuse, totuși, pentru domeniul cercetat, au rezultat "zone" în care procesul se desfășoară preponderent prin "așchiere" și cu "zgomot mare". În aceste zone, caracterizate de presiuni specifice mai mari decât 10 MPa (la viteze sub 34 m/s) și chiar în domeniul presiunilor specifice recomandate (la viteze mai mari decât 34 m/s), se respectă restricția densității curentului, dar, procedeul nu poate fi considerat ca și un proces eroziv. Așchiera, are o explicație fenomenologică, în creșterea numărului descărcărilor la același număr de puncte de contact pe o semiperioadă, concomitent cu scăderea duratei de contact și a duratei de viață a arcului electric nestaționar. Zgomotul mare, se datorează pe de o parte creșterii numărului descărcărilor în arc nestaționar pe semiperioadă, pe de alta, vibrațiilor care apar în proces la valorile ridicate ale presiunilor specifice și a vitezelor relative.

În urma și a acestor cercetări desfășurate pe modelul experimental, s-au definitivat pentru un "proces stabil" limitele de variație ale presiunii specifice $p \in (1 \dots 10)$ MPa ale densității de curent $j \geq 5 \text{ A/mm}^2$ și ale vitezei relative $v_r \in (10 \dots 35)$ m/s, în vederea determinării modelului matematic la prelucrarea prin procedeul EERC.

În ceea ce privește eroarea experimentală, aceasta a fost stabilită în cadrul subcapitolului 4.1.2., rezultatele erorilor de măsurare situându-se în limitele acceptate de cercetarea experimentală.

4.3. Modelarea matematică prin experimentul activ

Modelarea în sine și deci și modelarea matematică, reprezintă o fază uzuală a cercetării în investigarea proceselor de prelucrare erozive.

Utilizarea în practică tehnologică a unor modele determinate statistic, a fost acceptată sub toate aspectele, deoarece, metodologia determinării modelelor este riguroasă sub aspect matematic, rezultatele obținute satisfac necesitățile uzinale iar metoda de interferență statistică limitează substanțial numărul experiențelor.

În cadrul procesului de modelare matematică a prelucrării, s-a urmărit determinarea legăturilor existente între cei trei parametri (factori) reglabili ai procesului și cei doi indicatori tehnico-economici, deci, determinarea unei legături statistice denumită legătură de corelație. Etapele dezvoltate sînt reprezentate de :

- determinarea funcției matematice pe baza analizei de regresie ;
- testarea gradului de adecvanta a funcției matematice determinate (modelului matematic) prin analiza de corelație.

4.3.1. Programul de experimentare

Ca metodă de experimentare a fost adoptată metoda experiențelor factoriale, caracterizată de un program cu experiențe strict necesare pentru obținerea informațiilor date /44, 45/.

Intr-un asemenea program, variabilele iau un număr limitat de valori, numite nivele, utilizându-se toate combinațiile posibile ale nivelelor (variabilelor) pentru alcătuirea unei matrici de experimentare.

S-a ales, un program factorial cu trei nivele, care, asigură organizarea unui experiment factorial complet - EFC (model matematic liniar), de forma :

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^n b_{i,j} x_i x_j \quad ; \quad (4.15)$$

și dacă acest model nu este adecvat, experiment factorial compus EFC, de ordinul doi - PO2, de forma :

$$y = \sum_{i=0}^n b_i x_i + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^n b_{i,j} x_i x_j + \sum_{i=1}^n b_{i,i} x_i^2 \quad , \quad (4.16)$$

în care, y , este funcția de răspuns ;

x_i, x_j - parametrii procesului ;

b_i - coeficienții ecuației de regresie .

Numărul experiențelor, este pentru fiecare caz determinat de numărul variabilelor independente luate în considerare și de nivelele corespunzătoare.

Pentru cele două forme de exprimare a modelului matematic, s-au notat cu (-1) valorile minime, (+1) valorile maxime și cu (0) valorile centrale ale variabilelor independente, rezultând astfel trei nivele codificate -1, 0, +1.

Iuînd în considerare rezultatele cercetărilor preliminare la prelucrarea prin procedeul EERC, și baza de date a sistemului tehnologic, s-au stabilit următorii parametri (variabile independente) :

x_1 - viteza de erodare $v_e/N/A/$, nivel -1, 0, +1 ;

x_2 - viteza relativă $v_r/m/s$, nivel -1, 0, +1, cercetați în vederea determinării productivității prelucrării și a consumului specific de energie electrică.

Tabelul 4.6.

EXPERIMENT FACTORIAL COMPLET - EFC.							
Nr. exp.	Param. procesului- x_1	Param. procesului- x_2	Param. procesului- x_3	Param. procesului- x_4	Varabila de stare- y ; cod	Unitate	Unitate
1	+1	v_{e15}	+1	v_{r17}	M_{1jk}	$Q(m^3/s)$	$q(kwh/kg)$
2	-1	v_{e2}	+1	v_{r17}	$M_{1jk} j=1..4, k=1,2$	010-080 090	01q-08q 09q
3	1	v_{e15}	1	v_{r12}			
4	-1	v_{e2}	-1	v_{r12}	$M_{2jk} j=1..4, k=1,2$		
EXPERIMENT FACTORIAL COMPUS EFC.-P02							
Nr. exp.	Param. procesului- x_1	Param. procesului- x_2	Param. procesului- x_3	Param. procesului- x_4	Varabila de stare- y ; cod	Unitate	Unitate
1	+1	v_{e15}	+1	v_{r17}	$M_{1jk} j=1..4, k=1,2$	010-080 090	01q-08q 09q
2	+1	v_{e15}	-1	v_{r12}			
3	-1	v_{e2}	+1	v_{r17}			
4	-1	v_{e2}	+1	v_{r12}			
5	+1	v_{e15}	0	v_{r14}	$M_{2jk} j=1..4, k=1,2$		
6	-1	v_{e2}	0	v_{r14}			
7	0	v_{e5}	+1	v_{r17}			
8	0	v_{e5}	-1	v_{r12}			
9	0	v_{e5}	0	v_{r14}			

Matricea programării experimentului bifactorial corespunzător modelului matematic liniar și matricea programării experimentului central, sînt prezentate în tabelul 4.6. Pentru ambele matrici, înainte de a începe experimentarea, se stabilesc nivelurile parametrilor în forma naturală, $(x_1, x_2)_i$ și $(x_1, x_2)_s$, iar apoi, se calculează coordonatele naturale ale centrului programului, $(x_1, x_2)_0$ și inter-

valele de variație $\Delta(x_1, x_2)$ cu ajutorul relațiilor :

$$0(x_1, x_2) = / (x_1, x_2)^s + (x_1, x_2)_i / 2, \quad (4.17)$$

$$\Delta(x_1, x_2) = / (x_1, x_2)^s - (x_1, x_2)_i / \alpha, \quad (4.18)$$

în care, indicii i, s și 0 , definesc nivelurile inferior, superior și central al parametrilor, iar α , reprezintă coordonate punctului spațiului factorial în programe compuse de ordinul doi.

Programul experimental factorial, este completat de programul experimental, stabilit pentru baza de date a sistemului tehnologic experimental, tabelul 4.7. Elementele din componența ta-

Tabelul 4.7

$M_{i,j,k}$	$A_{i,j}$	$V_{e,i,j}$		$v_{r,i,j}$	$m_{i,j}$	ITE	Observatii
		$S_{i,j}$	F_i				
M1161	A22	S28	$F_2 \div F_9$	$v_{r2}; v_{r4}; v_{r7}$	m_{21}	Q	P02 01P
M1151	A22	S27	$F_2 \div F_9$	$v_{r2}; v_{r4}; v_{r7}$	m_{21}	Q	P02 02P
M1141	A22	S26	$F_2 \div F_9$	$v_{r2}; v_{r4}; v_{r7}$	m_{21}	Q	P02 03P
M181	A22	S18	$F_2 \div F_9$	$v_{r2}; v_{r4}; v_{r7}$	m_{21}	Q	P02 04P
M1161	A32	S28	$F_2 \div F_{15}$	$v_{r2}; v_{r4}; v_{r7}$	m_{21}	Q	P02 05P
M1162	A22	S28	$F_2 \div F_9$	$v_{r2}; v_{r4}; v_{r7}$	m_{41}	Q	P02 06P
M1152	A22	S27	$F_2 \div F_9$	$v_{r2}; v_{r4}; v_{r7}$	m_{41}	Q	P02 07P
M1142	A22	S26	$F_2 \div F_9$	$v_{r2}; v_{r4}; v_{r7}$	m_{41}	Q	P02 08P
M18.2	A22	S18	$F_2 \div F_9$	$v_{r2}; v_{r4}; v_{r7}$	m_{41}	Q	P02 09P
M2161	A22	S28	$F_2 \div F_9$	$v_{r2}; v_{r4}; v_{r7}$	m_{21}	q	P02 01Q
M2151	A22	S27	$F_2 \div F_9$	$v_{r2}; v_{r4}; v_{r7}$	m_{21}	q	P02 01Q
M2141	A22	S26	$F_2 \div F_9$	$v_{r2}; v_{r4}; v_{r7}$	m_{21}	q	P02 03Q
M281	A22	S18	$F_2 \div F_9$	$v_{r2}; v_{r4}; v_{r7}$	m_{21}	q	P02 04Q
M2161	A32	S28	$F_2 \div F_{15}$	$v_{r2}; v_{r4}; v_{r7}$	m_{21}	q	P02 05Q
M2162	A22	S28	$F_2 \div F_9$	$v_{r2}; v_{r4}; v_{r7}$	m_{41}	q	P02 06Q
M2152	A22	S27	$F_2 \div F_9$	$v_{r2}; v_{r4}; v_{r7}$	m_{41}	q	P02 07Q
M2142	A22	S26	$F_2 \div F_9$	$v_{r2}; v_{r4}; v_{r7}$	m_{41}	q	P02 08Q
M28.2	A23	S18	$F_2 \div F_9$	$v_{r2}; v_{r4}; v_{r7}$	m_{41}	q	P02 09Q

belului 4.7, au semnificația elementelor prezentate în subcapitolul 4.1.2. Rezultatele experimentărilor sînt cuprinse în tabelul 4.8, pentru cei doi parametrii de proces, la trei nivele, determinîndu-se productivitatea prelucrării $Q/m^3/s$ și consu-

mul specific de energie electrică, q /kWh/kg/.

Tabelul 4.8

M	$Q \cdot 10^7$ [m ³ /s]		q [kWh/kg]				
	v_{r11}	v_{r12}	v_{r14}	v_{r17}	\bar{Q}	\bar{q}	
M1161	Ve2	1,566	0,470	1,467	0,373	1,773	0,211
01	Ve5	2,050	0,430	1,962	0,313	2,605	0,203
M2161	Ve8	2,290	0,502	2,405	0,283	2,906	0,191
M1151	Ve2	1,638	0,431	1,318	0,344	1,573	0,315
02	Ve5	2,161	0,408	1,890	0,331	2,048	0,284
M2151	Ve8	2,414	0,402	2,578	0,302	2,734	0,262
M1141	Ve2	1,252	0,500	1,205	0,277	1,463	0,242
03	Ve5	1,576	0,463	1,464	0,252	1,954	0,230
M2141	Ve8	1,639	0,436	1,904	0,244	2,212	0,216
M181	Ve2	1,950	0,596	1,864	0,532	1,996	0,521
04	Ve5	2,215	0,551	2,156	0,527	2,441	0,500
M281	Ve8	2,275	0,543	2,376	0,520	2,646	0,496
M1161	Ve5	0,863	0,629	0,930	0,493	0,990	0,353
*05	Ve9	1,483	0,606	1,749	0,456	2,352	0,332
M2161	Ve5	1,891	0,556	2,161	0,451	2,828	0,327
M1162	Ve2	1,260	0,631	0,915	0,468	1,166	0,253
06	Ve5	1,624	0,593	1,548	0,378	1,930	0,198
M2162	Ve8	1,857	0,553	2,095	0,321	2,596	0,154
M1152	Ve2	1,219	0,596	1,062	0,472	1,375	0,263
07	Ve5	1,625	0,561	1,692	0,352	2,156	0,230
M2152	Ve8	1,989	0,545	2,208	0,333	2,628	0,204
M1142	Ve2	1,182	0,514	0,977	0,418	1,393	0,370
08	Ve5	1,465	0,466	1,488	0,396	2,155	0,335
M2142	Ve8	1,576	0,446	1,914	0,381	2,528	0,314
M182	Ve2	1,640	0,592	1,832	0,512	2,048	0,464
09	Ve5	2,048	0,575	2,251	0,432	2,734	0,420
M282	Ve8	2,148	0,557	2,386	0,438	2,926	0,405

Au fost cercetate două perechi de materiale, OL 42-E.Cr18Ni8Mn6, ($m_{2,1}$) și OL42-EP.NiCu, ($m_{4,1}$), pentru două secțiuni de prelucrare, 25,13 mm²(A₂₂) și 39,26 mm²(A₃₂), pentru cele două tensiuni de mers în gol ale sursei de alimentare, pe curbele caracteristice definite de acestea. S-au efectuat cinci determinări paralele, media aritmetică, fiind cuprinsă în tabelul 4.8, pentru fiecare nivel cercetat. Rezultatele experimentale sînt înregistrate pentru modelele matematice definite de matricea spațială a modelelor definită în cadrul subcapitolului 3.3 relația (3.18).

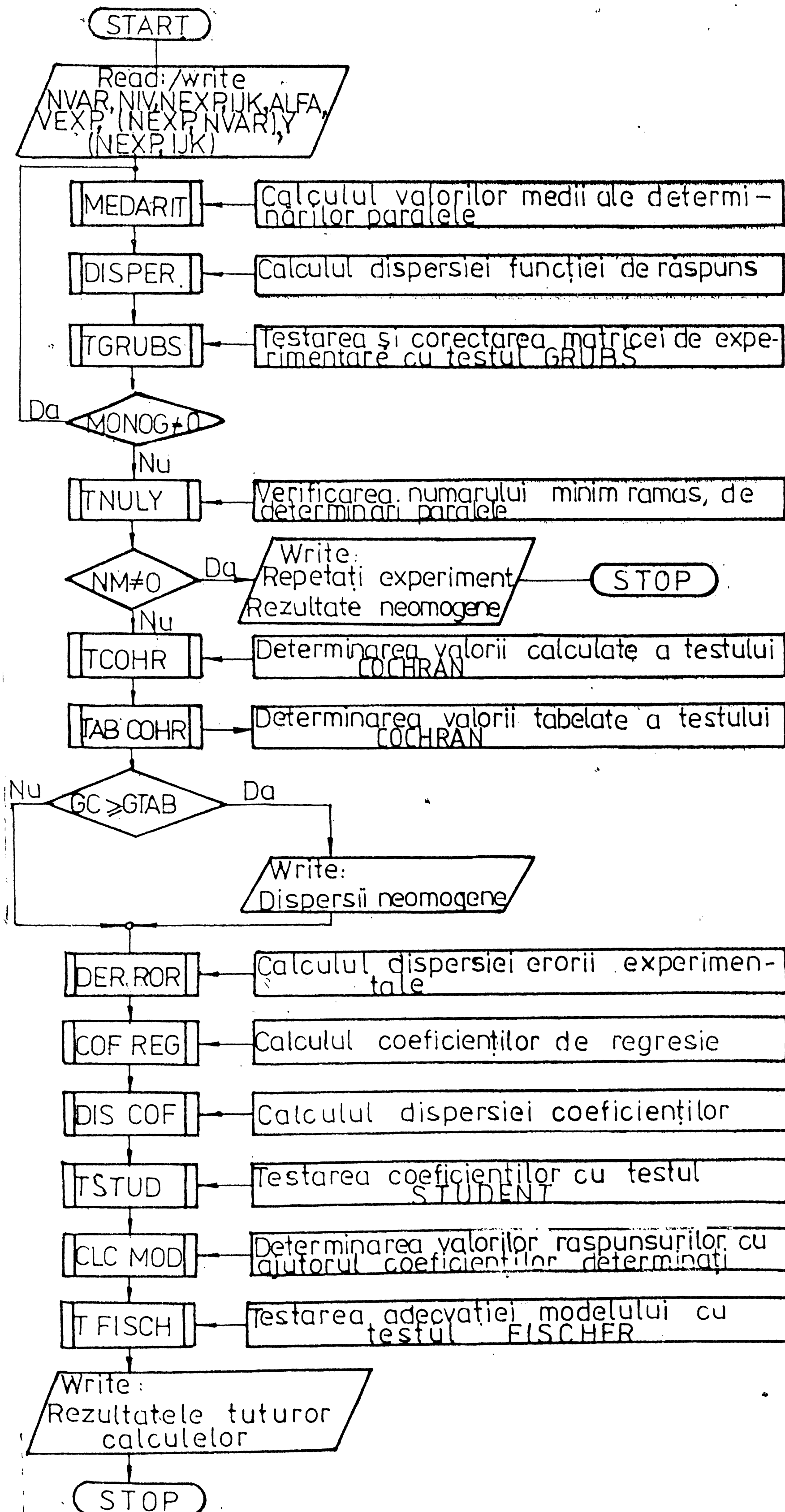
4.3.2. Algoritmul de calcul și analiza modelului matematic

Datorită volumului mare de calcule matematice care apar la determinarea modelului matematic, prin testarea experimentului factorial complet și dacă este cazul și a experimentului factorial compus de ordinul doi, s-a elaborat un program de calcul. Programul a fost scris în limbaj FORTRAN - 77, sistem de operare RSX - 11 M, rulat pe un calculator "Independent" I 102F. Datele experimentului prezentate în tabelul 4.8, au fost prelucrate inițial conform matricei programării experimentului bifactorial. Au rezultat, modele matematice liniare neadecvate pentru toate cele 18 cazuri cercetate.

Din acest motiv, s-a trecut la a doua etapă, prelucrarea datelor experimentale conform matricei programării experimentului factorial compus de ordinul doi.

Schema logică a programului se prezintă în figura 4.6. Aceasta a fost concepută astfel ca elementele importante ale calculului matematic, să fie tipărite pentru verificare și interpretare.

Sucesiunea calculelor necesare determinării coeficienților ecuației de regresie, analiza statistică a acesteia și deciziile care se iau în cele două situații definite de relațiile (4.15), (4.16), cuprind șase etape majore de calcul :



- alegerea formei modelului matematic, prin testarea inițială a modelului liniar ;
- calculul coeficienților ecuației de regresie, urmărindu-se dacă ecuația de regresie este adecvată datelor experimentale;
- calculul și verificarea omogenității dispersiilor, pentru determinările paralele efectuate, în cadrul programului experimental de cercetare a procesului ;
- calculul erorii experimentale ;
- calculul dispersiei coeficienților de regresie și verificarea semnificației coeficienților ;
- calculul dispersiei de concordanță ;
- verificarea gradului de concordanță al modelului .

Fig.4.6. Schema logică a programului de calcul P-04.

s-au efectuat cu ajutorul testelor Student și Fischer.

Au rezultat funcții matematice de forma celor definite

de relația (4.16), exprimând dependența dintre parametrii procesului x_1, x_2 și variabila de stare y .

4.3.3. Stabilirea ecuațiilor curbilor de regresie

În urma testelor aplicate s-au obținut la prelucrarea EERC modele matematice definite prin relațiile (4.20)...(4.37).

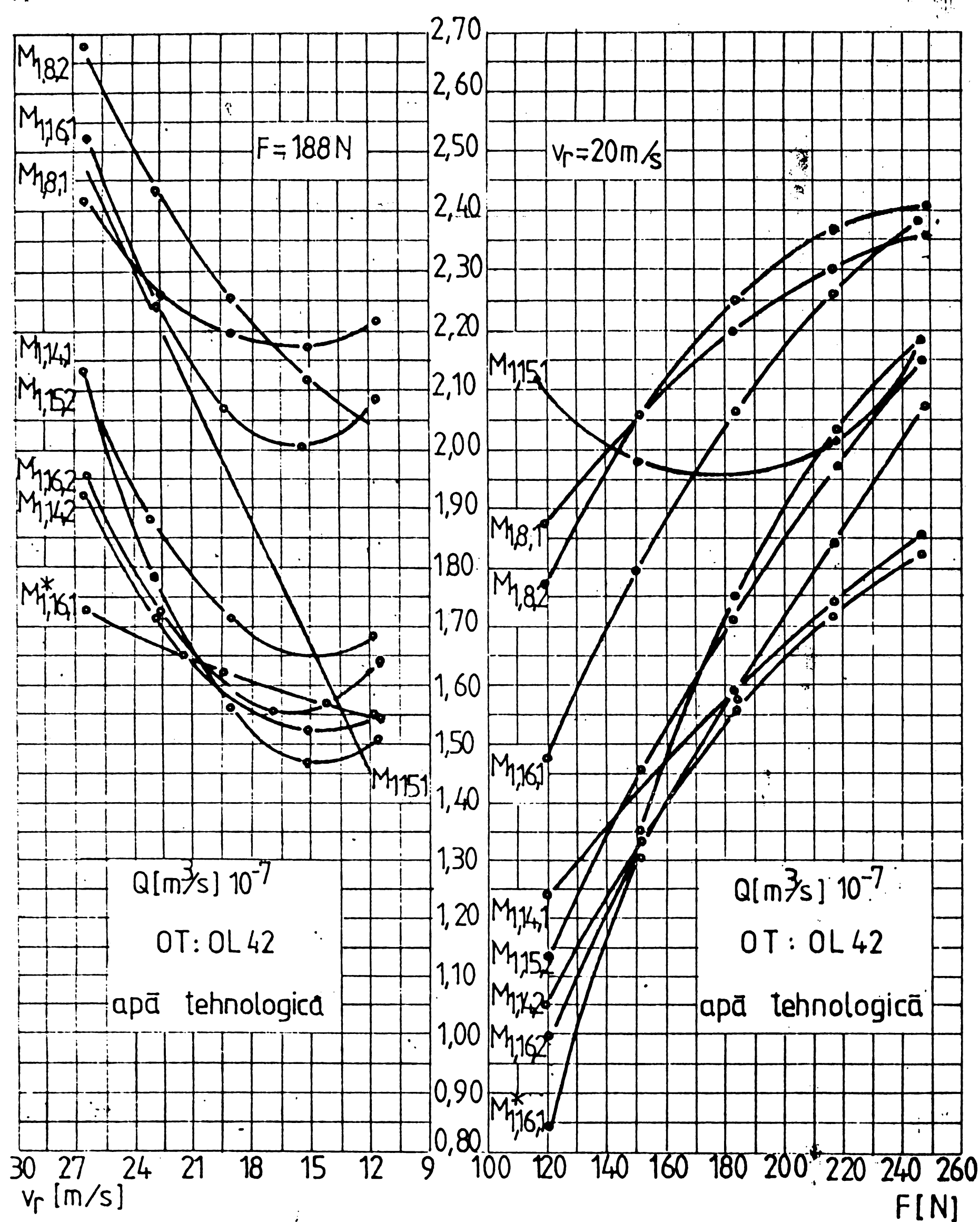


Fig. 4.7. Variația productivității prelucrării în funcție de viteza relativă și de viteza de erodare.

Se remarcă, în toate modelele matematice reprezentate în figura 4.7, dependența productivității prelucrării - Q , de viteza relativă dintre OT și OP și de viteza de erodare. Valori de vîrf ale productivității prelucrării, s-au obținut pentru cele două modele $M_{1,8,1}$ și $M_{1,8,2}$, deci la prelucrarea oțelului înalt aliat și a fontei, cu OT din oțel OL42, cu o sursă de alimentare externă, tensiunea de mers în gol $U_{20} = 20$ V, la presiunea specifică

$p \in (1 \dots 10)$ MPa și densitatea de curent $j \geq 5$ A/mm². Valori minime ale productivității prelucrării, au rezultat la modelele $M_{1,16,1}$ și $M_{1,16,2}$, deci, la prelucrări în aceleași condiții cu cele prezentate anterior, cu deosebire că la aceste modele, s-a utilizat caracteristica externă S28, caracterizată prin tensiunea de mers în gol, $U_{20} = 14,5$ V.

tensiunea de mers în gol $U_{20} = 20$ V la presiunea specifică $p \in (1 \dots 10)$ MPa și densitate de curent $j \geq 5$ A/mm², pe curba caracteristică S₂₇, deci, intensități de curent mai mici decât în cazul productivității prelucrării.

Valori minime ale consumului specific de energie electrică, se obțin la viteze relative și viteze de erodare foarte apropiate valoric de cele prezentate pentru productivitatea prelucrării.

Modelele matematice analizate și prezentate în figurile 4.7 și 4.8 au următoarea formă :

$$01P = 206,17 + 22,88x_1 + 46,72x_2 + 10,07x_1x_2 + 25,55x_1^2 - 13,74x_2^2 ; \quad (4.20)$$

$$02P = 196,17 + 2,37x_1 + 53,27x_2 + 9,61x_1x_2 + 16,54x_1^2 - 0,97x_2^2 ; \quad (4.21)$$

$$03P = 158,30 + 19,38x_1 + 30,57x_2 + 9,05x_1x_2 + 15,86x_1^2 - 5,22x_2^2 ; \quad (4.22)$$

$$04P = 219,85 + 10,73x_1 + 24,71x_2 + 8,09x_1x_2 + 12,03x_1^2 - 8,54x_2^2 ; \quad (4.23)$$

$$05P = 175,21 + 32,22x_1 + 68,28x_2 + 20,99x_1x_2 + 12,13x_1^2 - 25,10x_2^2 ; \quad (4.24)$$

$$06P = 159,19 + 15,85x_1 + 53,45x_2 + 20,80x_1x_2 + 21,91x_1^2 - 5,25x_2^2 ; \quad (4.25)$$

$$07P = 172,84 + 22,08x_1 + 52,83x_2 + 12,06x_1x_2 + 17,76x_1^2 - 7,74x_2^2 ; \quad (4.26)$$

$$08P = 156,51 + 30,89x_1 + 41,10x_2 + 18,52x_1x_2 + 25,63x_1^2 - 10,78x_2^2 ; \quad (4.27)$$

$$09P = 225,84 + 31,22x_1 + 32,32x_2 + 9,22x_1x_2 + 10,11x_1^2 - 18,10x_2^2 ; \quad (4.28)$$

$$01Q = 315,98 - 132,86x_1 - 13,00x_2 - 12,95x_1x_2 + 11,46x_1^2 + 22,86x_2^2 ; \quad (4.29)$$

$$02Q = 330,69 - 63,36x_1 - 20,70x_2 - 6,20x_1x_2 + 24,56x_1^2 + 1,56x_2^2 ; \quad (4.30)$$

$$03Q = 275,88 - 118,46x_1 - 20,53x_2 + 9,75x_1x_2 + 90,33x_1^2 + 4,33x_2^2 ; \quad (4.31)$$

$$04Q = 525,05 - 29,86x_1 - 16,13x_2 + 5,20x_1x_2 + 6,93x_1^2 + 7,53x_2^2 ; \quad (4.32)$$

$$05Q = 465,59 - 129,63x_1 - 23,63x_2 + 11,65x_1x_2 + 0,34x_1^2 + 3,23x_2^2 ; \quad (4.33)$$

$$06Q = 387,77 - 195,40x_1 - 53,86x_2 - 5,35x_1x_2 + 8,00x_1^2 + 7,20x_2^2 ; \quad (4.34)$$

$$07Q = 397,50 - 167,60x_1 - 41,60x_2 - 2,20x_1x_2 + 14,33x_1^2 + 21,33x_2^2 ; \quad (4.35)$$

$$08Q = 397,44 - 68,00x_1 - 26,76x_2 + 2,90x_1x_2 + 8,93x_1^2 + 8,03x_2^2 ; \quad (4.36)$$

$$09Q = 495,25 - 72,50x_1 - 19,76x_2 - 6,05x_1x_2 + 4,83x_1^2 + 7,23x_2^2 ; \quad (4.37)$$

De remarcat este faptul că pentru domeniul cercetat, în cazul productivității, viteza de erodare determină în majoritatea cazurilor salturi de 230%, iar pentru consumul specific de energie electrică, viteza relativă determină de 120-400% în sensul creșterii și descreșterii acestora. Cercetarea detaliată a modelelor, în punctele de referință a nivelelor parametrilor (variabilelor independente), pentru productivitatea prelucrării și consumul specific de energie electrică, a confirmat aceste concluzii. Se remarcă, însă, o deplasare a punctelor de minim ale productivității spre viteze relative superioare, odată cu creșterea vitezei de erodare.

Între aceste zone extreme, se situează celelalte modele matematice, însă pentru toate modelele reprezentate creșterea vitezei relative - v_r și a vitezei de erodare - v_e , determină creșterea productivității prelucrării. Valori maxime ale productivității - Q (fig.4.7), se obțin la viteze relative de 30 m/s și viteze de erodare echivalente unei presiuni specifice $p = 9,789$ MPa, pe curbe caracteristice care determină densități de curent $j \geq 5A/mm^2$.

Se impune deci, pentru adoptarea corectă a parametrilor tehnologici de proces, determinarea zonelor de optim în care să se asigure prin perechi de valori, viteză relativă - viteză de erodare, productivitatea maximă prelucrării.

Modelele matematice reprezentate în figura 4.8, reprezintă dependența consumului specific de energie electrică - q , de viteza relativă - v_r și de viteza de erodare - v_e .

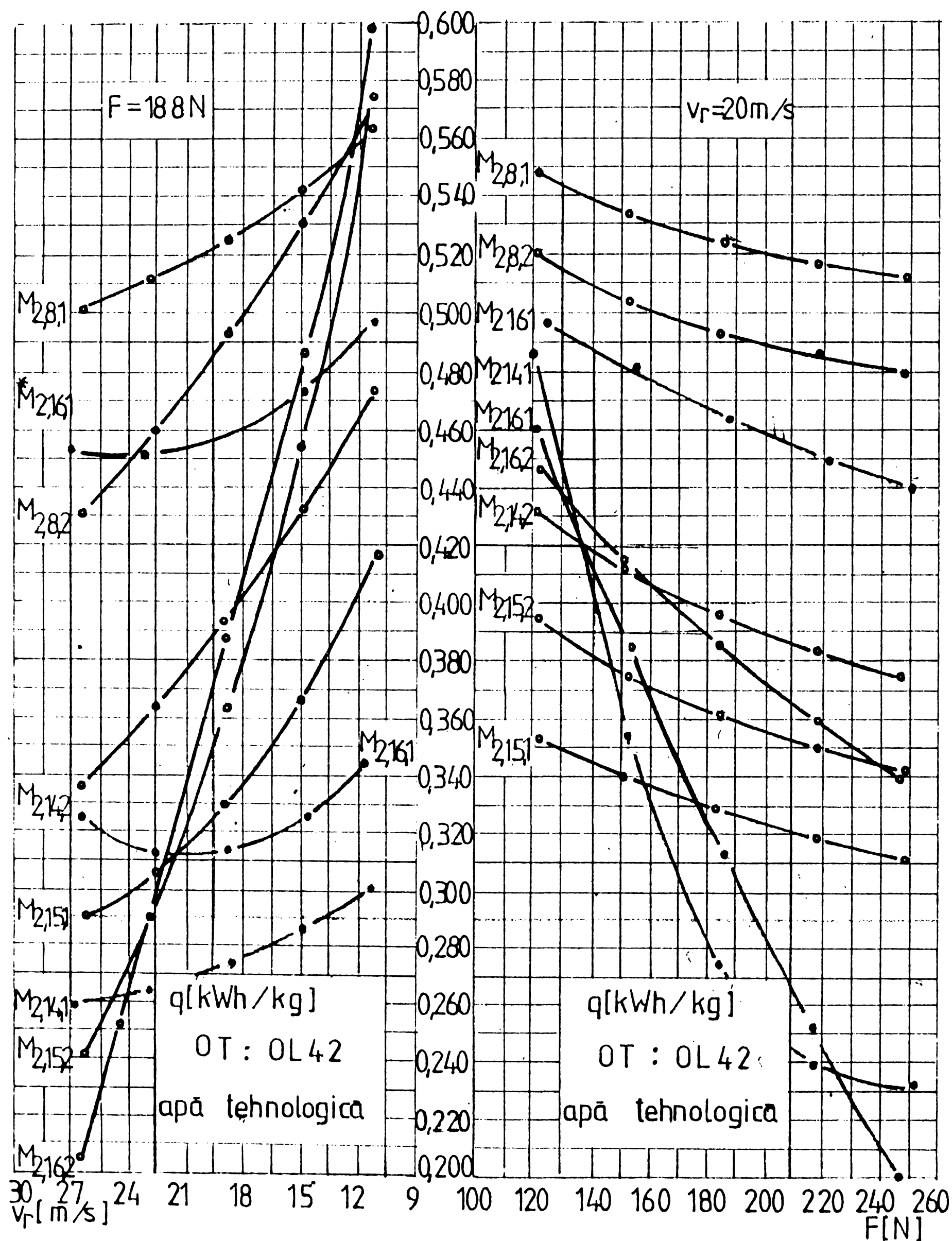


Fig.4.8. Variația consumului specific de energie electrică în funcție de viteza relativă și de viteza de erodare.

Valori maxime ale consumului specific de energie electrică s-au obținut pentru modelele $M_{1,8,1}$ și $M_{1,8,2}$ adică tocmai pentru modelele evidențiate în cazul analizei productivității prelucrării. De remarcat este faptul că odată cu deplasarea vitezei relative și a vitezei de erodare spre valori superioare, are loc o scădere a consumului specific de energie electrică. Valori minime ale consumului specific de energie electrică, au rezultat pentru modelele $M_{2,15,1}$ și $M_{2,15,2}$, deci, la prelucrarea oțelului înalt aliat și a fontei cu OT din oțel OL42,

4.4. Programul de calcul și reprezentarea grafică a curbelor de regresie

Pe parcursul subcapitolului 4.3.1., s-a prezentat modul în care a fost adoptat și planificat programul de experimentare. Prelucrarea rezultatelor, în vederea stabilirii relațiilor finale dintre parametrii (factorii) procesului eroziv și variabilele de stare adoptate, impune obligatoriu folosirea mijloacelor electronice de calcul.

Reprezentarea grafică, a ecuațiilor curbelor de regresie rezultate, este facilitată de utilizarea mijloacelor electronice de calcul. Configurațiile rezultate permit analiza vizuală, și determină adoptarea deciziei de optimizare tehnologică a procesului eroziv de prelucrare prin procedeul EERC.

4.4.1. Programul de calcul pentru modelarea matematică

Programul de calcul pentru determinarea relațiilor de interdependență s-a realizat prin teste statistice de prelucrare a datelor, pentru cele două tipuri de experiențe factoriale adoptate, experimentul factorial complet (E.F.C), experiment factorial compus-program ortogonal de ordinul doi (E.F.C. - P02)/90, 106, 108/.

Analiza datelor experimentale, prin metode statistice, are ca scop bine definit trecerea de la particular la general. Pentru ca rezultatele experimentale obținute să asigure atingerea acestui obiectiv, este necesar ca acestea să fie reprezentative, adică fiecare experiment să aibă aceiași probabilitate de a fi obținut.

Pentru cercetarea experimentală cel mai mult se utilizează "sondajul simplu" al rezultatelor experimentale.

Estimarea adevăratelor valori ale mărimilor măsurate în timpul cercetării are în vedere cele două categorii de erori de măsurare :

- erorile sistematice (cauzate de imprecizia aparatelor de măsurat, a metodei de măsurare, factorilor exteriori cu acțiune unilaterală), calculate și limitate la valori acceptate de cercetarea experimentală (subcapitolul 4.1.3) ;

- erorile aleatoare, controlabile prin metode probabilistice.

Activitatea de prelucrare efectivă a datelor experimentale a debutat cu prima etapă, calculul principalelor parametrii

statistici :

- media aritmetică, \bar{y} ;
- dispersia s^2 (σ^2) ;
- abaterea medie pătratică, s .

Relațiile care definesc acești parametri, sînt următoarele ;

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{y} = 1/m(y_1 + y_2 + \dots + y_m) = 1/m \sum_{i=1}^m y_i \\ s^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2 \end{array} \right. , \quad (4.38)$$

în care, m , reprezintă numărul determinărilor paralele efectuate pentru un punct experimental.

În continuare, se impune eliminarea rezultatelor experimentale afectate de erori grosolane. Prin această excludere de date experimentale se urmărește utilizarea unor informații cât mai omogene.

Pentru această etapă s-a utilizat testul Grubs și s-au determinat următoarele mărimi caracteristice ;

- mărimea v_p ;
- valoarea teoretică maximă a rezultatului experimental, $x_{(n)P}$;
- valoarea teoretică minimă a rezultatului experimental, $x_{(1)P}$.

Valorile acestor mărimi sînt determinabile prin relațiile

$$\left\{ \begin{array}{l} v_p = \frac{y_{(n)P} - \bar{y}}{s} ; \\ y_{(n)P} = \bar{y} + sv_p ; \\ y_{(1)P} = \bar{y} - sv_p , \end{array} \right. \quad (4.39)$$

în care, probabilitatea, P , a fost adoptată la valoarea de 0,95 iar numărul probelor efectuate pentru fiecare determinare, $n = 5$.

Corespunzător acestui test cei doi parametri de sondaj, media - y și abaterea medie pătratică - s , s-au calculat pe baza tuturor datelor experimentale, efectuate pentru o determinare.

Aplicarea testului Grubs a permis testarea și corectarea matricei rezultatelor experimentale.

Programul de calcul a continuat cu verificarea numărului minim de determinări paralele, zonele afectate de eliminarea erorilor grosolane fiind completate cu noi experimente.

Etapa a doua de calcul, cuprinde calculul și analiza

coeficienților ecuației de regresie pentru experimentul factorial complet (E.F.C.). În această etapă s-au desfășurat următoarele evenimente :

- calculul dispersiei erorii experimentale (testul Cochran) ;
- calculul coeficienților ecuației de regresie, b_i ;
- verificarea semnificației coeficienților ecuației de regresie (testul Student) ;
- verificarea gradului de concordanță a ecuației de regresie (testul Fischer).

Determinarea erorii experimentale, s_0^2 , a debutat prin calculul dispersiilor, pentru fiecare rînd al matricii programării, s_u^2 , urmat de verificarea omogenității dispersiilor, cu ajutorul testului Cochran. Pentru dispersiile omogene s-a calculat dispersia medie, care reprezintă eroarea experimentală, relația (4.40) :

$$\begin{aligned}
 s_u^2 &= \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (y_{ui} - \bar{y}_u)^2, \quad (u = 1, 2, \dots, N) ; \\
 \mathcal{G}_c &= \frac{s_u^2 \max}{\sum_{u=1}^N s_u^2} ; \\
 \mathcal{G}_c &\leq T_{0,05}(\nu_1, \nu_2), \quad (\nu_1 = m-1, \nu_2 = N) ; \\
 s_0^2 &= \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N s_u^2 ;
 \end{aligned}
 \tag{4.40}$$

în care, m reprezintă numărul determinărilor paralele ;

N - numărul punctelor experimentale (numărul rîndurilor matricii programării) ;

\mathcal{G}_c - valoarea calculată a testului Cochran ;

$\mathcal{G}_{0,05}$ - valoarea tabelată a testului Cochran.

Nivelul de semnificație α , a fost adoptat la valoarea de 0,05, pentru numărul gradelor de libertate ν_1 și ν_2 .

Calculul coeficienților ecuației de regresie, s-a efectuat prin rezolvarea sistemului de ecuații (4.41) :

$$\left| \begin{array}{l} \sum_{u=1}^N x_{iu}^2 x_{ju}^2 = N, \quad (i, j = 1, 2, \dots, n; i \neq j) \\ b_{ij} = (1/N) \sum_{u=1}^N x_{iu} x_{ju} y_u \quad (i \neq j) \end{array} \right. , \quad (4.41)$$

în care , n reprezintă numărul parametrilor (factorilor) ;
 b - coeficienții ecuației de regresie ;
 y_u - media aritmetică a valorilor obținute în cele "m" determinări paralele corespunzătoare rîndului "u" al matricei programării. S-au utilizat, matricea parametrilor (factorilor), X, transpusa matricei parametrilor (factorilor), X', matricea coloană a rezultatelor experimentale medii, Y, și matricea coeficienților, B.

Sistemul de ecuații normale transpus va lua forma din relația (4.42) :

$$B = (X'X)^{-1} X'Y \quad (4.42)$$

Verificarea semnificației coeficienților ecuației de regresie, s-a efectuat utilizând testul Student, prin rezolvarea sistemului de ecuații (4.43) :

$$\left| \begin{array}{l} s_{bi}^2 = \frac{s_0^2}{Nm} \\ t_{bi} = \frac{|b_i|}{s_{bi}} \quad , \quad (i = 1, 2, \dots, l) \\ t_{bi} > T_{0,05} \quad , \quad (v_0) \end{array} \right. \quad (4.43)$$

în care , l, reprezintă numărul coeficienților ecuației de regresie;

t_{bi} - valoarea calculată a testului Student ;

$t_{0,05}$ - valoarea tabelară a testului Student corespunzătoare unui nivel de semnificație α , adoptat la valoarea de 0,05.

Verificarea gradului de concordanță a ecuației de regresie, s-a realizat prin aplicarea testului Fischer. Acest test calculează dispersia de concordanță, s_{con}^2 și raportul dintre această dispersie și dispersia medie (eroarea experimentală), raport care reprezintă valoarea calculată a testului :

$$s_{\text{con}}^2 = \frac{m}{N-1} \sum_{u=1}^N (\bar{y}_u - \tilde{y}_u)^2$$

$$F_c = s_{\text{con}}^2 / s_o^2, \quad (4.44)$$

$$F_c \leq F_{0,05}, \quad (\nu_{\text{con}}, \nu_o), \quad \nu_{\text{con}} = N-1; \nu_o = N(m-1)/$$

în care, \tilde{y}_u reprezintă valorile medii calculate cu ecuația de regresie ;

1 - numărul termenilor semnificativi din ecuația de regresie ;

F_c - valoarea calculată a testului Fischer ;

$F_{0,05}$ - valoarea tabelară a testului Fischer corespunzătoare unui nivel de semnificație α , adoptat la valoarea de 0,05 pentru numărul gradelor de libertate ν_{con} și ν_o .

Etapa a treia de calcul, cuprinde calculul și analiza coeficienților ecuației de regresie pentru experimentul factorial compus - program ortogonal de ordinul doi (E.F.C - P02). Această etapă se utilizează atunci când modelele liniare sînt neadecvate. În această ultimă etapă s-au desfășurat evenimente identice cu cele enunțate în etapa a doua, cu mențiunea utilizării relațiilor de calcul specifice programelor ortogonale de ordinul doi /108/.

Programul de calcul P-04 (fig.4.6), a fost conceput pentru a asigura prelucrarea rapidă a unui volum mare de date necesare modelării procesului eroziv.

```
TYP P04. FTN
PROGRAM P-04
C
IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H, O-Z)
DIMENSION VEXP(32,10), Y(32,10)
DIMENSION YMED(32), S2YE(32), B(32), YMOD(32), XP(32,10), XMED(32)
DIMENSION SB 2(32)
DATA NP, NS, NT/32, 10, 4/
CHARACTER 12 FISDAT
BYTE UN
ALFA = 0,05
50 TYPE 60
60 FORMAT (' Fisier de date (c6);', '$)
READ (5,70, ERR = 50) FISDAT
70 FORMAT (A12)
IF(FISDAT(1;1);,EQ,, ' ')GOTO 50
OPEN(UNIT=1, FILE=FISDAT, ORGANIZATION='SEQUENTIAL',
1 ACCES='SEQUENTIAL; FORM='FORMATED; RECL=80,
2 STATUS= 'OLD; ERR=1300
UN=5
EPS=0,000001
90 TYPE 100
100 FORMAT('Nr.de variabile independente NVAR;', '$)
```



```
RECD(5,110,ERR=90)NVAR
110 FORMAT (12)
    IF(NVAR.LE.0)GOTO 90
120 TYPE 130
130 FORMAT('Nr.de nivele NIV;', $)
    READ(5,110,ERR=120)NIV
    IF(NIV.LE.0)GOTO 120
140 TYPE 150
150 FORMAT('Nr.de experiențe NEXP;', $)
    READ(5,110,ERR=140)NEXP
160 TYPE 170
170 FORMAT('Nr.de determinări paralele IJK;', $)
    READ(5,110,ERR=160)IJK
    IF(IJK.LE.0)GOTO 160
    NEXP1=NEXP + 1
    TYPE , 'MATRICEA EXPERIMENTELOR SI REZULTATELOR'
    DO 10 I=1, NEXP 1
        READ(1,30,END=40,ERR=1301) (VEXP(I,J),J=1,NVAR), (Y(I,J),
        J=1,IJK)
        TYPE 30, (VEXP(I,J),J=1,NVAR), (Y(I,J),J=1, IJK)
10 CONTINUE
30 FORMAT(<NVAR>F8.4.<IJK>F10.4)
40 CONTINUE
    CLOSE(1)
365 CALL MEDARIT(Y,NEXP,IJK,YMED,NP,NS,EPS)
    TYPE *, 'Media aritmetică a rezultatelor'
    DO 380 I=1,NEXP
        WRITE(UN,390)I, YMED(I)
380 CONTINUE
390 FORMAT(2X,I5,5X,1PE 15.6)
    CALL DISPER(Y, YMED, NEXP, IJK, S2YE, SUMA, NP, NS, EPS)
    TYPE , ' Dispersia funcției de răspuns'
    DO 410 I=1,NEXP
        WRITE(UN,390)I, S2YE(I)
410 CONTINUE
    WRITE(UN,430)SUMA
430 FORMAT(2X, 'Suma dispersiilor;', 1PE 15.6, /)
    IF(SUMA.LT.EPS) STOP 11111
    CALL TGRUBS(Y, YMED, S2YE, IJK, NEXP, NOMOG, NP, NS, EPS)
    TYPE *, 'Matricea rezultatelor corectată cu testul GRUBS'
    DO 440 I=1,NEXP
        WRITE(UN,450)I, (Y(I,J), J=1, IJK)
440 CONTINUE
450 FORMAT(2X, I3, <IJK> (1PE 15.6) )
    IF(NOMOG.NE.0)GOTO 365
    CALL TNULY(Y, NEXP, IJK, NML, NP, NS, EPS)
    IF(NML.EQ.07) THEN
        TYPE *, 'Repetati experimentul datorită neomogenității re
        STOP 22222
    ENDIF
    CALL TCOHR(S2YE, SUMA, NEXP, GC, NP)
    WRITE(UN,460) GC
460 FORMAT62X, 'Val.calculata test COHRAN ;', F10.4)
    CALL TABCOH(NEXP, IJK, GTAB)
    WRITE(UN,470) GTAB
470 FORMAT(2X, 'Val.tabelata test COHRAN ;', F10.4)
    IF(GC.GE.GTAB) THEN
        WRITE(UN,480)
480 FORMAT(2X, 'Dispersiile NU sint omogene !!!' /)
    ENDIF
    CALL DERROR(S2YE, NEXP, IJK, S, NF2, NP)
    WRITE(UN,490) S, NF2
```

```
490   FORMAT(2X,'Dispersia erorii experimentale;',F10.4,/,
      2X,'Nr. grd.libertate dispersie   ;',I5,/)
CALL COFREG(VEXP,XP,YMED,B,XMED,NVAR,NEXP,IJK,NCOF,NP,NS)
WRITE(UN,500)
500   FORMAT(2X,'Coeficientii de regresie ;',/)
      DO 505 I=1,NCOF
      WRITE(UN,510)I,B(I)
505   CONTINUE
510   FORMAT(2X,I5,5X,F15.7)
CALL DISCOF(VEXP,Y,YMED,SB2,B,XP,SO2,NEXP,NVAR,IJK,NO,NP,NS)
CALL TSTUD(SB2,B,IJK,NVAR,NCOF,NP)
WRITE(UN,520)
520   FORMAT(2X,'Coef.regresiei testati cu testul STUDENT',/)
      WRITE(UN,530) (I,B(I),I=1,NCOF)
530   FORMAT(2X,I5,5X,F15.7)
CALL CLCMOD(VEXP,B,YMOD,NEXP,NVAR,NP,NS)
CALL TFISH(NEXP,NVAR,IJK,YMED,B,NF2,SO2,VEXP,YMOD,NF1,NCOF,FTAB,
1      FC,NP,NS)
WRITE(UN,535) NF1,NF2,FTAB,FC
535   FORMAT(2X,'Nr.grd.libertate NF1;',I5,/,
1      19X,'NF2;',I5,/,
2      2X,'Valoarea tabelata a testului FISHER;',F10.4,/,
3      2X,'Valoarea calculata a testului FISHER;',F10.4,/)
WRITE(UN,540) (I,YMOD(I),I=1,NEXP)
540   FORMAT(2X,I5,5X,F10.4,/)
GOTO 999
1300  TYPE *, '...EROARE OPEN fisier ;',FISDAT
GOTO 999
1301  TYPE *, '...EROARE CITIRE fisier ;',FISDAT
999   CONTINUE
STOP
END
SUBROUTINE MEDARIT(Y,NEXP,IJK,YMED,NP,NS,EPS)
IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
DIMENSION Y(NP,NS),YMED(NP)
DO 10 I=1,NEXP
  N1=0
  YMED(I)=0
  DO 20 J=1,IJK
    IF(Y(I,J).GT.EPS) THEN
      N1=N1+1
      YMED(I)=YMED(I)+Y(I,J)
    ENDIF
  20  CONTINUE
  IF(N1.NE.0) YMED(I)=YMED(I)/N1
10   CONTINUE
RETURN
END
SUBROUTINE DISPER(Y,YMED,NEXP,IJK,S2YE,SUMA,NP,NS,EPS)
IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
DIMENSION Y(NP,NS),YMED(NP),S2YE(NP)
SUMA=0
DO 10 I=1,NEXP
  N1=0
  S2YE(I)=0
  DO 20 J=1,IJK
    IF(Y(I,J).GT.EPS) THEN
      N1=N1+1
      S2YE(I)=S2YE(I)+(Y(I,J)-YMED(I)) (Y(I,J)-YMED(I))
    ENDIF
  20  CONTINUE
  IF(N1.LT.2) THEN
    TYPE *, 'Dispersia NU se poate determina'
    GOTO 10
  ENDIF
```



```

    S2YE(I)=S2YE(I)/FLOAT(N1-1)
    SUMA=SUMA+S2YE(I)
10  CONTINUE
    RETURN
    END
    SUBROUTINE TCOHR(S2YE,SUMA,NEXP,GC,NP)
    IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
    DIMENSION S2YE(NP)
    XMAX=S2YE(1)
    DO 1 I=1,NEXP
        IF(XMAX.LT.S2YE(I)) XMAX=S2YE(I)
1  CONTINUE
    GC=XMAX/SUMA
    RETURN
    END
    SUBROUTINE TABCOH(NEXP,IJK,GTAB)
    IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
    INTEGER VALC1(17),VALC2(9)
    DIMENSION COHR(17,9)
    DATA VALC1/2,3,4,5,6,7,8,9,10,12,15,20,24,30,40,60,120/
    DATA VALC2/2,3,4,5,6,7,8,8,10/
    DATA COHR/.995,.97,.91,.84,.78,.73,.68,.64,.60,.54,.47,.31,.34,
1  .29,.24,.17,.10,.97,.87,.77,.68,.62,.56,.52,.48,.44,.39,
2  .33,.27,.24,.20,.16,.11,.06,.94,.80,.68,.60,.53,.48,.44,
3  .40,.37,.33,.28,.22,.19,.16,.13,.09,.05,.91,.75,.63,.54,
4  .48,.43,.39,.36,.33,.29,.24,.19,.17,.14,.11,.08,.04,.88,
5  .71,.59,.51,.44,.40,.36,.33,.30,.26,.22,.17,.15,.12,.10,
6  .07,.04,.85,.68,.56,.48,.42,.37,.34,.31,.28,.24,.20,.16,
7  .14,.11,.09,.06,.03,.83,.65,.54,.46,.40,.35,.32,.29,.27,
8  .23,.19,.15,.13,.11,.08,.06,.03,.82,.63,.52,.44,.38,.34,
9  .30,.28,.25,.22,.18,.14,.12,.10,.08,.06,.03,.80,.62,.50,
1  .42,.37,.33,.29,.27,.24,.21,.17,.14,.13,.10,.07,.05,.03/
    M1=NEXP
    M2=IJK-1
    CALL CORLIB(VALC1,M1,17)
    CALL CORLIB(VALC2,M2,9)
    TYPE *,M1,M2
    GTAB=COHR(M1,M2)
    RETURN
    END
    SUBROUTINE CORLIB(VAL,M1,NR)
    INTEGER VAL(NR)
    NNR=1
    DO 1 I=1,NR
        IF(M1.LE.VAL(I)) GOTO 2
        NNR=NNR+1
1  CONTINUE
    IF(NNR.GT.NR)*NNR=NR
2  CONTINUE
    M1=NNR
    RETURN
    END
    SUBROUTINE DERROR(S2YE,NEXP,IJK,S,NF2,NP)
    IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
    DIMENSION S2YE(NP)
    S=0.
    DO 1 I=1,NEXP
        S=S+S2YE(I)
1  CONTINUE
    S=S/NEXP
    NF2=NEXP (IJK-1)
    RETURN
    END

```

```
SUBROUTINE COFREG(VEXP,XP,YMED,B,XMED,NVAR,NEXP,IJK,NCOF,NP,NS)
IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
DIMENSION VEXP(NP,NS),XP(NP,NS),YMED(NP),B(NP),XMED(NP)
DO 10 I=1,NEXP
    B(I)=0
    B(1)=B(1)+YMED(I)
10 CONTINUE
B(1)=B(1)/NEXP
DO 20 J=1,NVAR
    V=0
    DO 30 K=1,NEXP
        B(J+1)=B(J+1)+VEXP(K,J)*YMED(K)
        V=V+VEXP(K,J)*VEXP(K,J)
30 CONTINUE
B(J+1)=B(J+1)/V
TYPE *, 'J=', J, ' V=', V, ' B(J+1)=', B(J+1)
20 CONTINUE
DO 40 I=1,NVAR-1
    J=I+1
50 IF (J.GT.NVAR) GOTO 40
    N2=NVAR+J+I-1
    V=0
    DO 60 K=1,NEXP
        B(N2)=B(N2)+VEXP(K,I)*VEXP(K,J)*YMED(K)
        V=V+VEXP(K,I)*VEXP(K,I)*VEXP(K,J)*VEXP(K,J)
60 CONTINUE
B(N2)=B(N2)/V
TYPE *, 'N2=', N2, ' B(N2)=', B(N2), ' V=', V
    J=J+1
    GO TO 50
40 CONTINUE
DO 70 I=1,NVAR
    XMED(I)=0
    DO 71 K=1,NEXP
        XMED(I)=XMED(I)+VEXP(K,I)*VEXP(K,I)
71 CONTINUE
XMED(I)=XMED(I)/NEXP
TYPE *, 'I=', I, ' XMED=', XMED(I)
70 CONTINUE
DO 80 I=1,NVAR
    DO 90 J=1,NEXP
        XP(J,I)=VEXP(J,I)*VEXP(J,I)-XMED(I)
90 CONTINUE
80 CONTINUE
N11=N2
DO 100 I=1,NVAR
    N2=N2+1
    V=0
    DO 110 J=1,NEXP
        B(N2)=B(N2)+XP(J,I)*YMED(J)
        V=V+XP(J,I)*XP(J,I)
110 CONTINUE
B(N2)=B(N2)/V
TYPE *, 'N2=', N2, ' B(N2)=', B(N2)
100 CONTINUE
NCOF=(NVAR+1)*(NVAR+2)/2
TYPE *, 'COFREG; NCOF=', NCOF
V=0
DO 120 I=1,NVAR
    N11=N11+1
    V=V+B(N11)*XMED(I)*XMED(I)
120 CONTINUE
```



```

B(1)=B(1)-V
RETURN
END
SUBROUTINE TNULY(Y,NEXP,IJK,NM1,NP,NS,EPS)
IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
DIMENSION Y(NP,NS)
NM1=0
DO 1 J=1,IJK
  DO 2 I=1,NEXP
    IF(Y(I,J).GT.EPS) NM1=NM1+1
2    CONTINUE
1  CONTINUE
RETURN
END
SUBROUTINE TGRUBS(Y,YMED,S2YE,IJK,NEXP,MOMOG,NP,NS,EPS)
IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
INTEGER VALG(23)
DIMENSION Y(NP,NS),YMED(NP),S2YE(NP)
DIMENSION GRUBS(23)
DATA VALG/3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,
1      23,24,25/
DATA GRUBS/.1412,1.698,1.869,1.996,2.093,2.172,2.237,2.294,2.343,
1      2.387,2.426,2.461,2.493,2.523,2.551,2.577,2.600,2.623,
1      2.644,2.664,2.683,2.701,2.717/
MOMOG=0
M1=NEXP
CALL CORLIB(VALG,M1,23)
VR=GRUBS(M1)
TYPE *, 'M1=',M1, ' VR=',VR
DO 1 I=1,NEXP
  S1=SQRT(S2YE(I))
  YMAXP=YMED(I)+S1*VR
  YMINP=YMED(I)-S1*VR
  TYPE *, YMINP, YMAXP, S1
  DO 20 J=1,IJK
    IF(Y(I,J).LT.EPS) GOTO 20
    IF(YMINP.LE.Y(I,J).AND.Y(I,J).LE.YMAXP) GOTO 20
    Y(I,J)=0.
  20  CONTINUE
1  CONTINUE
RETURN
END
SUBROUTINE TSTUD(SB2,B,IJK,NVAR,NCOF,NP)
IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
INTEGER VALS1(34)
DIMENSION STUD(24)
DIMENSION SB2(NP),B(NP)
DATA VALS1/1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,
1      22,23,24,25,26,27,28,29,30,40,30,120,1000/
DATA STUD/12.706,4.303,3.182,2.776,2.571,2.447,2.365,2.306,2.262,
1      2.228,2.201,2.179,2.160,2.145,2.131,2.120,2.110,2.101,
2      2.093,2.086,2.080,2.074,2.069,2.064,2.060,2.056,2.052,
3      2.048,2.045,2.042,2.021,2.000,1.980,1.960/
M1=IJK-1
CALL CORLIB(VALS1,M1,34)
TYPE *, 'M1=',M1
TABS=STUD(M1)
TYPE *, 'Valoarea tabelata a testului STUDENT;', TABS
NCOF=(NVAR+1)*(NVAR+2)/2
M1=0
TYPE *, 'NCOF=',NCOF
DO 10 I=2,NCOF

```

```
3      2.28,2.25,2.23,2.2,2.18,2.16,2.15,2.13,2.12,2.
      10,2.09,2.,1.92,1.83,
4      1.75,249.,19.45,8.64,5.77,4.53,3.84,3.41,3.12,
      2.9,2.74,2.61,2.5,
5      2.42,2.35,2.29,2.24,2.19,2.15,2.11,2.08,2.05,2.
      03,2.,1.98,1.96,1.95,
6      1.93,1.91,1.9,1.89,1.79,1.7,1.61,1.52,254.3,19.
      5,8.53,5.63,4.36,
7      3.67,3.23,2.93,2.73,2.54,2.4,2.3,2.21,2.13,2.07,
      2.01,1.96,1.92,1.88,
8      1.84,1.81,1.78,1.76,1.73,1.71,1.69,1.67,1.65,1.
      64,1.62,1.51,1.39,
```

```
9      1.25,1./
S2AD=0
DO 2 L=1,NEXP
      S2AD=S2AD+(YMOD(L)-YMED(L)) * (YMOD(L)-YMED(L))
```

```
CONTINUE
L1=(NVAR+1) * (NVAR+2)/2
S2AD=S2AD/FLOAT(NEXP-L1)
TYPE *, 'Dispersia de concordanta ;', S2AD
FC=S2AD/S
NF1=NEXP-L1
NF2=IJK-1
M2=NF1
M1=NF2
```

```
CALL CORLIB(VALF1,M1,34)
CALL CORLIB(VALF2,M2,10)
TYPE *, 'M1=', M1, ' M2=', M2
FTAB=FISH(M1,M2)
IF(FC.LE.FTAB) THEN
      TYPE *, 'Modelul se considera adecvat'
ELSE
      TYPE *, 'Model neadecvat'
ENDIF
RETURN
END
```

```
SUBROUTINE DISCOF(VEXP, Y, YMED, SB2, B, XP, SO2, NEXP, NVAR,
1      IJK, NO, NP, NS)
IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H, O-Z)
DIMENSION VEXP(NP, NS), SB2(NP), Y(NP, NS), YMED(NP), XP(NP, NS)
NO=IJK
SO2=0
```

```
DO 10 K=1,NO
      SO2=SO2+(Y(NEXP,K)-YMED(NEXP)) * (Y(NEXP,K)-YMED(NEXP))
CONTINUE
```

```
SO2=SO2/(NO-1)
SB2(1)=SO2/FLOAT(NEXP)
TYPE *, 'SB2(1)=', SB2(1), ' SO2=', SO2
DO 20 I=2, NVAR+1
      X2=0
      DO 30 K=1, NEXP
            X2=X2+VEXP(K, I-1) * VEXP(K, I-1)
```

```
CONTINUE
SB2(I)=SO2/X2
TYPE *, 'I=', I, ' SB2(I)=', SB2(I), ' X2=', X2
```

```
CONTINUE
N=NVAR+1
DO 40 I=1, NVAR-1
      J=I+1
      IF(J.GT.NVAR) GOTO 40
```



```
TYPE * , 'I=', I, ' SB2(I)=', SB2(I)
SBI=DSQRT(DABS(SB2(I)))
TBI=SBI * DABS(B(I))
TYPE * , 'I=', I, ' SBI=', SBI, ' TBI=', TBI
IF(TBI.LT.TABS) THEN
    B(I)=0
    NI=NI+1
ENDIF
10 CONTINUE
C NCOF=NCOF-NI
RETURN
END
SUBROUTINE TFISH(NEXP, NVAR, IJK, YMED, B, NF2, S, VEXP, YMOD, NFI,
1 NCOF, FTAB, FC, NP, NS)
IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H, O-Z)
DIMENSION VEXP(NP, NS), YMED(NP), YMOD(NP), B(NP)
INTEGER VALF1(34), VALF2(10)
DIMENSION FISH(34, 10)
DATA VALF1/1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19,
1 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 40, 60, 120, 1000/
DATA VALF2/1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 12, 24, 1000/
DATA FISH/161.4, 18.51, 10.13, 7.71, 6.61, 5.99, 5.59, 5.32, 5.12, 4.
96, 4.84,
1 4.75, 4.67, 4.60, 4.54, 4.49, 4.45, 4.41, 4.38, 4.35, 4.32, 4.
30, 4.28,
2 4.26, 4.24, 4.22, 4.21, 4.20, 4.18, 4.17, 4.08, 4.00, 3.92, 3.
3 199.5, 19.00, 9.55, 6.94, 5.79, 5.14, 4.74, 4.46, 4.26, 4.10,
3.98, 3.88,
4 3.80, 3.74, 3.68, 3.63, 3.59, 3.55, 3.52, 3.49, 3.47, 3.44, 3.
42, 3.40,
5 3.38, 3.37, 3.35, 3.34, 3.33, 3.32, 3.23, 3.15, 3.07, 2.99, 2.
7, 19.16,
6 9.28, 6.59, 5.41, 4.76, 4.35, 4.07, 3.86, 3.71, 3.59, 3.49, 3.
41, 3.34,
7 3.29, 3.24, 3.20, 3.16, 3.13, 3.10, 3.07, 3.07, 3.03, 3.01, 2.
99, 2.98,
8 2.96, 2.95, 2.93, 2.92, 2.84, 2.76, 2.68, 2.60, 2.24.6, 19.25,
9.12,
9 6.39, 5.19, 4.53, 4.12, 3.84, 3.63, 3.48, 3.36, 3.26, 3.18, 3.
11, 3.06,
1 3.01, 2.96, 2.93, 2.90, 2.87, 2.84, 2.82, 2.80, 2.78, 2.76, 2.
74, 2.73,
2 2.71, 2.70, 2.69, 2.61, 2.52, 2.45, 2.37, 2.30.2, 19.3, 9.01, 6.
26, 5.05,
3 4.39, 3.97, 3.69, 3.48, 3.33, 3.20, 3.11, 3.02, 2.96, 2.90, 2.
85, 2.81,
4 2.77, 2.74, 2.71, 2.68, 2.66, 2.64, 2.62, 2.60, 2.59, 2.57, 2.
56, 2.54,
5 2.53, 2.45, 2.37, 2.29, 2.21, 2.34.0, 19.33, 8.94, 6.16, 4.95,
4.28, 3.87,
6 3.58, 3.37, 3.22, 3.09, 3., 2.92, 2.85, 2.79, 2.74, 2.70, 2.66,
2.63, 2.60, 2.57,
7 2.55, 2.53, 2.51, 2.49, 2.47, 2.46, 2.44, 2.43, 2.42, 2.34, 2.
25, 2.17, 2.09,
8 238.9, 19.37, 8.84, 6.04, 4.82, 4.15, 3.73, 3.44, 3.23, 3.07,
2.95, 2.85, 2.77,
9 2.70, 2.64, 2.59, 2.55, 2.51, 2.48, 2.45, 2.42, 2.40, 2.38, 2.
30, 2.34, 2.32,
1 2.30, 2.29, 2.28, 2.27, 2.18, 2.1, 2.01, 1.94, 2.43.9, 19.41, 8.
74, 5.91, 4.68,
2 4., 3.57, 3.28, 3.07, 2.91, 2.79, 2.69, 2.6, 2.53, 2.48, 2.42, 2.
38, 2.34, 2.31,
```

```

        N2=NVAR+I+J-1
        S=0
        DO 60 K=1,NEXP
            S=S+VEXP(K,I) * VEXP(K,I) * VEXP(K,J) * VEXP(K,J)
60     CONTINUE
        SB2(N2)=S02/S
        TYPE *, 'N2=', N2, ' SB2(N2)=', SB(N2), ' S=', S
        J=J+1
        GOTO 50
40    CONTINUE
        DO 100 I=1,NVAR
            N2=N2+1
            S=0
            DO 110 J=1,NEXP
                S=S+XP(J,I) * XP(J,I)
110   CONTINUE
            SB2(N2)=S02/S
            TYPE *, 'N2=', N2, ' SB2(N2)=', SB2(N2), ' S=', S
100  CONTINUE
        RETURN
        END
        SUBROUTINE CLCMOD(VEXP,B,YMOD,NEXP,NVAR,NP,NS)
        IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H, O-Z)
        DIMENSION VEXP(NP,NS),B(NP),YMOD(NP)
        DO 10 K=1,NEXP
            S=B(1)
            DO 20 J=1,NVAR
                S=S+B(J+1) * VEXP(K,J)
20    CONTINUE
            DO 30 I=1,NVAR-1
                J=I+1
50    IF(J.GT.NVAR) GOTO 30
                N2=NVAR+J+I-1
                S=S+B(N2) * VEXP(K,I) * VEXP(K,J)
                J=J+1
                GOTO 50
30    CONTINUE
            DO 40 I=1,NVAR
                N2=N2+1
                S=S+B(N2) * VEXP(K,I) * VEXP(K,I)
40    CONTINUE
            YMOD(K)=S
10   CONTINUE
        RETURN
        END

```

Programul a fost conceput astfel încât evenimentele importante să fie tipărite în vederea prelucrării ulterioare a rezultatelor cercetării.

4.4.2. Reprezentarea grafică a ecuațiilor curbelor de regresie

Suprafețele rezultate delimitează domeniul în care funcțiile de răspuns au valori determinate. Acest domeniu este limitat superior și inferior de valorile limită ale parametrilor tehnologici viteza relativă și viteza de erodare (domeniul acceptat în timpul cercetărilor).

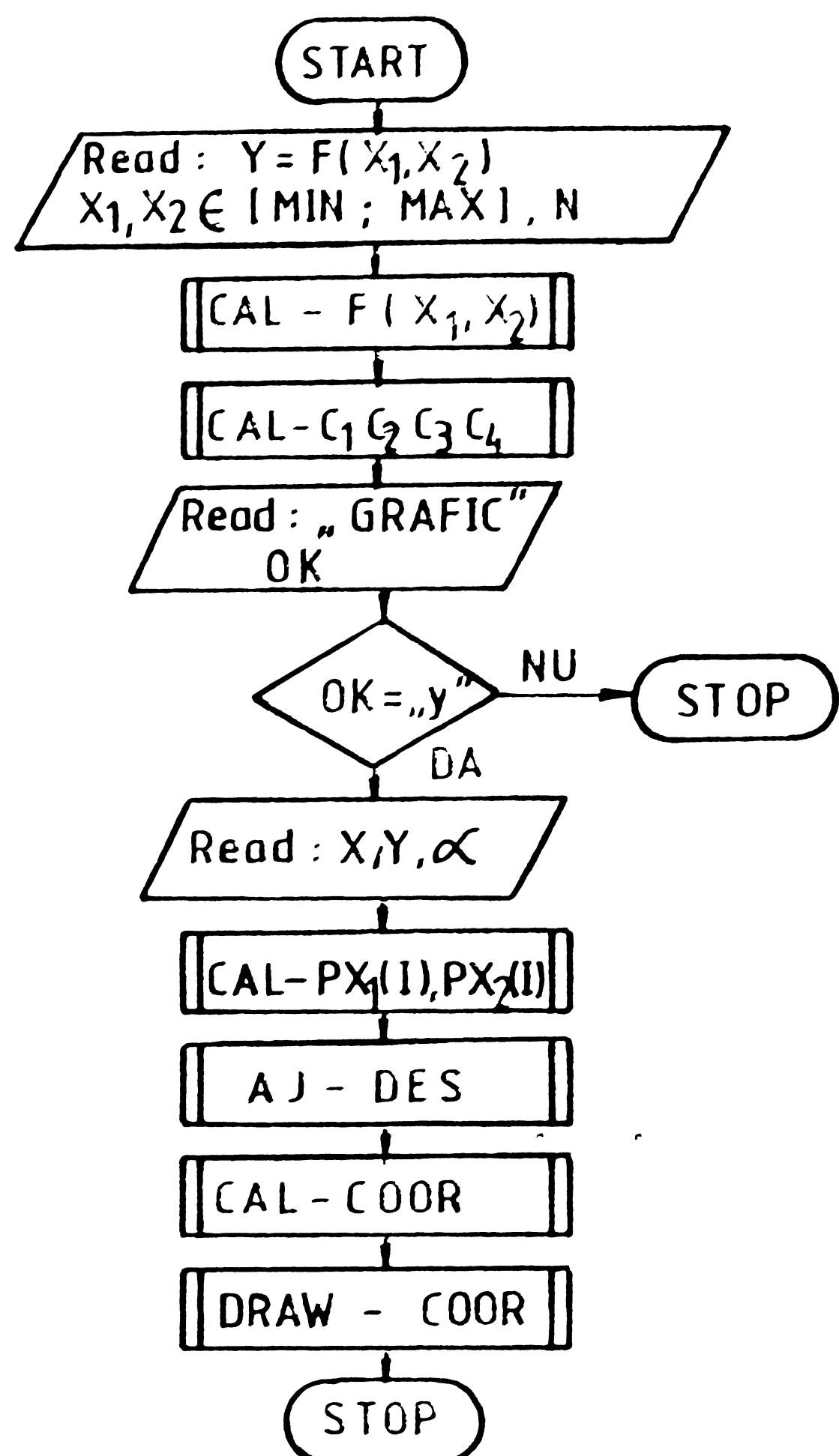


Fig.4.9. Schema logică a programului de calcul GRAFIC .

Pentru reprezentarea grafică a funcțiilor de răspuns s-a conceput și rulat programul de calcul "GRAFIC" scris în limbaj TURBOPASCAL pentru microcalculatorul CUB-Z. Schema logică a programului este reprezentată în figura 4.9, iar programul de calcul cuprinde următoarele etape importante :

- introducerea funcțiilor $y=f(x_1, x_2)$, care, urmează a fi reprezentate, a domeniului de variație ale variabilelor x_1, x_2 și a numărului punctelor de divizare ale domeniului luat în considerare, $N=10$;
- calculul valorii funcției $y=f(x_1, x_2)$, în punctele de divizare ale domeniului
- calculul coeficienților proiecției axonometrice diametrice C_1, C_2, C_3, C_4 ;
- stabilirea limitelor ecranului (fereastra fizică) și lecturarea limitelor reale de încadrare a celor două variabile la proiecția plană X,Y și a unghiului de rotire ;

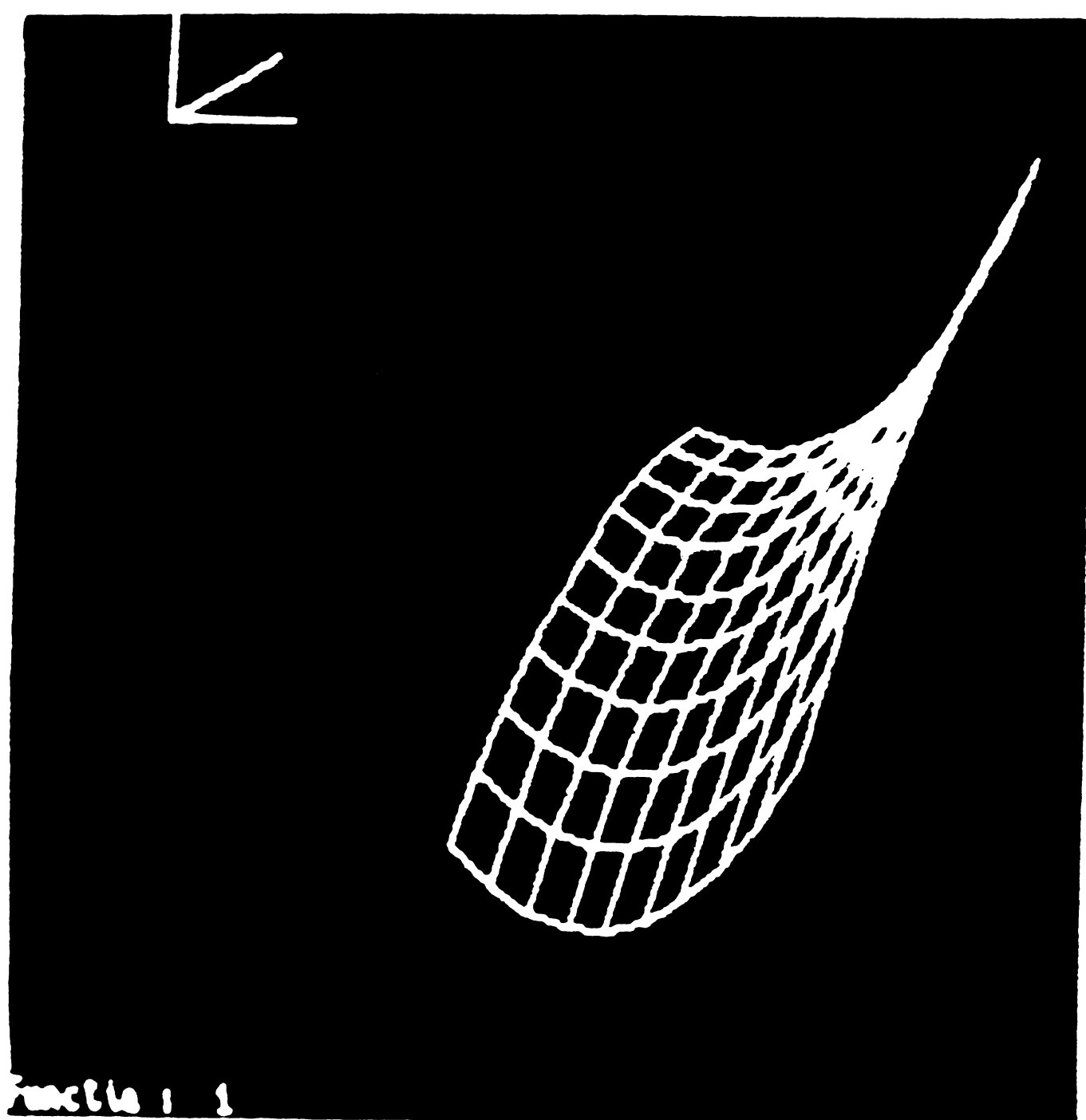


Fig.4.10. Suprafața de răspuns a productivității prelucrării, ecuația P01, modelul matematic M₁.16.1, $X=4$, $f=100$, $\theta=0$.

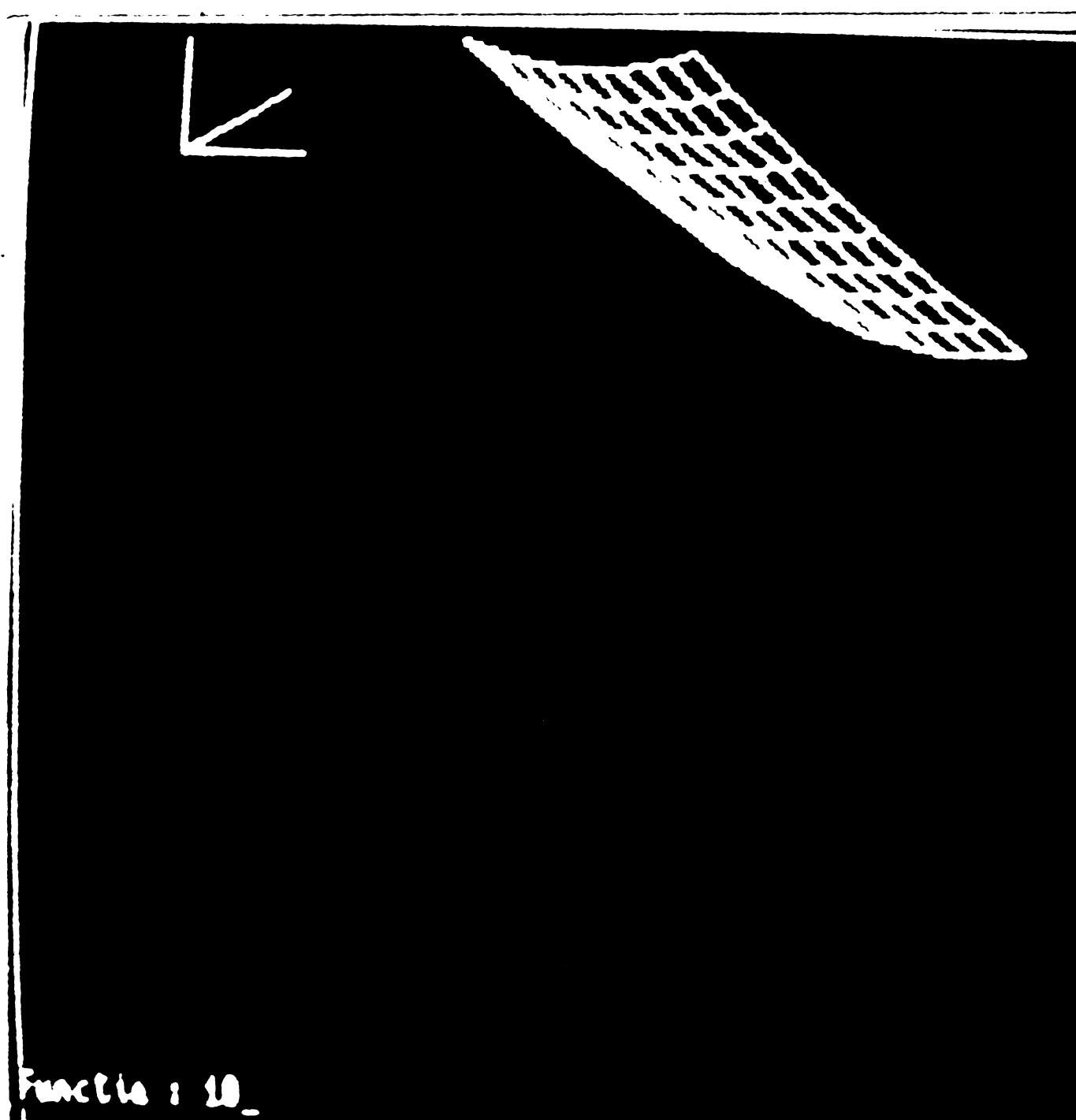


Fig.4.11. Suprafața de răspuns a consumului specific de energie electrică, ecuația Q01, modelul matematic M₂.16.1' $X=4$, $Y=500$, $\theta=0$.

- calculul de ajustare și reprezentarea imaginii logice la dimensiunile ecranului ;
- calculul coordonatelor proiecției pe ecran ;
- reprezentarea grafică a funcției.

Reprezentările grafice rezultate au fost fotocopyate de pe ecranul microcalculatorului și sînt prezentate în figurile 4.10..4.27.

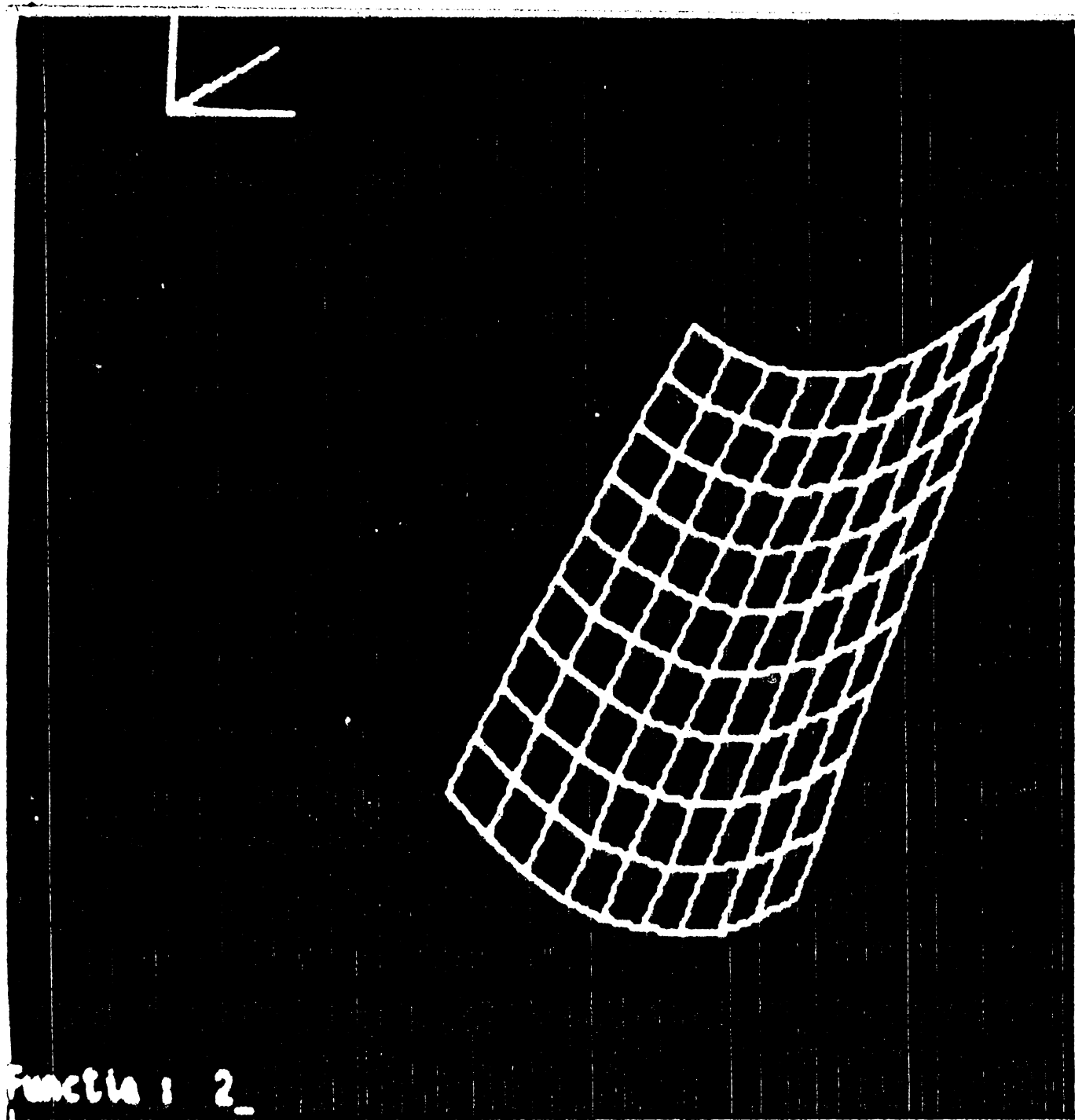


Fig.4.12. Suprafața de răspuns a productivității prelucrării, ecuația P02, modelul matematic $M_{1.15.1}$, $X=4$, $Y=100$, $\theta = 0$.

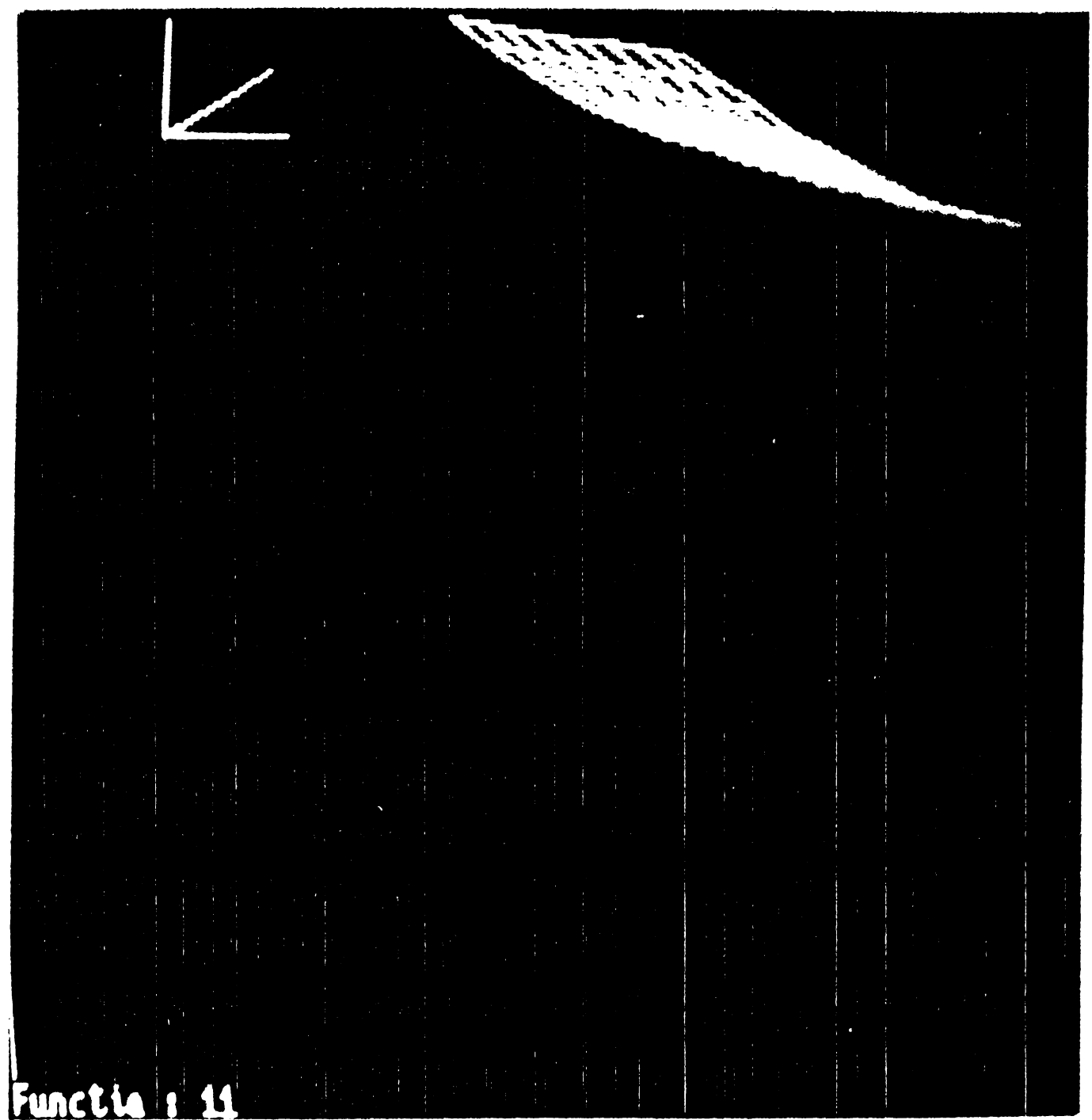


Fig.4.13. Suprafața de răspuns a consumului specific de energie electrică, ecuația Q02, modelul matematic $M_{2.15.1}$, $X=4$, $Y=450$, $\theta = 0$.

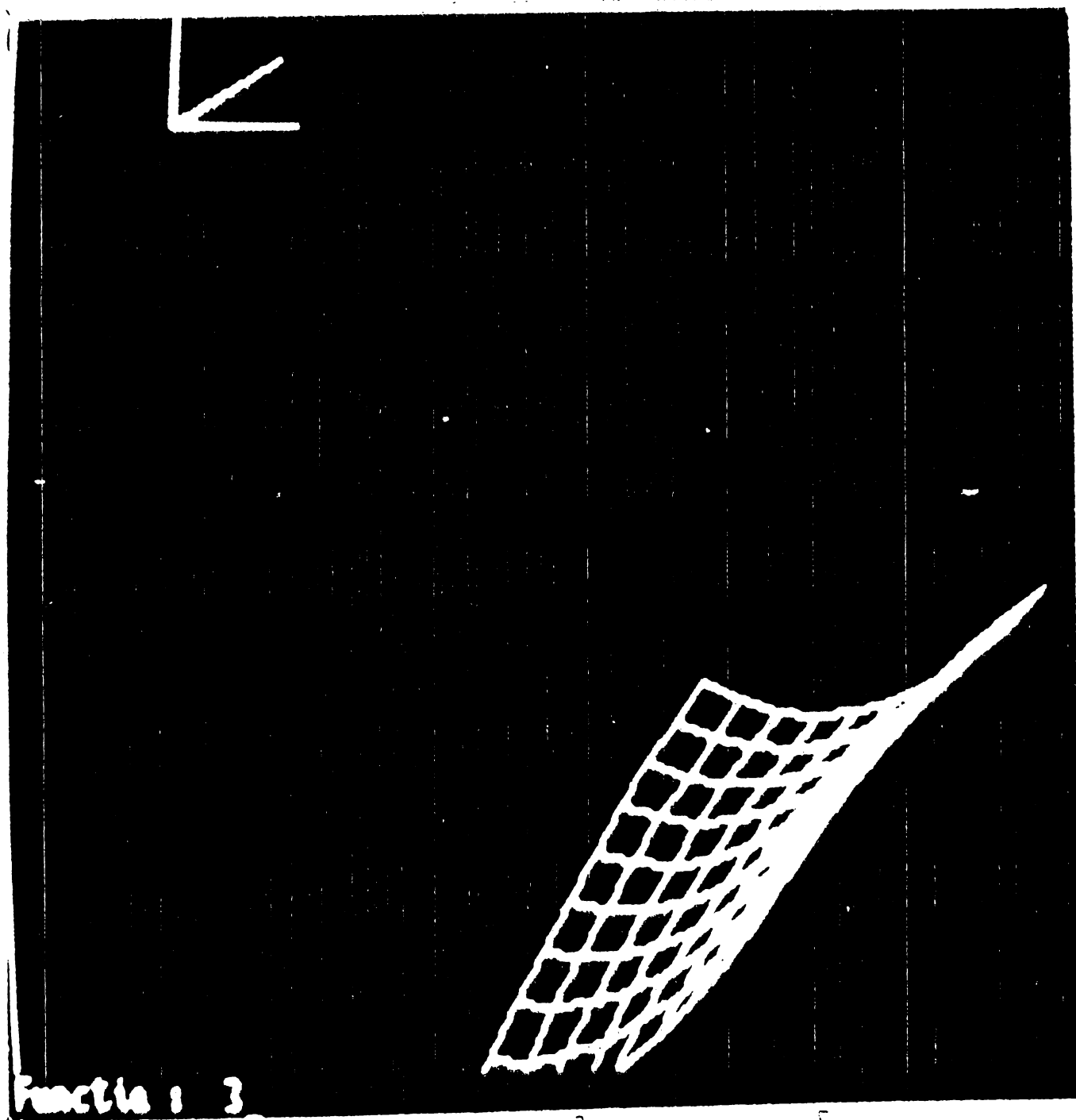


Fig.4.14. Suprafața de răspuns a productivității prelucrării, ecuația P03, modelul matematic $M_{1.14.1}$, $X=4$, $Y=100$, $\theta = 0$.

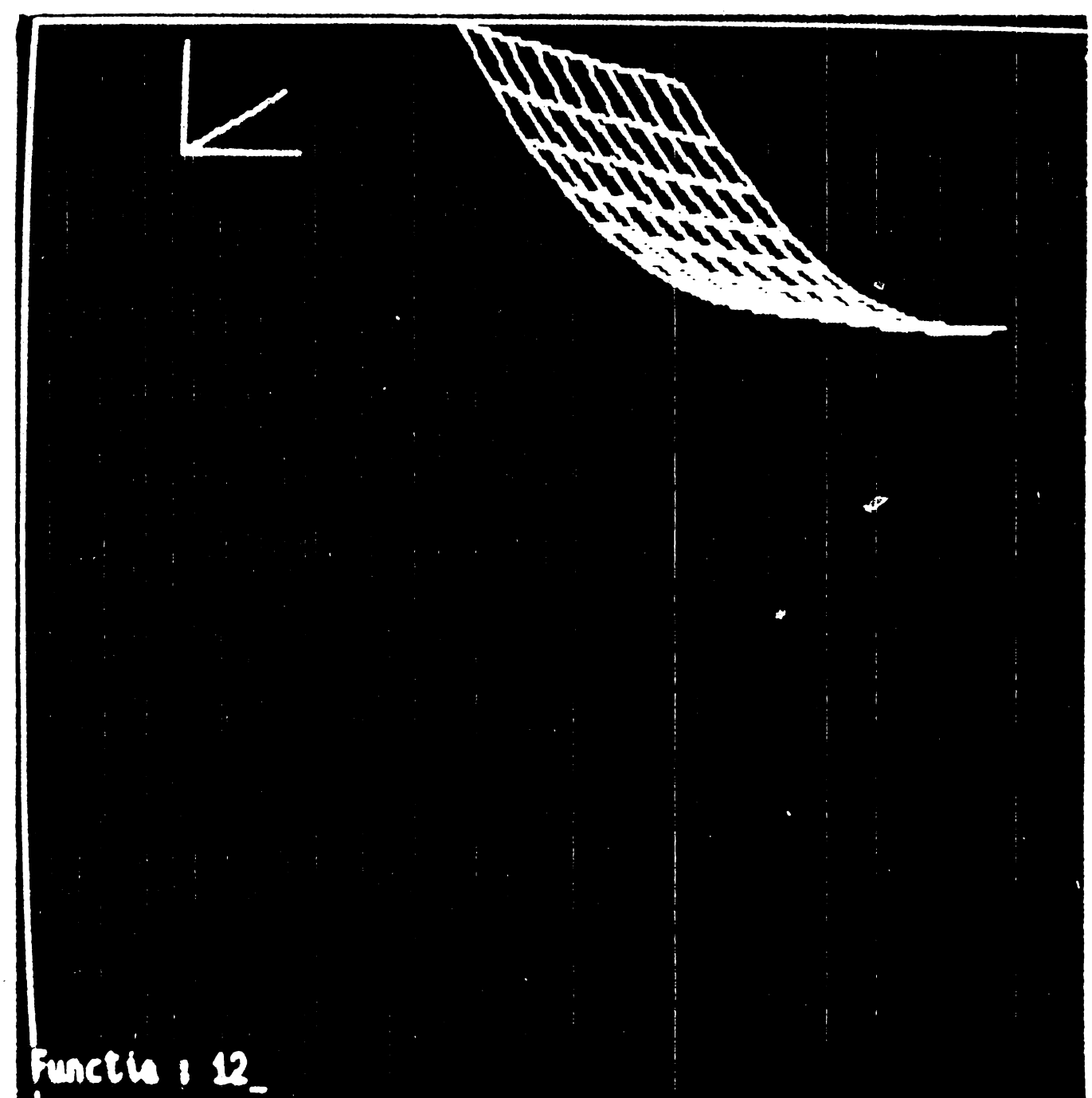


Fig.4.15. Suprafața de răspuns a consumului specific de energie electrică, ecuația Q03, modelul matematic $M_{2.14.1}$, $X=4$, $Y=520$, $\theta = 0$.

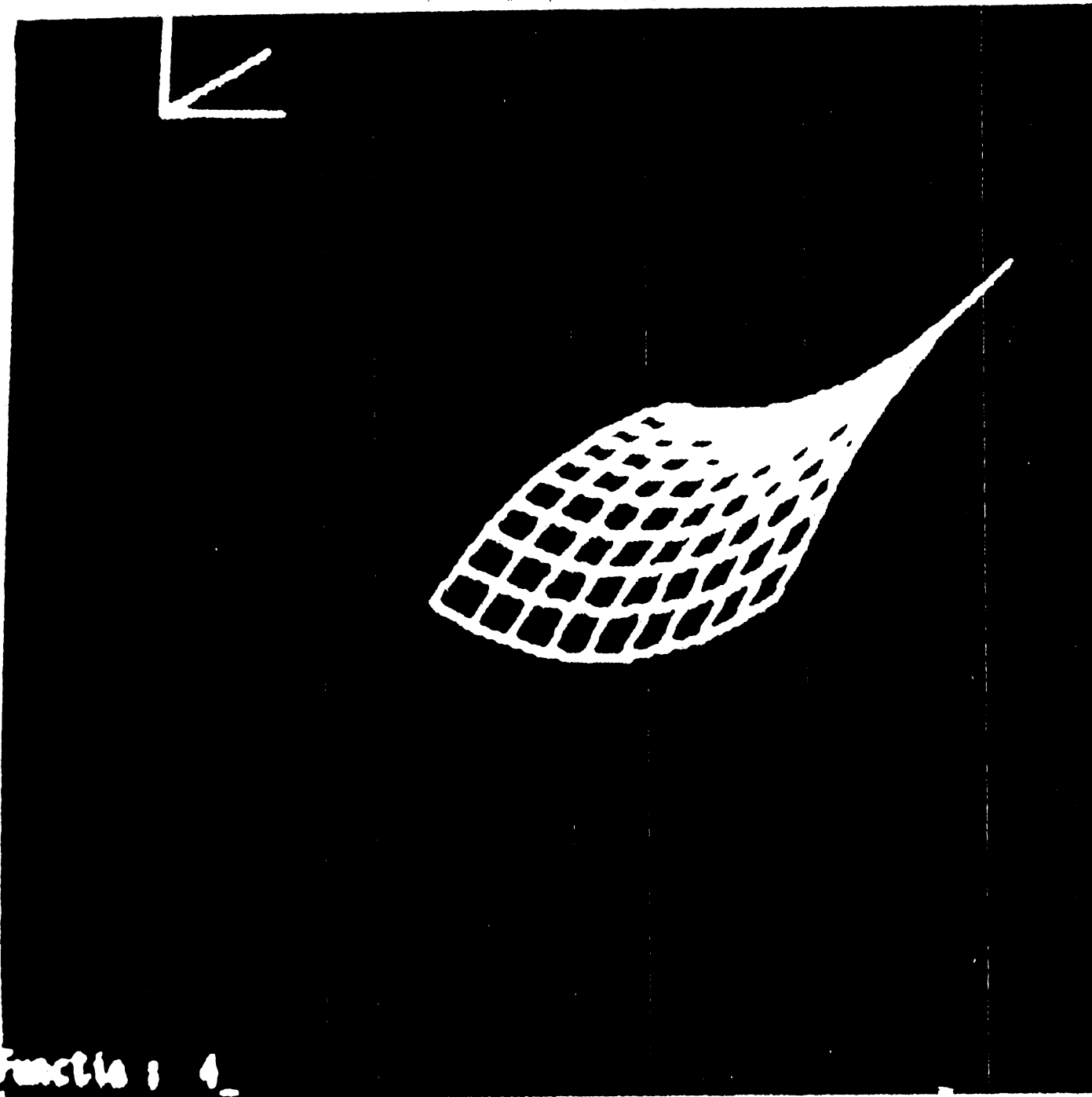


Fig.4.16. Suprafața de răspuns a productivității prelucrării, ecuația P04, modelul matematic M1.8.1, X=4, Y=100, $\theta = 0$.

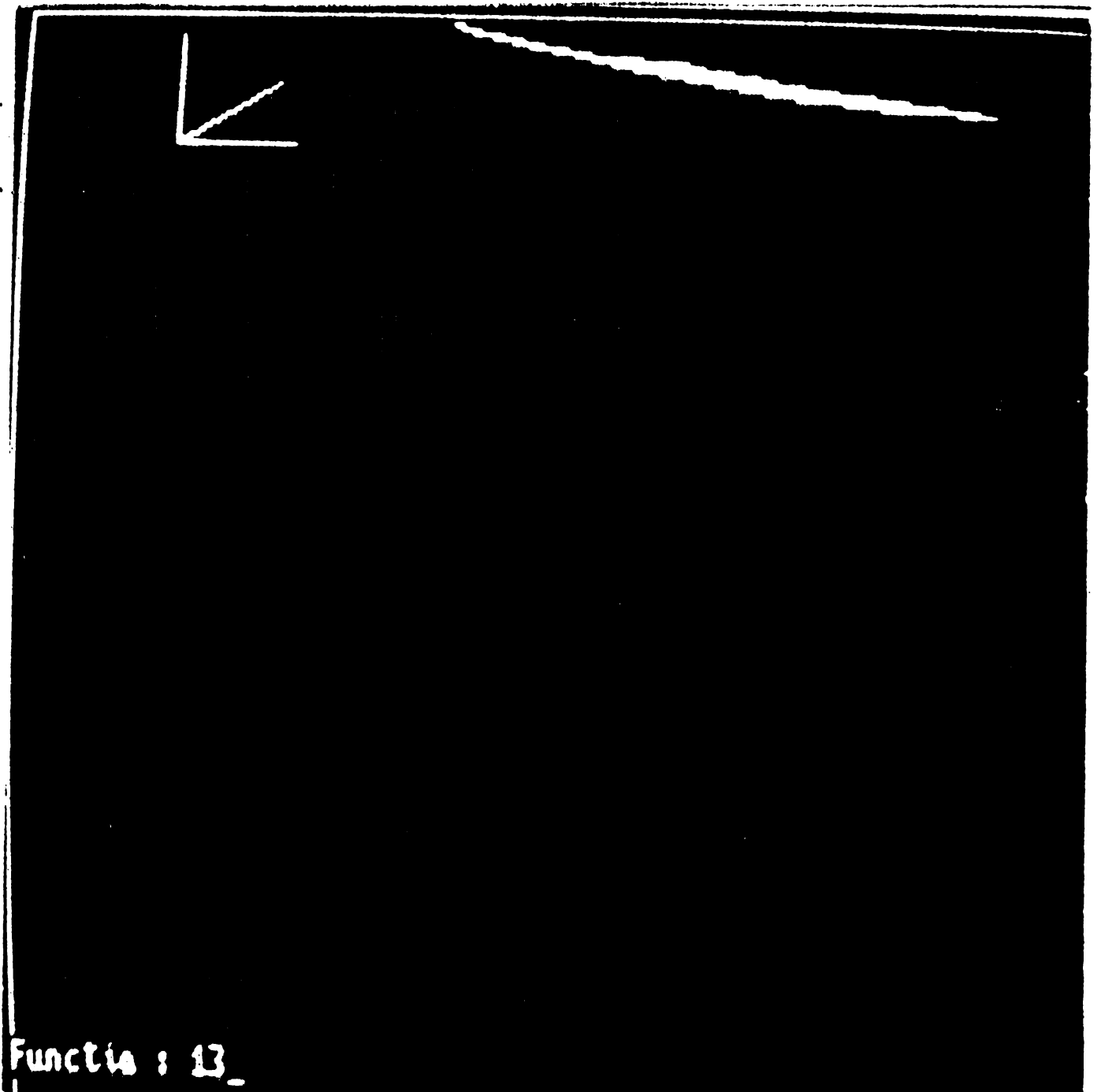


Fig.4.17. Suprafața de răspuns a consumului specific de energie electrică, ecuația Q04, modelul matematic M2.8.1, X=4, Y=600, $\theta = 0$.

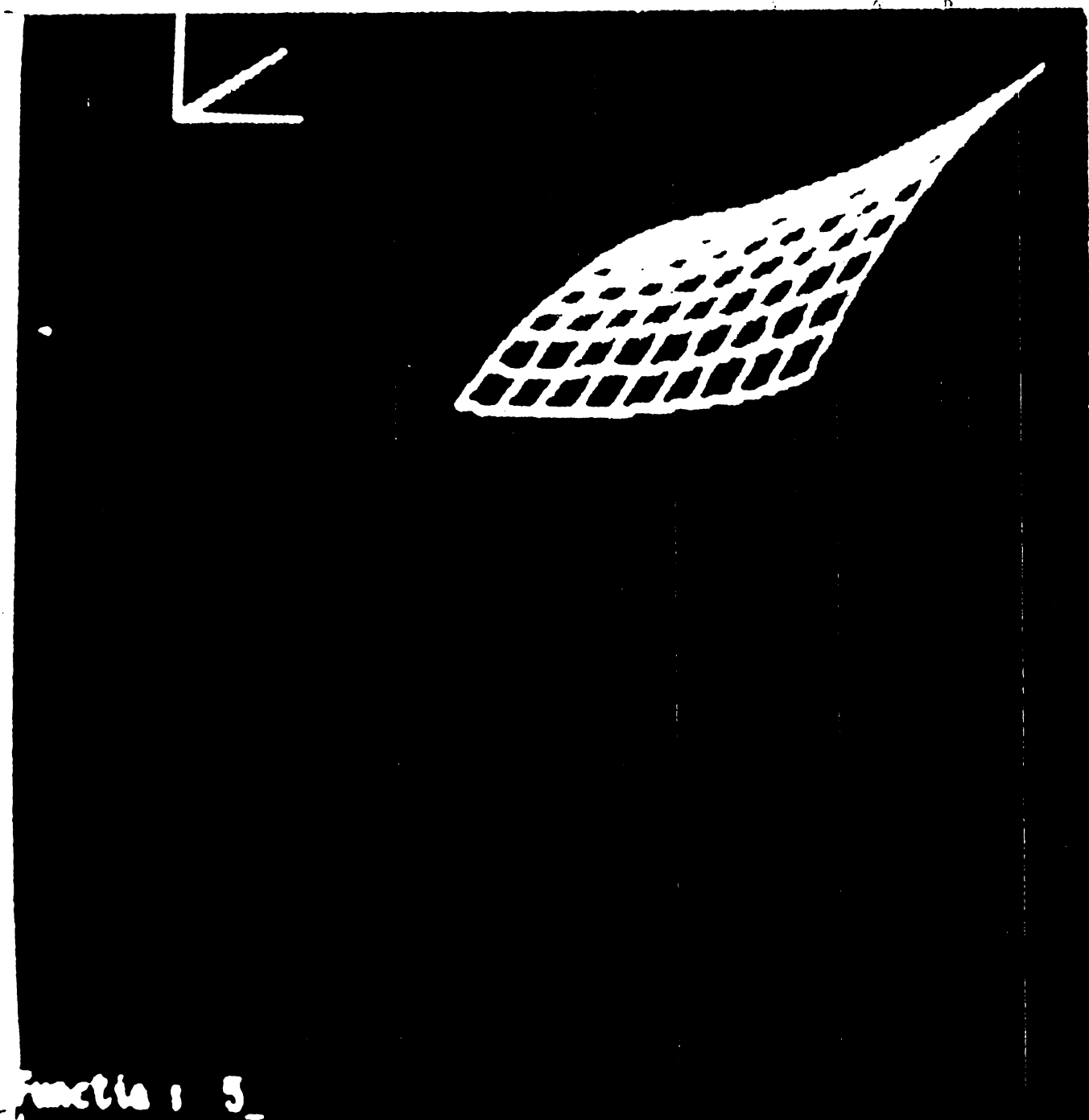


Fig.4.18. Suprafața de răspuns a productivității prelucrării, ecuația P05, modelul matematic M1.16.1, X=4, Y=300, $\theta = 0$.

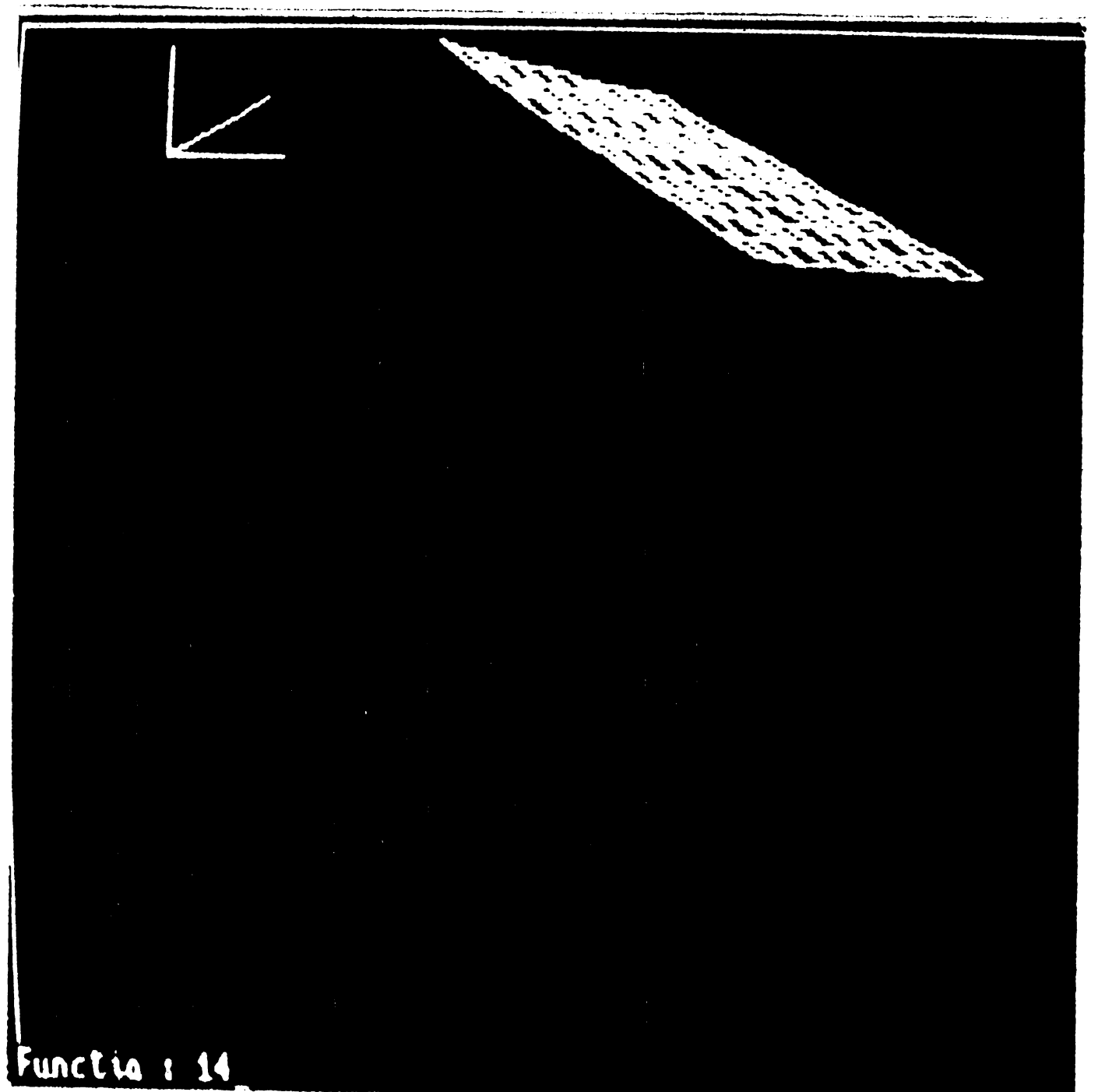


Fig.4.19. Suprafața de răspuns a consumului specific de energie electrică, ecuația Q05, modelul matematic M2.16.1, X=4, Y=650, $\theta = 0$.

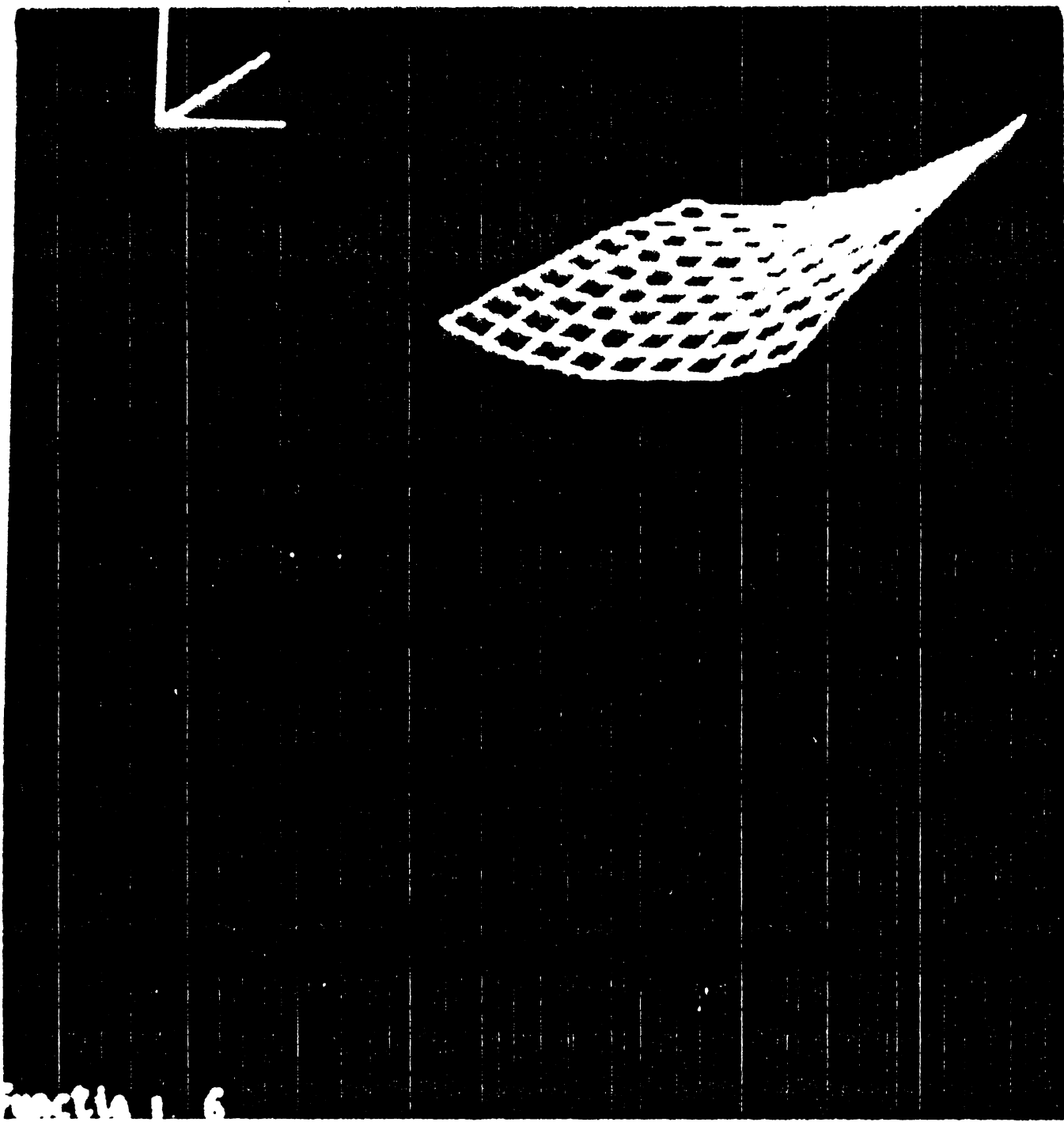


Fig.4.20. Suprafața de răspuns a productivității prelucrării, ecuația P06, modelul matematic $M_1.16.2$, $X=4$, $Y=300$, $\theta = 0$.

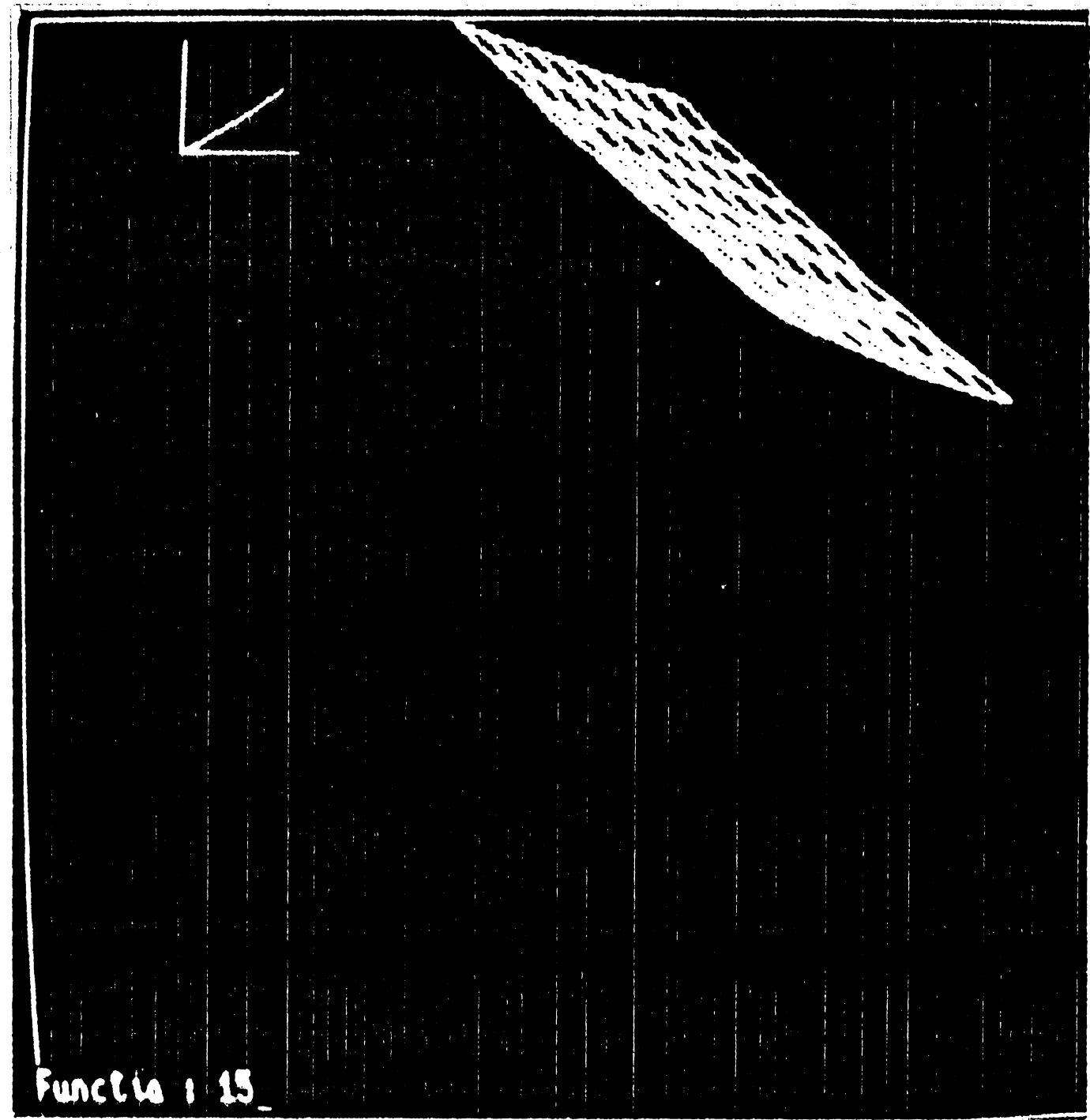


Fig.4.21. Suprafața de răspuns a consumului specific de energie electrică, ecuația Q06, modelul matematic $M_2.16.2$, $X=4$, $Y=650$, $\theta = 0$.

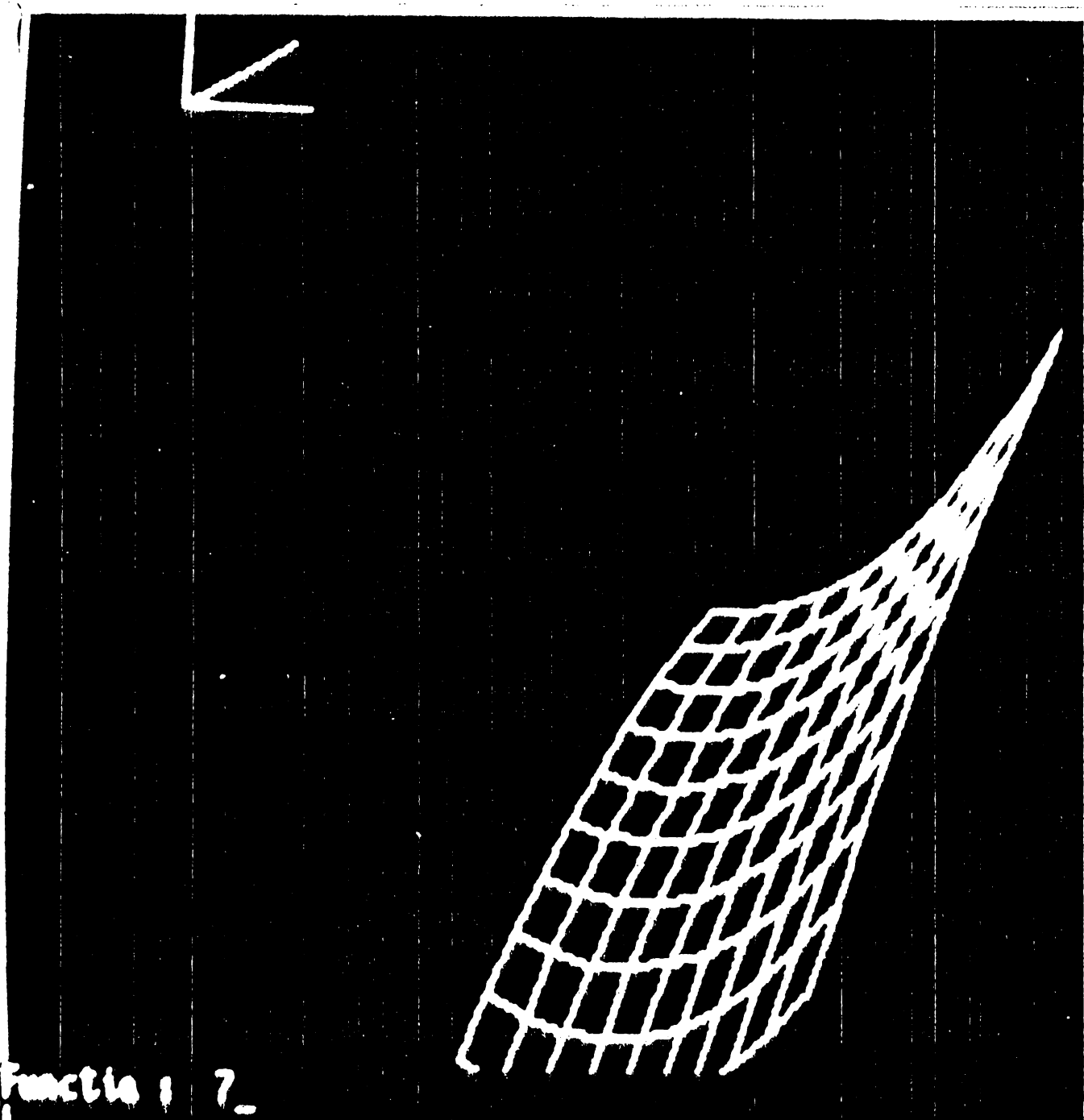


Fig.4.22. Suprafața de răspuns a productivității prelucrării, ecuația P07, modelul matematic $M_1.15.2$, $X=4$, $Y=100$, $\theta = 0$.

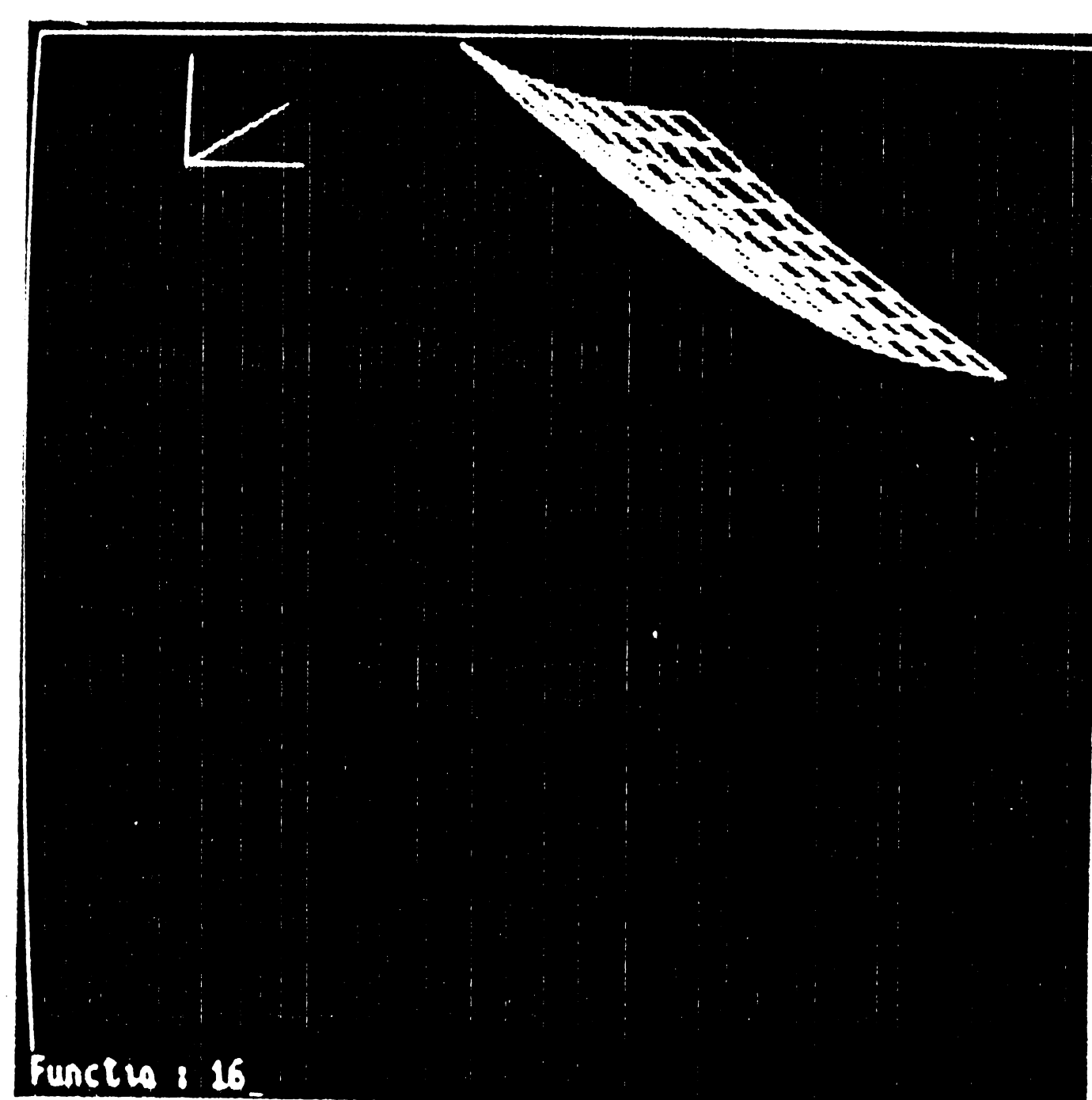


Fig.4.23. Suprafața de răspuns a consumului specific de energie electrică, ecuația Q07, modelul matematic $M_2.15.2$, $X=4$, $Y=650$, $\theta = 0$.

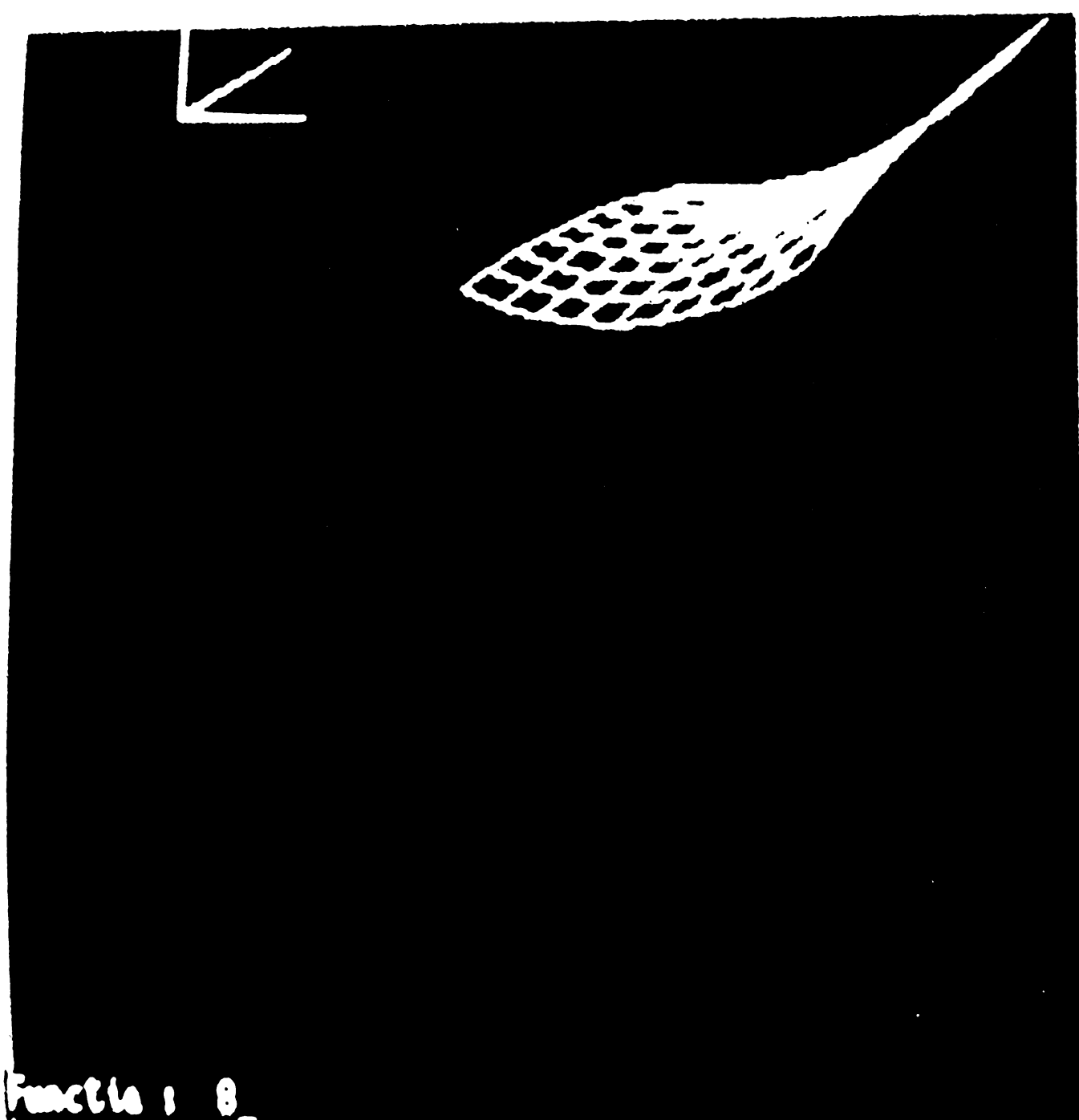


Fig.4.24. Suprafața de răspuns a productivității prelucrării, ecuația P08, modelul matematic $M_{1.14.2}$, $X=4$, $Y=250$, $\theta=0$.

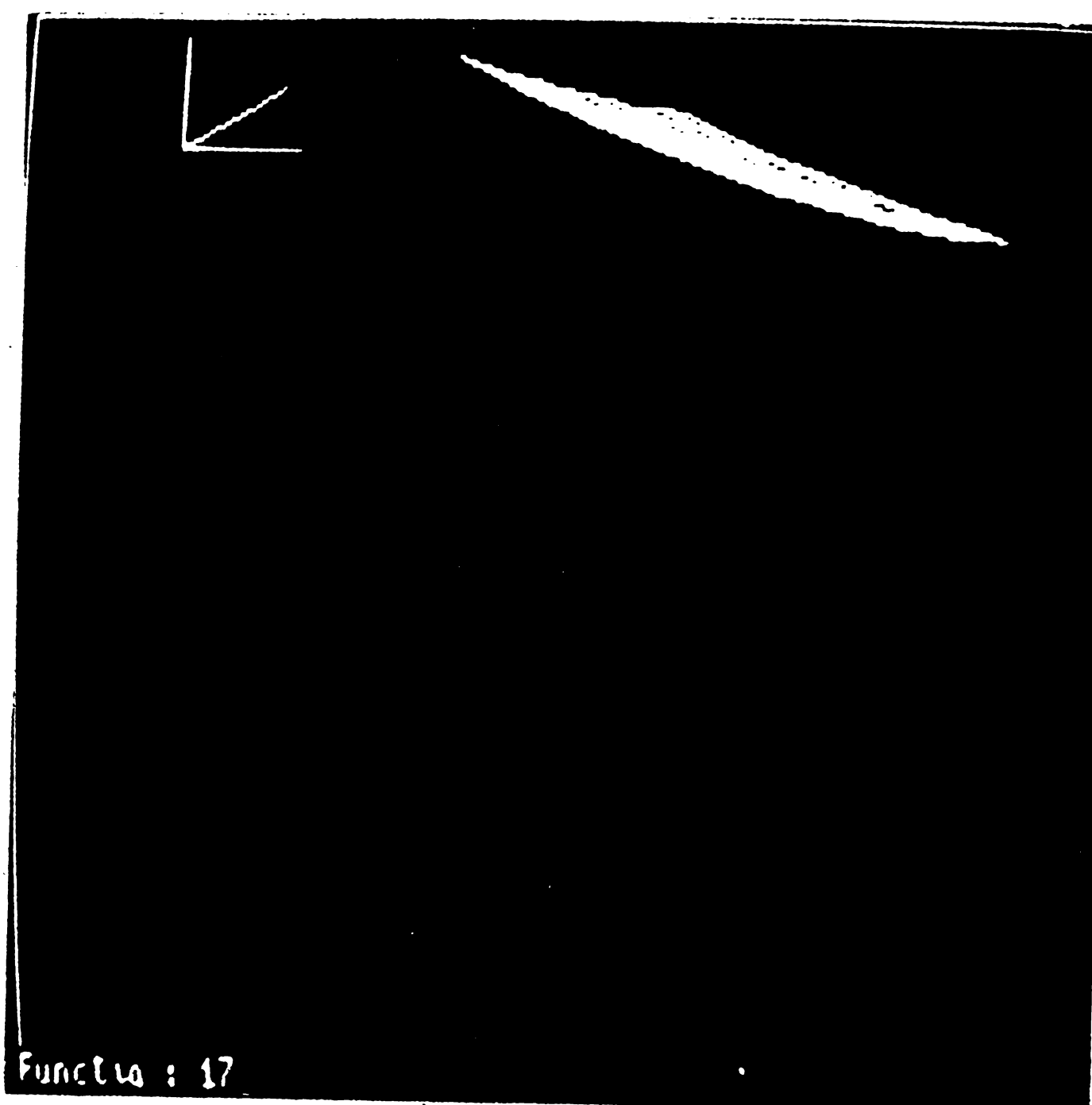


Fig.4.25. Suprafața de răspuns a consumului specific de energie electrică, ecuația Q08, modelul matematic $M_{2.14.2}$, $X=4$, $Y=550$, $\theta=0$.

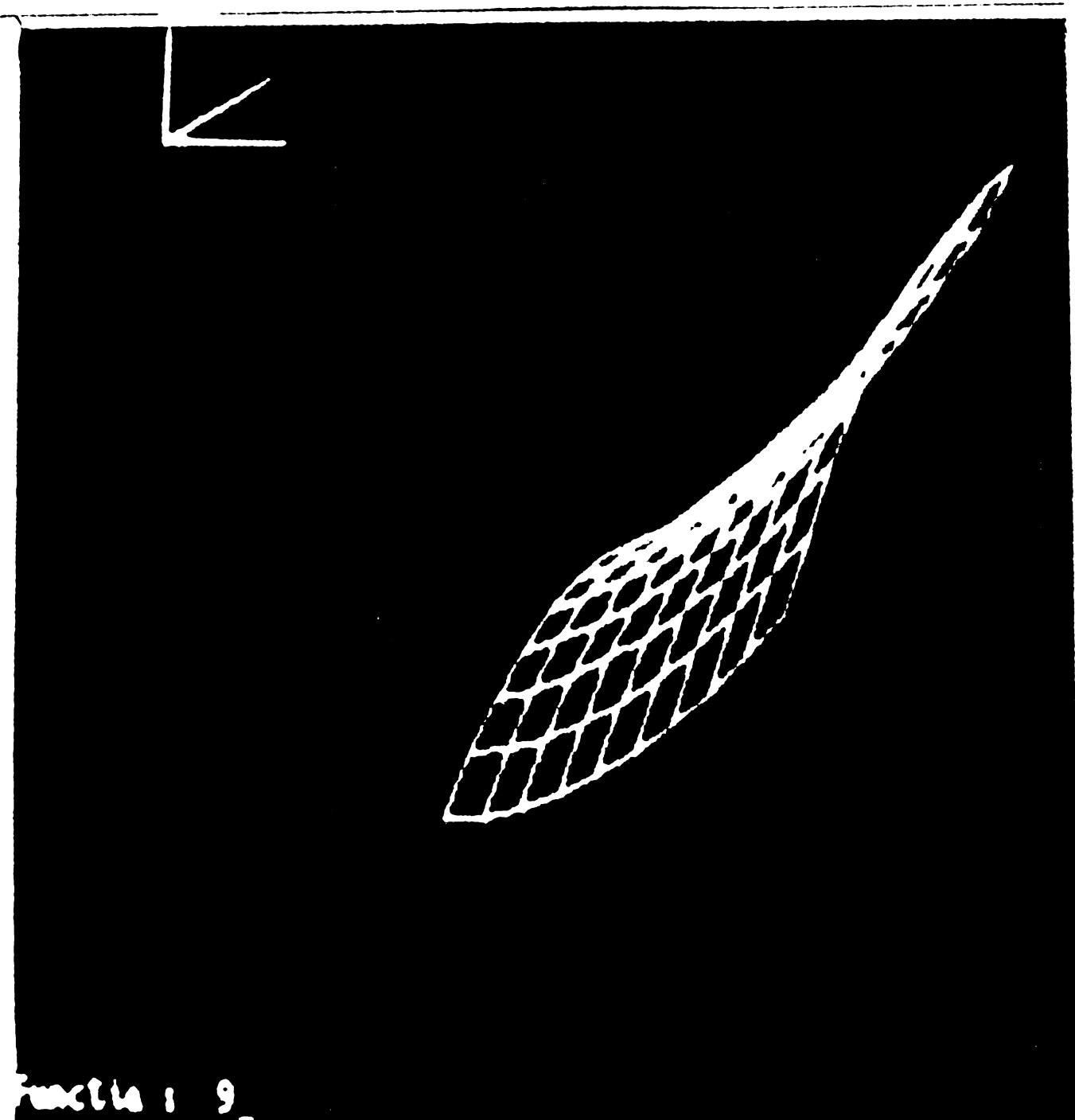


Fig.4.26. Suprafața de răspuns a productivității prelucrării, ecuația P09, modelul matematic $M_{1.8.2}$, $X=4$, $Y=100$, $\theta=0$.

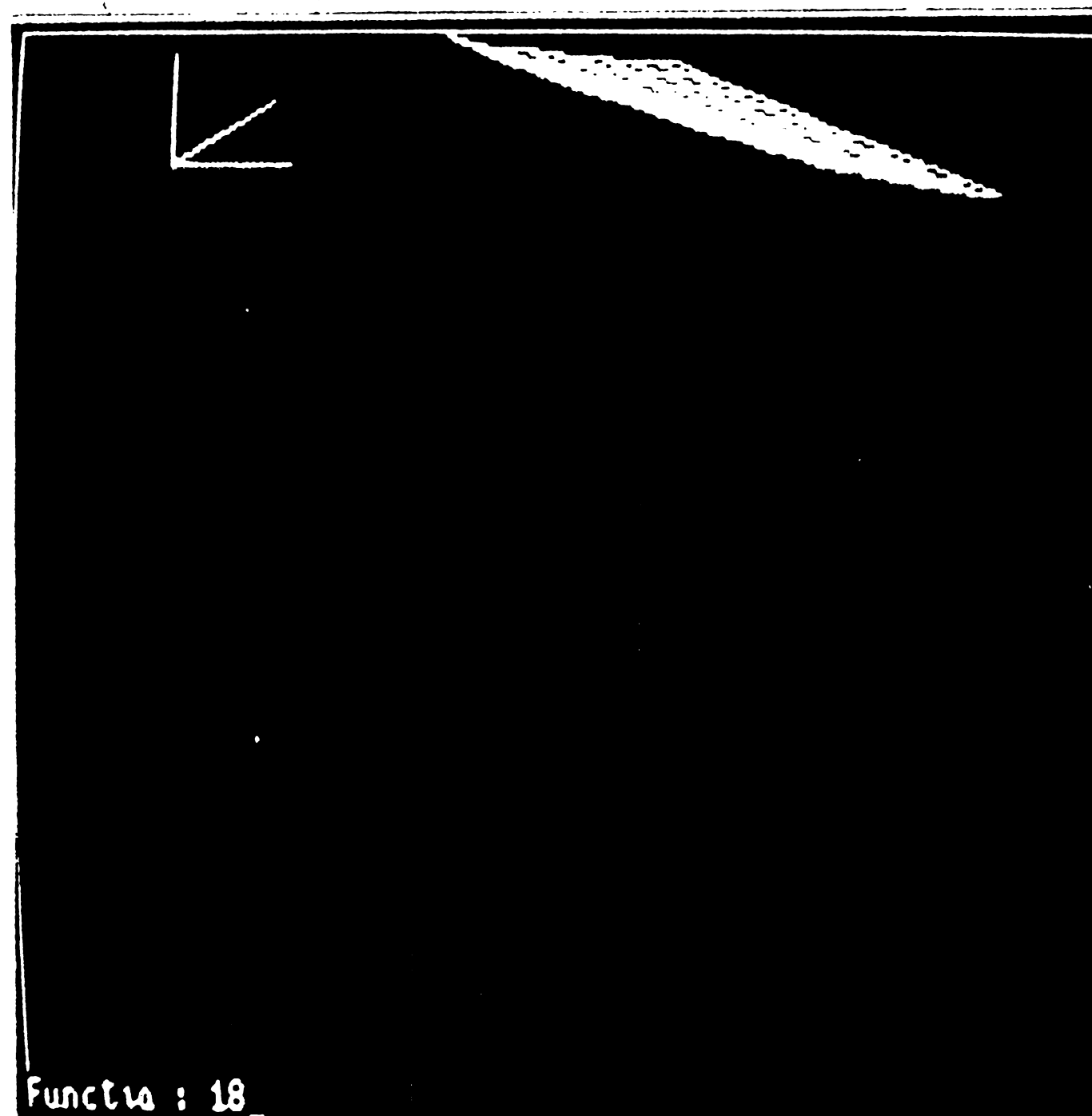


Fig.4.27. Suprafața de răspuns a consumului specific de energie electrică, ecuația Q09, modelul matematic $M_{2.8.2}$, $X=4$, $Y=600$, $\theta=0$.

Limitale rețele de încadrare a proiecției plane (X,Y) și unghiul de rotire (θ), au fost determinate experimental, în vederea unei difuzii corecte a imaginii în fereastra fizică a ecranului microcalculatorului. Valorile adoptate, sînt prezentate în dreptul fiecărui model matematic.

5. CONTRIBUTII LA OPTIMIZAREA PROCESULUI DE PRELUCRARE PRIN EROZIUNE ELECTRICA CU RUPERE DE CONTACT

În urma modelării efectuate în capitolul 4, s-au obținut 18 ecuații de gradul doi a căror concordanță a fost verificată din punct de vedere statistic. Au rezultat modele matematice care descriu în mod satisfăcător domeniul cercetat. În continuare, se pune problema determinării condițiilor de realizare a optimului și a valorii acestuia.

Forma actuală a ecuațiilor de regresie (4.20.....4.37), oferă indicații cu privire la tipul suprafeței de răspuns, dar nu se poate stabili cu ajutorul lor regimul optimal. Din acest motiv, se efectuează o prelucrare matematică a ecuațiilor de regresie utilizând metodele geometriei analitice și algebrei liniare /99,106, 107,108/.

5.1. Funcția de optimizare

Studiul ecuației de regresie începe cu transpunerea ei într-o formă tip - formă canonică, ceea ce presupune trecerea la un nou sistem de coordonate, în care ecuația de regresie, prin aspectul ei, să poată caracteriza forma suprafeței de răspuns.

Pentru ecuațiile de regresie determinate în capitolul 4, ecuații cu două variabile independente de forma :

$$\tilde{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2, \quad (5.1)$$

aduse la forma canonică, capătă următorul aspect :

$$\tilde{y} - y_c = a_{11}\tilde{x}_1^2 + a_{22}\tilde{x}_2^2, \quad (5.2)$$

în care, y_c , reprezintă valoarea parametrului optimizării în centrul suprafeței de răspuns ;

a_{11} și a_{22} - coeficienți canonici ;

\tilde{x}_1 , \tilde{x}_2 - variabile corespunzătoare noului sistem de coordonate.

Pentru cele 18 modele matematice rezultate, se pot efectua secțiuni în suprafața de răspuns la diferite valori ale lui \tilde{y} . Se

obțin curbe de nivel a căror formă geometrică este definită de semnul și valoarea absolută a coeficienților canonici, a_{11} , a_{22} .

5.1.1. Transformarea canonică a ecuației de regresie

Ecuația de regresie adusă la forma canonică (5.2), conține doar termeni pătratici, centrul noului sistem de coordonate corespunzând cu centrul suprafeței de răspuns.

Coordonatele centrului suprafeței de răspuns, x_{c_i} , $i = \langle 1, 2 \dots n \rangle$ (în vechiul sistem de coordonate), se determină prin rezolvarea sistemului de ecuații ;

$$\frac{\partial y}{\partial x_i} = 0, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5.3)$$

iar prin introducerea valorilor obținute în ecuația de regresie (5.1), se stabilește valoarea y_c .

Pentru calcularea coeficienților canonici, se alcătuieste determinantul caracteristic și se anulează ;

$$(a) = \begin{vmatrix} (b_{11}-a) & 0,5b_{12} & 0,5b_{13} & \dots & 0,5b_{1n} \\ 0,5b_{21} & (b_{22}-a) & 0,5b_{23} & \dots & 0,5b_{2n} \\ 0,5b_{31} & 0,5b_{32} & (b_{33}-a) & \dots & 0,5b_{3n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0,5b_{n1} & 0,5b_{n2} & 0,5b_{n3} & \dots & (b_{nn}-a) \end{vmatrix} = 0 \quad (5.4)$$

Pe baza semnelor coeficienților canonici, se stabilește forma suprafeței de răspuns.

Calculul coordonatelor centrului suprafeței și al coeficienților canonici, se efectuează pentru problemele cu două variabile independente astfel :

$$x_{c_1} = \frac{b_2 b_{12} - 2b_1 b_{22}}{4b_{11} b_{22} - b_{12}^2} ; \quad x_{c_2} = \frac{b_1 b_{12} - 2b_2 b_{11}}{4b_{11} b_{22} - b_{12}^2} \quad (5.5)$$

Ecuația coeficienților canonici, prin dezvoltarea determinantului caracteristic (5.4), pentru $n = 2$, ia forma ;

$$a^2 - (b_{11} + b_{22}) a + (b_{11} b_{22} - 0,25 b_{12}^2) = 0 \quad (5.6)$$

Rădăcinile ecuației (5.6), reprezintă coeficienții canonici a_{11} , a_{22} .

Pentru cele 18 ecuații de regresie (4.20.....4.37), valorile coeficienților canonici (a_{11} , a_{22}) și a coordonatelor

centrului suprafeței (x_{c1}, x_{c2}), se prezintă în tabelul 5.1.

Se remarcă, existența a două tipuri posibile de curbe de nivel pentru funcția de două variabile $\tilde{y} = f(x_1, x_2)$.

Tabelul 5.1

M	x_{c1}	x_{c2}	y_c	a_{11}	a_{22}	λ	x_1	x_2	q	M	x_{c1}	x_{c2}	a_{11}	a_{22}
01P	-0,73	1,43	231,2	12,86	-1,05	40	0,97	0,52	278,7	01 Q	7,09	2,29	34,54	0,22
02P	-3,29	11,11	488,0	16,03	-0,47	28	1,00	0,52	259,1	02 Q	2,83	12,27	25,47	0,64
03P	-1,15	1,92	176,4	11,49	-0,85	29	0,93	0,57	210,4	03 Q	0,56	1,73	93,90	0,75
04P	-0,98	1,60	234,0	8,00	-1,19	20	1,00	0,65	261,2	04 Q	2,01	0,37	13,90	0,55
05P	-1,83	0,59	165,0	6,36	-19,33	36	0,99	0,72	271,8	05 Q	-4,31	11,44	7,62	-3,96
06P	-1,44	2,27	208,9	21,05	-4,35	39	0,97	0,83	253,3	06 Q	15,37	9,40	14,65	0,54
07P	-1,40	2,31	218,2	12,18	-2,16	34	0,96	0,77	255,2	07 Q	5,94	1,28	34,66	0,99
08P	-0,98	1,05	163,5	18,65	-3,80	46	0,99	0,52	241,4	08 Q	3,64	1,00	16,03	0,92
09P	-1,74	0,44	205,7	2,72	-10,71	28	0,98	0,44	281,8	09 Q	11,32	6,10	11,81	0,24

a) Elipse. Ambii coeficienți a_{11} și a_{22} au același semn. Centrul figurii este un maximum dacă a_{11} și a_{22} sînt negativi și minimum dacă ambii coeficienți sînt pozitivi. Dacă $|a_{22}| < |a_{11}|$, elipsa este alungită pe direcția axei \tilde{x}_2 . Suprafața de răspuns este în acest caz un paraboloid eliptic.

b) Hiperbole. Coeficienții a_{11} și a_{22} au semne diferite. Dacă $|a_{22}| < |a_{11}|$, curbele de nivel vor fi alungite pe direcția axei \tilde{x}_2 .

Mărimea $y = \tilde{y} - y_c$, va crește prin deplasarea din centrul S pe direcția uneia dintre axe și se va micșora prin deplasarea pe direcția celeilalte axe. Centrul figurii - punctul S - se numește "șă" sau "minimax", iar suprafața de răspuns este un paraboloid hiperbolic. Ajungînd în domeniul optimului (vecinătatea "minimaximului") se cercetează suprafața de răspuns, prin deplasarea de direcția axei \tilde{x}_2 (sau axei \tilde{x}_1 dacă intersectează minimumul).

5.1.2. Stabilirea regimurilor optimale

Prezentarea sub formă canonică, relația (5.2), a ecuației de regresie, relația (5.1), asigură alegerea rapidă a regimurilor optimale de prelucrare, prin analiza și interpretarea suprafețelor de răspuns pentru cele 18 modele matematice.

Pentru suprafețele de tip paraboloid hiperbolic, relațiile (4.20.....4.28), productivitatea crește prin deplasarea din centrul figurii, S, în direcția axei $\pm \tilde{x}_1$, și se micșorează prin de-

plasarea în direcția $\pm \tilde{x}_2$. Centrul figurii, se numește minimax. Pentru determinarea condițiilor optime de prelucrare, în acest caz, s-a adoptat metoda multiplicatorilor Lagrange.

Se alcătuieste sistemul de ecuații :

$$\begin{cases} (b_{11} - \lambda)x_1 + 0,5b_{12}x_2 + \dots + 0,5b_{1n}x_n + 0,5b_1 = 0 \\ 0,5b_{21}x_1 + (b_{22} - \lambda)x_2 + \dots + 0,5b_{2n}x_n + 0,5b_2 = 0 \\ 0,5b_{31}x_1 + 0,5b_{32}x_2 + \dots + 0,5b_{3n}x_n + 0,5b_3 = 0 \\ \dots\dots\dots \\ 0,5b_{n1}x_1 + 0,5b_{n2}x_2 + \dots + (b_{nn} - \lambda)x_n + 0,5b_n = 0 \end{cases} \quad (5.7)$$

în care, λ , reprezintă multiplicatorul Lagrange.

Rezolvarea sistemului (5.7), este posibilă când se cunosc valorile lui λ , valori care depind de tipul problemei.

În cazul problemelor cu maxim, se recomandă ca valoarea lui λ să fie astfel aleasă încît să nu depășească valoarea celui mai mare coeficient canonic, iar în cazul problemelor de minim, valoarea să fie mai mică decît cel mai mic coeficient canonic.

În practică, valorile lui λ , se aleg astfel încît să fie satisfăcută inegalitatea :

$$|\lambda'| \geq \lambda > \begin{vmatrix} a_{\max} \\ \min \end{vmatrix}, \quad (5.8)$$

în care, $\lambda' = 2(a_{\max} - b_{kk})$;

a_{\max} - coeficientul canonic de valoare maximă sau minimă
 \min

(funcție de tipul problemei) ;

b_{kk} - coeficientul celui mai mic termen pătratic din ecuația de regresie (probleme de maxim), respectiv coeficientul celui mai mare termen pătratic (probleme cu minim).

Se aleg cîteva valori ale lui λ în intervalul considerat, se rezolvă pentru fiecare valoare sistemul de ecuații (5.7), iar regiunile obținute se supun unei verificări experimentale.

Sistemul de ecuații (5.7) devine pentru $n = 2$:

$$\begin{cases} (b_{11} - \lambda)x_1 + 0,5b_{12}x_2 + 0,5b_1 = 0 \\ 0,5b_{12}x_1 + (b_{22} - \lambda)x_2 + 0,5b_2 = 0 \end{cases}, \quad (5.9)$$

de unde rezultă :

$$x_1 = \frac{0,25b_{12}b_2 - 0,5b_1(b_{22} - \lambda)}{(b_{11} - \lambda)(b_{22} - \lambda) - 0,25b_{12}^2} ; \quad x_2 = \frac{0,25b_{12}b_1 - 0,5b_2(b_{11} - \lambda)}{(b_{11} - \lambda)(b_{22} - \lambda) - 0,25b_{12}^2} \quad (5.10)$$

Regimurile optimale rezultate pentru cele nouă ecuații de regresie (4.20.....4.28) sînt prezentate în tabelul 5.1. Acest tabel cuprinde și valorile adoptate pentru multiplicatorul Lagrange, cît și valorile maxime ale productivității prelucrării.

Pentru suprafețe de tip paraboloid eliptic, relațiile (4.29.....4.37), consumul specific de energie electrică, prezintă valori minime în centrul figurii, S. Se impune realizarea unui experiment în centrul figurii, pentru a verifica măsura în care valoarea parametrului optimizat este adevărată. Dacă nu este posibil un experiment în acest punct (din motive obiective), se impune verificarea în punctele de la graniță a domeniului optim rezultat.

Studiul coordonatelor centrului figurii (suprafeței) și a coeficienților canonici, tabelul 5.1, pentru cele nouă ecuații de regresie specifice consumului specific de energie electrică (01 Q.....09 Q), a relevat următoarele aspecte :

- suprafața de răspuns este un elipsoid de rotație ;
- coeficienții ecuațiilor standard sînt pozitivi cu o singură excepție, aceea a modelului matematic 030, relația (4.33) ;
- ecuațiile analizate vor avea în centrul suprafeței (figurii) S, valoarea minimă ;
- valorile parametrilor x_1 , x_2 care optimizează funcția obiectiv sînt coordonatele centrului suprafeței (figurii), S;
- coordonatele centrului suprafeței se găsesc în afara domeniului cercetat.

În aceste condiții, s-a adoptat varianta calculului consumului specific de energie electrică în punctele de graniță ale domeniului optim rezultat.

Volumul mare de calcule aritmetice care au apărut la optimizarea unui singur model matematic a impus utilizarea mijloacelor electronice de calcul. S-a elaborat un program de calcul, scris în limbaj BASIC și rulat pe un calculator CIB-2. Schema logică a programului P05 se prezintă în figura 5.1. Aceasta a fost concepută astfel ca evenimentele importante ale calculului matematic să fie tipărite pentru verificare și interpretare.

Programul de calcul P05, a fost întocmit în vederea determinării pentru cele 18 modele matematice a coordonatelor centrului suprafeței (figurii) S, a valorii parametrului optimizării în centrul suprafeței de răspuns, a coeficienților canonici, a coeficientului lui Lagrange, a unghiului dintre axele celor două sisteme de coordonate și a coordonatelor punctelor de optim.

Programul de calcul cuprinde 5 subprograme cu următoarea ordine logică de desfășurare :

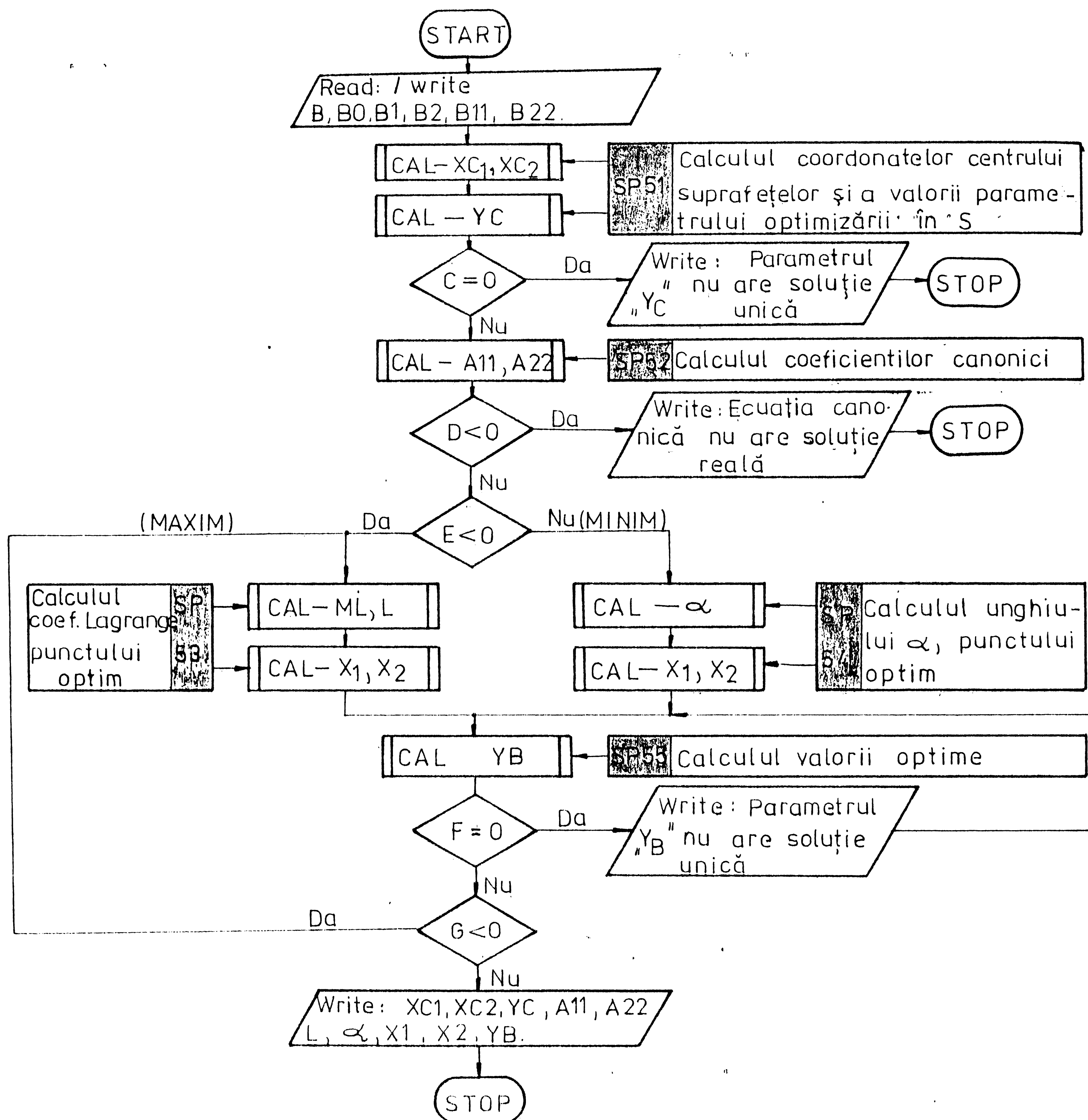


Fig.5.1. Schema logică a programului P05.

- SP 5.1, calculul coordonatelor centrului suprafeței și a valorii parametrului optimizării în centrul suprafeței ;
- SP 5.2, calculul coeficienților canonici și verificarea corectitudinii calculului ;
- SP 5.3, calculul și adoptarea coeficientului lui Lagrange și calculul coordonatelor punctului de optim ;
- SP 5.4, calculul unghiului dintre axele celor două sisteme de coordonate și a coordonatelor punctelor de optim ;
- SP 5.5, calculul valorii optime (maxim, minim).

Modelele matematice analizate au fost determinate simultan pentru productivitatea prelucrării (cod P) și consumul specific de energie electrică (cod Q), tabelul 5.1.

Rezultatele aplicării programului matematic de stabilire a regimurilor optimale, au evidențiat, pentru productivitatea prelucrării, domeniul parametrilor codificați ;

- viteza de erodare, $v_e \equiv x_1 \in /0,93 \div 1,00/$;
- viteza relativă, $v_r \equiv x_2 \in /0,52 \div 0,83/$.

Pentru cea de a doua variabilă de stare, consumul specific de energie electrică, rezultatele aplicării programului matematic indică existența punctelor de optim (minim) în afara domeniului cercetat. Din acest motiv, s-a adoptat ca și puncte de funcționare, punctele de la granița domeniului optim, în care, productivitatea prelucrării prezintă valori optimale.

5.1.3. Verificarea experimentală a regimurilor optimale

Verificarea experimentală s-a desfășurat pentru cele 18 ecuații de regresie, conform programului experimental din tabelul 5.2.

Tabelul 5.2

Modelul P Q	$v_{ei,j}$			$v_{rij} [m/s]$	$A_{ij} [mm^2]$	m_{OTi}	m_{OPj}	$\bar{Q} \cdot 10^{-5}$ [m ³ /s]	q [kWh/kg]
	$F_i [N]$	$J_j [A]$	S_{ij}						
01P 01Q	$F = 246$	528	S_{28}	$v_{r6} = 26$	$A_{22} = 25,13$	ECr 18 Ni 8 Mn 6	OL 42	279,74	191,43
02P 02Q	$F = 246$	515	S_{27}	$v_{r6} = 26$	$A_{22} = 25,13$	ECr 18 Ni 8 Mn 6	OL 42	248,31	282,45
03P 03Q	$F_g = 246$	421	S_{26}	$v_{r6} = 26$	$A_{22} = 25,13$	ECr 18 Ni 8 Mn 6	OL 42	214,73	251,73
04P 04Q	$F = 246$	431	S_{28}	$v_{r6} = 26$	$A_{22} = 25,13$	ECr 18 Ni 8 Mn 6	OL 42	259,31	504,37
05P 05Q	$F = 407$	528	S_{28}	$v_{r6} = 26$	$A_{32} = 39,26$	ECr 18 Ni 8 Mn 6	OL 42	260,37	336,38
06P 06Q	$F_g = 246$	528	S_{28}	$v_{r6} = 26$	$A_{22} = 25,13$	EF Ni Cu	OL 42	236,54	173,47
07P 07Q	$F_g = 246$	515	S_{27}	$v_{r6} = 26$	$A_{22} = 25,13$	EF Ni Cu	OL 42	242,48	229,68
08P 08Q	$F_g = 246$	421	S_{26}	$v_{r6} = 26$	$A_{22} = 25,13$	EF Ni Cu	OL 42	241,05	342,39
09P 09Q	$F_g = 246$	431	S_{28}	$v_{r6} = 26$	$A_{22} = 25,13$	EF Ni Cu	OL 42	283,39	421,73

S-au utilizat modelul experimental, baza de date și lanțul de măsurare prezentate în capitolul 4.

Condițiile inițiale de verificare experimentală sînt reprezentate de ;

- viteza de erodare, $v_{ei,j}$, situată la limita superioară a domeniului cercetat, realizată în timpul testelor de verificare prin aplicarea forțelor care determină diapazonul tensiunilor TD(AI - RC), pe curbele caracteristice ale sursei de alimentare existente ;

- viteza relativă, $v_{ri,j}$, situată la o valoare medie a domeniului impus de rezultatele aplicării programului de optimi-

zare. S-a realizat în timpul testelor de verificare prin utilizarea treptei șase (v_{r6}), corespunzătoare unei viteze de 26 m/s a OT față de OP ;

- aria supusă prelucrării, $A_{i,j}$, și perechea de materiale $m_{OTi} - m_{OPj}$, au fost menținute aceleași cu cele din timpul determinărilor experimentale în vederea modelării (capitolul 4).

Au fost înregistrate și prelucrate valorile maxime ale productivității prelucrării, și valorile minime, din domeniul explorat, pentru consumul specific de energie electrică.

Rezultatele verificărilor experimentale efectuate au confirmat, pentru toate cele 18 modele matematice (ecuații de regres) existența domeniului optim de prelucrare cu următoarele mărimi de comandă a procesului :

1 - viteza de erodare, se asigură prin forța de proces la valori care determină presiuni specifice de 10^7 Pa la suprafața de contact dintre OT și OP. La aceste valori ale forței de apăsare, se asigură și diapazonul tensiunilor de proces TD(AI - RC), iar intensitatea curentului rezultată este dependentă de caracteristicile externe ale sursei de alimentare. Se impune, ca valoare minimă a intensității curentului, valoarea care asigură densități de curent minime de $5A/mm^2$;

2 - viteza relativă, se asigură prin mișcarea relativă dintre OT și OP, la valori cuprinse în domeniul 25.....30m/s ;

3 - perechea de materiale, se asigură prin alegerea corectă a materialului obiectului de transfer conform nivelului de prelucrabilitate cunoscut în prezent .

5.2. Structuri de conducere optimă a procesului

Comportarea dinamică a utilajelor de prelucrare prin procedeul EERC, poate fi definită prin modelele matematice determinate în capitolul 4, optimizate în acest capitol .

Aprecierea dinamicii de poziționare-generare permite realizarea, și pentru operațiile de prelucrare prin procedeul EERC, a unui sistem de conducere automată a sistemului tehnologic, capabil să asigure următoarele funcții de bază /1,10,125/ :

- realizarea unei traiectorii impuse punctelor de intersecțiune dintre OT și OP cu precizie dată (impusă) ;

- realizarea unor parametri optimi ai regimului de prelucrare ;

- comanda și supravegherea desfășurării diferitelor etape tehnologice ale procesului de prelucrare ;

- introducerea de date manual sau de la periferice.

Pentru modelele matematice determinate, se impune flexibilitatea adecvată elaborării unui sistem de conducere a sistemului tehnologic, în varianta cea mai modernă cu microcalculatorul (microprocesorul).

5.2.1. Structura ansamblului de prelucrare

Sistemul de conducere a procesului de prelucrare, este prezentat în schema de principiu din figura 5.2. Elementul central al sistemului este un microcalculator de tipul TIM-S (microprocesor Z 80), care, realizează conducerea directă a procesului.

Microcalculatorul, este cuplat la proces printr-un subsistem de interfațare, care asigură conversia analog-numerică și numeric-analogică a semnalelor, precum și multiplexarea liniilor de semnal.

Acțiunea asupra procesului (legătura directă), se realizează prin elementele de execuție EE1 - asupra subsistemului de antrenare în mișcarea de rotație a obiectului de transfer și EE2 - asupra subsistemului de avans. Elementele de execuție sînt de tipul motor de curent continuu excitat independent, alimentat prin redresor comandat, cu bucle de reglare automată analogică după turație și după curent.

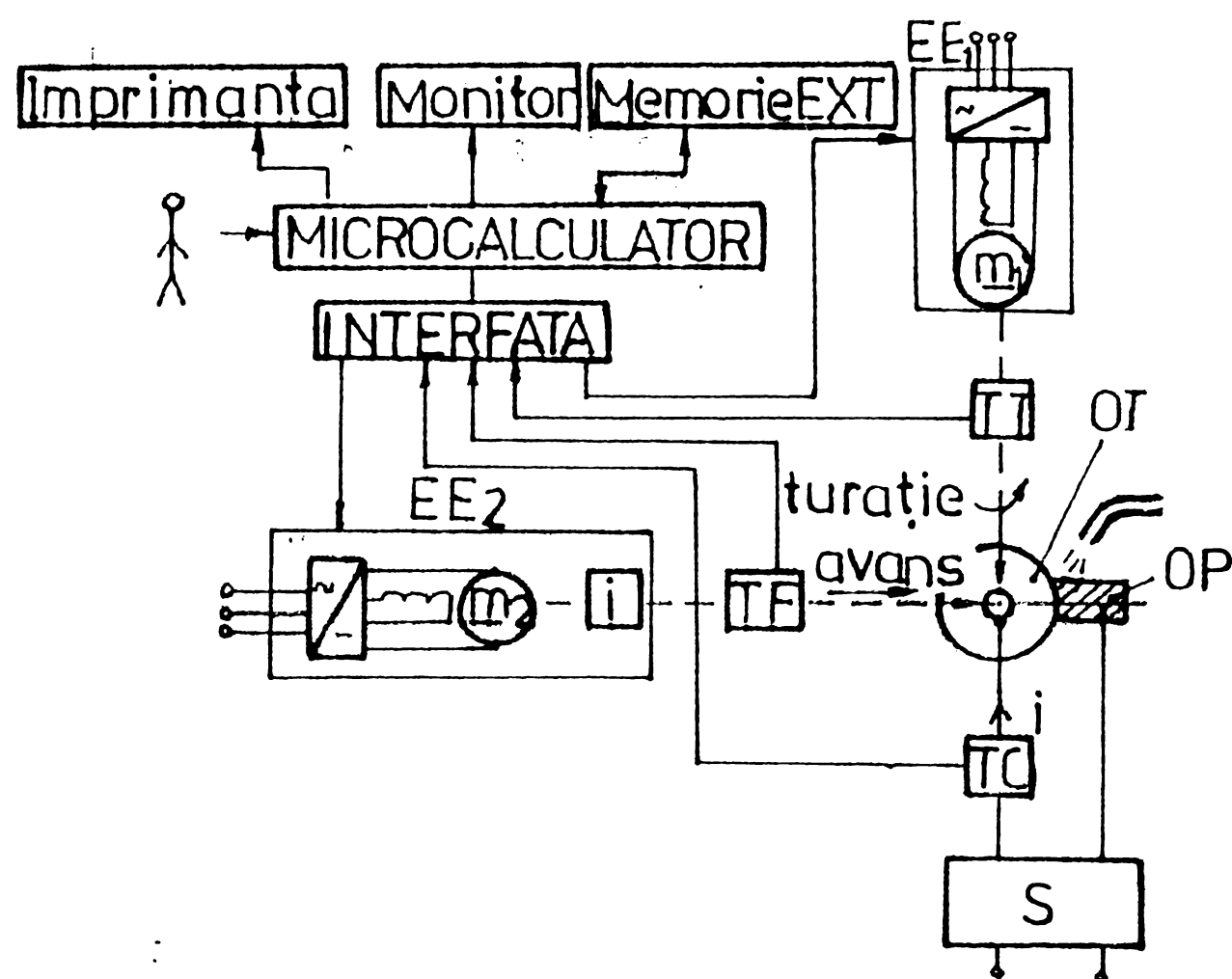


Fig.5.2. Schema de conducere a procesului EERC.

activă cu operatorul.

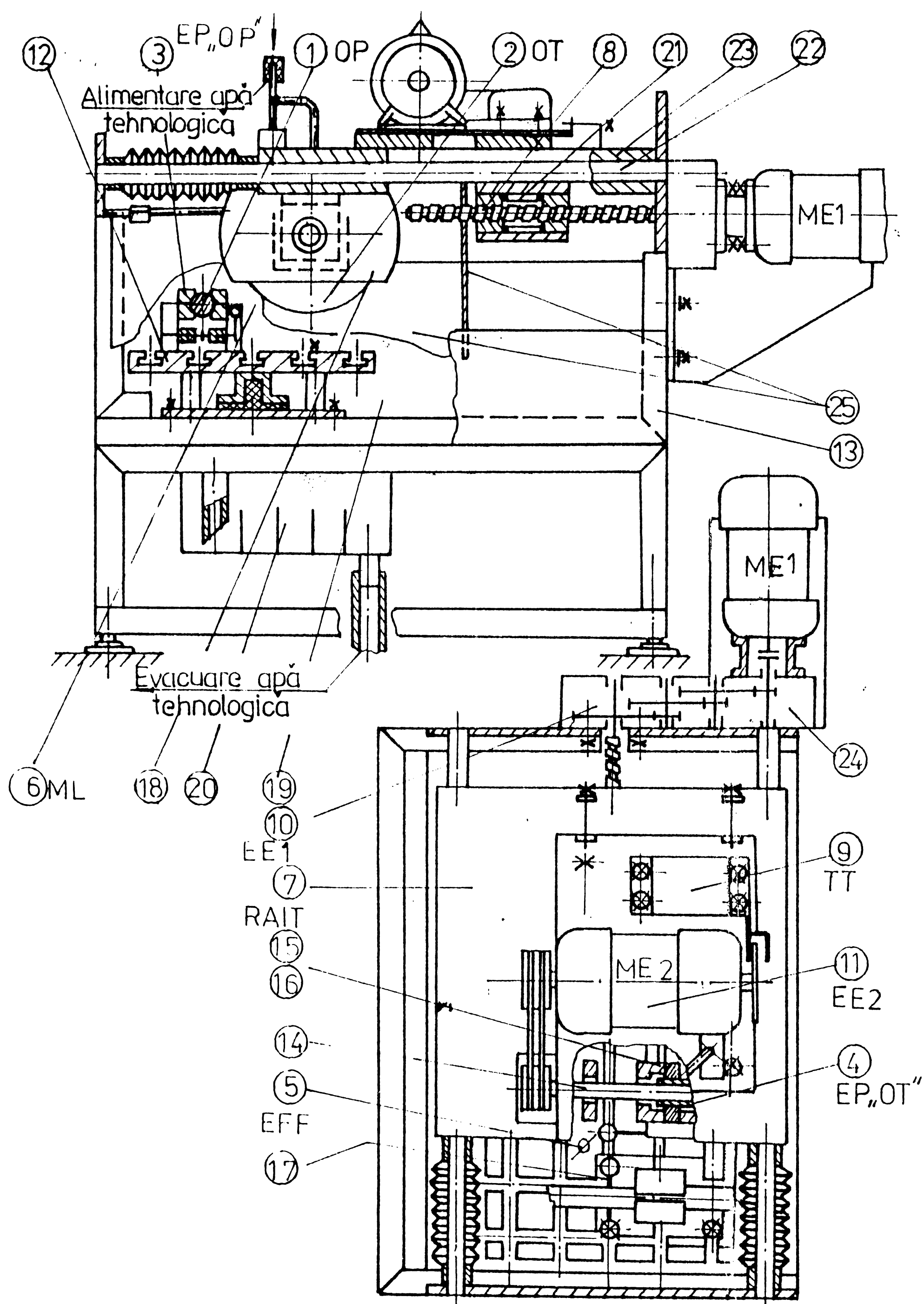
Configurația adoptată asigură utilizarea cu eficiență ridicată a resurselor microcalculatorului, făcînd posibilă imple-

Informația din proces se culege prin subsistemul traductorului de turație, TT, (traductor optic) cuplat pe arborele de antrenare a OT și prin subsistemul traductorului de forță, TF (T.E.R.) cuplat la mecanismul de avans. În tandem cu traductorul de forță, este cuplat traductorul de curent, TC, pe circuitul secundar al sursei de alimentare S. Microcalculatorul, poate fi cuplat la dispozitive periferice, care, asigură introducerea programului și comunicarea inter-

mentarea unui algoritm de optimizare a procesului concomitent cu realizarea unor funcții auxiliare (comenzi secvențiale, semnalizare, monitorizare și protecție). În aceste condiții este posibilă conducerea complet automatizată a procesului de prelucrare.

5.2.2. Structura utilajului de prelucrare

Utilajul experimental de prelucrare (fig.5.3), este parte componentă a ansamblului pentru conducere automată a prelucrării.



La studiul și proiectarea utilajului s-au respectat funcțiile și structura utilajelor de prelucrare, de asemenea, s-au definit ca mărimi specifice de comandă a procesului mărimile rezultate prin aplicarea teoriei similitudinii și prin cercetările experimentale efectuate /35,36,37,38,39,40,45/.

Cinematica modelului cuprinde elemente specifice utilajelor de prelucrare asistate de mijloace electronice de calcul, cu luarea în considerare a particularităților procesului eroziv de prelucrare. Obiectul de prelucrare, 1, este

Fig. 5.3. Structura utilajului de prelucrare UPCA.

orientat și fixat printr-un dispozitiv autocentrant, pe masa de prelucrare 12, izolată electric de batiul 13. Totalitatea elemente-

lor de orientare și fixare, formează echipamentul de poziționare a OP, EP "OP", 3.

Obiectul de transfer, 2, sub forma unui disc, este montat pe arborele 14, component al echipamentului de poziționare a OT, EP "OT", 4. Periile colectoare 15, bușa colectoare 16 de pe EP "OP", formează echipamentul de formare finală EFF, 5, a agentului eroziv.

Mediul de lucru, ML, 6, se asigură prin alimentarea cu apă tehnologică în carcasa 18, colectarea apei și a produselor erozive făcându-se în baia de proces 19 și în decantorul 20.

Prima mărime specifică de comandă - viteză de erodare, se asigură prin echipamentul de reglare automată a interstițiului tehnologic, RAIT 7. Cinematica cuprinde traductorul de forță TF, 8, alcătuit dintr-un șurub cu bile și element elastic 21, coloanele de ghidare 22, casetele cu bile 23 și elementul de execuție, EE1, 10, format din cutia de viteză 24 și motorul de curent continuu ME1.

A doua mărime specifică de comandă - viteza relativă, materializată prin turația discului "n", se realizează tot prin RAIT, cinematica cuprinzând traductorul de turație, TT, 9 și elementul de execuție EE2, 11, format din motorul electric de curent continuu ME2.

Protecția vizuală, este asigurată prin elementele 25, demontabile, în vederea asigurării accesului în zona de prelucrare.

5.2.3. Structura lanțului cinematic de avans și poziționare

Lanțul cinematic de avans și poziționare, este format în ordine de un motor de curent continuu Ce 90 F, $P = 0,55 \text{ kW}$, $n = 500 \div 2700 \text{ rot/min}$ fabricat de I.M.E. București, cutie de viteză monobloc și de un mecanism șurub piuliță cu bile.

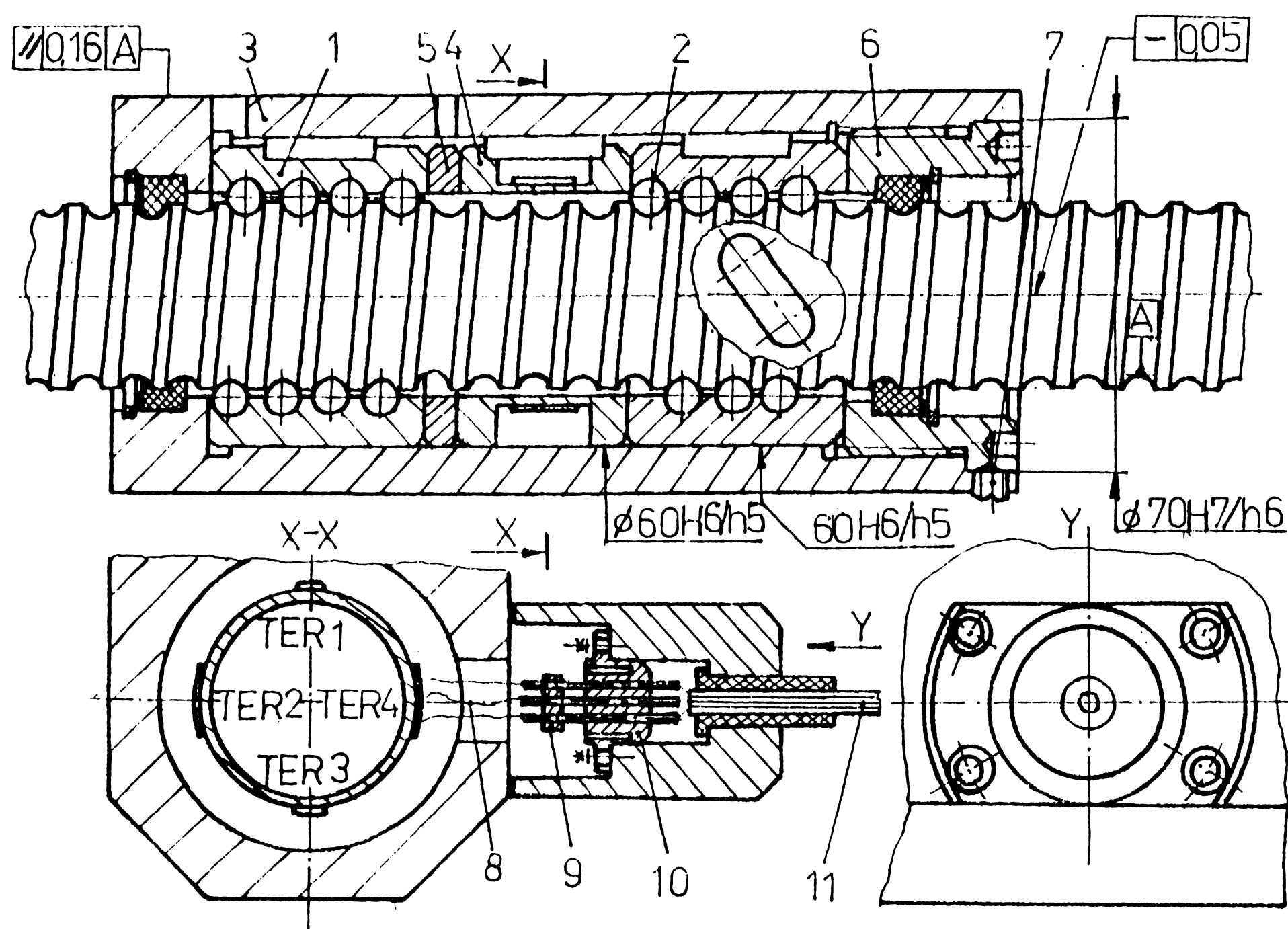
Cinematica adoptată are ca scop direct, asigurarea forței în proces și determinarea în consecință a mărimii intensității curentului electric în proces, deci tocmai asigurarea vitezei de erodare, v_e .

Cutia de viteză, structurată monobloc pentru ușurarea execuției, prezintă trei etape de transmisie cu rapoarte de transformare identice $i_{11} = i_{12} = i_{13} = \frac{1}{4}$, alese conform metodologiei de proiectare a transmisiilor cu roți dințate în servomecanisme.

Soluțiile tehnice adoptate asigură compensarea jocului în

angrenare, prin soluția pinion activ - pinion pasiv cu element elastic pretensionat, pentru toate cele trei trepte de transmisie.

Mișcarea se transmite, de la motorul electric prin cutia de viteză, la mecanismul de avans-poziționare. Acest mecanism, este de tip șurub-piuliță cu bile, figura 5.4, și cuprinde



două piulițe 1, bilele 2, montate în caseta 3. Intre cele două piulițe s-a montat elementul elastic 4 și șai-ba de reglaj 5, prestrângerea elementelor pe direcția axia-lă realizându-se prin bucașă filetată 6, blo-cată de știftul filetat 7. Pe elementul elas-tic 4, s-au apli-

Fig. 5.4 Mecanismul de avans și poziționare.

căut traductorii electrici rezistivi TER 1.....TER 4 cu ade-zivi corespunzători. Transmisia semnalului electric provenit de la puntea traductoarelor la tensiometrul electronic N32o2, este asigurată de firele electrice 8, mufa de legătură DIN, 9, 1o și cablul ecranat 11.

Elementul elastic și accesoriile enumerate, au fost in-troduse în mecanismul șurub-piuliță în vederea determinării forței axiale, realizate de lanțul cinematic descris.

Turația arborelui, la ieșirea din cutia de viteză, este de 3o rot/min, realizându-se viteze de avans de 0,5.....5 mm/s, la deplasarea axială a casetei.

Lanțul de avans și poziționare, este cuprins în siste-mul de comandă și măsurare (fig.5.5), asigură realizarea celor doi parametri, forța de apăsare și intensitatea curentului, prin măsurarea și comandarea valorilor impuse.

5.2.4. Structura lanțului cinematic de antrenare

Lanțul cinematic de antrenare a OT, este format în ordine dintr-un motor de curent continuu, tip C 112 L, $P = 2,2 \text{ kW}$, $n = 200 \div 3000 \text{ rot/min}$, fabricat de I.M.E. București și echipamentul de formare finală a agentului erosiv.

Cinematica lanțului de antrenare este simplă, și are ca scop asigurarea vitezei relative dintre OT și OP, prin antrenarea obiectului de transfer sub forma unui disc cu lățime îngustă, montat pe arborele de antrenare al EFF. Energia de efect, este transmisă prin casetele electrice poziționate la 90° pe arborele de antrenare. Contactul electric, se asigură la nivelul arborelui de antrenare, prin bușca conductoare și periile colectoare, montate în casetele electrice.

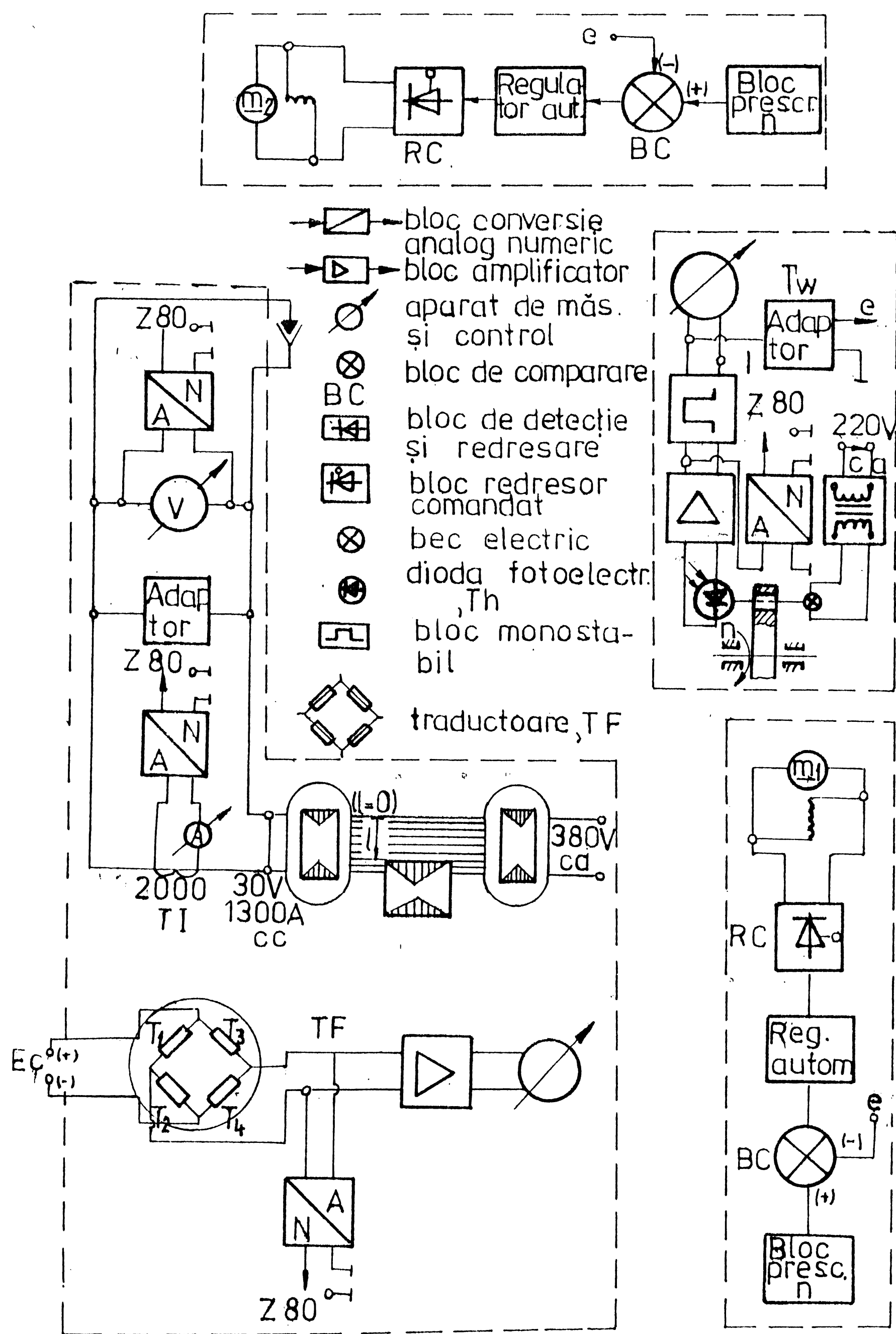


Fig. 5.5. Sistemul de comandă și măsurare.

Raportul de transformare a lanțului, este $i_{2,1} = 1$, și asigură domeniul vitezelor periferice (viteze relative) ale OT, cuprinse între $10 \dots 50 \text{ m/s}$.

Lanțul de antrenare, este cuprins în sistemul de comandă și măsurare (fig. 5.5) și asigură realizarea parametrului de proces, viteză relativă (măsurarea și comanda valorilor impuse de proces).

Viteza periferică a OT, este măsurată prin turația arborelui de antrenare. Soluția adoptată constă în utilizarea unui traductor fotoelectric, montat pe lanțul cinematic de antrenare (arborele

INSTITUTUL NAȚIONAL DE RECHERȘI ȘI DEZVOLTĂRI
 IIA
 BUCUREȘTI

de antrenare).

Informațiile culese de la cele trei traductoare TJ , Tn , sînt preluate de interfața sistemului și apoi transmise microcalculatorului. În urma prelucrării datelor, semnalele parcurg traseul invers, fiind aplicate de la interfață pe cele două elemente de execuție de tip convertizor CMM, $P = 2,1 \text{ kW}$, 50 A , monofazat, pentru ambele motoare m_1 și m_2 ale lanțurilor cinematice.

Se asigură astfel sistemul de comandă și măsurare a utilajului de prelucrare.

5.2.5. Structura interfeței de proces

Alături de utilajul de prelucrare, interfața de proces formează sistemul de conducere automată a standului experimental. Interfața asigură achiziția de date de la traductoarele utilajului și apoi distribuția comenzilor între elementele de execuție. Transferul de informații implică un subsansamblu hardware, care, trebuie să asigure următoarele funcții :

- achiziția de date de la cele trei traductoare TF , TI , Tn , necesare comenzilor de determinare a mărimilor specifice de proces, viteza de erodare - v_e și viteză relativă - v_r ;
- distribuirea de date către elementele de execuție, mai exact către cele două blocuri de comandă de tip convertizor monofazat ;
- furnizarea de date care să permită urmărirea modului de lucru al standului experimental.

Interfața, concepută pentru utilajul de prelucrare, asigură două canale de intrare, pentru cele trei traductoare TF , TJ , Tn , și două canale de ieșire, pentru acționarea celor două lanțuri cinematice de deplasare și de antrenare (fig.5.6).

Datele de intrare analogice, de la traductoare, sînt convertite în date numerice, de convertorul ADC-D8-2 analog digital de opt biți, apoi, prin interfața paralelă programabilă 8253, sînt transmise microprocesorului Z 80.

Datele de ieșire numerice, parcurg interfața paralelă programabilă 8255, apoi sînt convertite în date analogice, prin convertorul DAC-08 digital analogic de opt biți.

Selecționarea și controlul circuitelor pe interfață este asigurată printr-un decodor/demultiplexor de trei biți de tip 74 LS-138, în legătură directă cu cele două interfețe programabile 8255-1,2 prin canalele de ieșire CS1, CS2 și cu microprocesorul Z 80, prin cele șase canale de intrare.

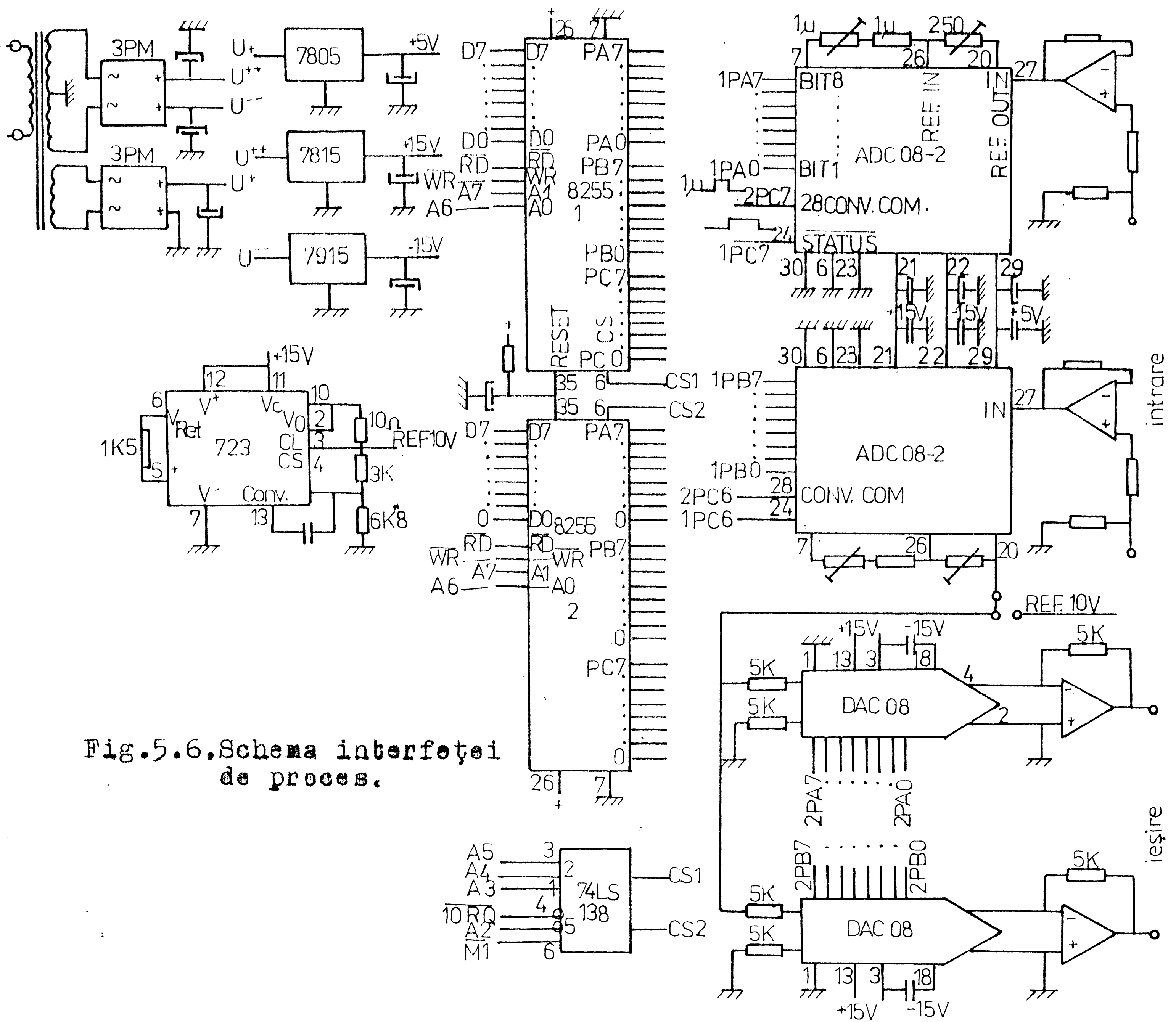


Fig.5.6.Schema interfeței de proces.

Sursa de alimentare, asigură tensiuni de +5, +15, -15 V stabilizate, prin circuitele integrate 7805, 7815, 7915, tensiunea de referință de 10 v, pentru convertoarele amintite, este asigurată de circuitul integrat 723.

Informațiile culese de cele trei traductoare de forță, de turație și de curent, sînt transmise microprocesorului Z 80, care, în baza unui program de conducere în cod mașină, determină optimul procesului, prin modelul matematic implementat în proces.

Valorile rezultante pentru viteza de erodare și viteza relativă, sînt transmise lanțurilor cinematice prin cele două canale de ieșire, realizîndu-se astfel conducerea automată a procesului de prelucrare.

5.3. Comanda automată a procesului

Utilizarea mijloacelor electronice de calcul în procesul de comandă, conducere și programare a sistemelor tehnologice de prelucrare neconvențională, reprezintă o etapă nouă, necesară realizării proceselor automate de prelucrare. În domeniul tehnologiilor neconvenționale, mijloacele electronice de calcul (calculatoarele electronice), pot fi utilizate pentru următoarele direcții de dezvoltare :

- comanda adaptivă a proceselor tehnologice ;
- conducerea unuia sau a unui grup de utilaje tehnologice neconvenționale cu structuri CNC ;
- programarea asistată de calculator a utilajelor tehnologice.

Funcțiile de bază posibil de realizat prin intermediul calculatoarelor electronice sînt :

- funcția de conducere a sistemului tehnologic în ansamblu (utilajul tehnologic și procesul tehnologic) ;
- optimizarea parametrilor tehnologici ai regimului de prelucrare cu eficiență maximă.

Cercetările desfășurate de autor asupra procesului de prelucrare prin procedeul EERC, au permis evidențierea în continuare, a posibilităților existente de realizare a conducerii automate a procesului tehnologic de prelucrare prin eroziune electrică cu rupere de contact.

5.3.1. Comanda adaptivă a procesului

Pentru elaborarea sistemului de conducere automată a procesului tehnologic, s-a determinat, în capitolul 4, legea de comandă adică modelul matematic al procesului. Problema generală a optimizării procesului de prelucrare prin procedeul EERC în cadrul unui sistem de conducere automată, este realizabilă prin cele două sisteme de comandă adaptivă/1/ :

- sistem cu comandă limitată (comandă adaptivă cu restricții), SCL ;
- sistem de comandă optimală, SOA.

Fiecare din aceste sisteme este utilizat în funcție de scopul urmărit, cercetările desfășurate pînă în prezent permițînd evidențierea următoarelor direcții de aplicare :

Sistemul de comandă limitată, denumit și sistem adaptiv

de reglare la limită, poate realiza un grad limitat de optimizare prin menținerea constantă a unuia din parametrii tehnologici. Acest parametru, se alege pe baza strategiei adoptate inițial. În timpul procesului de prelucrare, parametrul adoptat este comparat în mod continuu cu o valoare de referință și în funcție de rezultatul comparării, se comandă modificarea parametrilor tehnologici, v_e și v_r prin elementele de execuție EE1, EE2 (fig.5.7). În funcție

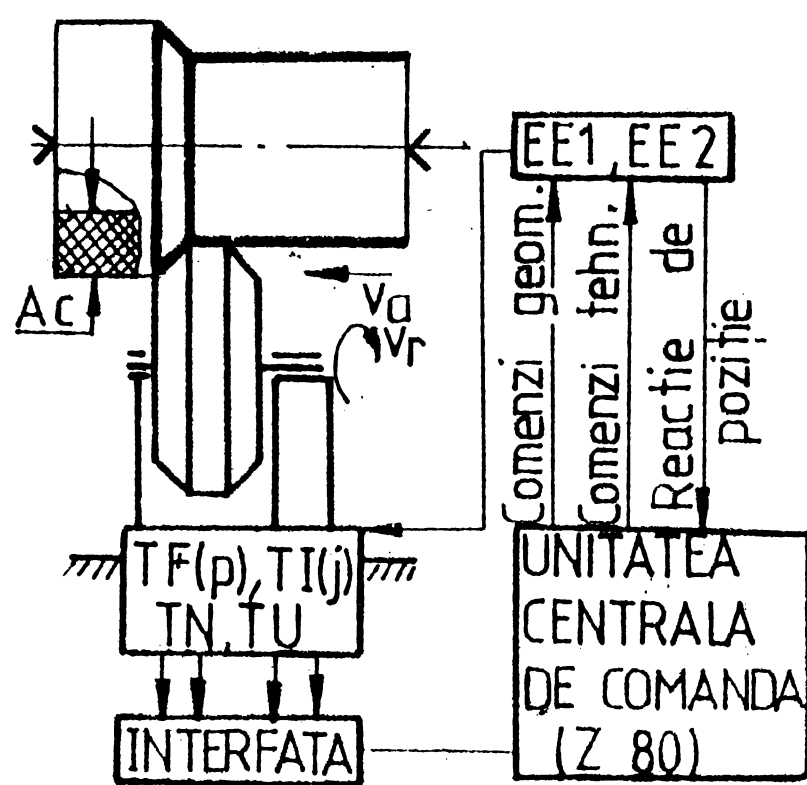


Fig.5.7. Schema SCL a procesului de prelucrare prin procedeul EERC.

de tipul prelucrării (degroșare, semifinisare, finisare), se poate adopta ca parametru constant densitatea de curent, tensiunea pe spațiu de lucru, presiunea specifică și viteza relativă dintre OT și OP. Modul în care influențează acești parametrii procesul de prelucrare a fost prezentat în subcapitolul 2.3, la care, se adaugă cercetările desfășurate de autor și prezentate în cadrul subcapitolului 2.5.

Indiferent de parametrul adoptat, se impune, efectuarea în prealabil a unor probe tehnologice manuale, în care, parametrul adoptat să nu depășească valoarea maximă admisă, iar limitele domeniului de reglare a celor doi parametrii tehnologici v_e și v_r , să asigure comportarea corespunzătoare din punct de vedere al productivității prelucrării, consumului specific de energie electrică și al reducerii la minim a riscului de deteriorare al utilajului.

Sistemul adaptiv de comandă optimală, depășește posibilitățile sistemului SCL, prin faptul că în acest caz, procesul de prelucrare, este dirijat spre o zonă optimă.

Sistemul este pretabil în special la operații de degroșare (debitare), dar impune existența modelului matematic al procesului. Strategia de optimizare, este descrisă de aceste modele matematice prin extremizarea funcțiilor obiectiv, productivitatea prelucrării-maximă, consumul specific de energie electrică-minim.

În ambele cazuri, cei doi parametri tehnologici v_e și v_r , constituie variabile independente ale procesului. Optimizarea, presupune calculul și materializarea pe utilaj a valorilor vitezei de erodare și vitezei relative, care, asigură extremizarea funcției obiectiv.

Indiferent de sistemul de comandă adoptat, conducerea automată a procesului se poate realiza în două variante :

- Programarea prealabilă a parametrilor tehnologiei v_e și v_r . În acest caz, se impune utilizarea unor algoritmi complecși de calcul ai procesului, programați de operatorul uman înaintea începerii procesului de prelucrare. În timpul procesului de prelucrare, se asigură doar comanda de execuție și control în timp real a parametrilor tehnologici;

- Programarea în timp real a parametrilor tehnologici v_e și v_r , prin calculul, comanda și controlul instantaneu a acestora. În acest caz, alegerea limbajului de programare și a elementelor de execuție, are o influență hotărâtoare asupra calității procesului de conducere automată realizat.

În ceea ce privește funcția de conducere a sistemului tehnologic, aceasta se realizează prin activitatea de programare asistată de calculator a utilajului tehnologic. Se disting următoarele instrucțiuni :

- Instrucțiuni speciale (calculare matematice)
- Instrucțiuni geometrice
- Instrucțiuni tehnologice (v_e , v_r , modul de răcire)
- Instrucțiuni auxiliare (oprirea lichidului de răcire, a mișcărilor și a utilajului tehnologic).

Aceste instrucțiuni, sînt înregistrate și memorate sub formă codificată, pe purtători de informații specifici mijloacelor electronice de calcul preconizate a fi utilizate în conducerea sistemului tehnologic .

6. APLICAREA INDUSTRIALA A REZULTATELOR CERCETARILOR

6.1. Cercetări tehnologice desfășurate la Institutul de învățămînt superior din Sibiu

Din punct de vedere tehnologic, procedeul EERC de prelucrare, și-a găsit o largă răspîndire la operațiile de curățire, debavurare, debitare în special, și în mai mică măsură, la operațiile de prelucrare, indiferent de metoda de generare a suprafețelor.

Materialele supuse prelucrării, prezintă o varietate largă, însă rezultatele foarte bune s-au obținut la prelucrarea materialelor termorezistente, metale și aliaje cu duritate și tenacitate ridicată (oțeluri inoxidabile austenitice și martensitice, oțeluri refractare, fonte, aluminiul și aliajele sale), în general a metalelor greu prelucrabile prin tehnologii de prelucrare convenționale.

Operațiile de debitare ocupă un loc important în cadrul oricărui proces tehnologic. Datorită specificului metodei de obținere a pieselor la turnare, debitarea, constituie o operație finală cu influențe tehnico-economice mari asupra procesului tehnologic ulterior.

Operațiile de debitare prin procedeul EERC, au fost analizate în cadrul Institutului de învățămînt superior din Sibiu, începînd cu anul 1982, în cadrul activității de cercetare și proiectare contractuală a catedrei TCM.

Cercetările tehnologice desfășurate s-au finalizat pînă în prezent prin patru contracte de cercetare. În cadrul acestor contracte, s-a realizat proiectarea și optimizarea tehnologiei de debitare prin procedeul EERC, și omologarea de utilaje de prelucrare, cu grade de complexitate diferite (impusă de condițiile concrete din întreprindere).

6.1.1. Stand pentru studiul debitării materialelor metalice prin procedeul EERC

Stadiul de cunoaștere al procedeeului EERC de prelucrare,

existent în perioada anilor 1980 - 1985, a impus analiza caracteristicilor tehnologice, în vederea aplicării sale în industrie. Ca urmare, în cadrul Institutului de învățămînt superior din Sibiu, a fost conceput și realizat standul experimental din figura 6.1. Standul permite variația într-un domeniu larg al parametrilor și factorilor care influențează procesul de prelucrare /29/.

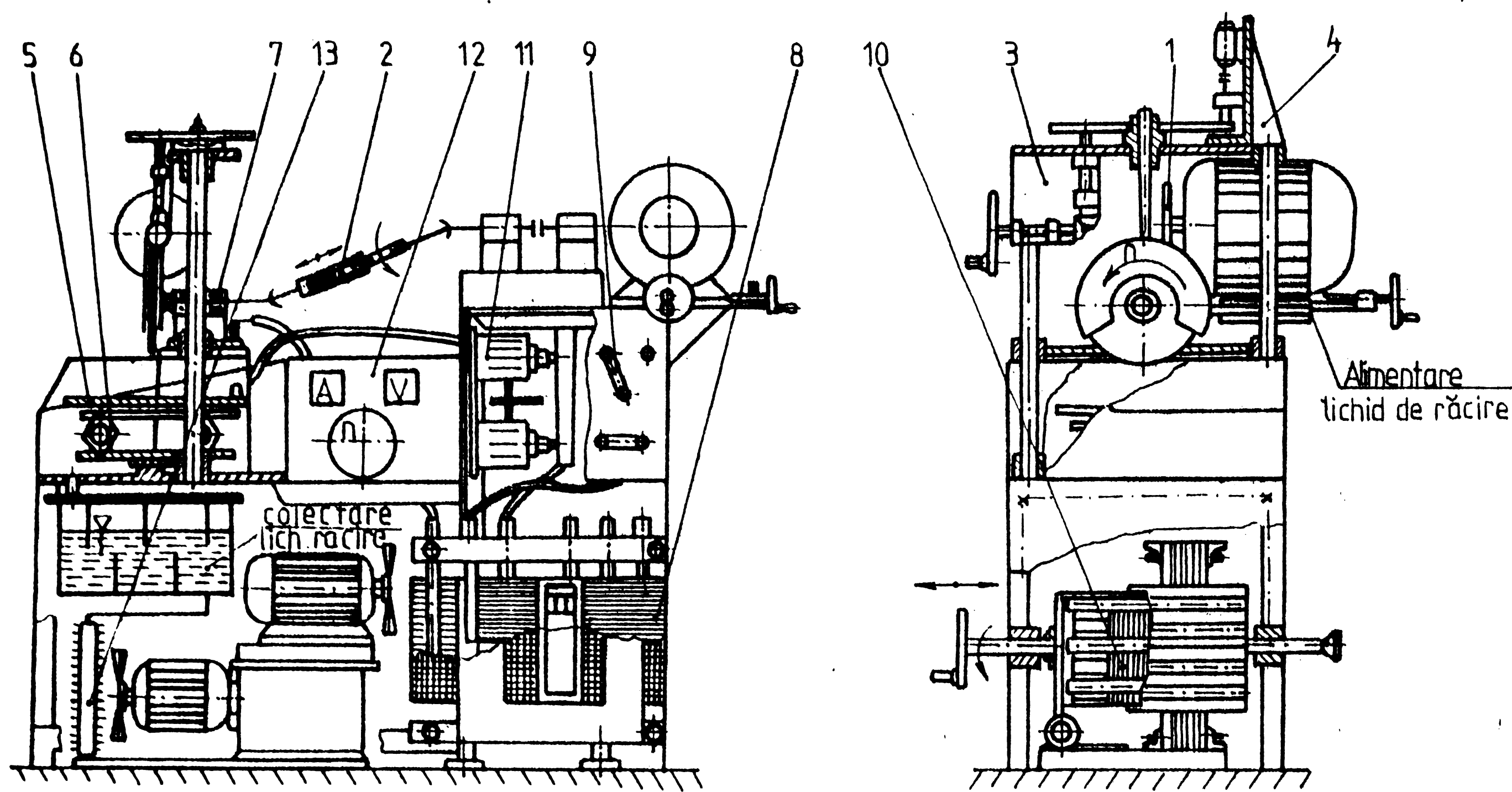


Fig. 6.1. Stand pentru studiul caracteristicilor tehnologice.

Structura standului respectă componentele unui utilaj de prelucrare prin procedeul EERC. Limitele largi de variație ale parametrilor tehnologici pe stand și mijloacele de măsurare, determină universalitate ridicată și posibilități largi de cercetare tehnologică.

Mișcarea relativă dintre OT și OP, se obține de la un motor electric de curent alternativ și se transmite printr-un variator mecanic continuu 1 și o articulație cardanică cu compensare axială 2.

Presiunea specifică la suprafața de contact dintre OT și OP, poate fi realizată manual 3, sau automat, printr-un sistem de avans reglabil 4, măsurarea nivelului presiunii specifice realizându-se prin masa dinamometrică 5 și traductoarele rezistive 6. Prin intermediul acestor elemente, este posibilă cercetarea prelucrării la presiuni cuprinse între (1.....15) MPa.

Alimentarea cu energie electrică, se realizează printr-o legătură directă la masa de lucru a utilajului, izolată electric față de batiul utilajului, respectiv prin intermediul unui sistem de perii colectoare 7, plasate pe arborele de susținere a OT.

Energia electrică este furnizată de către transformatorul 8, reglajul tensiunii de mers în gol și a intensității curentului, se realizează prin panoul cu eclise 9 și șuntul mobil 10. Sursa de alimentare, a fost prevăzută și cu un bloc redresor în punte 11. Măsurarea nivelului parametrilor electrici, se realizează prin intermediul aparatelor de măsură, amplasate pe panoul 12.

Studiul influenței lichidului de răcire asupra caracteristicilor tehnologice, se realizează utilizând, fie circuitul deschis de alimentare cu apă tehnologică, fie circuitul închis cu sistemul de recirculare, filtrare și răcire 13.

Ca sursă de alimentare cu energie electrică, a fost proiectat și realizat transformatorul special a cărui caracteristici externe sînt prezentate în figura 6.2.

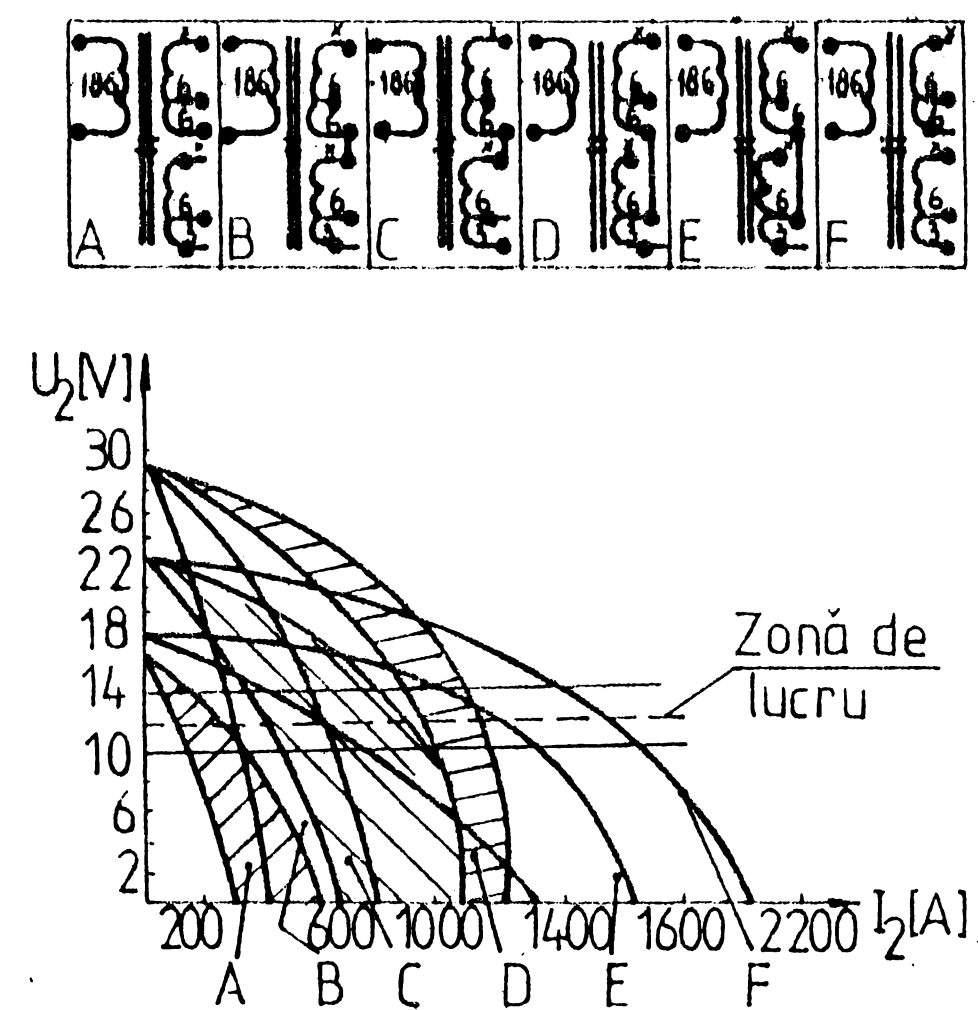


Fig. 6.2. Caracteristicile externe ale sursei de alimentare.

Construcția transformatorului face posibilă modificarea curentului în două moduri :

- în trepte, prin modificarea conexiunii înfășurării secundare ;
- continuu, în cadrul fiecărei trepte, prin deplasarea între coloanele transformatorului a unui șunt magnetic mobil.

Schema electrică, figura 6.3, asigură funcționarea normală a standului experimental. Toate elementele schemei sînt protejate la regimuri normale de funcționare.

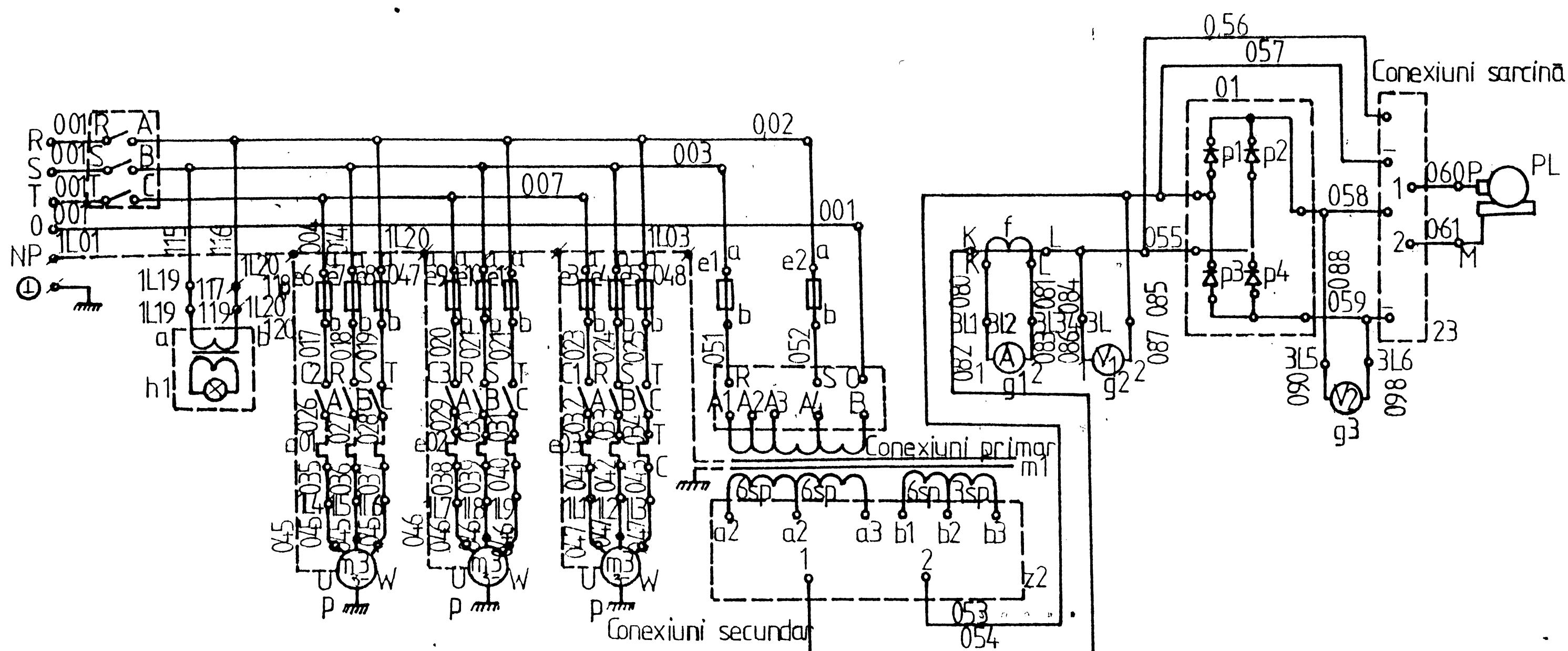


Fig. 6.3. Schema electrică a standului experimental.

Caracteristici tehnice

Ciclul de lucru	manual, semiautomat
Avansul de lucru în ciclu automat	0,5 ÷ 10 mm/s
Diametrul electrodului-sculă	∅ 150÷∅ 350 mm
Turația discului	1000÷6000 rot/min
Sistemul de orientare și fixare	modulat
Puterea instalată a sistemului de antrenare a electrodului sculă	3 kW
Masa dinamometrică de măsurare a componentelor de prelucrare	F_x, F_y, F_z, M_z
Sistemul de alimentare cu energie electrică	(figura 6.2)
Sistemul de alimentare cu agenți de răcire	deschis-închis
Sistemul electric de acționare și protecție	(figura 6.3)

6.1.2. Cîmpul de temperatură la debitarea prin procedeul
EERC

În timpul procesului de debitare prin procedeul EERC, în OP, iau naștere temperaturi înalte, care, determină procesele de încălzire, topire și eventual de vaporizare a microvolumelor de material, deci, influențează indicatorii tehnologici ai prelucrării. Pe aceste considerente, pentru o debitare de durată (prelucrare în regim staționar), se impune urmărirea dependenței, temperatura OP - parametrii tehnologici ai procesului.

Cercetările tehnologice s-au desfășurat pe standul prezentat în subcapitolul 6.1.1, figura 6.1., în următoarele condiții:

- obiectul de transfer, oțel OL42, sub forma unui disc cu diametrul de 200 mm, grosime 2 mm ;
- obiectul de prelucrare, oțel OLC45, sub formă paralelipipedică, în care s-au înglobat traductori termoelectrice (termocuple), figura 6.4 ;
- mediul de lucru, apă tehnologică în circuit deschis, dirijată atât pe suprafața OT cît și în zona de prelucrare pe OP;
- viteza relativă, realizată prin mișcarea de rotație a OT ;
- viteza de erodare, materializată prin viteza de avans a OT în domeniul 1.....5 mm/s ;
- tensiunea și intensitatea curentului la valori rezultate pe curbele caracteristice externe ale sursei de alimentare definite pe domeniul E, figura 6.2, $U_p = 12,5 V$, $I_2 \in / 800 \div 1400 / A$;

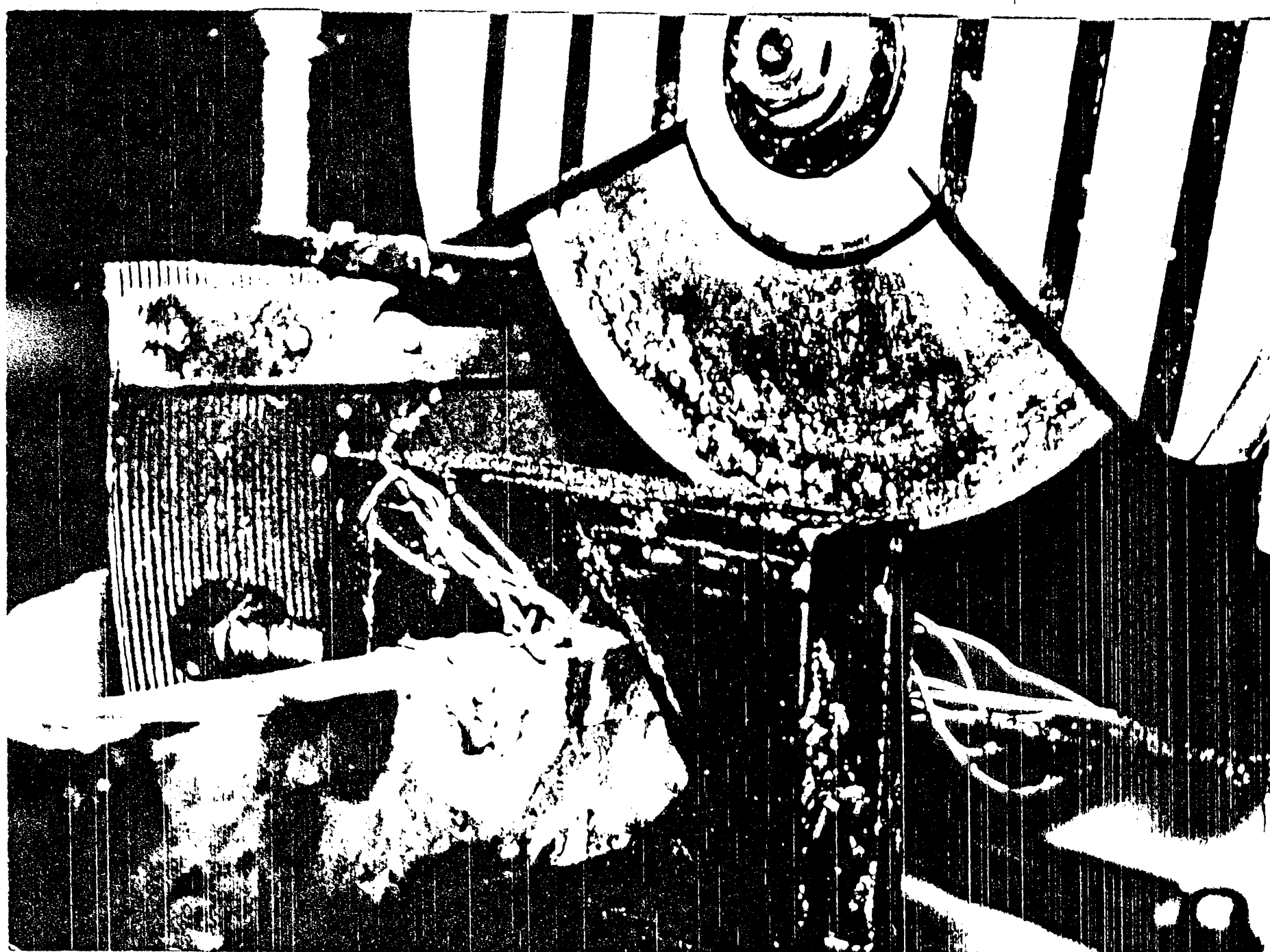


Fig. 6.4. Cercetarea cîmpului de temperatură la debitarea prin procedeul EERC.

Principiul de măsurare aplicat, are la bază efectul termoelectric. S-au utilizat două termocuple, fier-constantan rezistent la atmosferă oxidantă pînă la 760°C , precizie $\pm 1\%$ și cromel-alumel rezistent în atmosferă oxidantă pînă la distrugere (1300°C), precizie $\pm 0,75\%$. Cele două termocuple, au fost conectate la un lanț

de măsurare, în care, prin intermediul milivoltmetrului regulator, s-a realizat măsurarea temperaturii /17,89/.

Schema de prelucrare și amplasare a traductoarelor este reprezentată în figura 6.5. S-au realizat experimentări în patru cazuri distincte :

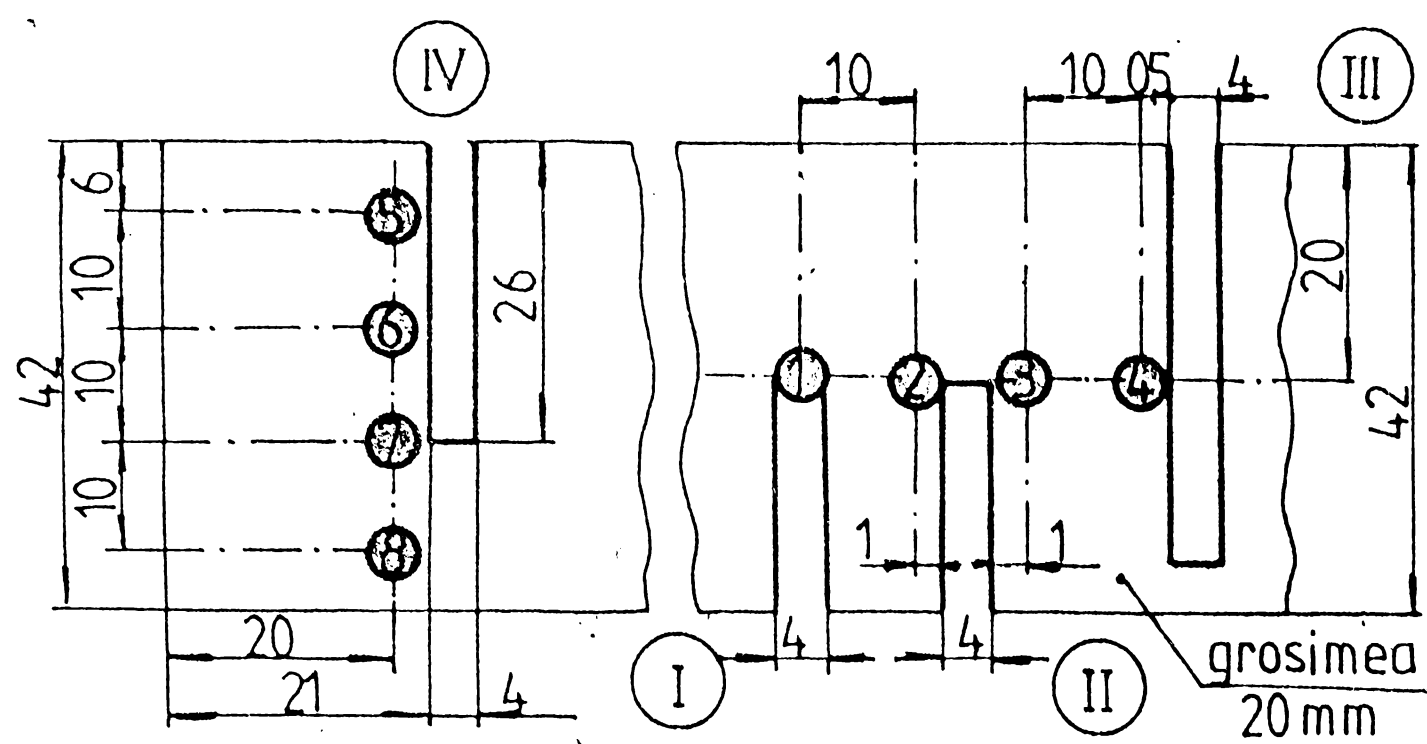


Fig. 6.5. Schema de prelucrare și amplasare a traductoarelor.

I - prelucrare pînă la distrugerea traductorului T1, termocuplu cromel - alumel ;

II - prelucrare simetrică pînă la nivelul traductoarelor T2, T3, termocuplu fier-constantan ;

III - prelucrare tangențială cu depășirea traductorului T4, termocuplu cromel - alumel ;

-alumel ;

IV - prelucrarea tangențială cu depășirea traductoarelor T5, T6, pînă la nivelul traductorului T7, termocuplu fier-constantan.

Pentru măsurarea, vizualizarea și înregistrarea rezultatelor cercetărilor, s-au utilizat : milivoltmetru regulator tip MR 192, fier-constantan 600°C , $32,621\text{ mV}$, $R_i = 159\ \Omega$, cu patru comutatoare cu platouri ; milivoltmetru regulator tip MR 192p, cromel-alumel 1200°C , $48,87\text{ mV}$, $R_i = 581\ \Omega$; cablu de compensație $R \leq 10\ \Omega$; ceas

electronic cu precizie de 0,01 s și domeniul de măsurare de 20 s, înregistrator X,Y de tip Endim 62002.

Rezultatele experimentărilor, sînt prezentate în figurile 6.6, 6.7 și completează rezultatele cercetărilor teoretice ale autorului (capitolul 2) și ale cercetătorilor sovietici /14,15/.

Astfel, pentru primul caz, se evidențiază sesizarea inițială a temperaturii la 3 mm de vârful traductorului și creșterea vertiginosă (cu 1000°C pe parcursul a 0,6 s) a temperaturii materialului OP pînă la atingerea temperaturii de topire (momentul distrugerii termocuplului), figura 6.6.

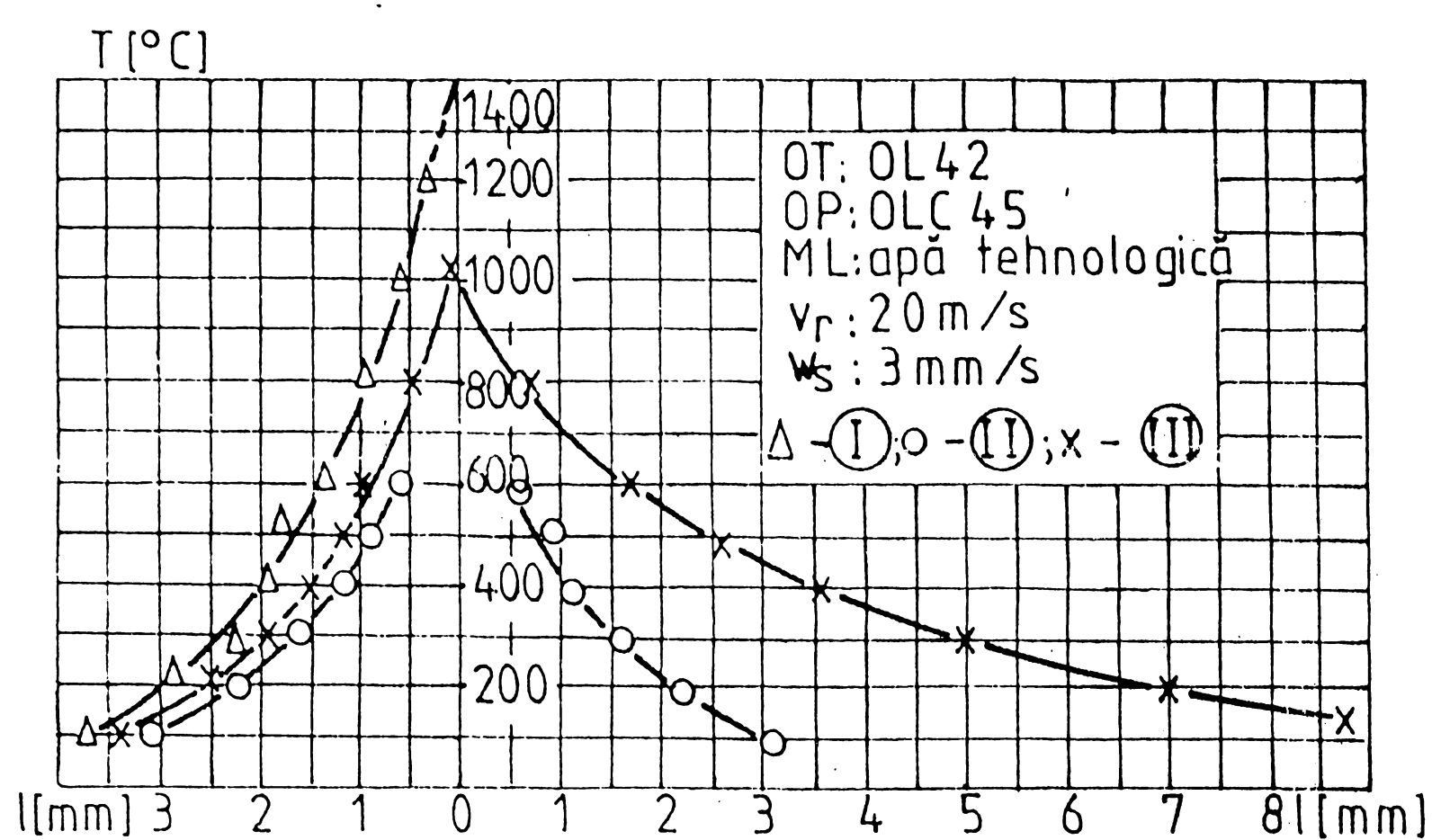


Fig.6.6.Repartiția cîmpului de temperatură în materialul supus prelucrării.

Pentru cel de-al doilea caz de prelucrare, poziția simetrică a OT față de cele două traductoare, a permis evidențierea existenței unei simetrii avansate a temperaturii în materialul OP. Se poate aprecia, existența unui paralelism accentuat între modul de dezvoltare

a temperaturii pentru primele două situații de prelucrare.

Pentru cel de-al treilea caz de prelucrare, s-au înregistrat valorile temperaturii înainte și după depășirea termocuplului. Viteza de avans a discului "v", determină aceeași creștere accentuată a temperaturii, odată cu apropierea zonei de interacțiune de termocuplu. Odată cu depășirea acestei zone, în materialul OP, are loc scăderea temperaturii, în special datorită schimbului de căldură realizat cu lichidul de răcire. Viteza de răcire, este însă mult mai mică decât viteza de încălzire a materialului OP, situație defavorabilă mai ales pentru stratul imediat vecin suprafeței prelucrate, strat în care apare zona influențată termic.

S-a definit prin viteza de încălzire respectiv viteza de răcire raportul dintre variația temperaturii de încălzire respectiv de răcire, ΔT , și unitatea de lungime.

În ceea ce privește cel de-al patrulea caz cercetat, trebuie remarcat de la început faptul că, s-a luat în considerare influența vitezei de avans asupra temperaturii dezvoltată în materialul OP. Si în acest caz, s-au înregistrat temperaturile dezvoltate odată cu deplasarea zonei de interacțiune de traductoarele T5 și T6 pînă în dreptul traductorului T7. La nivelul traductoru-

lui T8, aflat la distanța de 10 mm de traductorul T7, și deci de punctul final al prelucrării, nu s-au înregistrat variații ale temperaturii.

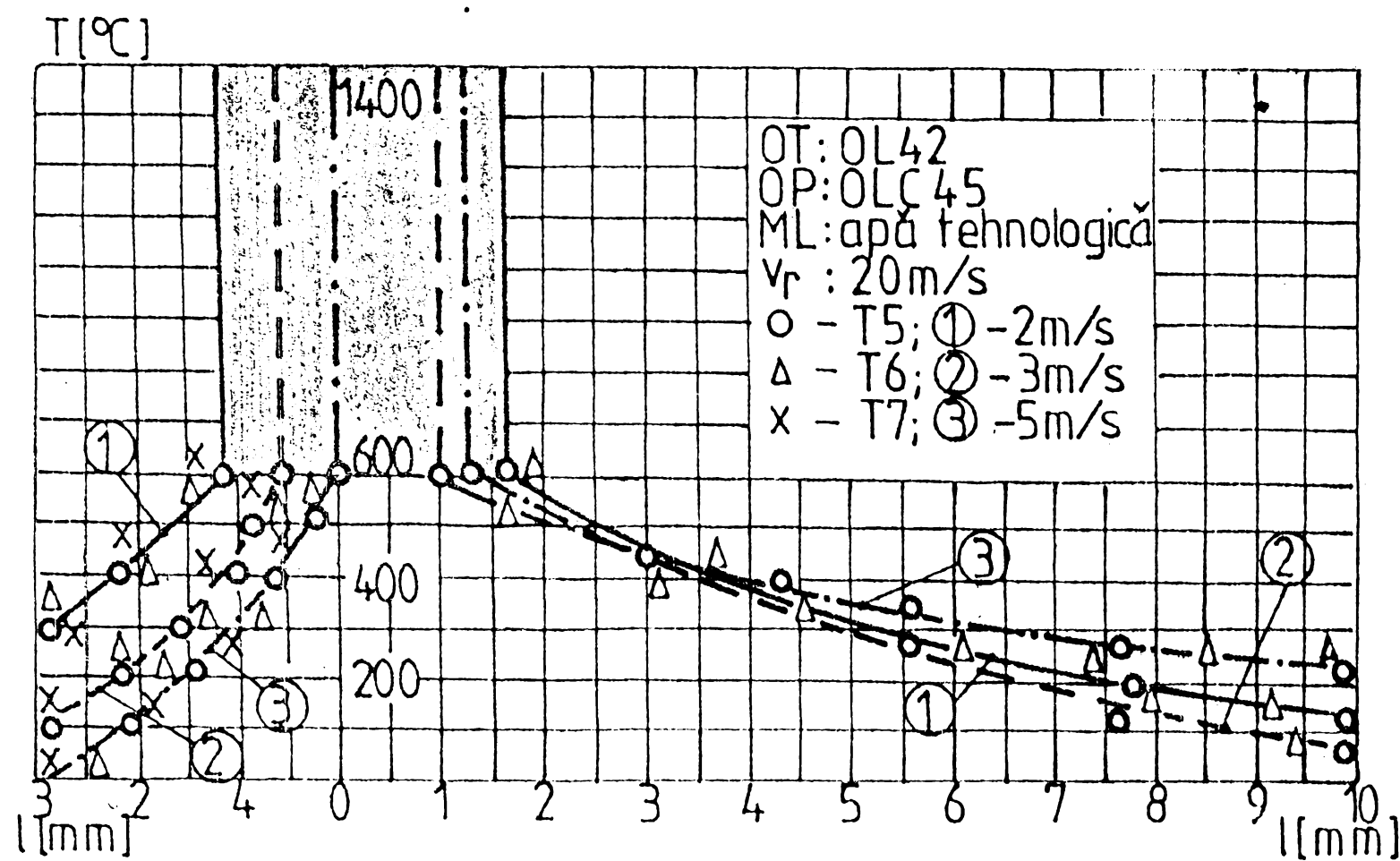


Fig. 6.7. Variația temperaturii în funcție de parametrii tehnologici ai procesului EERC.

S-au confirmat elementele caracteristice prezentate anterior privind repartiția temperaturii în materialul OP, pentru cele trei viteze de avans cercetate. Dezechilibrul dintre viteza de încălzire și viteza de răcire este accentuat la viteze de avans mari (curba 3), impunând

introducerea din exterior a unei cantități mai mari de lichid de răcire, pentru amplificarea schimbului de căldură, și ca atare localizarea energiei de efect. Creșterea vitezei de avans, determină creșterea vitezei de încălzire a materialului OP, și ca urmare, concentrarea prin reducere a suprafeței în care se localizează energia de efect a sursei de alimentare (suprafața grafică cenușie).

Reprezentările grafice pentru cele patru cazuri distincte cercetate, au evidențiat existența unui domeniu optim al debitării materialelor prin procedeul EERC. Astfel, se remarcă reducerea substanțială a suprafeței de localizare a energiei de efect (concentrarea energiei de efect), la viteze relative dintre OT și OP de 20 m/s, odată cu creșterea vitezei de avans a OT spre valori care determină viteze de erodare în domeniul definit în capitolul 5, $p \in (6,8 \dots 10) \text{ MPa}$, $j \geq 5 \text{ A/mm}^2$.

6.1.3. Modificări structurale la debitarea prin procedeul EERC

Interferența mecanismelor intime care concură la îndepărtarea materialului în cazul prelucrării dimensionale prin eroziune electrică cu rupere de contact, determină o serie de modificări structurale în zona de debitare. Acțiunea termică a surselor active din proces, este foarte intensă, conducând la topiri în straturile adiacente, la încălziri ale următoarelor straturi. Prin acțiunea mecanică se realizează evacuarea parțială a materialului

topit din spațiul de lucru. Totodată însă, frecările dintre OT și suprafața debitată a OP, pot determina îndepărtări suplimentare de material.

Rolul funcțional ulterior al suprafețelor rezultate prin debitare, sau necesitatea unor eventuale prelucrări prin așchiere ale acestor suprafețe, impun studierea prealabilă a modificărilor ce pot apărea sub acțiunea procesului respectiv.

Cercetările experimentale efectuate, au luat în considerare oțelul T 25 NiCr 250, turnat sub forma unor epruvete cilindrice \varnothing 25 mm. Debitarea acestui material a constituit obiectul contractului de cercetare științifică dintre Institutul de învățământ superior din Sibiu și întreprinderea "Independența" din Sibiu.

Oțelul T 25 NiCr 250, este un oțel refractar de tip austenitic din grupa 25-20, care, poate fi utilizat până la 1423°K în atmosferă oxidantă și până la 1323°K în atmosferă ușor sulfuroasă, această ultimă temperatură reducându-se treptat odată cu creșterea cantității de produse sulfuroase. Această grupă de oțeluri, este cea mai utilizată din categoria oțelurilor refractare austenitice, constituind materialul pentru fabricarea de cutii de cementare, creuzete pentru băi de săruri, recuperatoare de căldură, camere de ardere pentru turboreactoare, etc /109/.

Epruvetele din oțel T 25 NiCr 250 luate în considerare, au prezentat următoarea compoziție chimică /27/ :

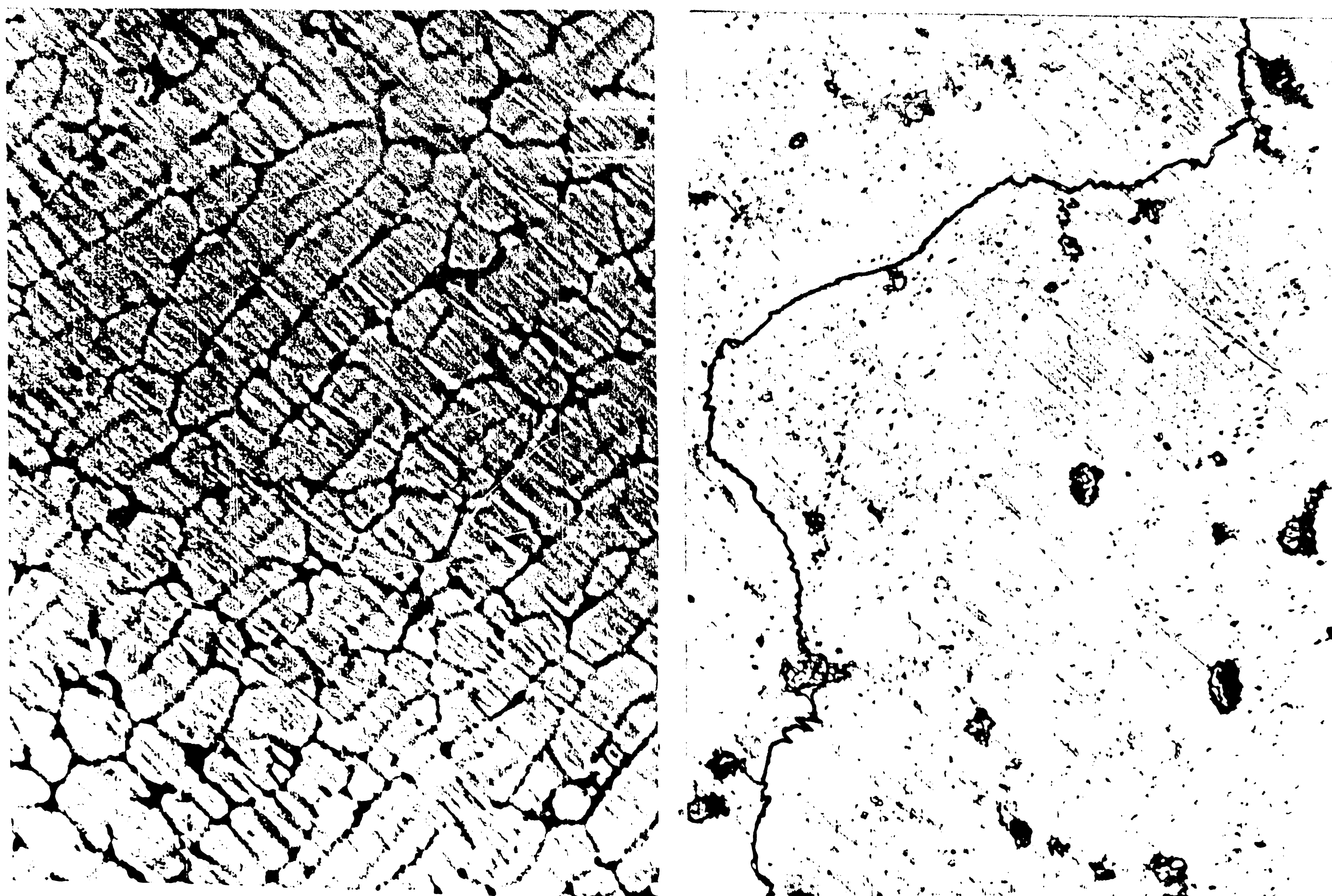


Fig. 6.8. Microstructura epruvetei (oțel T 25 NiCr 250) supusă debitării prin procedeul EERC, 500 x.

C = 0,24 %

Si= 2,14 %

Mn= 1,32 %

Cr=25,4 %

Ni=19,6 %

Probele metalografice prelevate după turnare, au prezentat o structură caracteristică, austenitică cu segregatii de carburi de crom și, local, feritice avînd o duritate de 240-250 HB. (figura 6.8).

După cum este cunoscut, piesele turnate din acest oțel se supun ulterior unei căliri de punere în soluție-încălzire la 1323-1373°K urmată de răcire în apă-ce urmărește creșterea rezistenței la coroziune prin omogenizarea chimică și structurală.

Prelevarea probelor din barele turnate s-a efectuat pe standul experimental pentru debitare prin procedeul EERC, /29/. Obiectul de transfer, a fost constituit dintr-un disc cu grosimea 2,5 mm din oțel OL 42. Pentru debitare, s-au utilizat regimuri caracterizate prin intensități ale curentului cuprinse între 600 A și 1350 A și tensiuni de cca. 13 V. Viteza relativă între cele două obiecte în interacțiune, s-a menținut constantă, la valoarea de 25 m/s, iar viteza de avans s-a variat în domeniul 0,5 ÷ 5 mm/s.

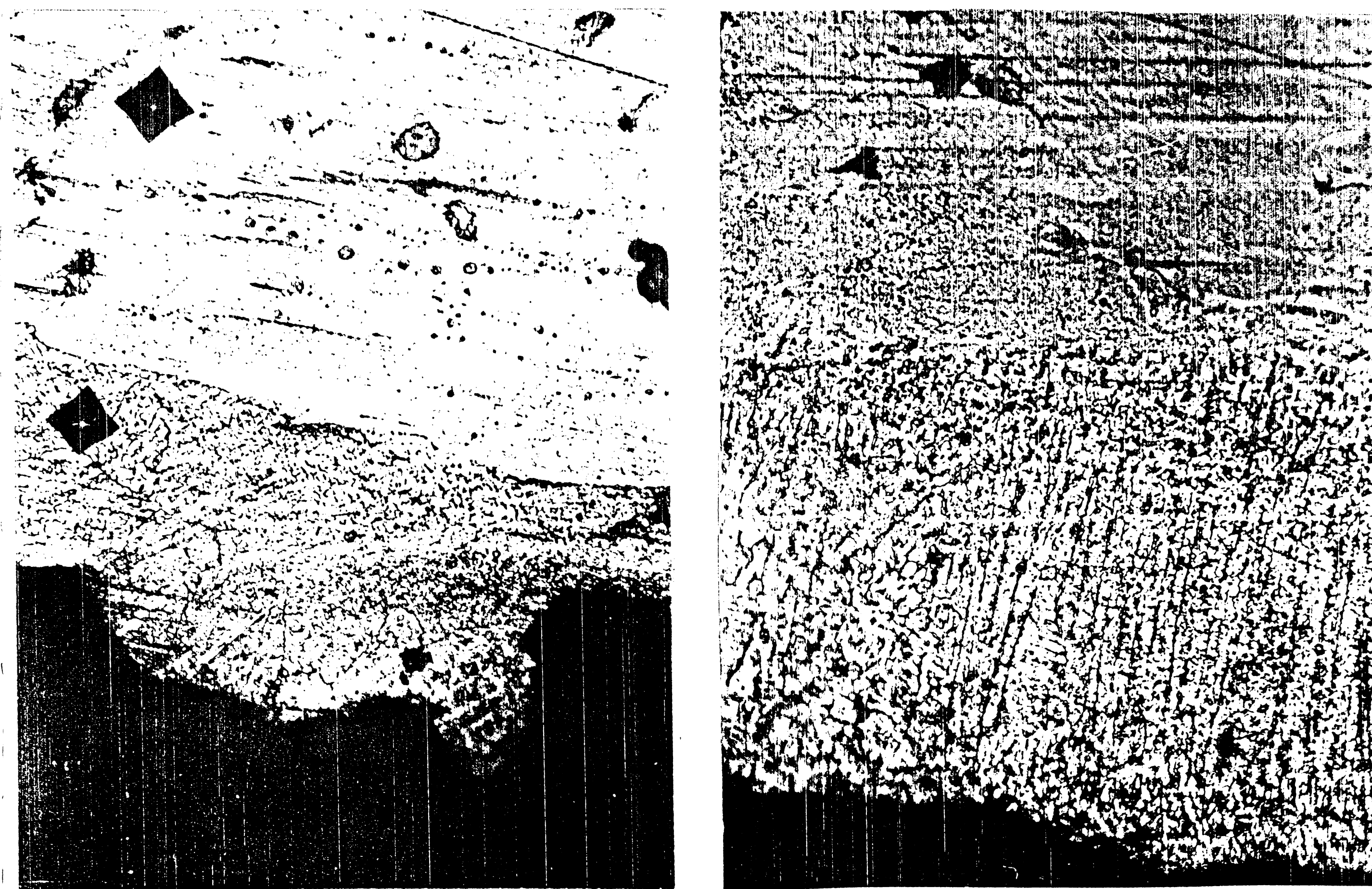


Fig.6.9. Microstructura probelor metalografice prelevate din zona supusă debitării, 500 x.

Analizele microstructurale efectuate pe probe metalografice prelevate din zona supusă debitării, arată existența unui strat superficial, discontinuu, cu grosimi cuprinse între 0,02 - 0,05 mm, care, la determinările efectuate, a prezentat o microdurate mai mare cu $20 \div 25$ HV $0,1$ decât cea a materialului de bază (254 HV $0,1$ în materialul de bază și respectiv 275÷280 HV $0,1$ în stratul superficial). Ca aspect general, stratul superficial prezintă o delimitare netă față de materialul de bază (fig. 6.9), cu carburi fine repartizate uniform și incluziuni nemetalice.

Aceste caracteristici ale zonei adiacente spațiului de lucru, pot fi determinate de topirile locale specifice procedurii EERC (evidențiate mai pregnant de imaginea din figura 6.10)

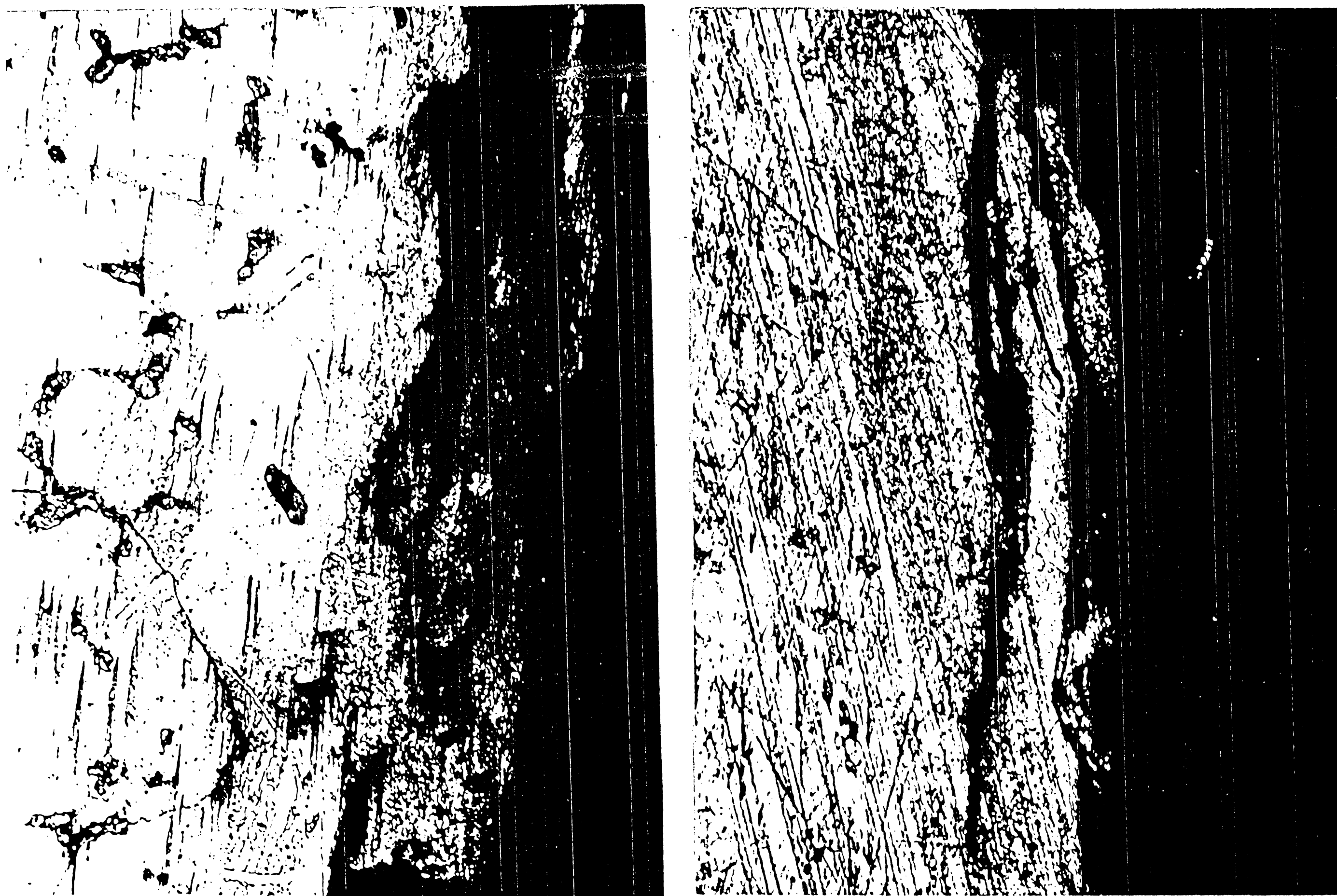


Fig. 6.10. Microstructura probelor metalografice, topiri locale specifice procedurii EERC, 500 x.

și respectiv de evacuarea mecanică a topiturii de către OT în mișcare relativă față de OP.

Intrucât oțelurile refractare de tip austenitic nu prezintă transformări structurale în intervalul de temperatură aferent procedurii EERC, metalul de bază situat în vecinătatea stratului superficial nu prezintă astfel de transformări, deși a suferit, fără îndoială, influențe termice.

Totuși, datorită conductibilității termice reduse și unui

coeficient ridicat de dilatare liniară, caracteristicile oțelului analizat, acțiunea termică - chiar de scurtă durată - ar putea explica apariția locală a unor microfisuri intergranulare, inițiate de la marginea debitată. Astfel de figuri au fost evidențiate atât în zone cu material resolidificat (fig.6.11a) cât și în zone unde stratul superficial a fost îndepărtat complet (fig. 6.11b).

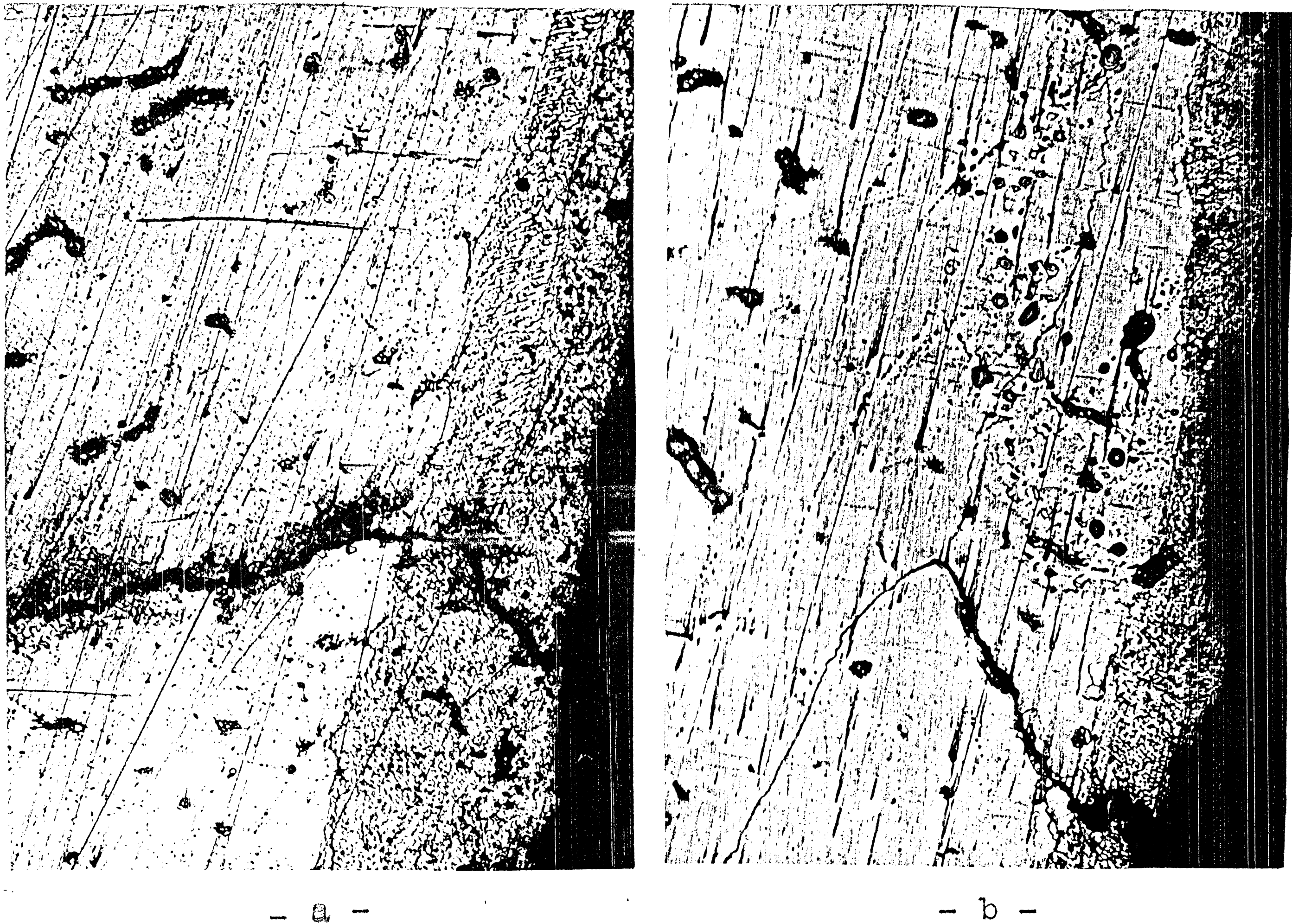


Fig. 6.11. Microstructura probelor metalografice, microfisuri intergranulare, 500 x.

Frecvența microfisurilor pe suprafața debitată este redusă iar adâncimea lor în metalul de bază se situează în ordinul de mărime al stratului superficial.

În urma cercetărilor experimentale efectuate, a rezultat că mecanismele intime care concură la debitarea oțelului T 25 NiCr 250 produc unele modificări structurale în zona adiacentă spațiului de lucru. Grosimea stratului afectat variază în domeniul 0-0,1mm. Extinderea redusă, caracteristicile structurale și de duritate ale stratului afectat de debitarea prin procedeul EERC, permit aprecierea unei prelucrabilități prin așchiere practic similare cu cea a materialului de bază.

6.2. Aplicarea procedeului EERC la Intreprinderea "Metalurgica" din Aiud

Intreprinderea Metalurgică Aiud, reprezintă în prezent parte integrantă din industria prelucrătoare a materialelor metalice. Nivelul tehnologic din întreprindere, se caracterizează prin aplicarea în ritm rapid a procedeelor noi de prelucrare, motivat prin necesitatea depășirii limitelor de prelucrare tradiționale.

Ca urmare, întreprinderea, a fost în permanență în căutarea de soluții tehnico-economice, care, să contribuie la creșterea productivității muncii și îmbunătățirea condițiilor sociale de muncă.

Intre multele soluții propuse și acceptate de I.M. Aiud, în vederea atingerii acestor deziderate, se găsește și implementarea tehnologiei de prelucrare prin procedeul EERC. Aceasta s-a realizat la debitarea maselotelor, rețelelor de turnare și diferitelor repere din oțeluri bogat aliate (oțeluri inoxidabile austenitice și martensitice, oțeluri refractare).

Analizând din punct de vedere al principalelor efecte tehnico-economice procedeele de debitare convenționale și neconvenționale, prin prisma aplicării lor la prelucrarea oțelurilor mediu și înalt aliate, a rezultat soluția din figura 6.12.

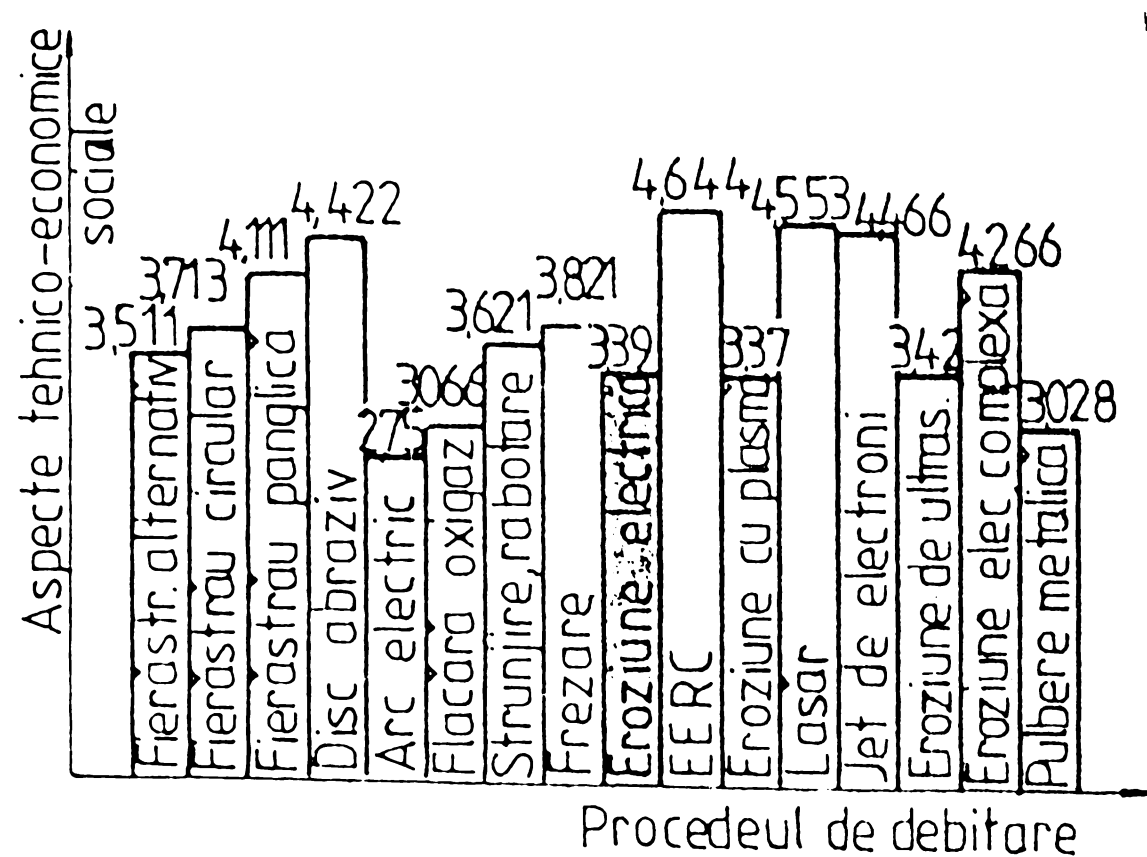


Fig. 6.12. Posibilitățile tehnico-economice și sociale de aplicare a procedeelor de debitare.

Rezultatul analizei efectuate a evidențiat avantajele aplicării procedeului EERC la debitarea reperelor turnate din oțeluri mediu și înalt aliate. Ținând cont de condițiile concrete necesare debitării, rezultă dificultăți majore sau chiar imposibilitatea aplicării altor procedee convenționale sau neconvenționale cu punctaje ridicate. În aceste condiții, s-a trecut la următoarea etapă, de proiectare creativ-inginerească, a componentelor di-

namice ale sistemului tehnologic de prelucrare /66,67/.

Caracteristicile secțiunilor de prelucrare și rezultatul studiului creativ efectuat sînt prezentate în figura 6.13. Selecția tehnico-economică efectuată, corelată cu posibilitățile

$\Delta 1_{ijk} = \Delta 117$	$\Delta 2_{ijk} = \Delta 332$	$\Delta 3_{ijk} = \Delta 3122$	$\Delta 4_{ijk} = \Delta 4121$	$\Delta 5_{ijk} = \Delta 5211$
comandă manuală Tensiune operator uman	Deplasarea punctului Analitica fix-OP	Grindă Sudare otel	Deschis Apa Extern	Baie de proces Pr. operator Pr. indiv.

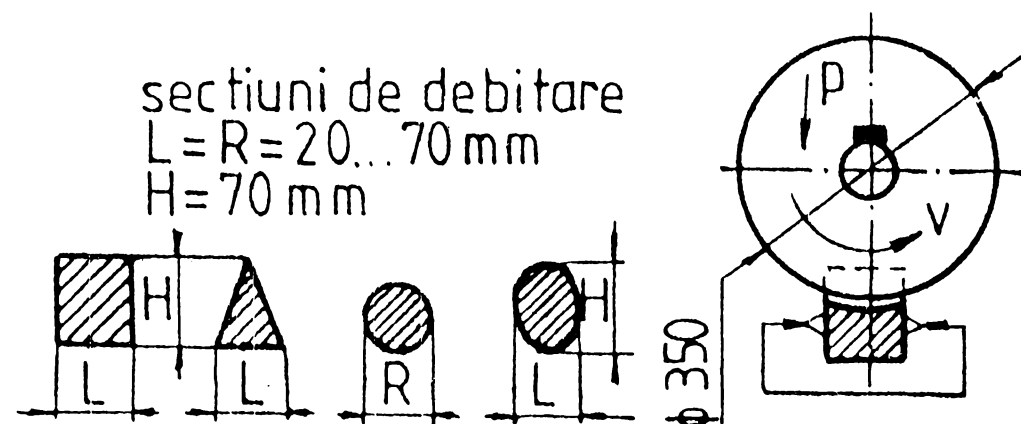


Fig. 6.13. Caracteristicile dinamice ale utilajului de prelucrare.

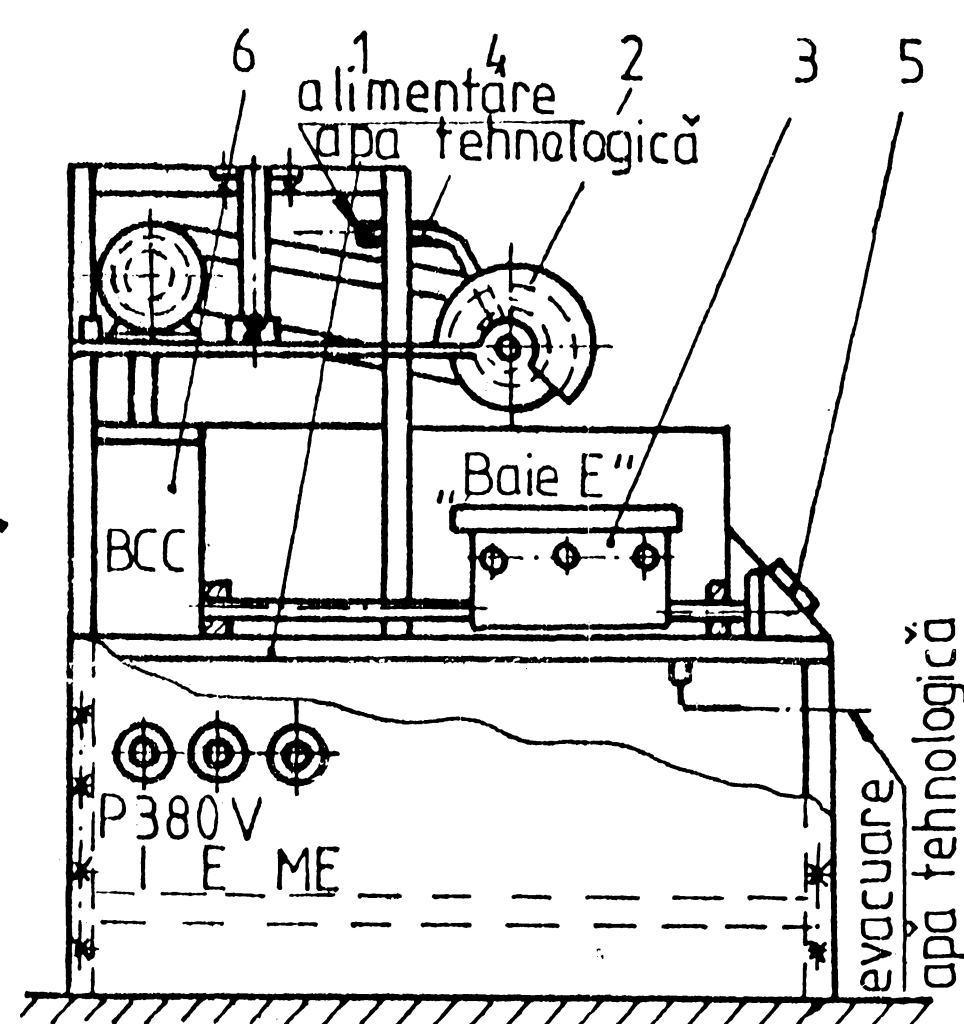
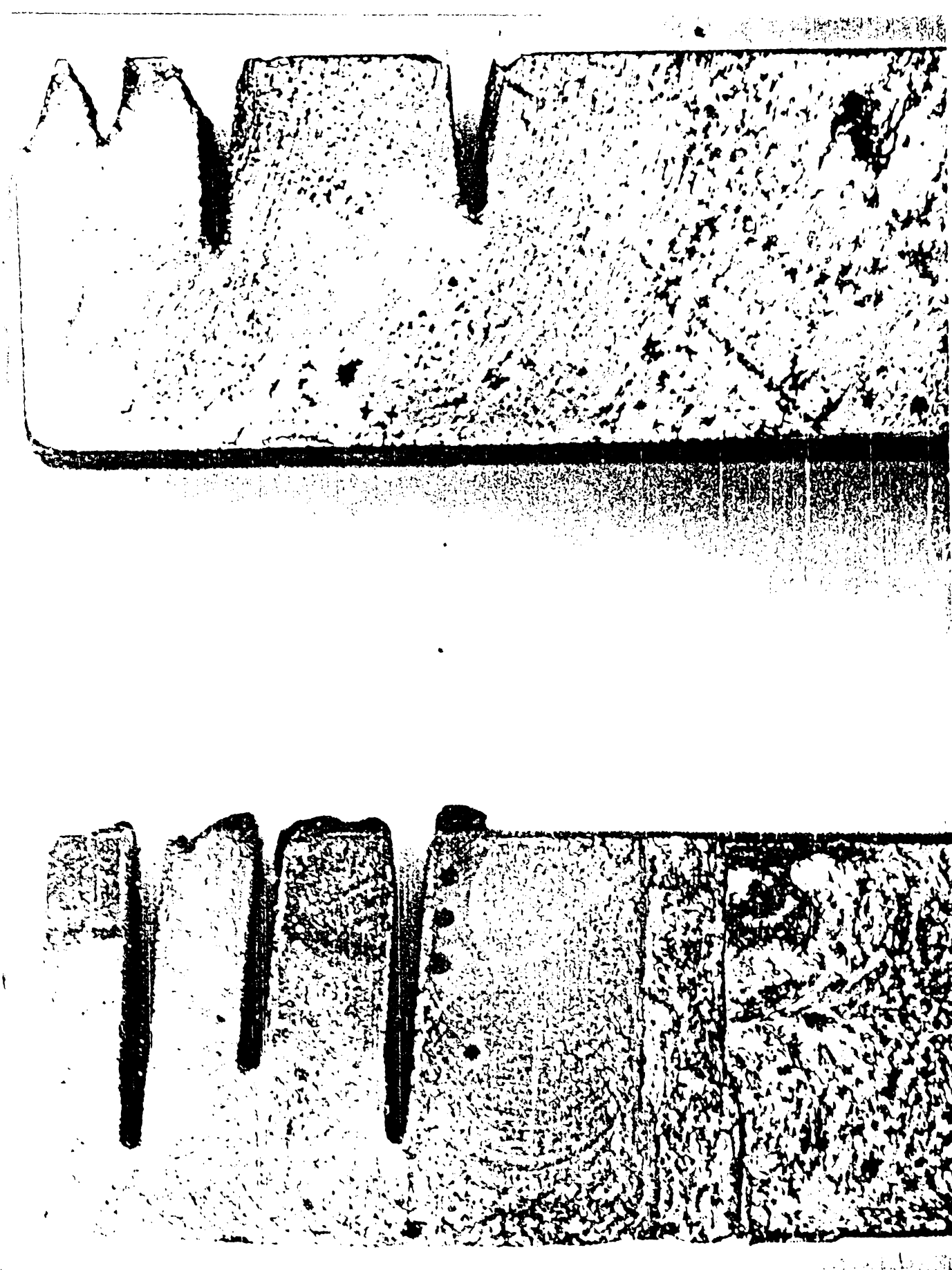


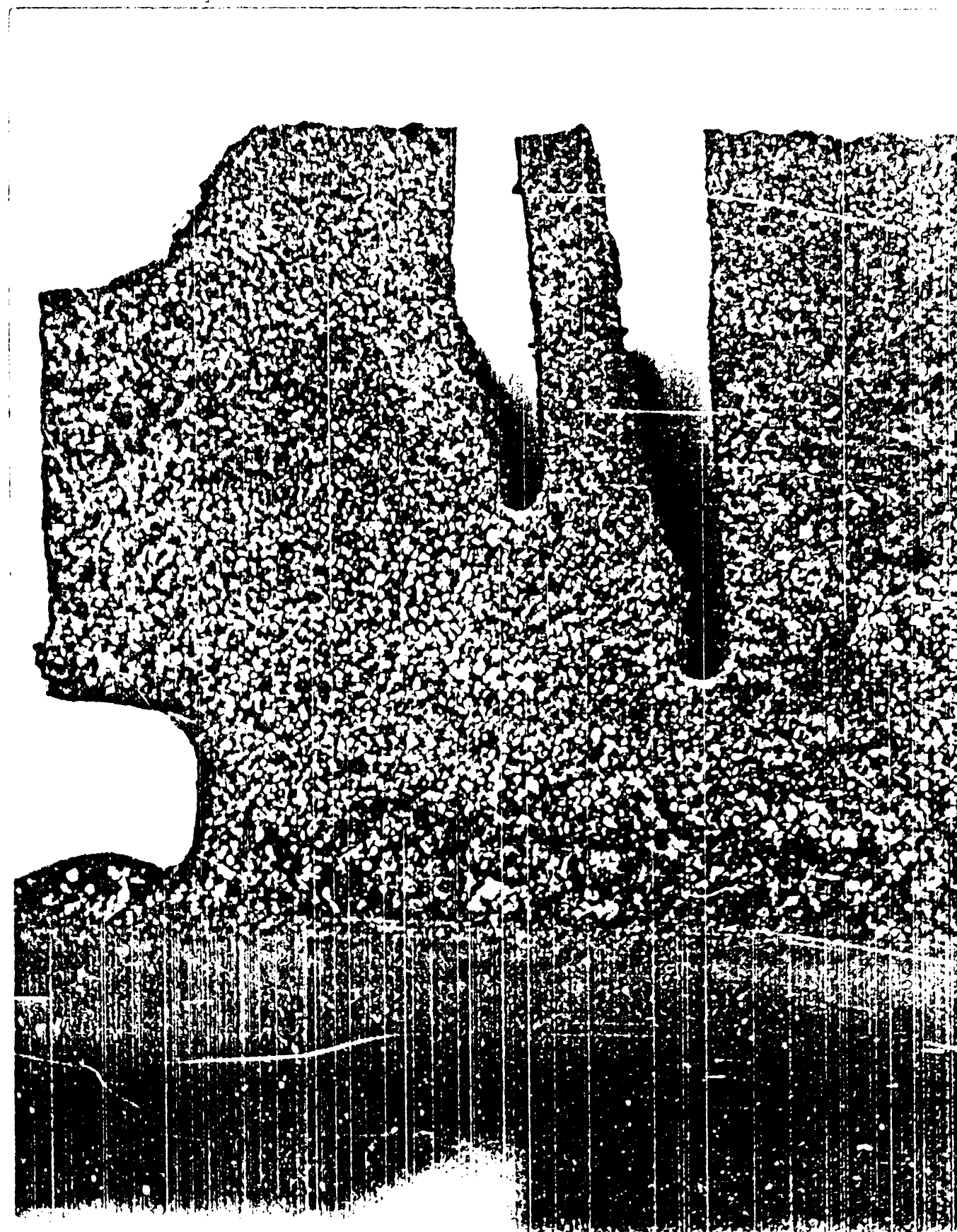
Fig. 6.14. Utilajul de prelucrare comandat manual.

de aplicare concretă, a impus utilajul de prelucrare din figura 6.14. Se asigură pe acest utilaj, debitarea unor repere de configurație variată și dimensiuni de gabarit medii /69,70,126/.

În forma sa de bază, utilajul de prelucrare, prezintă caracter universal la prelucrare, este format din batiul 1, capul de debitat 2, sistem de orientare și fixare (modulat) 3, subansamblu de alimentare, distribuție și evacuare a lichidului de răcire 4 și panoul cu elemente de comandă și control 5,6.



- a -



- b -

Fig. 6.15. Mostre de piese debitate : a - piesă din OLC45 (secțiunea debitată 450 mm²), b - piesă din 10TiMoNiCr175 (secțiunea debitată 400 mm²).

La omologarea utilajului, s-au efectuat și primele teste de aplicarea procedurii EERC în cadrul întreprinderii Metalurgica din Aiud (fig.6.15).

Alimentarea cu energie electrică, s-a realizat cu o sursă de curent externă de mare putere, tip RSAR - 1000, Electrotehnica București.

Schema electrică asigură alimentarea transformatorului, acționarea capului de debitat și admisia lichidului de răcire (apă tehnologică). S-a realizat de asemenea reducerea la minim a manevrelor necesare pornirii și opririi mașinii, prin centralizarea comenzilor într-un limitator de cursă.

Aparatele de măsură fac posibilă urmărirea parametrilor electrici ai prelucrării de la postul de lucru.

Caracteristici tehnice :

- ciclul de lucru.....manual ;
- diametrul maxim al electrodului sculă..... \varnothing 350 mm ;
- turațiile discului.....1455, 1940, 2180, 3880, 4365, 5820 rot/min ;
- cursa activă a capului de debitat..... 350 mm;
- puterea instalată..... 40 kW ;
- dimensiunile de gabarit ale mașinii.....1600 x 1500 x 960 mm .

Introducerea procedurii EERC, la debitarea maselelor și rețelelor de alimentare, s-a realizat în baza unui contract de cercetare științifică, încheiat între Institutul de învățământ superior din Sibiu și I.M.Aiud.

Experiența dobândită în cercetarea și proiectarea de utilaje de prelucrare, a permis abordarea unor tematici contractuale de complexitate ridicată cu aceiași întreprindere.

În urma analizei efectuate la I.M. Aiud, în cadrul secției de turnătorie de oțeluri înalt aliate, s-a perfectat contractul de cercetare științifică având ca temă automatizarea procesului tehnologic de debitare prin procedura EERC a tuburilor din oțeluri inoxidabile anticorozive /128/.

Prin tematica contractului de cercetare științifică, s-a impus debitarea tuburilor cu diametrul $D = 100 \div 200$ mm, grosimea peretelui $g = 8 \dots 20$ mm, la o lungime de $l = 200 \dots 400$ mm. Semifabricatele supuse debitării, sînt de lungimi variabile, cuprinse în domeniul $L = 3 \dots 6$ m.

Din numărul mare de variante, relațiile (3.3), (3.4), a fost adoptată varianta rezultată prin analiza tehnico-economică, ținîndu-se seama și de posibilitățile de aplicare și execuție existente în cadrul I.M. Aiud. A rezultat structura componentelor

dinamice ale sistemului tehnologic, (fig.6.16), și schema cinematică pentru secțiunile de debitare impuse. Utilajul de prelucrare,

$\Delta 1_{ijk} = \Delta 124$	$\Delta 2_{ijk} = \Delta 334$	$\Delta 3_{ijk} = \Delta 122$	$\Delta 4_{ijk} = \Delta 121$	$\Delta 5_{ijk} = \Delta 231$
Comandă automată Intensitate MHL	Deplasarea punctului Analitica Mobil-OP	Grindă Sudare oțel	Deschis Apa Extern	Baie de proces. Panouri Camera obscură

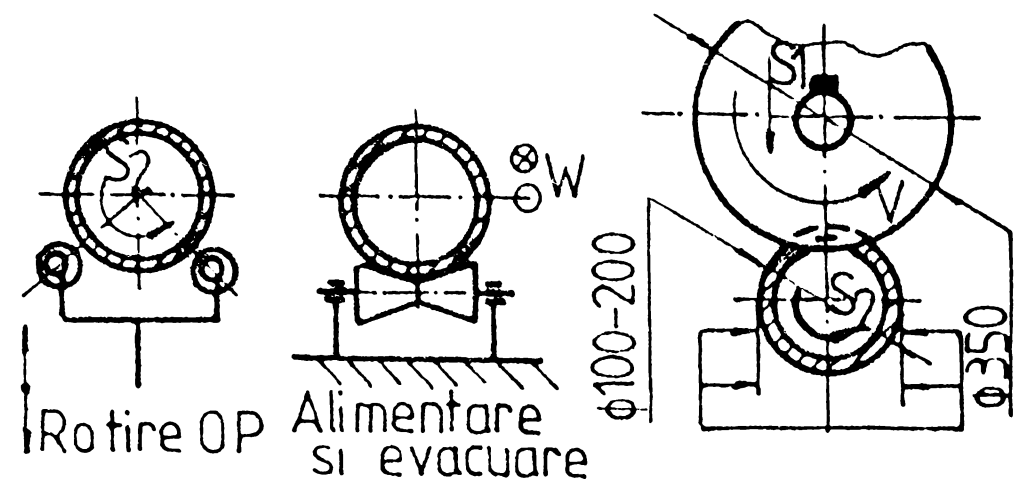


Fig.6.16. Caracteristicile dinamice și schema cinematică de debitare.

automatizarea procesului. S-a prevăzut alimentarea cu energie electrică printr-o sursă externă de mare putere, cu intensitatea curentului constantă. Automatizarea procesului, este asigurată prin comanda adaptivă, parametrul controlat fiind intensitatea curentului.

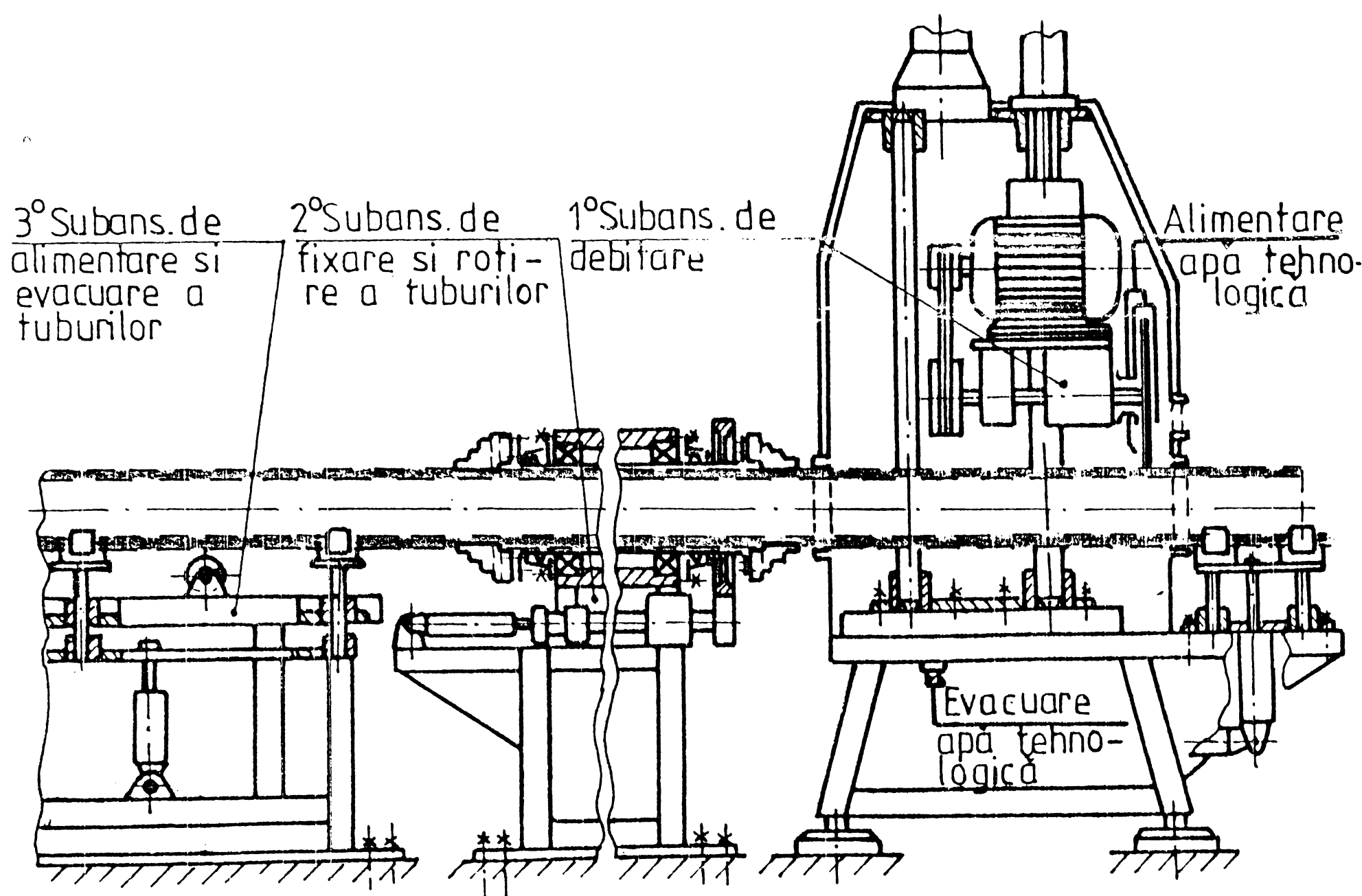


Fig.6.17. Agregat automat de debitare a tuburilor.

Sistemul hidraulic de acționare (fig.6.18), asigură funcționarea utilajului pentru două situații distincte : de reglaj și de prelucrare în regim semiautomat. Motorul hidraulic rectiliniu MHL, destinat acționării subansamblului de debitare 1, asigură mișcarea de avans la debitare, retragerea rapidă la sfârșitul debitării și retragerea în poziție inițială din orice punct al cursei.

Semifabricatul tubular, fixat în subansamblul 2, execută

a fost conceput și realizat din trei subansamble, (fig.6.17) , /75,128/:

- subansamblul de debitare, 1 ;
- subansamblul de fixare și ro-tire a tuburilor, 2 ;
- subansamblul de alimentare și evacuare a tuburilor, 3.

Complexitatea acestor subansamble, decurge din soluțiile adoptate avînd în vedere, în primul rînd, optimizarea tehnologică a procesului și condițiile impuse de

Elementele de execuție adop-tate sînt de tip electrohi-draulic, atît la nivelul avansu-lui transversal (executat de blo-cul de antrenare a OT) cît și la nivelul avansu-lui radial (exe-cutat de blocul de antrenare a OP).

o mișcare de avans circulară, realizată de motorul hidraulic rec-
tiliniu MH2, cuplat la un mecanism șurub-piuliță cu bile, care tran-
sformă mișcarea rectilinie în mișcare circulară cu viteză variabi-
lă. Alimentarea agregatului cu tuburi, se realizează prin subansam-
blul 3, pre-

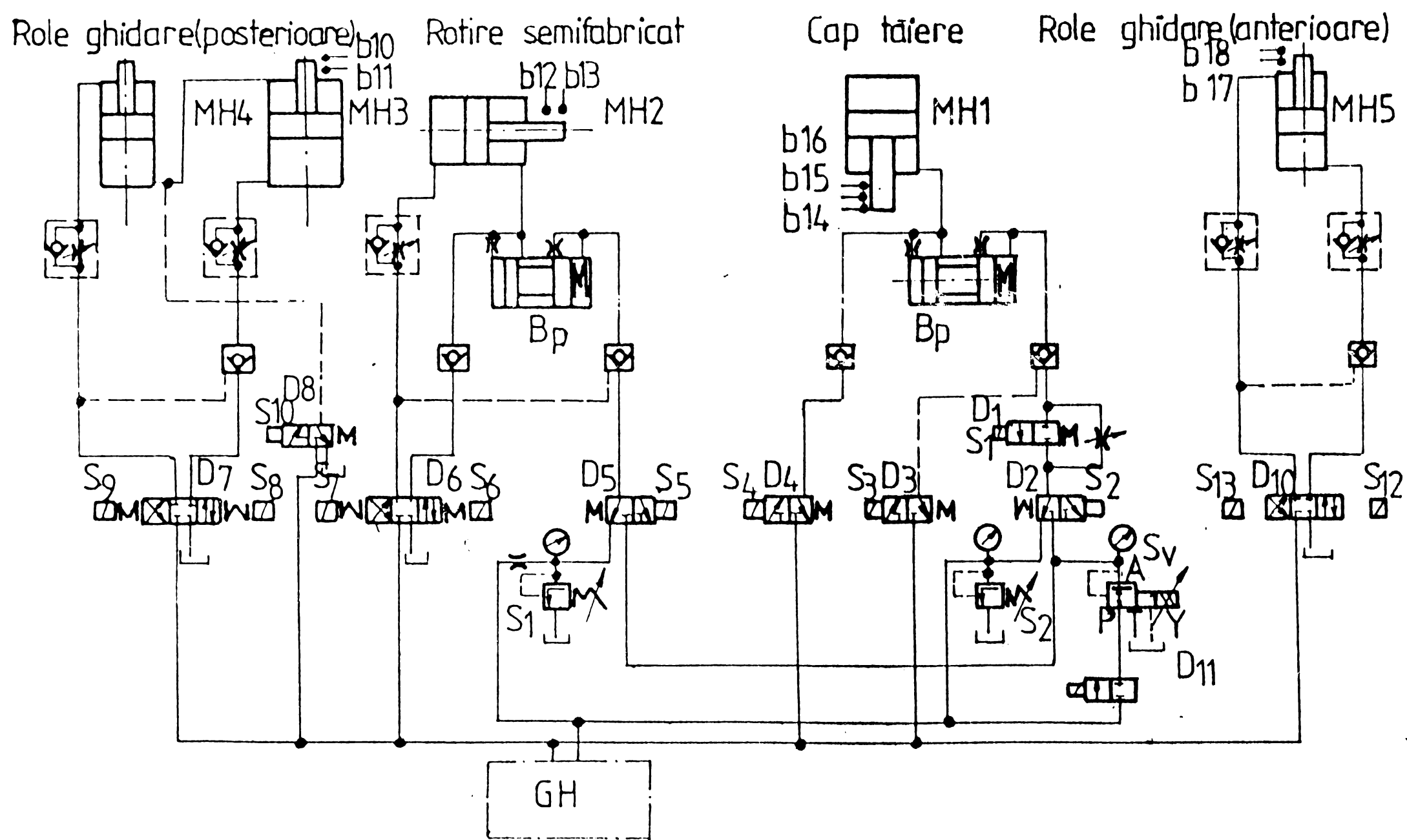


Fig. 6.18. Schema hidraulică a agregatului de debi-
tare a tuburilor.

blul 3, pre-
văzut cu do-
uă grupuri
de role, de
ghidare pos-
terioare și
de ghidare
anterioare.
Primul grup
de role, a-
sigură de-
plasarea
axială a
semifabri-
catului și
ridicarea

acestuia la o anumită înălțime care astfel stabilită, asigură
coaxialitatea cu subansamblul de fixare și rotire a tuburilor 2.
Mișcarea, se realizează prin două motoare hidraulice rectilinii
MH3, MH4, legate în serie.

Al doilea grup de role, asigură susținerea semifabrica-
telor debitate din tub. Acest grup, este amplasat pe subansamblul
de debitare 1, în spatele zonei de debitare, și este acționat de un
motor hidraulic rectiliniu MH5.

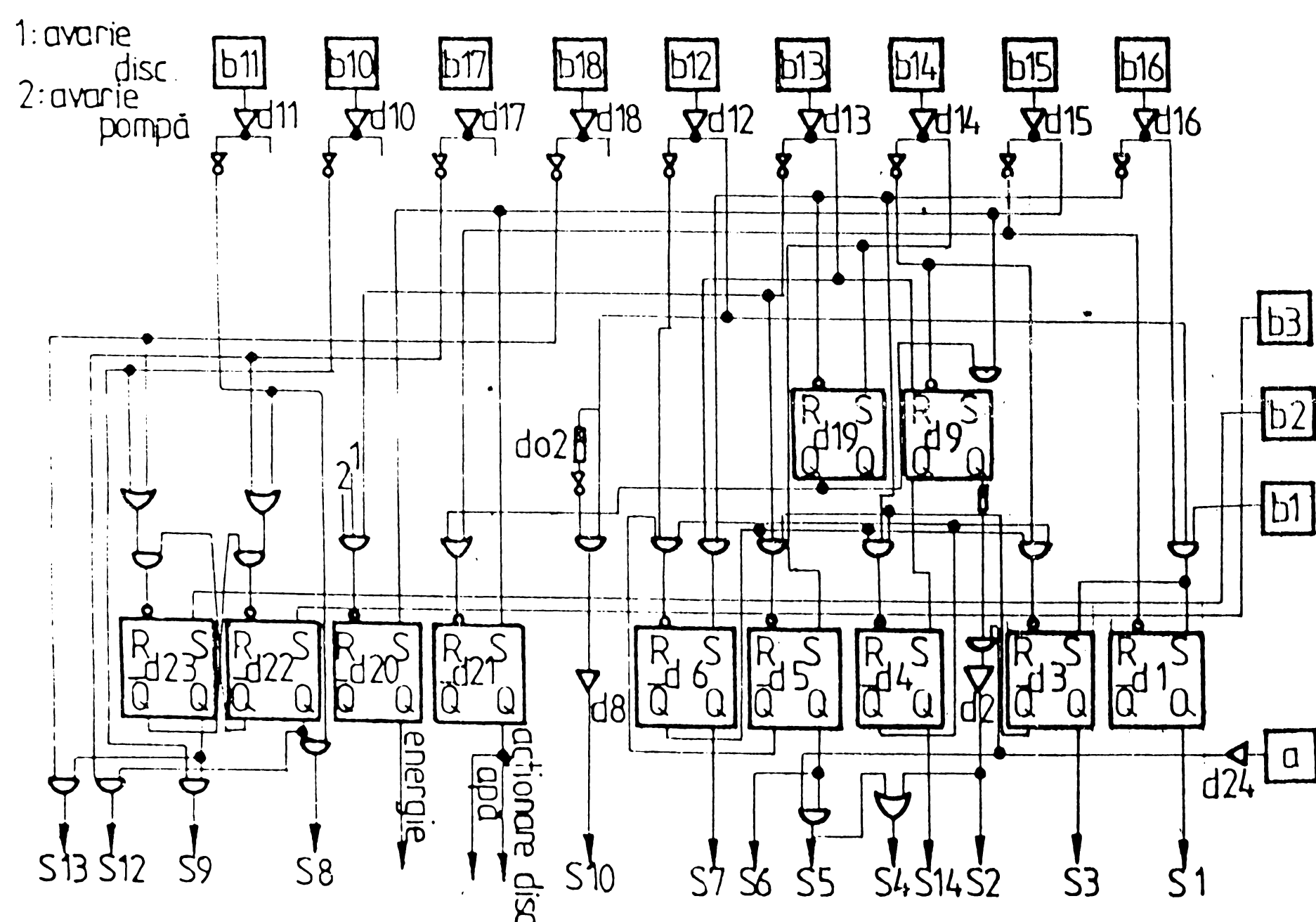


Fig. 6.19. Schema logică a automatului secvențial.

Energia hidrosta-
tică necesară ac-
ționării, este li-
vrată de un grup
generator, ampla-
sat pe un panou
hidraulic. Dis-
tribuția fluidu-
lui de lucru sub
presiune, este re-
alizată cu apar-
taj de distribuție
de tipul cu sertar
cu două sau mai

multe câmpuri funcționale, prevăzut cu comandă electrică nereținută.

Comanda ciclului automat de debitare, se realizează prin schema electrică din figura 6.19, prevăzută cu releu, care, implementează un automat secvențial asincron cu program fix.

Blocul de comandă, primește la intrare, semnale de la transductoarele de poziție de tip contact (limitator de cursă $b_{10} \dots b_{13}$), și are ca elemente de execuție distribuitorii hidraulice comandați electric ($S_1 \dots S_{14}$) și contactoarele care comandă sursa de energie, motorul de acționare a OT și ventilul electric pentru admisia apei de răcire.

Intrările suplimentare 1 și 2, realizează protecția agregatului de debitare, prin decuplarea sursei de alimentare cu energie electrică (în caz de avarie).

Pentru efectuarea reglajelor în circuitele hidraulice de acționare și pentru poziționarea inițială a elementelor sistemului, blocul de comandă este comutat în regim de lucru manual. În acest caz, circuitele de acționare, sînt comandate individual, fără a anula funcțiile limitatoarelor de cursă.

În timpul desfășurării ciclului automat, comenzile manuale sînt anulate, aici, s-a prevăzut posibilitatea reglării automate a intensității curentului în proces, prin acțiunea asupra vitezei de avans. Funcționarea în acest regim este opțională, și se selectează prin intrarea a.

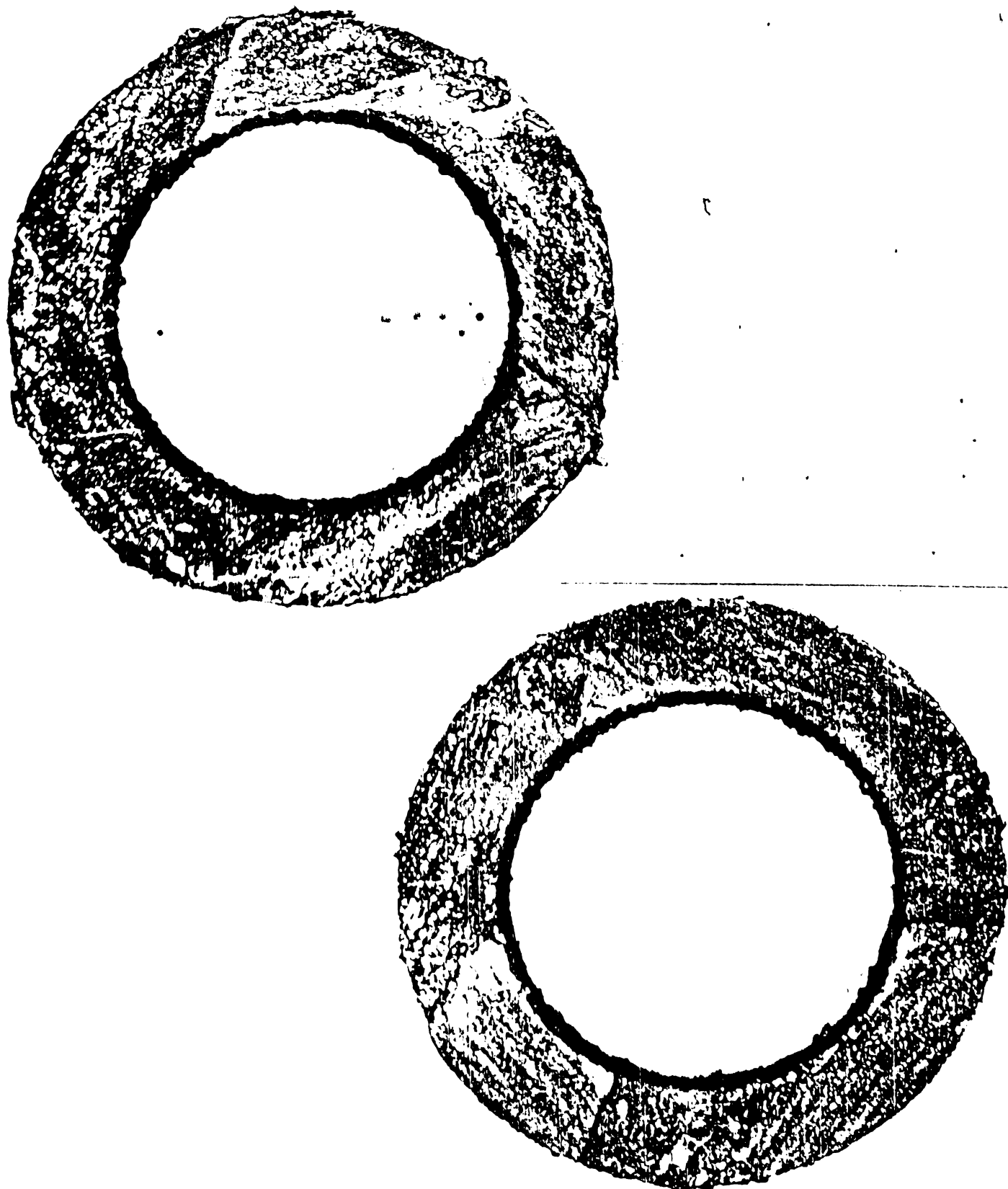


Fig. 6.20. Mostră de tub debitat.

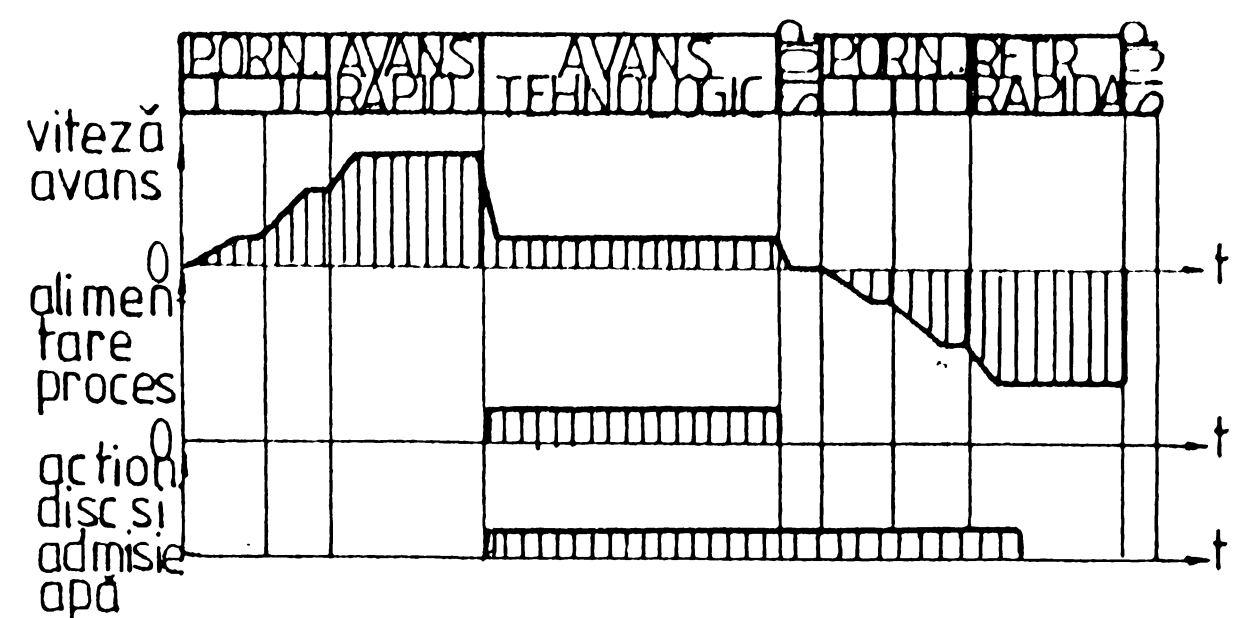


Fig. 6.21. Ciclograma generală de lucru a agregatului de debitare a tuburilor.

Automatul de comandă, a fost realizat printr-o schemă cu releu, deoarece s-a avut în vedere asigurarea fiabilității sistemului de acționare, în prezența perturbațiilor electromagnetice

intense generate de curentul de mare intensitate, variabil rapid, din procesul de debitare.

In cadrul probelor de omologare a agregatului, s-au debitat tuburi cu diametrul de 140 mm, grosimea peretelui 20 mm din oțel inoxidabil 10TiNiCr180 (fig. 6.20).

La debitarea mostrei din figura 6.20, s-a experimentat regimul manual și regimul automat de lucru.

Instalația hidraulică și electrică asigură buna funcționare a ciclogramei generale de lucru (fig. 6.21).

Caracteristici tehnice :

- ciclul de lucru.....semiautomat ;
- diametrul maxim disc..... \varnothing 350 mm ;
- turația disc.....2200 rot/min ;
- cursa activă.....350 mm ;
- avansul automat disc...1.....10 mm/s ;
- avansul automat tub.....0,2±2 rot/min ;
- diametrul maxim de prelucrare... \varnothing 220 mm ;
- dimensiuni de gabarit ;
 - subansamblul de debitare.....2200x1200x900 mm ;
 - subansamblul de fixare și rotire ...1400x1200x900 mm ;
 - subansamblul de alimentare și evacuare...6500x1200x900 mm ;
- puterea instalată.....45 kW .

6.3. Aplicarea procedurii EERC la Intreprinderea "Independența" din Sibiu

La Intreprinderea "Independența", secția turnătorie, procedeul EERC, a fost aplicat la operații de curățire, debavurare și debitare. Raportînd condițiile care optimizează operația de debitare la îndepărtarea maselelor și rețelelor de turnare din cadrul secției de turnătorie, s-au evidențiat următoarele aspecte :

- creșterea productivității muncii ;
- reducerea consumului de material ;
- îmbunătățirea calității produselor ;
- reducerea operațiilor ulterioare turnării ;
- îmbunătățirea condițiilor de lucru .

Analizînd, din punct de vedere a principalelor efecte tehnico-economice și sociale, procedeele de debitare, prin prisma aplicării lor la debitarea oțelurilor mediu și înalt aliate, a rezultat soluția din figura 6.22. Prin ierarhizarea influențelor, s-a acordat un punctaj prestabilit la fiecare efect tehnico-eco-

conomic și social considerat /72/.

Ponderea criteriilor de evaluare a aplicabilității procedurii EERC, la debitarea maselotelor și rețelelor de turnare, este diferită, s-a impus deci, stabilirea unui coeficient de pondere pentru analiza comparativă a importanței criteriului. A rezultat în ordine următoarea pondere :

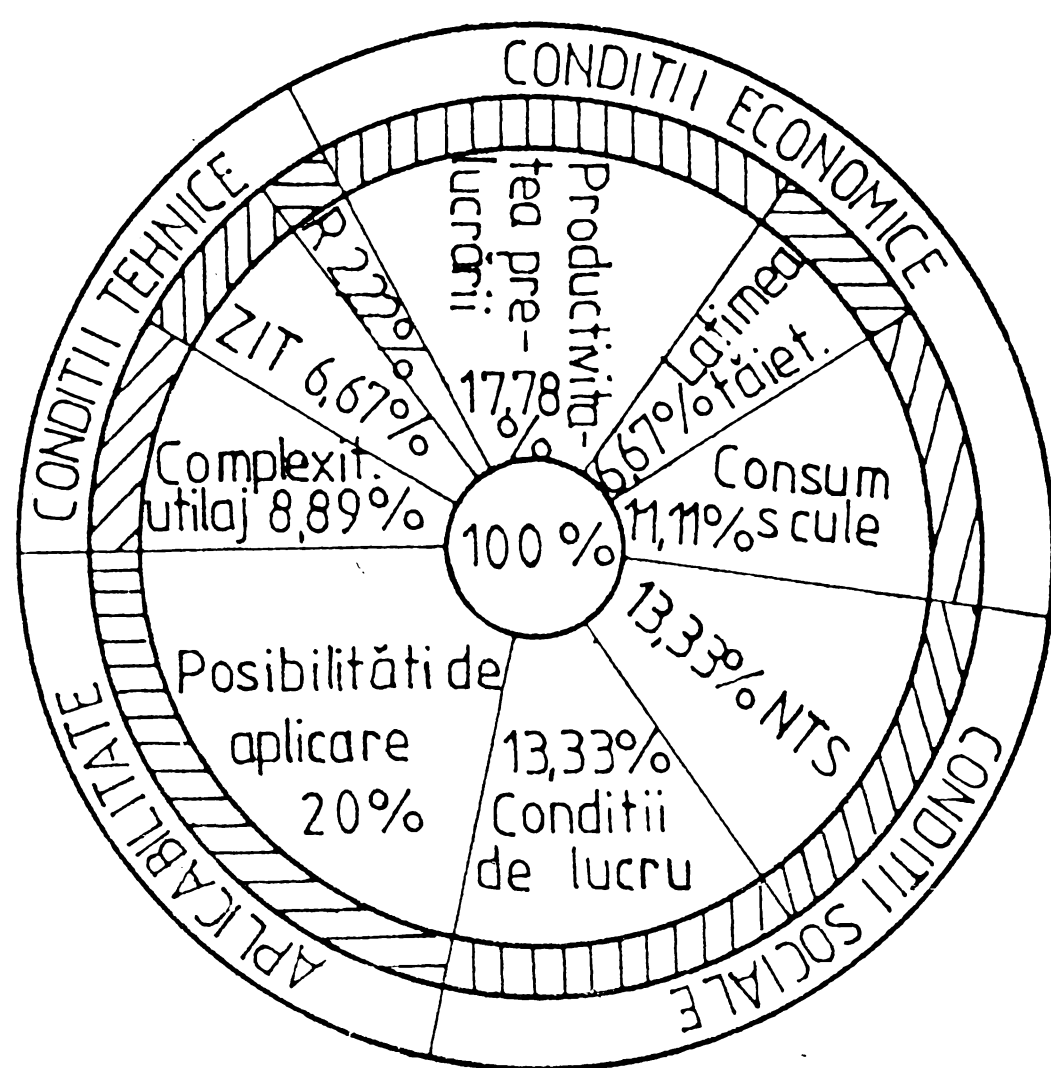


Fig. 6.22. Ponderele criteriilor de evaluare a aplicabilității procedurii EERC.

- posibilități de aplicare a procedurii 20% ;

- productivitatea debitării 17,87% ;

- condiții de lucru 13,33% .

Caracteristicile reperelor supuse prelucrării sînt următoarele :

- materiale, oțel înalt aliat cu Cr și Ni, fontă cu grafit nodular (T25 Ni Cr 250/STAS 11523-87, T35 Cr 260/STAS 11523-87, Fgn 400-12/STAS 6071-82) ;

- forma, repere dreptunghiulare de dimensiuni relativ mari prevăzute cu trei, patru maselote și 10 ÷ 12 rețele de alimentare ;

- secțiuni de debitare, 600...1200 mm²;

Studiul creativ efectuat, cît și selecția tehnico-economică aplicată, corelată cu posibilitățile de aplicare concretă, a impus utilajul de prelucrare cu structura și schema cinematică de lucru din figura 6.23.

Reperetele supuse prelucrării 1, au forma dreptunghiulară și sînt prevăzute pe fețele laterale cu maselote și rețele de alimentare 2.

Secțiunile de debitat, sînt reprezentate de forme circulare cu diametrul maxim de 40 mm iar formele dreptunghiulare cu aria maximă de 1200 mm².

Schema cinematică prevede orientarea și fixarea semifabricatelor pe masa 3, care, execută mișcarea de translație pe două direcții și mișcarea de rotație în jurul axei sale de simetrie /30/.

Debitarea maselotelor și a rețelelor de alimentare, se realizează prin deplasarea manuală a semifabricatului, pe traseul indicat de schema cinematică 4, cu viteza de avans w_s , prin deplasarea pe verticală a OT, sub formă de disc 5, cu viteza de avans v_a .

$\Delta_{1,ijk}=\Delta_{1,111}$	$\Delta_{2,ijk}=\Delta_{2,335}$	$\Delta_{3,ijk}=\Delta_{3,122}$	$\Delta_{4,ijk}=\Delta_{4,121}$	$\Delta_{5,ijk}=\Delta_{5,211}$
comandă automată Tensiunea MCA	Deplasarea punctului Analitică Mobil-OP	Grindă Sudare Otel	Deschis Apa Extern	Baie de proces Pr. operator Pr. individuală

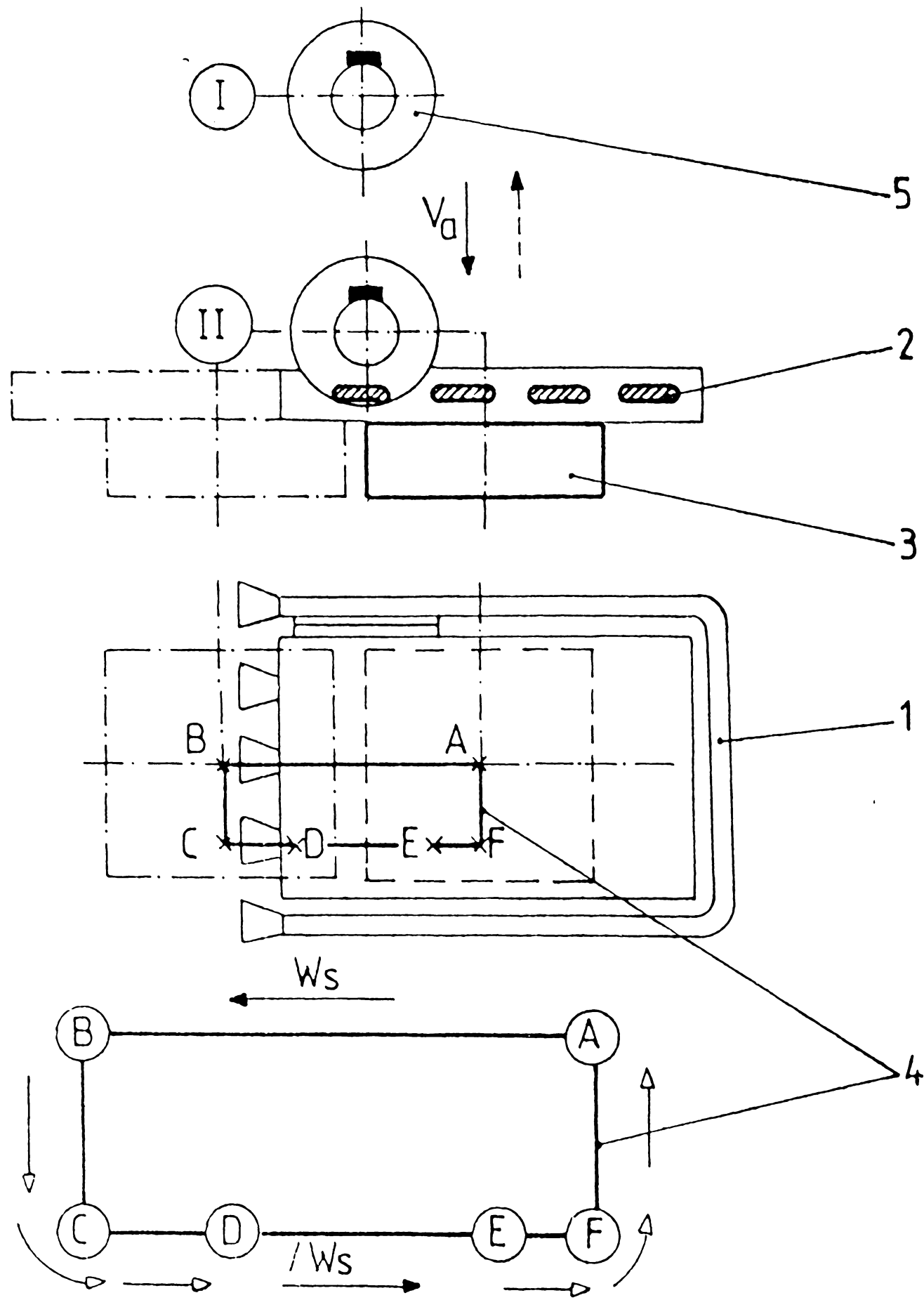


Fig. 6.23. Caracteristicile dinamice și schema cinematică de debitare.

realizată de motorul electric 4. Alimentarea cu energie electrică, se asigură prin casetele colectoare 5. Mișcarea de avans se re-

Configurația utilajului este prezentată în figura 6.24, alimentația cu energie electrică fiind asigurată de o sursă de curent externă, de mare putere, de tip RSAR - 1000, Electrotehnica București (caracteristica externă reglabilă).

Soluția constructivă adoptată cuprinde batiul utilajului 1, pe care rulează sistemul de orientare și fixare a semifabricatelor 2, acționat manual în faza de poziționare și prelucrare. Debitarea, se realizează prin discul 3, aflat în mișcarea de rotație prin antrenarea rea-

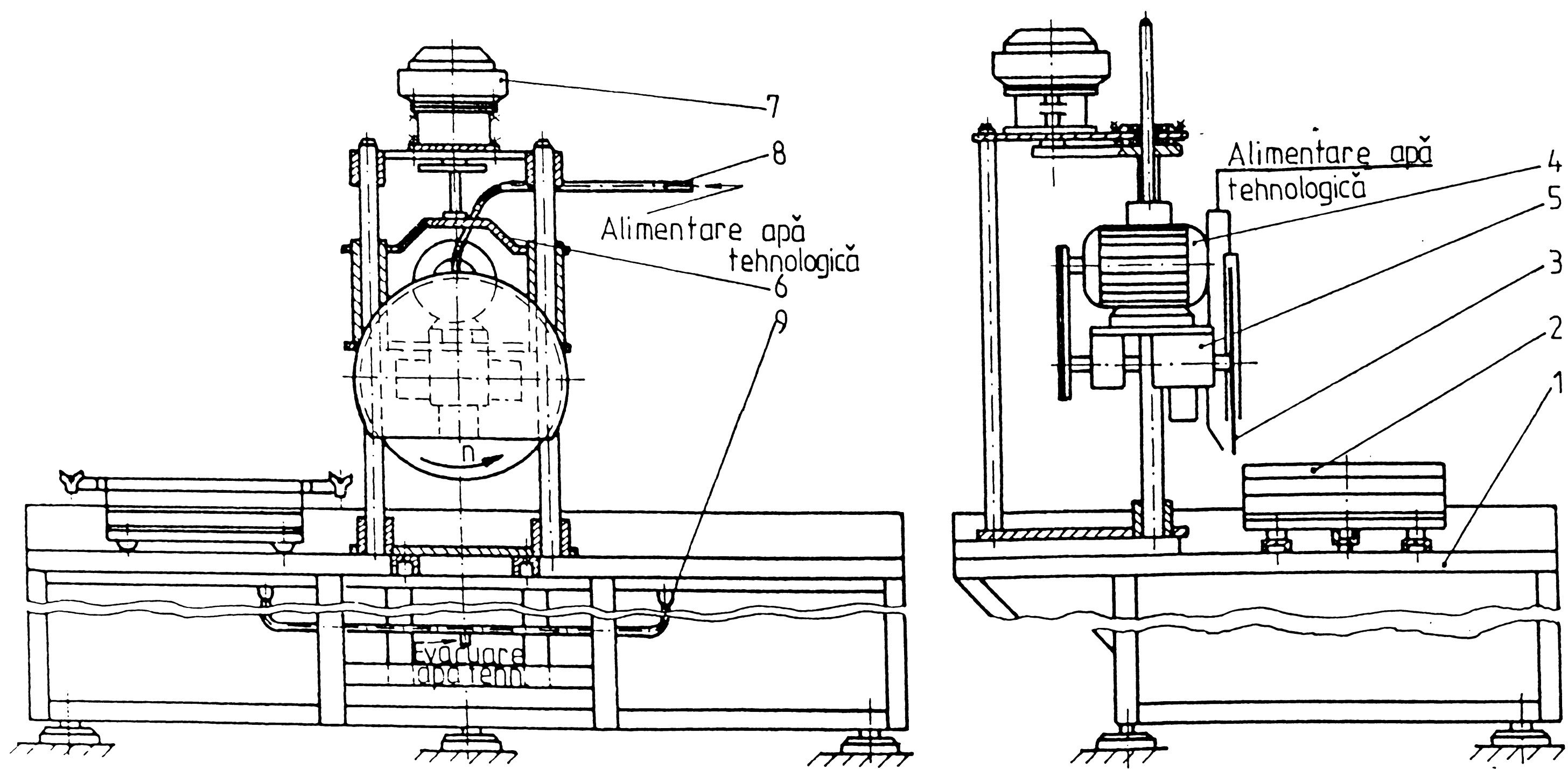


Fig. 6.24. Utilajul de prelucrare, în ciclu semiautomat.

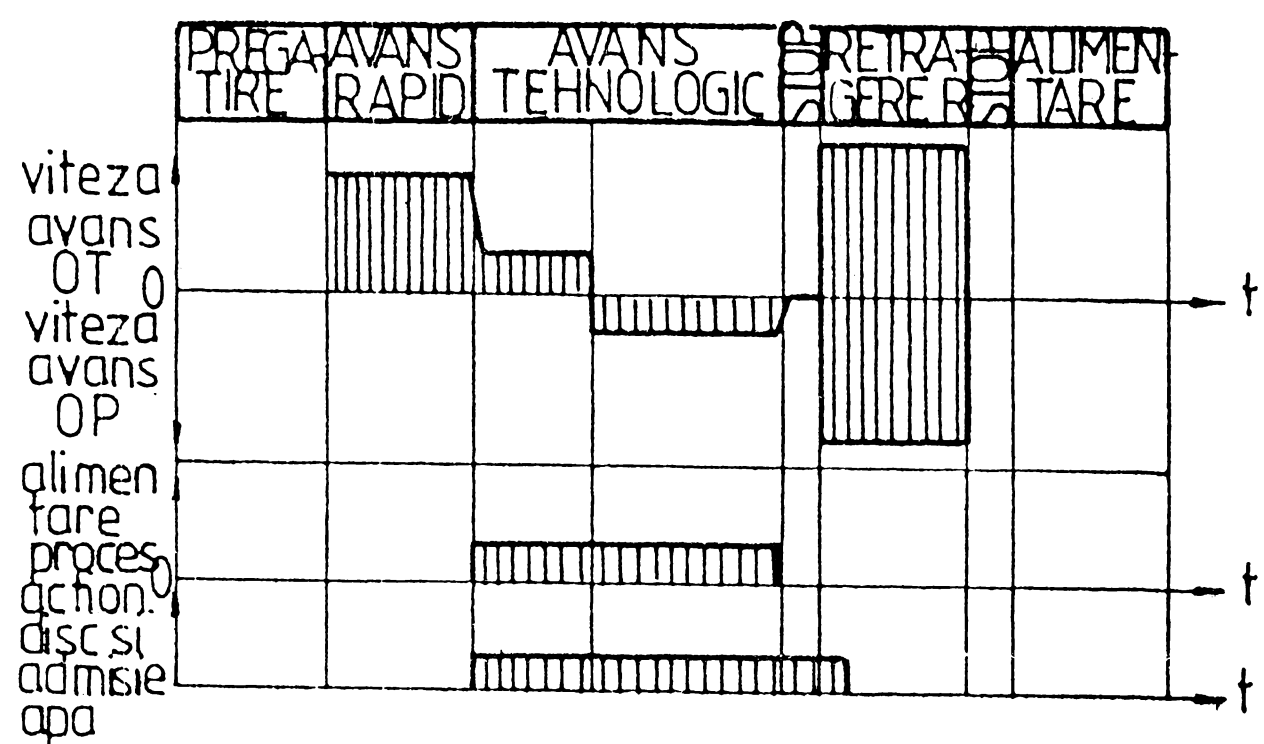


Fig.6.25. Ciclograma generală de lucru a utilajului.

alizează la nivelul traversei mobile 6, acționată de motorul electric cu rotor disc 7. Alimentația cu apă tehnologică, se asigură prin conductă și carcasa 8, evacuarea apei fiind prevăzută la nivelul băii de proces 9.

Ciclograma de lucru (fig. 6.25), asigură prin intermediul instalației electrice, fazele importante de execuție ale procesului de debitare.

Caracteristici tehnice :

- ciclul de lucru.....semiautomat ;
- diametrul maxim, disc..... \emptyset 500 mm ;
- turația discului.....1360 rot/min ;
- cursa activă.....300 mm ;
- avansul automat, disc.....1 ÷ 10 mm/s ;
- dimensiunile blocului de orientare și fixare.....500 x 500 mm.
- cursa sistemului de poziționare :
 - longitudinal.....1700 mm ;
 - transversal..... 250 mm ;
 - indexare.....4 poziții la 90° ;
- puterea instalată.....45 kW ;
- dimensiuni de gabarit.....2200 x 2150 x 1500 mm ;

Studiul creativ, selecția tehnico-economică și dezvoltarea componentelor dinamice, s-au realizat în cadrul unui contract de cercetare științifică încheiat între Institutul de învățământ superior din Sibiu și Intreprinderea "Independența" din Sibiu/127/.

Tendențele și perspectivele actuale și de viitor în domeniul tehnologiilor de prelucrare neconvenționale moderne (deci și pentru prelucrarea prin procedeul EERC), pot fi concretizate în următoarele schimbări :

- creșterea gradului de complexitate a prelucrării ;
- înăsprirea condițiilor de siguranță în funcționare ;
- creșterea performanțelor impuse în funcționare ;
- diminuarea consumurilor energetice .

Toate aceste schimbări au determinat la nivelul tehnologiilor de prelucrare noi condiții de aplicare privind :

- asigurarea unor regimuri de funcționare stabile și optime din punct de vedere economic ;

- acționarea de la distanță asupra diverselor părți componente ale utilajului de prelucrare ;
- culegerea, transmiterea, memorarea și prelucrarea unor volume mari de informații privind procesul de prelucrare ;
- asigurarea unor relații de interdependență între diverși parametri ai procesului pentru satisfacerea unor criterii de performanță globale la valori optime.

Aceste aspecte, au condus la continuarea cercetării științifice contractuale cu Intreprinderea "Independența" din Sibiu, în vederea stabilirii tehnologiei optime de debitare a oțelurilor înalt aliate și a fontei cu grafit nodular /129/.

Cercetările experimentale efectuate, au avut ca scop, optimizarea procesului de prelucrare pe considerente tehnico-economice, prin premodelare, modelare matematică (prin experimentul activ) și stabilirea regimurilor optime.

Parametrii regimului optim de debitare rezultați pentru utilajul de prelucrare existent în întreprindere sînt reprezentați de :

- viteza periferică a discului.....22 m/s ;
- avansul manual, automat.....2,0÷2,75 mm/s;
- tensiunea de proces.....20 V ;
- intensitatea curentului.....800 A.

7. C O N C L U Z I I

Tematica abordată în teza de doctorat tratează, pentru prima dată în literatura românească, amplu, problema prelucrărilor dimensionale a materialelor metalice prin eroziune electrică cu rupere de contact. Prelucrarea, se realizează prin exploatarea efectelor erozive datorate contactului electric și arcului electric nestaționar în condițiile existenței unei mișcări relative între obiectele aflate în interacțiune. Mediul de lucru și localizarea energiei de efect, se asigură prin introducerea din exterior a unui fluid sub presiune la nivelul suprafeței de contact.

Tinând seama de faptul că cercetările în domeniul prelucrării dimensionale prin eroziune electrică cu rupere de contact, efectuate la nivel mondial, s-au concentrat preponderent asupra efectelor tehnologice (interdependența dintre anumiți parametri mecanici similari prelucrărilor clasice prin așchiere, optimizarea limitată a utilajului tehnologic prin eliminarea deficiențelor cinematice și constructiv-funcționale, derivate din asimilarea mașinilor-unelte clasice la procesul eroziv), cercetările a căror rezultate sînt cuprinse în teza de doctorat, a demarat prin studii teoretice (stabilirea interdependenței dintre diferiții parametri ai procesului, legile care stau la baza fenomenelor utilizînd aparatul matematic și din domeniul fizicii, chimiei și tehnologiei materialelor) și continuate pe cale experimentală (modele experimentale, concepute și realizate în vederea validării studiilor teoretice și a determinării condițiilor de prelucrare cu aplicabilitate practică).

În ceea ce privește tipul materialelor asupra cărora s-au efectuat cercetări, acestea au fost : oțel carbon OLC 45/STAS 380 - 80, oțeluri refractare T25 NiCr 250/STAS 11523 - 87, T35 Cr 260, electrozi de sudură pentru oțeluri inoxidabile anticorozive (10 TiNiCr 180/STAS 10322 - 80; 10 TiMoNiCr 175/STAS 10322 - 80) E.Cr 18Ni8Mn6X, pentru fontă E.F.NiFeB și pentru aluminiu, E.A. AlSi-P. Stabilirea materialelor, s-a făcut în funcție de recomandările cuprinse în literatura de specialitate, precum și de rezultatele cercetărilor tematice și experimentale proprii.

Principalele contribuții teoretice și experimentale aduse prin această cercetare sînt :

A. In domeniul cercetării fundamentale

1. Definirea etapelor și stadiilor de evoluție a proceselor elementare de eroziune electrică cu rupere de contact, stabilindu-se tipul surselor de proces (contact electric, arc electric nestaționar). Studiul s-a efectuat prin prisma teoriei contactelor, pentru cazul particular al microcontactelor singulare și pentru cazul real al microcontactelor multiple, și prin prisma teoriei descărcărilor electrice în gaze, pentru cazul descărcărilor în arc nestaționar. S-au stabilit expresiile matematice de interdependență dintre mărimile caracteristice care participă la dezvoltarea și stabilitatea procesului eroziv.

2. Clasificarea mărimilor caracteristice care determină evoluția procesului de prelucrare, în două grupe distincte, parametri și factori, și evidențierea influenței lor în determinarea caracteristicilor tehnologice.

3. Modelarea prin similitudine a procesului eroziv cu rupere de contact. Avînd ca punct de pornire mărimile fizice de intrare (independente) și cele de ieșire (dependente) s-a stabilit ecuația criterială a procesului utilizîndu-se în acest scop analiza dimensională. A fost elaborat un program de calcul, PO1 (scris în limbaj FORTRAN-77, sistem de operare RSX-11M, și rulat pe un calculator "Independent I 102 F"), pentru determinarea numerică a exponenților ecuației criteriale. Aplicînd condițiile de unicitate specifice procesului de prelucrare prin eroziune electrică cu rupere de contact s-a determinat "legea modelului".

4. Studiul funcțiilor sistemului tehnologic de prelucrare, elaborat prin definirea în ordine a structurii spațiului de lucru elementar, a sistemului tehnologic eroziv și a funcțiilor globale și parțiale.

5. Studiul structurii sistemului tehnologic de prelucrare prin cercetarea sistematică a evoluției utilajelor de prelucrare și a elementelor componente. A fost elaborată analiza informațiilor asupra soluțiilor constructiv-funcționale existente evidențindu-se astfel restricțiile existente sub aspectul concepției structurale a utilajelor și a elementelor componente.

6. Sinteza și elaborarea sistemului tehnologic de prelucrare eroziv, efectuată prin prelucrarea informațiilor asupra soluțiilor constructiv-funcționale existente și prin crearea matricelor morfologice a ideilor pentru componentele dinamice ale utilajului tehnologic. Au rezultat un număr foarte mare de soluții, unele cu-

noscute și utilizate, altele necunoscute utilizabile sau neutilizabile. A fost structurat programul de calcul P02, de selectare tehnico-economică a componentelor dinamice ale utilajului tehnologic, program, care impune ca date inițiale, condițiile tehnice prescise prelucrării, producția anuală și matricele morfologice aferente utilajului tehnologic.

7. Elaborarea bazei de date a sistemului tehnologic de prelucrare eroziv, în vederea centralizării organizării și optimizării tuturor informațiilor. Baza de date a fost elaborată pentru cele două echipamente de bază ale sistemului tehnologic, echipamentul de generare a agentului eroziv (sursa de alimentare) și echipamentul de formare finală și poziționare a agentului eroziv la suprafața de prelucrat. Prezentarea matricială a informațiilor (matrici boolene) facilitează prelucrarea datelor cu mijloace electronice de calcul.

8. Evidențierea posibilităților de proiectare asistată de calculator a sistemului tehnologic eroziv prin : definirea situațiilor de determinare a sistemului tehnologic și a datelor inițiale necesare proiectării lui și prin prezentarea structurii programului de calcul P03 conceput în acest scop.

9. Evidențierea posibilităților de conducere automată a procesului tehnologic eroziv prin definirea tipurilor de comenzi posibil de utilizat. În funcție de natura tehnologică a prelucrării, de comanda parametrilor tehnologici de proces și de funcțiile obiectiv luate în considerare, s-au prezentat variantele de programare aferente procesului tehnologic eroziv.

B. În domeniul cercetării experimentale

1. Evidențierea influenței surselor active de proces asupra dimensiunilor și structurii obiectului de prelucrat. Astfel, au fost constatate și evidențiate apariția și dezvoltarea proceselor de încălzire topire și expulzare a materialului excedentar, ca urmare a efectului Joule-Lentz și a descărcării în arc nestacionar. În acest context, s-a evidențiat compoziția produselor erozive, efectul de interacțiune cu mediul de lucru și factorii care determină ponderea raportului surselor active, contact electric/arc electric nestacionar, în procesul eroziv.

2. Evidențierea influenței mărimilor fizice (mecanice și electrice) asupra fenomenelor și proceselor care au loc în spațiul de lucru. S-a determinat influența forței de apăsare asupra numărului descărcărilor în arc, dependența forței de apăsare-

-tensiune de proces, dependența formelor de descărcare din proces de forța de apăsare și dependența intensitate de curent-forța de apăsare (identică cu dependența densitate de curent-presiune specifică). În ceea ce privește viteza relativă, aceasta a fost analizată în corelație directă cu unele mărimi fizice (tensiunea, intensitatea curentului, raportul de transformare a sursei de alimentare), evidențiindu-se rolul determinant în formarea și dezvoltarea descărcărilor în arc nestaționar.

3. Evidențierea influenței naturii materialului prelucrat asupra fenomenelor și proceselor din spațiul de lucru. S-au confirmat concluziile rezultate din studiul teoretic al surselor active de proces, privind influența durității și rezistivității materialului prelucrat, a tensiunii din proces asupra cantității de căldură dezvoltată.

4. Determinarea mărimilor de comandă specifice procesului, prin analiza sistematică a influenței mărimilor specifice procesului eroziv și, ca atare, determinarea punctelor de optime ale dependenței dintre raportul, forță de apăsare/intensitate de curent, și viteza relativă.

5. Determinarea bazei de date specifice sistemului tehnologic experimental, utilizat la modelarea matematică a procesului de prelucrare eroziv. Au fost stabilite matricele boolene asociate sursei de alimentare, modelului experimental și perechii de materiale supuse experimentării.

6. Stabilirea lanțului de măsurare aferent modelului experimental. Au fost luați în considerare parametrii (factorii) caracteristici procesului și s-au determinat erorile maxim-possibile care însoțesc cele două mărimi de stare măsurate, productivitatea prelucrării și consumul specific de energie electrică. Pentru domeniul de variație al parametrilor, au rezultat erori de măsurare acceptate de cercetarea experimentală ($\varepsilon_Q = 1...5\%$, $\varepsilon_q = 1,5...13\%$).

7. Determinarea și selectarea parametrilor tehnologici, prin premodelarea procesului de prelucrare eroziv. S-a utilizat metoda corelației de rang, și a rezultat un coeficient de concordanță corespunzător ($W=0,68$), apoi s-au determinat limitele de existență și intervalul de variație a parametrilor tehnologici selecționați. S-a urmărit în cadrul acestor cercetări "stabilitatea procesului".

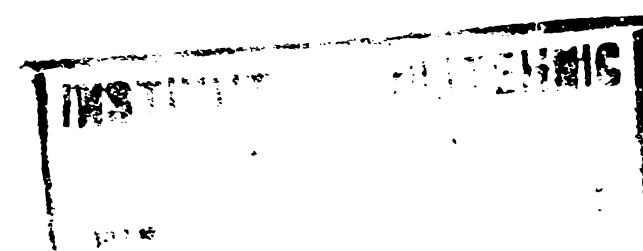
8. Determinarea influenței parametrilor tehnologici supra celor două funcții obiectiv : productivitatea prelucrării

și consumul specific de energie electrică. Au fost stabilite nivelurile caracteristice ale parametrilor tehnologici apoi modelele matematice (deduse pe baza metodei experiențelor factoriale). Inițial, a fost testat modelul matematic liniar (experiment factorial complet) și dacă acest model nu a fost adecvat s-a trecut la testarea modelului matematic neliniar (experiment factorial compus de ordinul doi). În acest scop, a fost conceput și utilizat programul de calcul P04 scris în limbaj FORTRAN-77, sistem de operare RSX-11M rulat pe calculatorul "Independent" I 102F. Ecuațiile curbelor de regresie rezultate, au fost supuse verificărilor de adecvanță, utilizându-se în acest scop teste specifice.

9. Determinarea zonelor de optim a celor două funcții obiectiv, s-a realizat baza modelelor matematice (ecuațiile curbelor de regresie) în trei etape distincte : reprezentarea grafică a ecuațiilor curbelor de regresie, stabilirea regimurilor optimale și verificarea experimentală a acestora. Pentru prima etapă s-a conceput și utilizat programul de calcul "GRAFIC" scris în limbaj TURBOPASCAL și rulat pe microcalculatorul CUB-Z. În etapa a doua au fost aduse la forma canonică ecuațiile curbelor de regresie, și apoi, s-au ales regimurile optimale prin metoda multiplicatorilor Lagrange. Și pentru această etapă a fost conceput și utilizat programul de calcul P05 scris în limbaj BASIC și rulat pe microcalculatorul CUB-Z. În etapa a treia s-au determinat experimental valorile funcțiilor obiectiv în punctele de optim ale parametrilor tehnologici.

10. Determinarea repartiției câmpului de temperatură la debitarea prin eroziune electrică cu rupere de contact. Cercetările au evidențiat existența unei distribuții simetrice avansate a temperaturii față de planul de debitare, a apariției zonei influențată termic, a rolului determinant pe care îl are fluidul introdus la suprafața de contact (lichidul de răcire) în localizarea energiei de efect și a interdependenței dintre parametrul tehnologic - viteza de avans (viteza de erodare) și viteza de dezvoltare a căldurii în masa materialului supus prelucrării.

11. Determinarea modificărilor structurale la debitarea prin eroziune electrică cu rupere de contact în zona supusă debitării. S-au evidențiat, microduritatea materialului, aspectul, poziția și modificările structurale apărute în zona adiacentă spațiului de lucru. Rezultatul cercetărilor efectuate, permit aprecierea unei prelucrabilități prin așchiere ulterioare similară cu cea a materialului de bază.



C. In domeniul proiectării și realizării unor instalații experimentale și aplicării industriale a prelucrării dimensionale prin eroziune electrică cu rupere de contact.

1. Proiectarea și realizarea modelului experimental pentru studiul influenței surselor active de proces. Modelul experimental cuprinde sursa de alimentare, standul experimental și lanțul de măsurare. La proiectarea modelului s-a utilizat "legea modelului", rezultată din aplicarea analizei dimensionale la procesul de prelucrare prin eroziune electrică cu rupere de contact.

2. Proiectarea și realizarea modelului experimental pentru determinarea tehnologiei de prelucrare. Modelul experimental utilizează aceeași sursă de alimentare ca în cazul precedent și cuprinde standul experimental și lanțul de măsurare (necesar urmării și măsurării parametrilor procesului și determinării funcțiilor de stare).

3. Proiectarea și realizarea standului experimental pentru studiul caracteristicilor tehnologice la operații de debitare prin eroziune electrică cu rupere de contact. Standul experimental este conceput ca un utilaj de prelucrare, cu limite largi de variație a parametrilor, este dotat cu o sursă de alimentare de mare putere, cu bloc redresor în punte și cu mijloace de măsurare.

4. Proiectarea și realizarea unui sistem de conducere automată a procesului și a unui utilaj tehnologic de debitare prin eroziune electrică cu rupere de contact. Sistemul este format din utilajul de prelucrare UPCA (conceput și realizat pe structura utilajelor de prelucrare asistate de mijloace electronice de calcul) și utilizează sursa de alimentare de la punctul 3. Pentru comanda automată a procesului s-a proiectat interfața de proces, element de legătură între microprocesor și ansamblul de prelucrare.

5. Proiectarea și omologarea utilajului de debitare universal pentru Intreprinderea "Metalurgica" din Aiud. Utilajul a fost conceput pentru debitarea unor repere de configurație variată și dimensiuni de gabarit medii. Comanda în proces este asigurată manual, iar alimentarea cu energie electrică se realizează de la o sursă de curent externă de mare putere (contract de cercetare științifică nr.7 din 1983).

6. Proiectarea și omologarea utilajului de debitare în ciclu semiautomat pentru Intreprinderea "Independența" din Sibiu. Utilajul a fost conceput pentru operații de curățirea, debavurarea și debitarea unor repere turnate din oțeluri refractare și din

fontă cu grafit nodular. Orientarea și fixarea semifabricatelor se realizează manual, după care, utilajul execută mișcările de avans rapid, tehnologic de prelucrare și de revenire în regim automat. Alimentarea cu energie electrică se asigură de la o sursă externă de mare putere (contract de cercetare științifică nr. 6 din 1984).

7. Proiectarea și omologarea agregatului automat de debitare tuburi pentru Intreprinderea "Metalurgica" din Aiud. Utilajul a fost conceput pentru debitarea în ciclu automat a unor tuburi din oțeluri inoxidabile anticorozive și cuprinde trei subansambluri: de debitare, de fixare și rotire și de alimentare - evacuare a tuburilor. Automatizarea procesului se asigură prin comanda adaptivă a parametrului tehnologic intensitatea de curent (viteza de erodare). S-a asigurat fiabilitatea sistemului de comandă și acționare în prezența perturbațiilor electromagnetice intense, generate de curentul de mare intensitate (variabil rapid în procesul de debitare). S-a prevăzut alimentarea cu energie electrică de la o sursă externă de mare putere, cu intensitatea curentului constantă. (contract de cercetare științifică nr. 13 din 1986).

În final, se poate afirma că cercetarea procesului de prelucrare dimensională prin eroziune electrică cu rupere de contact, a condus la elucidarea unor aspecte legate de evoluția fenomenelor fundamentale și a proceselor elementare, la îmbogățirea documentației tehnice necesare proiectării unor tehnologii și echipamente tehnologice specifice procedeului EERC.

Desigur, în domeniul optimizării proceselor și sistemelor tehnologice, prelucrarea dimensională a materialelor metalice prin eroziune electrică cu rupere de contact, constituie un domeniu neacoperit în totalitate, care, abordat poate conduce la rezultate surprinzătoare, în legătură cu extinderea sa la alte operații și materiale de prelucrare.

B I B L I O G R A F I E

1. ALBU, A.s.a. Programarea asistată de calculator a mașinilor unelte. București, Editura Tehnică, 1980.
2. APOSTOLESCU, N. și TARAZA, D. Bazele cercetării experimentale a mașinilor termice. București, Editura Didactică și Pedagogică, 1979.
3. BAGIU, L., DREUCEAN, A. și BECHEANU, G. Fenomene termice și metalurgice la limita de separație disc-piesă, la debi-tarea prin rupere de contact a capetelor barelor laminate din oțel. In; Simpozionul "Tehnologii neconvenționale", Timișoara, 1986.
4. BRIAN, I.M., SEMICOLENII, N.M. și TOLSTOV, I.A. Zavisimost osnovnîh pokazatelei elektrokontaktnoi obrabotki (E.K.C) ot materiala instrumenta i tehnologhiceskih re-jimov. In ; Elektronnaia obrabotka materialov , (U.R.S.S.), Nr.3, 1983.
5. BADARAU, E. și POPESCU, I. Descărcări electrice în gaze. Editura Tehnică, 1965.
6. BARBULESCU, N.s.a. Teoria cinetico-moleculară a gazelor. București, Editura Stiințifică, 1972.
7. BELOUS, V. Sinteza sculelor aşchietoare. Iași, Editura Junimea, 1980.
8. BINMAN, B.M. și MANET, M.O. Tehnologhiceskie protesî elektrokontakt-noi obrabotki. In ; Stanki i instrument, (U.R.S.S. Nr.9, 1977.
9. BLEZU, D., NANU, D., DUSE, D. și OPREAN, C-TIN. Metodă de estimare a numărului punctelor de contact și a celor de arc la prelucrarea prin eroziune electrică cu rupere de contact. In; Tehnomus, vol.I, Suceava, 1985.
10. CRANGIU, TH.s.a. Structuri moderne de conducere automată a mașinilor unelte. București, Editura Tehnică, 1982.
11. BORISOV, B.I. și VELIKII, V.I. Poli electrohimiceskih protesov pri elektrokontaktnoi obrabotke metalov. In; Elektronnaia obrabotka materialov, (U.R.S.S.), Nr.3, 1983.

12. BIRSAN, I., DUSE, D. și VASILOAICA, C-TIN. Asupra construcției unui servo-mecanism electro-hidraulic utilizat în acționarea mașinilor unelte și a roboților industriali. In; Buletinul științific al Institutului de învățământ superior din Sibiu, Vol.VIII, 1986.
13. BOTEZ, E. s.a. Mașini unelte. București, Editura Tehnică, Vol.I,II, 1977, 1978.
14. CAZMINA, L.D. și DYALCEIBEFOV, N.J. și USOMIRSKAIA, L.A. Analiticeskoe isledovanie temperaturnogo talia v zagotovke tri elektrokontaktno otrezke s ucitom slojnogo tetlobmena toverhnosti reza. In ;Electronnaia obrabotka materialov (U.R.S.S.) Nr.4, 1989.
15. CAZMINA, L.D. și TOI, L.M. Isledovanie temperaturnobo polea pri elektrokontaktna otrezke zagotovki ucetom teplotdaci c ee poverhnosti. In ;Electronnaia obrabotka materialov, (U.R.S.S.), Nr.6, 1989.
16. CIOCIARDIA, C-TIN. s.a. Bazele elaborării proceselor tehnologice în construcția de mașini. București, Editura Didactică și Pedagogică, 1983.
17. CIOCIARDIA, C-TIN și UNGUREANU, I. Bazele cercetării experimentale în tehnologia construcțiilor de mașini, București, Editura Didactică și Pedagogică, 1979.
18. DANCEA, I. Metode de optimizare. Cluj-Napoca, Editura Decia, 1976.
19. DAVIDOV, A.S. Elektrokontaktna obrabotka metalov. In ; Stanki i instrument (U.R.S.S.), Nr.7, 1957.
20. DAVIDOV, A.S. Konstruirovaniie i raschet stancovglea elektrokontaktnoi obrabotki metalov. In ; Stanki i instrument (U.R.S.S.), Nr.6, 1964.
21. DAVIDOV, A.S. Elektrokontaktnaia obrabotka metalov elektriceschim oplavniem. In; Svarocnoe proizvodstvo (U.R.S.S.), Nr.7, 1969.
22. DAVIDOV, A.S.s.a. Vlianie geometriiceskih parametrov elektriceskim instrumentam na precisovitelnost elektrokontaktnoi rezki. In; Electronnaia obrabotka materialov (U.R.S.S.), Nr.6, 1983.
23. DAVIDOV, A.S., VITLIN, V.D. și SEMENOV, V.N. Isledovanie kharakteristik kontaktno-fagovovo razreza. In ; Electronnaia obrabotka materialov (U.R.S.S.), Nr.2, 1985.

24. DAVIDOV, A.S., VITLIN, V.B. și SEMENOV, V.N. Metodă nasciota glinî canala kontaktno-dugovovo razreada. In; Elektronnaia obrabotka materialov (U.R.S.S.), Nr.5, 1986.
25. DEAC, V., NANU, D. și DUSE, D. Unele aspecte privind modificările de structură la debitarea prin eroziune electrică cu rupere de contact. In; Comunicările cele de a V-a Conferințe de procese și utilaje de prelucrare la rece, Timișoara, 1986.
26. DIACONESCU, C-TIN, NANU, D. și DUSE, D. O analiză cantitativă a materialului îndepărtat la prelucrarea prin eroziune electrică cu rupere de contact. In; Tehnomus, Suceava, 1987.
27. DOMSA, AL. și DOMSA, S. Materiale metalice în construcția de mașini și instalații., Cluj-Napoca, Editura Dacia, Vol. I, II, 1981.
28. DRAGHICI, GHE. Tehnologia construcțiilor de mașini. București, Editura Didactică și Pedagogică, 1984.
29. DUSE, D., DIACONESCU, C., NANU, D., BOLOGA, O. și TURCU, N. Cercetări privind realizarea unui stand experimental pentru prelucrări prin eroziune electrică cu rupere de contact (EERC). In; Buletinul științific al Institutului de învățământ superior din Sibiu, Vol.VII, 1985.
30. DUSE, D., TURCU, N., NANU, D. și BIRSAN, I. Asupra construcției unui sistem de orientare, fixare și poziționare a semifabricatelor la debitarea prin eroziune electrică cu rupere de contact (E.E.R.C.). In; Buletinul științific al Institutului de învățământ superior din Sibiu, Vol.IX, 1987.
31. DUSE, D., TUTUREA, M. și DIACONESCU C-TIN. Contribuții privind stabilirea ecuației de invarianți, caracteristică prelucrării prin eroziune electrică cu rupere de contact (partea întâi). La a. II-a conferință națională de prelucrare control și asamblare. București, 1988.
32. DUSE, D., DIACONESCU, C-TIN și TUTUREA, M. Contribuții privind stabilirea ecuației de invarianți caracteristică prelucrării prin eroziune electrică cu rupere de contact (partea a II-a). La a II-a Conferință națională de prelucrare, control și asamblare, București, 1988.

33. DUSE, D., DIACONESCU, C-TIN. și TUTUREA, M. Aplicații ale modelării fizice prin similitudine la prelucrarea prin eroziune electrică cu rupere de contact. La a II-a Conferință națională de prelucrare, control și asamblare, București, 1988.
34. DUSE, D., DIACONESCU, C-TIN. și NANU, D. Stand experimental pentru studiul fenomenelor fizice la prelucrarea prin eroziune electrică cu rupere de contact. La a II-a Conferință națională de prelucrare, control și asamblare, București, 1988.
35. DUSE, D., NANU, D. și OPREAN, C-TIN. Contribuții asupra funcțiilor și structurii utilajelor de prelucrare prin eroziune electrică cu rupere de contact (partea întâia), In; Lucrările sesiunii jubiliare de comunicări științifice, Iași, Vol.VII, 1988.
36. DUSE, D., NANU, D. și OPREAN, C-TIN. Contribuții asupra funcțiilor și structurii utilajelor de prelucrare prin eroziune electrică cu rupere de contact (partea a doua). In ; Lucrările sesiunii jubiliare de comunicări științifice, Iași, Vol.VII, 1988.
37. DUSE, D. și DIACONESCU, C-TIN. Cercetări privind influența mărimilor fizice de proces la prelucrarea prin eroziune electrică cu rupere de contact. In ; Lucrările sesiunii jubiliare de comunicări științifice, Iași, Vol.VII, 1988.
38. DUSE, D. și DIACONESCU, C-TIN. Cercetări privind efectul surselor active de proces la prelucrarea prin eroziune electrică cu rupere de contact. In ; Lucrările sesiunii jubiliare de comunicări științifice, Iași, Vol.VII, 1988.
39. DUSE, D. și DIACONESCU, C-TIN. Considerații și cercetări privind modelarea cibernetică a procesului de prelucrare prin eroziune electrică cu rupere de contact. In ; Lucrările sesiunii jubiliare de comunicări științifice, Iași, Vol.VII, 1988.
40. DUSE, D., DIACONESCU, C-TIN și BOLOGA, O. Stand pentru conducerea cu microprocesorul a prelucrării prin eroziune electrică cu rupere de contact. In ; Comunicările celei de a VI-a conferințe de procese și utilaje de prelucrare la rece, Timișoa-

- ra, 1989.
41. DUSE, D., DIACONESCU, C-TIN, BOLOGA, O. și ROSCA, L. Stand experimental pentru studiul parametrilor procesului de prelucrare prin eroziune electrică cu rupere de contact. (partea întâia). In; Comunicările celei de a VI-a conferințe de procese și utilaje de prelucrare la rece, Timișoara, 1989.
 42. DUSE, D., DIACONESCU, C-TIN, BOLOGA, O. și ROSCA, L. Stand experimental pentru studiul parametrilor procesului de prelucrare prin eroziune electrică cu rupere de contact. (partea a doua). In; Comunicările celei de a VI-a conferințe de procese și utilaje de prelucrare la rece, Timișoara, 1989.
 43. DUSE, D., BOLOGA, O. și NATANAIL, C. Contribuții la stabilirea bazei de date a prelucrării prin eroziune electrică cu rupere de contact. In; A V-a conferință națională de tehnologii neconvenționale, Timișoara, 1989.
 44. DUSE, D., BOLOGA, O. și NATANAIL, C. Cercetări privind stabilirea regimurilor de prelucrare prin eroziune electrică cu rupere de contact. In; A.V-a conferință națională de tehnologii neconvenționale, Timișoara, 1989.
 45. DUSE, D., ROSCA, L. și BOLOGA, O. Modelarea matematică a procesului de prelucrare prin eroziune electrică cu rupere de contact. In ; A V-a conferință națională de tehnologii neconvenționale, Timișoara, 1989.
 46. GAVRILAS, I. s.a. Prelucrări electrice în construcția de mașini. București, Editura Tehnică, 1968.
 47. GLUZBERG, E.I., CAZMINA, L.D., USOMIRSCAIA, L.A. și SVQEV, V.F. Sposob elektrokontaktnoi obrabotki. Brevet de invenție, U.R.S.S., Nr. 891304.
 48. HOREGPAN, G. Aparate electrice. București, Editura Didactică și Pedagogică, 1984.
 49. ISBAS, C.s.a. Ergonomia mașinilor-unelte. București, Editura Tehnică, 1984.
 50. IUVVID, M.E. și CRAVET, A.T. Obrabotka narujnîh poverhnostei vragcennia elektrokontaktnîm metodom. In ; Stanke i instrument (U.R.S.S.), Nr.5, 1960.

51. KRAVET, A.T. și BILIK, N.I. Vîbop parametrov sistemî pitania elektrokontaktîh stankov. In; Stanki i instrument (U.R.S.S.), Nr.11, 1984.
52. KRUGLOV, A.I. și KRUGLOVA, S.K. Nekotorîe șvedenia o mehamizme razreada pri elektroiskrovom razrezanii metalov. Minsk, Editura Academia de științe a U.R.S.S., 1962.
53. KRUPETKII, V.A., PETROVH, E.A. și ZAITEV, O.P. Sposob elektrokontaktnoi obrabotki. Brevet de invenție, U.R.S.S. Nr. 833417.
54. LAZARENKO, B.R. și LAZARENKO, N.I. Sovremenîi uroven razvitcia elektroiskrovoi obrabotki metalov i nekotorîe naucenîe problemî oblasti. Minsk, Editura Academiei de științe a U.R.S.S., 1957.
55. LAZARENKO, B.R. și LAZARENKO, N.I. Tehnologiceskie karakteristiki elektroiskrovo obrabotki tokoprovodiashchih materialov. Minsk, Editura Academiei de științe a U.R.S.S., 1960.
56. LANCRANJAN, Z. Contribuții la prelucrarea corpurilor de revoluție prin eroziune electrică complexă. Teza de doctorat, Institutul politehnic "Traian Vuia" din Timișoara, 1986.
57. LEMUIJ, I. Fenomenul tehnic. București, Editura științifică și enciclopedică, 1976.
58. LIVSCIT, A.L. și JUHVID, M.E. Elektrokontaktîi metod udaleniia defektnogo sloia u slitkov. In; Stanki i instrument (U.R.S.S.) Nr.4, 1959.
59. MACHEEVA, T.I. Elektroiskrovoe zagotovitelnoe razrezanie metalov i splavov na ustanovche electrom - 17. Minsk, Editura Academiei de științe a U.R.S.S., 1962.
60. MARINESCU, I.D., TANASESCU, A. și CONSTANTINESCU, R. Desfășurarea suprafețelor asistată de calculator. București, Editura Tehnică, 1987.
61. MERKURIEV, A.N., PECIURO, N.I., ROITER, L.A. și GOLDIN, V.I. Sredîlia razmerno elektroeroziono obrabotki metalov. In; Elektronnaia obrabotka materialov (U.R.S.S.), Nr.1, 1965.
62. MICLOSI, V.s.a. Bazele proceselor de sudare. București, Editura Didactică și Pedagogică, 1982.
63. MOLDOVAN, V., SARAMET, G.C., și SARAMET, C.C. Formă și culoare în construcția de mașini. Cluj-Napoca, Editura

- Dacia, 1988.
64. NANU, A. Tehnologia materialelor. București, Editura Didactică și pedagogică, 1983.
65. NANU, A. și NANU, D. Prelucrarea dimensională prin eroziune electrică în câmp magnetic. Timișoara, Editura Facla, 1981.
66. NANU, A. Realizări din domeniul tehnologiilor neconvenționale în România. In ; A IV-a conferință națională de tehnologii neconvenționale, Timișoara, 1983.
67. NANU, D., DUSE, D., DIACONESCU, C-TIN, OPREAN, C-TIN, și BRINDASU, D. Mașini de debitat prin eroziune electrică cu rupere de contact. In ; A IV-a conferință națională de tehnologii neconvenționale, Timișoara, 1983.
68. NANU, D., GRUNFELD, ST., DUSE, D., și NANU, S. Unele considerații privind prelucrarea prin eroziune electrică cu rupere de contact. In ; A IV-a conferință națională de tehnologii neconvenționale, Timișoara, 1983.
69. NANU, D., DIACONESCU, C-TIN. și DUSE, D. Posibilități de determinare teoretică a unor parametri la prelucrarea prin eroziune electrică cu rupere de contact. In ; A IV-a conferință națională de tehnologii neconvenționale, Timișoara, 1983.
70. NANU, D., DUSE, D., DIACONESCU, C-TIN., OPREAN, C-TIN., CERNAT, C. și MAGDA, I. Mașină de debitat prin eroziune electrică cu rupere de contact. In ; Tehnomus, Suceava, 1985.
71. NANU, D., DUSE, D. și DIACONESCU, C-TIN. Unele considerații privind necesitatea corelării unor parametri la prelucrarea prin eroziune electrică cu rupere de contact. In ; Simpozionul "Tehnologii neconvenționale", Timișoara, 1986.
72. NANU, D., DUSE, D., OPREAN, C-TIN. și BOLOGA, C. O analiză a procedeelor aplicate la debitarea maselelor și rețelelor de turnare, la piese turnate din oțeluri bogat aliate. In ; Sesiunea tehnico-stiințifică de tehnologii și utilaje pentru prelucrări la cald, Vol. I, Brașov, 1988.

73. NANU, D., DUȘE, D., TURCU, N., DIACONESCU, C-TIN. și PRECUPESCU, I. Utilaj de debitare prin eroziune electrică cu rupere de contact. In ; Buletinul științific al Institutului de învățământ superior din Sibiu, vol. IX, 1987.
74. NANU, D., DIACONESCU, C-TIN. și DUȘE, D. Posibilități de evaluare teoretică a productivității la prelucrarea prin eroziune electrică cu rupere de contact. In ; Tehnomus, Suceava, 1987.
75. NANU, D., TRIFU, T., DIACONESCU, C-TIN., DUȘE, D. și MAGDA, I. Sistem de acționare electro-hidraulică pentru instalații de debitat țevi prin eroziune electrică cu rupere de contact. In ; Buletinul științific al Institutului de învățământ superior din Sibiu, Vol. IX, 1987.
76. NANU, D., DUȘE, D., TURCU, N., și DIACONESCU, C-TIN. Agregat de debitare prin eroziune electrică cu rupere de contact. In ; Buletinul științific al Institutului de învățământ superior din Sibiu, Vol. IX, 1987.
77. NEGRIMOVSKI, L.F. Elektrokontaktnii metod obdairskii sloia, maplavlenoro iznosonstoicivim splavom. In ; Stanke i instrument (U.R.S.S.), Nr. 11, 1964.
78. NICA, M. s.a. Unele constatări privind debitarea prin contact electric. In ; Lucrările celei de a III-a conferințe de procese și utilaje de prelucrare la rece, Timișoara, 1978.
79. NICA, M. și ICLAZAN, T. Optimizarea procesului de debitare prin contact electric a oțelului 21 MoMn12. In ; Lucrările sesiunii științifice jubiliare, Tîrgu-Mureș, 1981.
80. NICA, M. și ICLAZAN, T. Cercetări privind debitarea țevilor din OL37 prin contact electric. In ; Lucrările celei de a IV-a conferințe de procese și utilaje de prelucrare la rece, Timișoara, 1981.
81. NICA, M., și ICLAZAN, T. Mașină de debitat țevi prin contact electric. In ; Lucrările celei de a IV-a conferințe de procese și utilaje de prelucrare, la rece, Timișoara, 1981.
82. NICA, M. și REVITZKY, A. Automatizarea ciclului de lucru la debitarea prin contact electric. In ; Lucrările celei de a IV-a Conferințe de procese și

utilaje de prelucrare la rece, Timișoara, 1981.

83. NICA, M., ICLAZAN, T. și GURBAN, I. Unele realizări în domeniul echipamentelor și tehnologiilor de prelucrare prin contact electric. In ; Simpozionul "Tehnologii neconvenționale", Timișoara, 1986.
84. NICA, M. Prelucrarea prin contact electric, prin vibrarea electrodului-sculă. In ; Lucrările celei de a V-a Conferințe de procese și utilaje de prelucrare la rece, Timișoara, 1986.
85. NICA, M. și GURBAN, I. Aspecte economice ale utilizării procedurii de prelucrare prin contact electric la prelucrări de debitare. In ; Lucrările celei de a V-a Conferințe de procese și utilaje de prelucrare la rece, Timișoara, 1986.
86. NICA, M. Folosirea procedurii de prelucrare prin contact electric la operații de curățire a suprafețelor metalice. In ; Lucrările celei de a VI-a Conferințe de procese și utilaje de prelucrare la rece, Timișoara, 1989.
87. NICHICI, A.s.a. Prelucrarea prin eroziune în construcția de mașini. Timișoara, Editura Facla, 1983.
88. PAVELESCU, D. Concepții noi, calcule și aplicații în frecarea și uzura sculelor deformabile. București, Editura Academiei R.S.R., 1971.
89. FICOS, C.s.a. Prelucrabilitatea prin așchiere a aliajelor ferose. București, Editura Tehnică, 1981.
90. POPESCU, I. Optimizarea procesului de așchiere. Craiova, Scrisul romanesc, 1987.
91. POPPER, K.R. Logica cercetării. București, Editura științifică și enciclopedică, 1981.
92. PRONKO, G.F. și DIMITRIEVA, J.P. Preoborudovanie metaložejuskih stankov b elektroiskrovie. Minsk, Editura Academiei de științe a U.R.S.S., 1962.
93. FUGNA, I. și MUTIU, C. Relația om-mașină-mediul. Timișoara, Editura Facla, 1979.
94. REABOV, I.V. Rasciot optimalnîh rejimov obrabotki korotkoi dugoi. In; Elektronnaia obrabotka materialov (U.R.S.S.), Nr.5, 1983.
95. RAKITIN, A.N., SEFER, V.G., KONOPELKO, O.B., USOMIRSCAIA, L.A. și KARMANOV, L.G. Elektrokontaktnaia obrabotka tverdosplvnîh poverhnostei getalei zasîpnîh

- aparatorv domenîh pecei. In ; Stali (U.R.S.S.) Nr.1, 1979.
96. ROCA, M. Creativitatea individuală și de grup - studii experimentale. București, Editura Academiei, R.S.R., 1979..
97. RUTKOVSKI, A.E. și BAIAN, M.I. Ustanovka dlea elektrokontaktnoi obrabotki detaiei zasîpnîh aparatov. In; Metalurgia, Nr.9, 1980.
98. SALAJAN, T. Fenomene fizice și metalurgice la sudarea oțelurilor cu arcul electric. București, Editura Academiei R.S.R., 1963.
99. SALAJAN, T., MALAI, D. și VODA, M. Optimizarea sudării cu arcul electric. București, Editura tehnică, 1983.
100. SEMENOV, V.N. și FOTEEV, N.C. Vozdeistvie elektromagnitnogo nolia na protes elektrokontaktnoi rezki. In ; Elektronnaia obrabotka materialov (U.R.S.S.), Nr. 3, 1983.
101. SEMENOV, V.N. și FOTEEV, N.C. Raspredelenie teplotî vîdelea-iuşcerea v mejelektrodnom promejutke pri elektrokontaktnoi rezke. In ; Elektronnaia obrabotka materialov (U.R.S.S.), Nr.5, 1983.
102. SEMENOV, V.N. și FOTEEV, N.C. O migrații elektriceskih dugovîh pazpeádov v mejelektrodnom promejntke pri elektrokontaktnoi rezke. In ; Elektronnaia obrabotka materialov (U.R.S.S.), Nr.6, 1983.
103. SEMENOV, V.N. și FOTEEV, N.C. Kacestvo poverhnosti posle elektrokontaktnoi rezki. In ; Elektronnaia obrabotka materialov (U.R.S.S.), Nr.1, 1984.
104. SEMENOV, V.N. și FOTEEV, N.C. Nekotorîe voprosî metodiki isledovanii elektrokontaktnoi rezki. In ; Elektronnaia obrabotka materialov (U.R.S.S.), Nr.2, 1984.
105. STAICU, C.I. Analiza dimensională generală. București, Editura Tehnică, 1976.
106. TALOI, D. Optimizarea proceselor tehnologice. București, Editura Academiei R.S.R., 1987.
107. TAPALAGA, I. s.a. Bazele încetării experimentale. Rotaprint, Institutul politehnic din Cluj-Napoca, 1984.
108. TIRON, M. Prelucrarea statistică și informațională a datelor de măsurare, București, Editura Tehnică, 1976.
109. TUTUREA, M., MOLDOVAN, V. și DUȘE, D. Aplicații ale modelării

- fizice prin similitudine la laminarea foilor de arc în regim nestăţionar. In ; Sesiunea tehnico-ştiinţifică de tehnologii şi utilaje pentru prelucrări la cald, Vol.II, Braşov, 1988.
110. USOMIRSKAIA, L.A. şi KARETKII, I.N. Vlianie vneşnih magnitnih poleina tehnologhiceschie parametri elektrokontaktnoi obrabotki. In ; Elektronnaia obrabotka materialov (U.R.S.S.) ; Nr.1, 1988.
111. VASILESCU, A.I.A. Analiza dimensională şi teoria similitudinii. Bucureşti, Editura Academiei R.S.R., 1969.
112. VELIKII, V.I., VENGERENKO, V.E. şi GUDE, I.A. Univeralnii elektrokontaktnei karuselnoi stanok. In; Elektronnaia obrabotka materialov (U.R.S.S.), Nr. 2, 1985.
113. VELIKII, V.I., ZEKUM, N.G. şi PIROGOV, L.A. Elektrofizicheskie i elektrohimicheskie metodî obrabotki. In ; Elektrokontaktnaia obrabotka trudnoobrabotivaiemih stali (U.R.S.S.), Nr.1, 1981.
114. VITLIN, V.B., KORMIENKO, V.L. şi MAXIMOV, M.I. Ustroistvo dlea bozduşno-dugovoi bîrezki otverstii. Brevet de invenţie, U.R.S.S., Nr. 141964.
115. VITLIN, V.B. Elektrokontaktnaea rezka zagotovie iz legirovanih stali. In; Stanki i instrument (U.R.S.S.), Nr. 5, 1963.
116. VITLIN, V.B. Avtomaticeskaia bozduşno-dugovaia rezka metala vrasciainscimsea diskom. In ; Svarocinoe proizvodstvo (U.R.S.S.), Nr.10, 1966.
117. VITLIN, V.B. Cistovaiia elektrokontaktno-abrazivnaia rezka metala. In ; Stanki i instrument (U.R.S.S.), Nr.4, 1977.
118. VITLIN, V.B. Elektrokontaktno-abrazivnaia rezka trudnoobrabativaiemih metalov. In ; Stali (U.R.S.S.), Nr.7, 1979.
119. VITLIN, V.B. Diskovii elektrod-instrument dlea elektrokontaktnoi rezki. Brevet de invenţie, U.R.S.S., Nr. 808233.
120. VITLIN, V.B. Modeli proţesa elektrokontaktno-abrazivnoi rezki. In ; Stanki i instrument (U.R.S.S.), Nr.5, 1981.
121. VITLIN, V.B. şi DAVIDOV, A.S. Vîsota prorezi pri elektrokontaktno-abrazivnom razrezanii. In ; Elektronnaia

- obrabotka materialov (U.R.S.S.), Nr.1, 1987.
122. ZAITEV, V.A., KARETKII, I.N., și VITLIN, V.B. Stanok dlea elektrokontaktnoi obrabotki. Brevet de invenție, U.R.S.S., Nr. 749614.
123. ZAITEV, V.A., VALEAEV, A.N. și KARETKII, I.N. Optimizația proțesa elektrokontaktnoi obrabotki metalov metodom planirovania experimenta. In ; Elektromnaia obrabotka materialov (U.R.S.S.), Nr.1, 1984.
124. ZAHITNIC, C. Inteligența tehnică. București, Editura Științifică și enciclopedică, 1976.
125. ZARNESCU, H. Utilizarea optimală a motorului sincron. București, Editura Tehnică, 1984.
126. x x x Studiul, proiectarea și realizarea unor instalații industriale de debitare prin eroziune electrică cu rupere de contact, a unor semifabricate turnate. Contract de cercetare științifică nr.7 din 1983 încheiat cu Intreprinderea Metalurgica din Aiud.
127. x x x Studii și cercetări privind aplicarea procedurii de prelucrare prin eroziune electrică cu rupere de contact la debitarea maselelor și rețelelor de turnare. Contract de cercetare științifică nr.6 din 1984, încheiat cu Intreprinderea "Independența" din Sibiu.
128. x x x Automatizarea debitării țevilor turnate. Contract de cercetare științifică nr.13 din 1986 cu Intreprinderea Metalurgica din Aiud.
129. x x x Implementarea condacerii cu microprocesorul la prelucrările dimensiunale prin eroziune electrică cu rupere de contact. Contract de cercetare științifică nr.6 din 1988 cu Intreprinderea "Independența" din Sibiu.
130. x x x Sistemul internațional de unități (S.I.) , București, Editura Academiei R.S.R., 1989.
131. x x x Cercetări privind debitarea prin eroziune electrică cu rupere de contact. Aiud, Centru de cercetare și proiectare, 1985.

