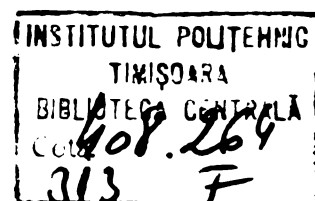


MINISTERUL EDUCATIEI SI INVATAMINTULUI  
INSTITUTUL POLITEHNIC "TRAIAN VUIA" TIMISOARA

Ing. IUHAS POPOVICI CORINA ANTIGONA

TEZA DE DOCTORAT



CONDUCATOR STIINTIFIC,  
Prof.dr.doc.st.ing.NANU AUREL

1 9 8 1



MINISTERUL EDUCATIEI SI INVATAMINTELUI  
INSTITUTUL POLITEHNIC "TRAIAN VULI" TIMISOARA

Ing.IUHAS POPOVICI CORINA ANTIGONA

CERCETARI TEORETICE SI EXPERIMENTALE ASUPRA TAIERII  
PRIN EROZIUNE COMPLEXA ELECTRICA - ELECTROCHIMICA A  
OTELURILOR ALIATE PENTRU SCULE SI MARI TE

BIBLIOTECA CENTRALĂ  
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"  
TIMIȘOARA

CONDUCATOR STIINTIFIC,

Prof.dr.doc.gt.ing.NANU AUREL

1 9 8 1

## C U P R I N S U L

### I n t r o d u c e r e

1.-Prelucrarea prin eroziune electrică și electrochimică - - - - -	pag.1
1.1.-Considerații generale - - - - -	1
1.2.-Factorii și parametri care influențează procesul de tăiere - - - - -	2
1.3.-Prelucrabilitatea diferitelor metale prin eroziune complexă electrică-electrochimică - - -	9
2.-Stadiul actual de construcție al utilajelor pentru tăierea oțelurilor prin eroziune electrică-electrochimică - - - - -	11
2.1.-Clasificarea mașinilor de tăiere prin eroziune electrică-electrochimică - - - - -	11
2.2.-Sisteme de acționare a sculei de tăiere și a avansului - - - - -	12
2.2.1.-Acționarea sculei de tăiere - - - - -	12
2.2.2.-Acționarea avansului - - - - -	13
2.3.-Sisteme de alimentare cu lichid de lucru - - - -	14
2.3.1.-Cerințe de bază - - - - -	14
2.3.2.-Soluții constructive pentru ajutoaje - - -	14
2.4.-Dispozitiv pentru fixarea piesei de tăiat - - -	16
2.5.-Surse de curent - - - - -	16
2.6.-Soluții constructive - - - - -	18
2.6.1.-Alegerea construcției - - - - -	18
2.6.2.-Mașina de tăiere prin eroziune complexă electrică-electrochimică de la Intre- prinderea Ambalajul Metalic - - - - -	19
2.6.3.-Mașina de tăiere prin eroziune complexă electrică-electrochimică de la labo- ratorul catedrei TM de la IPTVT - - - - -	22
3.-Reglarea automată a mașinilor de prelucrare prin eroziune electrică-electrochimică - - - - -	24
3.1.-Clasificarea dispozitivelor automate și a elementelor lor - - - - -	24
3.2.-Reglatoare și stabilizatoare - - - - -	24

3.3.-Probleme ale reglării automate	pag.29
3.4.-Statica reglării automate	30
3.4.1.- Variația interstițiului S dintre electrozi	31
3.4.2.- Fenomenul de dependență neliniară între parametri indirecti și parametrul de bază, interstițiul S	32
3.4.3.- Probabilitatea apariției descărcării electrice	33
3.5.- Dinamica reglării automate	37
3.6.- Tipuri constructive de regulatoare	39
3.6.1.- Regulatorul solenoidal	39
3.6.2.- Regulatorul cu cuplaj electromagnetic	40
3.6.3.- Reglare cu motor electric	41
3.6.4.- Reglare cu motor cu două înfășurări de excitație contrare	42
3.6.5.- Sistemul de reglare și stabilizare automată a avansului realizat la catedra IM de la Facultatea de Mecanică a IPTVT	43
3.7.- Criteriile de apreciere ale reguletoarelor automate	46 20
4.- Particularitățile eroziunii complexe modificate prin R, L, C reglabile	50
4.1.- Fenomene fundamentale în spațiul de lucru la prelevarea prin eroziune complexă electrică-electrochimică	50
4.2.- Sistemul energetic sursă-circuit-spațiu de lucru (SCSL)	54
4.3.- Schema electrică echivalentă a sistemului SCSL	55
4.4.- Geometria zonei de interacțiune electrod-obiect	62
4.5.- Flux termic la prelucrarea prin eroziune complexă electrică-electrochimică	65
4.6.- Probleme de stabilitate ale procesului de tăiere	67
4.6.1.- Forma generală clasică a condițiilor de stabilitate a unui sistem energetic	68
4.6.2.- Incuspile elementelor sistemului automat de reglare a avansului electrodului sculă	74

5.-	Concepția, proiectarea și realizarea unei instalații experimentale de tăiere prin eroziune complexă electrică-electrochimică modificată prin R,L,C reglabile - - - - -	pag.83
5.1.-	Componența instalației experimentale	
5.1.1.-	Sursă de curent statică - - - - -	85
5.1.2.-	Bateriile de condensatoare - - - - -	90
5.1.3.-	Bobina de reactanță - - - - -	93
5.1.4.-	Rezistența de balast - - - - -	94
5.1.5.-	Mecanismul de tăiere - - - - -	95
5.1.6.-	Regulatorul de inducție - - - - -	100
5.1.7.-	Pupitrul de comandă - - - - -	101
5.1.8.-	Caracteristicile cunoscute ale instalației experimentale - - - - -	101
5.2.-	Lichide de lucru (electrolitul) - - - - -	103
5.3.-	Parametrii de lucru - - - - -	104
5.4.-	Exploatarea instalației - - - - -	105
5.4.1.-	Deservirea instalației - - - - -	105
5.4.2.-	Intreținerea instalației - - - - -	107
5.5.-	Norme de tehnica securității muncii - - - - -	107
6.-	Cercetări experimentale de tăiere prin eroziune complexă electrică-electrochimică a oțelurilor aliase	109 <sup>26</sup>
6.1.-	Oțeluri experimentate la tăiere - - - - -	109
6.2.-	Experimentări privind influența factorilor R,L,C asupra timpurilor de tăiere și a productivității - - - - -	113
6.2.1.-	Tensiunea optimă între electrozi - - - - -	113
6.2.2.-	Variația timpului de tăiere și a produc- tivității în funcție de curentul de lucru - - - - -	118
6.2.3.-	Influența inductanței L - - - - -	126
6.2.4.-	Influența capacității C - - - - -	129
6.3.-	Influența factorilor R,L,C asupra zonei influențate termic (ZIT) - - - - -	134
6.3.1.-	Structura ZIT a materialelor metalice dure și extradure tăiate prin eroziune complexă electrică-electrochimică - - - - -	134
6.3.2.-	Variația durității zonei influențate termic (ZIT) - - - - -	139

6.4.-Influența factorilor R,L,C asupra rugozității suprafețelor de tăiere - - - - -	pag.150
6.5.-Constanta de material și de mașină - - - - -	156
6.6.-Nomograme pentru determinarea parametrilor procesului tehnologic de tăiere - - - - -	160
6.7.-Materialele și uzura discului de tăiere - - - - -	162
6.8.-Influența compoziției lichidului de lucru asupra procesului de tăiere - - - - -	166
6.9.-Influența vibrațiilor asupra procesului de tăiere - - - - -	169
6.9.1.-Cauzele principale de apariție a vibrațiilor - - - - -	169
6.9.2.-Izolatori de vibrații - - - - -	171
7.-Microscopia electronică a zonei secționii de tăiere - - - - -	173
7.1.-Microanaliza prin sonda electronică - - - - -	173
7.2.-Oțel 35Mn16 - - - - -	174
7.3.-Oțel 33MoCr11 - - - - -	178
7.4.-Oțel 21MoMnCr12 - - - - -	182
7.5.-Oțel RP 3 - - - - -	185
7.6.-Oțel C 120 - - - - -	186
7.7.-Oțelurile 7NiCr180 și 7MnNiCr 180 - - - - -	188
7.8.-Concluzii - - - - -	192
7.8.1.-Cu privire la tăierea oțelurilor aliate 35Mn 16, 33MoCr 11, 21MoMnCr 12 - - - - -	192
7.8.2.-Cu privire la tăierea oțelurilor de scule - - - - -	192
7.8.3.-Cu privire la tăierea oțelurilor inoxidabile - - - - -	193
8.-Cercetări experimentale de tăiere prin eroziune complexă electrică-electrochimică a plăcuțelor din carburi metalice (aliaje dure sinterizate) - - - - -	194
8.1.-Cercetarea influenței factorilor R,L,C asupra timpului de tăiere, respectiv productivitatea - - - - -	197
8.1.1.-Cazul circuitului rezistiv - - - - -	197
8.1.2.-Cazul circuitului inductiv - - - - -	198
8.1.3.-Cazul circuitului capacitiv - - - - -	200
8.1.4.-Cazul circuitului complex R,L,C - - - - -	201
8.2.-Cercetarea influenței factorilor R,L,C asupra zonei influențate termic - - - - -	202

8.3.-Cercetarea influenței factorilor R,L,C asupra rugozității suprafețelor de tăiere - - - - -	pag.204
8.4.-Cercetarea influenței factorilor R,L,C asupra formării fisurilor - - - - -	205
8.5.-Uzura discului de tăiere - - - - -	206
8.6.-Concluzii - - - - -	210
9.-Eficiența economică a tăierii prin eroziune complexă electrică-electrochimică - - - - -	211
10.-Considerații finale, contribuții originale și probleme de viitor - - - - -	214
10.1.-Considerații finale - - - - -	214
10.2.-Contribuții originale - - - - -	217
10.2.1.-In domeniul cercetării fundamentale - -	217
10.2.2.-In domeniul cercetării aplicative - -	218
10.3.-Probleme de viitor - - - - -	220
-Notății folosite în text	
-Bibliografie	



## I N T R O D U C E R E

În procesul de industrializare intensă din țara noastră, tehnologiile neconvenționale în prelucrarea metalelor și aliajelor dure și extradure ocupă un loc din ce în ce mai important. Tăierea prin eroziune complexă electrică - electrochimică este unul din cele mai productive procedee de prelucrare prin eroziune cu aplicații industriale din ce în ce mai largi.

Tăierea prin eroziune complexă se bazează atât pe principiul eroziunii electrice prin impulsuri electrice nedirijate, cât și pe eroziunea datorată efectului chimic al curentului electric.

În ultimii 10-12 ani, la catedra de Tehnologie materialelor de la Facultatea de Mecanică a Institutului politehnic "Traian Vuia" din Timișoara, condusă de prof.dr.doc.gt.Manu Aurel, au fost efectuate o serie de cercetări laboratorice privind studiul fenomenelor fundamentale la prelucrarea prin eroziune complexă [ 67, 68, 69, 70, 73, 74, 75, 76, 77, 79, 80, 81, 84, 105, 106, 107, 108, 116, 117 ]. Deși s-au obținut rezultate importante în domeniul stabilirii unor criterii pentru parametrii electrice, fizico-chimici, mecanici și geometrici optimi pentru condiții concrete de prelucrare, aceste rezultate încă n-au fost suficient valorificate în industrie, în special în domeniul tăierii oțelurilor aliate pentru scule și matrițe.

Stabilirea condițiilor se determină productivitatea tăierii, rugozitatea suprafeței de tăiere și zona influențată termic, problemele de stabilitate a procesului de tăiere în baza efectelor posibile date de modificările caracteristicilor circuitului de lucru prin RIC reglabile, constituie tematica cercetărilor desfășurate în prezenta lucrare.

Teza este desfășurată pe 10 capitole și cuprinde 224 pagini, 204 figuri, 23 tabele.

În capitolul 1 se arată că procedeul de tăiere prin eroziune electrică și electrochimică constă din cumulara acțiunii simultane a dizolvării anodice și a descărcărilor electrice prin impulsuri nedirejate cuasi-staționare între electrodul sculă, catod și obiectul supus tăierii electrod-anod, într-un mediu de lucru cu proprietăți speciale electrolitul. Se analizează factorii și parametrii electrice și mecanici care influențează procesul de tăiere. Se menționează că între acești factori există o corelație strinsă și ei pot fi dificil analizați separat. În ce privește prelucrabilitatea diferitelor metale prin eroziune electrică - electrochimică se precizează că se pot prelucra ușor metale și aliaje cu temperatura de topire scăzută și conductibilitate termică mică (Pb, Sn) și mai greu se prelucresc metalele și aliajele cu temperatură de topire ridicată (W). O poziție intermediară ocupă oțelurile carbon slab aliate și aliate, iar o poziție specială ocupă Zn, Cr și aliajele cu mult Cr, prelucrabilitatea acestora depinzând de procesul anodic care are loc la electroliza soluțiilor cu sticlă lichidă cu anodi din metale indicate.

Capitolul 2 cuprinde o prezentare a stadiului actual de construcție al utilajelor pentru tăierea oțelurilor prin eroziune. Se analizează sistemele de acționare a sculei de tăiere și a avansului, sistemele de alimentare cu lichid, dispozitivele pentru fixarea piesei de tăiat și caracteristicile tehnice ale celor mai noi surse de curent adoptate special pentru aceste mașini. În partea finală a capitolului se prezintă câteva tipuri de mașini de fabricație străină care au dat rezultate bune în exploatare și cele realizate la catedra de tehnologie mecanică a Facultății de Mecanică a IPTVT. Datele tehnice cuprinse în acest capitol au asigurat un instrument tehnico-stiințific pentru concepția instalației experimentale prezentate în capitolul 5, cu ajutorul căreia s-a desfășurat în mare parte programul de experimentări prezentat în capitolul 6 și 7.

O atenție deosebită s-a acordat reglării automate a mașinilor de prelucrare prin eroziune electrică electrochimică (capitolul 3). Se analizează problemele reglării automate insistându-se asupra fenomenului de dependență neliniară între parametrii in-

direcții și procesului de tăiere și parametrul de bază interstițial S dintre electrozi. Se prezintă diferite tipuri constructive de regulatoare automate și criteriile de apreciere a reguletoarelor automate.

În capitolul 4 se prezintă caracteristicile eroziunii complexe electrice electrochimice modificate prin R, L, C reglabile. În funcție de parametrii mecanici (presiune, viteză relativă) și electrice (tensiune, densitate de curent) ai procesului de eroziune, poate deveni preponderent fie fenomenul electrochimic de dizolvare anodică (putere mică), fie fenomenul termic de eroziune electrică prin impulsuri (putere mare). Datorită concentrării locale a curentului, densitatea de curent poate atinge valori de ordinul  $10^3 \dots 10^5 \text{ A/cm}^2$  și deși durata descărcării este mică  $10^{-3} \dots 10^{-5} \text{ s}$ , temperatura în canalul descărcărilor poate atinge valori de ordinul  $10^4 \dots 10^5 \text{ }^\circ\text{K}$ .

În baza acestor condiții speciale, se analizează fenomenele fundamentale în spațiul de lucru (electrod sculă - electrod obiectul de tăiat). Pentru crearea unor condiții favorabile în zona de interacțiune și stabilirea posibilităților de reglare a parametrilor tehnologici finali (productivitate, rugozitatea suprafeței, stratul modificat) prin modificarea caracteristicilor electrice ale circuitului de lucru, se face o amplă analiză a sistemului energetic sursă-circuit-spațiu de lucru (SCSL). Caracterul circuitului de lucru poate fi modificat prin R, L, C reglabile cu observația că rezistența fiind un mare consumator, duce la scăderea randamentului prelucrării.

Se prezintă o serie de scheme electrice echivalente a sistemului SCSL cu sursă un redresor trifazat, se indică ecuațiile diferențiale pentru aceste variante de circuite și se analizează pentru cazurile studiate modul de variație al curentului și tensiunii în spațiul de lucru. Deși tensiunea sursei este constantă, curentul din circuit are pe lângă componenta continuă, componente periodice. De asemenea se arată că tensiunea pe spațiul de lucru este variabilă, indiferent de forma de variație a curentului.

În continuare se arată că forma geometrică și dimensiunile electrodului și obiectului supus eroziunii modifică condițiile

de desfășurare a procesului, respectiv condițiile de prelucrare prin modificarea parametrilor electrici (tensiune, densitate de curent) și mecanici ai procesului de eroziune. Aceasta se datorează faptului că suprafața zonei de interacțiune electrod-obiect joacă un rol important în distribuția puterii specifice din spațiul de lucru, respectiv asupra productivității prelucrării precum și asupra altor parametri tehnologici finali.

Capitolul se încheie cu considerațiuni privind fluxul termic preluat de obiectul supus prelucrării prin eroziune complexă electrică electrochimică și probleme de stabilitate a procesului de tăiere.

Se analizează condițiile pe care trebuie să le îndeplinească sistemul energetic SCSL pentru ca sistemul să fie stabil. Se stabilește valoarea necesară pozitivă a coeficientului de stabilitate  $K_s$  definit prin diferența derivatelor caracteristicii statice a arcului electric format în spațiul de lucru și a caracteristicii externe a sursei de alimentare. Coeficientul de stabilitate  $K_s$ , reprezintă de fapt rezistența dinamică a întregului sistem SCSL.

Conceptia unei instalații experimentale de tăiere prin eroziune complexă electrică electrochimică modificată R, L, C reglabile, face obiectul capitolului 5. În componența instalației intră unele module de fabricație curentă cum ar fi sursa de curent, redresor trifazat RSC-400 modificat, module adaptate din fabricația atelierului de prototipuri IPTVT cum sînt bobina de reactanță de 8,5 mH, 500 A; rezistența de balast de 1,35 ohmi, 500 A și module construite special pentru echiparea instalației: bateriile de condensatoare de 992 și 54.050  $\mu F$ , mecanismul de tăiere cu disc, regulatorul de tensiune și pupitrul de comandă. Se indică caracteristicile tehnice ale instalației realizate, parametrii de lucru, normele de exploatare a instalației și tehnica securității muncii.

Cercetările experimentale și rezultatele obținute sînt concentrate în capitolele 6, 7, 8. În capitolul 6 sînt prezentate rezultatele obținute la tăierea unor oțeluri aliate reprezentative pentru scule și matrițe. Pentru a se trage concluzii cît mai folositoare aplicațiilor industriale, cercetările s-au extins asupra

citorva tipuri de oțeluri aliate pentru construcția de mașini și a trei tipuri de oțeluri inoxidabile. Se cercetează influența factorilor R, L, C asupra timpului de tăiere și a productivității asupra zonei influențată termic ZIT în ce privește structura modificată, variația durității și asupra rugozității suprafețelor de tăiere. Se experimentează influența materialului discului asupra parametrilor regimului de tăiere respectiv uzura acestuia și influența compoziției lichidului de lucru asupra procesului de tăiere și probleme de stabilitate a arcului electric, respectiv variația tensiunii și intensității în spațiul de lucru elementar sub influența parametrilor R, L, C reglabile. La finele capitolului 6 se prezintă monograma pentru determinarea parametrilor procesului tehnologic de tăiere prin eroziune electrică-electrochimică. Capitolul se încheie cu referiri la influența vibrațiilor asupra procesului de tăiere.

Capitolul 7 se ocupă de investigațiile făcute asupra zonei secțiunii de tăiere cu ajutorul microscopiei electronice. Se arată principiul microanalizei prin sonda electronică și se cercetează în detaliu variația elementelor componente în secțiunea transversală pe secțiunea de tăiere și anume variația carbonului, siliciului, manganului, molibdenului, cromului, nichelului, sulfurii și fosforului.

În continuare în capitolul 8 se prezintă cercetările experimentale de tăiere prin eroziune complexă electrică-electrochimică a plăcuțelor din carburi metalice (aliaje dure sinterizate). Se cercetează similar ca și în capitolul 6, influența factorilor R, L, C asupra timpului de tăiere și a productivității asupra zonei influențate termic ZIT și asupra rugozității suprafețelor de tăiere. O atenție deosebită se acordă cercetării influenței factorilor R, L, C asupra formării fisurilor. Se cercetează de asemenea uzura discului în procesul de tăiere.

În capitolul 9 se prezintă câteva date privind eficiența economică a tăierii prin eroziune complexă electrică electrochimică și posibilitățile de economisire a valutei prin renunțarea la importul discurilor speciale de tăiere folosite actualmente în

majoritatea întreprinderilor constructoare de mașini la debitarea oțelurilor înalt aliate pentru construcția de mașini, scule și matrițe.

În finalul tezei, capitolul 10 se prezintă o serie de considerațiuni finale, contribuții originale și probleme de viitor, care ar trebui să stea în atenția cercetătorilor.

Teza se încheie cu prezentarea bibliografiei cercetate (11) și a notațiilor folosite în teză (12).

Rezultatele obținute și concretizate în prezenta teză de doctorat sînt urmasa unei activități de cercetare a autoarei, desfășurată pe o durată de peste 6 ani sub îndrumarea sistematică a conducătorului științific, tovarășul prof.dr.doc.șt.ing.NANU AUREL căruii îi mulțumesc din toată inima pentru sprijinul moral și material permanent acordat și pentru indicațiile prețioase tehnico-științifice date.

Mulțumiri se cuvin de asemenea cadrelor didactice de la catedra Tehnologia mecanică de la Facultatea de mecanică a Institutului politehnic "Traian Vuia" din Timișoara, pentru numeroasele consultații de specialitate date pe tot parcursul pregătirii mele în domeniul tehnologiilor neconvenționale.

Pentru sprijinul acordat la realizarea instalației experimentale de tăiere, procurarea materialelor și la efectuarea numeroaselor experimentări și încercări, mulțumesc colectivului de la laboratoarele catedrei de Tehnologia mecanică și Tehnologia construcțiilor de mașini de la Facultatea de mecanică, IPTVT, Facultatea de mecanică de la Universitatea Craiova, IEP Craiova, ICSITPSC București, IMG București, ICM Reșița, ICM Caransebeș, Întreprinderea Oțelul Roșu, Întreprinderea ambalajul metalic Timișoara și Întreprinderea de detergenți din Timișoara.-

## 1.-PRELUCRAREA PRIN EROZIUNE ELECTRICA SI ELECTROCHIMICA

### 1.1.-Considerații generale

La procedeul de prelucrare prin eroziune electrică și electrochimică prelevarea de material este consecința acțiunii simultane a dizolvării anodice și a descărcărilor electrice prin impulsuri nedirijate cvasistaționare, care au loc la nivelul microasperităților între electrodul sculă-catod și obiectul supus prelucrării electrod-anod [ 8 , 4 , 15 , 17 , 32 , 36 , 44 , 49 , 55 , 62 , 64 , 78 , 84 , 89 ].

Procesul de eroziune are loc într-un mediu de lucru cu proprietăți speciale - electrolitul.

Schema principală a procedurii se prezintă în figura 1.1.

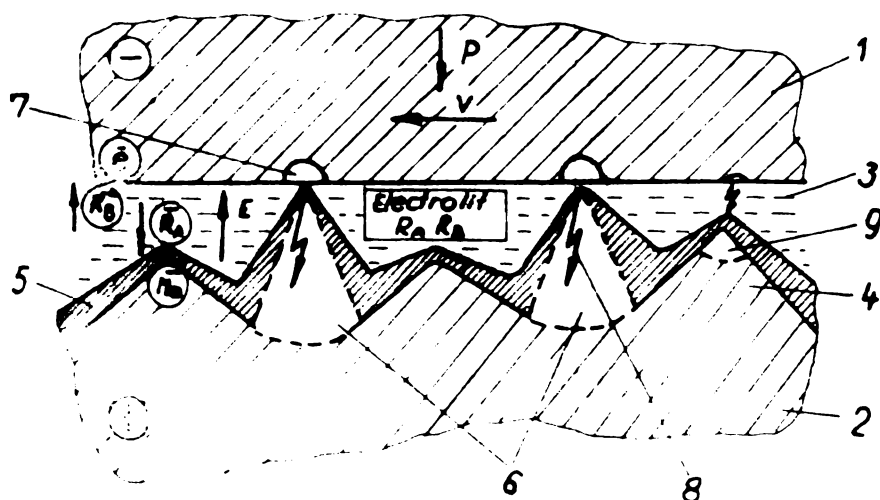


Fig.1.1.-Schema principală a procedurii de prelucrare prin eroziune electrică și electrochimică; 1-electrod; 2-obiect supus eroziunii; 3-electrolit; 4-microasperitate; 5-peliculă pasivă; 6-element de material erodat din anod prin descărcări electrice datorită contactului metalic; 7-element de material erodat electric din catod; 8-descărcări electrice prin impulsuri nedirijate; 9-element de material erodat din anod prin descărcări electrice datorită străpungerii spațiului disruptiv dintre electrozi; p-presiune dintre electrozi; v-viteza mișcării relative între electrozi; E-câmp electric exterior

În funcție de valorile parametrilor electrice, poate fi preponderent fenomenul electrochimic sau fenomenul electroeroziv. Dacă puterea folosită este mică, prelevarea are loc în special datorită dizolvării anodice, caz în care precizia de prelucrare și calitatea suprafeței sînt superioare, iar productivitatea este

mică. La creșterea puterii specifice introduse în spațiul de lucru, prelevarea se datorește aproape exclusiv procesului termic al descărcărilor electrice. În acest caz productivitatea crește, iar precizia de prelucrare respectiv calitatea suprafeței scade.

În cadrul procesului de prelucrare se produc descărcări electrice care generează efecte termice ce au ca efect descompunerea electrolitului respectiv crearea peliculei pasivizante. Datorită mișcării relative de frecare dintre electrozi pelicula pasivă este ruptă la nivelul vîrfurilor microasperităților. Reactivarea anodului prin îndepărtarea peliculei face posibilă apariția descărcărilor electrice fie datorită efectului Joule la ruperea contactului de scurtcircuit metalic pe asperitățile dezvelite de peliculă, fie datorită străpungerii spațiului între două asperități imediat vecine, una situată pe anod, iar cealaltă pe catod. Străpungerea se produce deoarece tensiunea pe electrozi atinge valoarea tensiunii de străpungere a spațiului disruptiv respectiv, format din electrolit, peliculă pasivă și produse ale eroziunii. Întrucît aceleași condiții fizico-chimice există în mai multe puncte pe suprafața de prelucrare, apar mai multe descărcări simultane sau parțial suprapuse. Prelevarea de material depinde de valorile medii ale tensiunii și curentului în spațiul de lucru. Tensiunea pe spațiul de lucru se menține constantă în limitele 18...30V.

Productivitatea poate să atingă valori pînă la  $8000 \text{ mm}^3/\text{min}$  [67].

### 1.2.-Factorii și parametrii care influențează procesul de tăiere

Procesul de erodare al metalului, la eroziunea complexă electrică și electrochimică depinde de regimul electric (densitatea de curent, tensiunea) și de parametrii mecanici (presiunea asupra suprafeței prelucrate, viteza de deplasare a electrodului sculă față de suprafața prelucrată). Între acești factori există o corelație strînsă și ei nu pot fi analizați separat

[11, 12, 16, 19, 35, 39, 48, 52, 56, 63, 71, 83, 85, 86].



Regimul electric determină intensitatea de desfășurare a procesului și calitatea suprafeței prelucrate.

Influența factorilor principali asupra desfășurării procesului și asupra altor parametri tehnologici ai prelucrării (rugozitatea suprafeței, precizia de prelucrare, zone de influență termică, formarea microfisurilor pe suprafețe prelucrate) sînt după cum urmează:

a) Felul curentului (c.c. sau c.a.) folosit în alimentarea electrozilor disc-material de tăiere, are o mare influență asupra erodării metalului. Folosind curent continuu erodarea este de două ori mai mare decît la curent alternativ de aceeași putere. Acesta se explică prin faptul că la polaritate inversă (piess-catod) metalul practic nu se erodează.

Dacă la alimentarea electrozilor se folosește curent continuu pulsatoriu atunci viteza de erodare a metalului poate crește cu 20-30%.

b) Densitatea de curent ( $j$ ) este factorul determinant al procesului.

La densități mici ale curentului prelucrarea are un caracter pronunțat electrochimic dacă și tensiunea pe spațiul de lucru este mică și nu este posibilă apariția descărcărilor electrice.

La densități mari de curent, predominante sînt descărcările electrice prin impulsuri generate la nivelul microasperităților.

Dependența dintre densitatea de curent și cantitatea de metal erodat, este prezentată în figura 1.2. Se observă trei zone ale

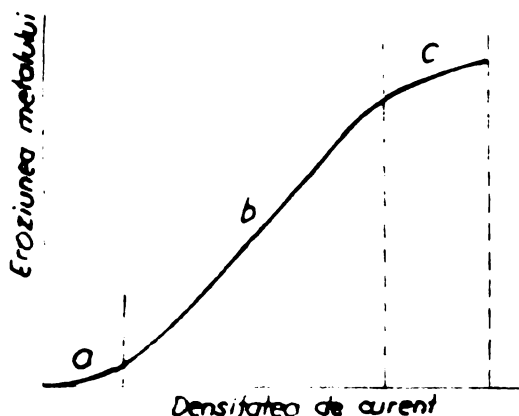


Fig.1.2.-Dependența dintre densitatea de curent și cantitatea de metal erodat

procesului de erodare: a - zona diluării anodice; b - zona topirii prin impuls; c- zona micșorării impulsurilor din cauza supraîncălzirii. În zona c corespunzătoare unei mari densități de curent are loc o înălțare exagerată a zonei de lucru și din această cauză

procesul formării impulsurilor este deranjat, încălzirea se în-  
prăgite pe o mare porțiune a suprafeței prelucrate, apare un  
arc electric stabil cu toate complicațiile respective.

Erodarea metalului în zona b se poate aproxima cu următo-  
rea relație:

$$q = q_0 j$$

unde:  $q$  - grosimea straturilor de metal erodat pe minut în mm;

$q_0$  - coeficient care depinde de condițiile de lucru;

$j$  - densitatea de curent A/cm<sup>2</sup>

c) Tensiunea de lucru dintre electrozi ( $U_0$ ) este factorul de-  
terminant care determină stabilitatea procesului, deoarece condi-  
ționează stabilirea unei anumite densități de curent. Practic s-a  
stabilit că pelicula anodică se formează la o tensiune de cca  
12 - 15 V.

Valorile limită ale densității de curent se obțin la o ten-  
siune de cca 30 V. Peste această tensiune, apare posibilitatea  
stabilirii unor descărcări electrice asemănătoare arcului electric  
de la procedeele de sudare, ceea ce deranjează formarea fenomenu-  
lui electrochimic de dizolvare, exagerând descărcările electrice  
nedirijate.

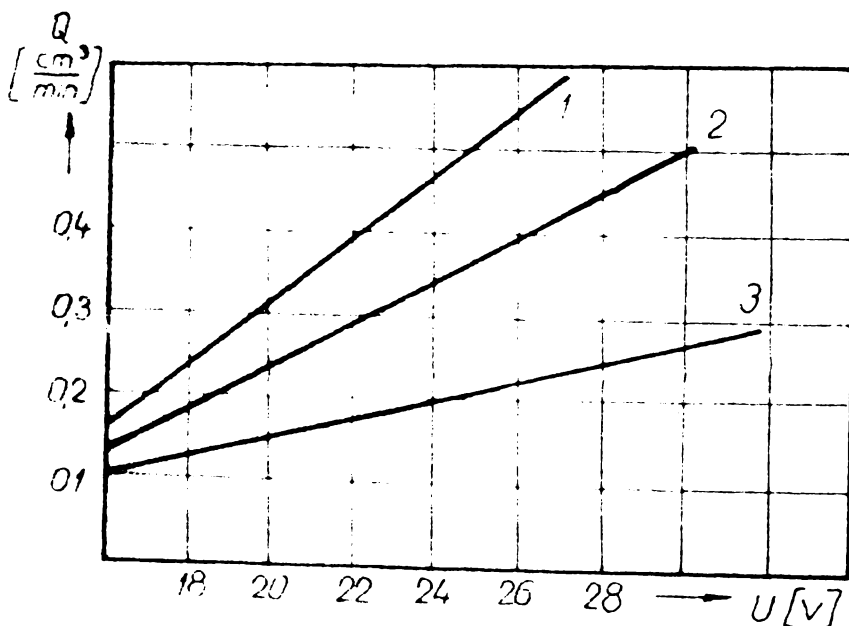


Fig.1.3

În figura 1.3 este  
prezentată cantita-  
tea de material ero-  
dat în unitate de  
timp pentru tensiu-  
nea de 16-30V și  
trei densități de  
curent: 1 - pentru  
 $j=35$  A/cm<sup>2</sup>; 2 -pentr  
 $j=25$  A/cm<sup>2</sup>; 3 - pent  
 $j=15$  A/cm<sup>2</sup>. După cum  
se observă produc-  
tivitatea eroziunii  
este aproape direct  
proporțională cu

densitatea de curent.

d) Presiunea dintre electrozi ( $p$ ) determină mărimea interstițiului dintre electrozi, respectiv rezistența electrică a zonei de lucru care influențează în mare măsură intensitatea curentului electric, respectiv densitatea de curent și în final stabilitatea procesului.

Presiunea dintre electrozi, delimitează procesul formării punților de contact, (numărul și mărimea lor), dintre sculă și piesă. Prelevarea de metal se desfășoară în bune condițiuni de productivitate, dacă formarea micropunților de contact se stabilește în anumite condițiuni după natura lichidului de lucru și anume când punctele de contact rămân active fără a se forma un scurtcircuit de durată între electrod-piesa de prelucrat.

Dacă presiunea crește peste anumite limite, crește și suprafața de contact metalic electrod-piesă, respectiv scade numărul micropunților de contact active.

Intensitatea procesului de eroziune în unitatea de timp,

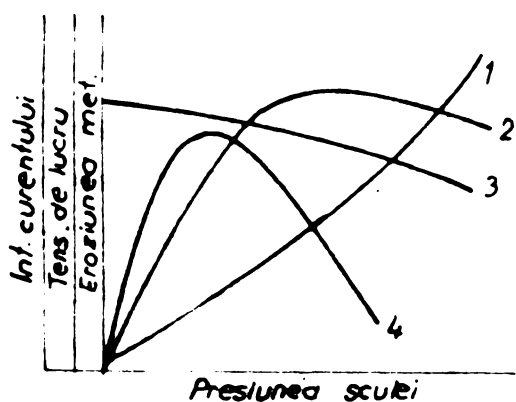


Fig.1.4.-Influența presiunii dintre electrozi asupra erodării metalului și regimului electric: 1-intensitatea curentului; 2-erodarea metalului la un lichid de lucru concentrat (corespunzător); 3-tensiunea de lucru; 4-erodarea metalului la un lichid de lucru diluat (necorespunzător)

intensitatea curentului și tensiunea de lucru dintre electrozi este prezentată în figura 1.4.

Forma diagramei care reprezintă erodarea metalului, arată influența mărimei interstițiului dintre electrozi și peliculei anodice asupra procesului de eroziune complexă electrică, electrochimică.

La început creșterea presiunii dintre electrozi are o influență bună asupra procesului de eroziune

contribuind la apropierea electrozilor și mărirea numărului micropunților unde are loc topirea prin impulsuri, fenomen însoțit de creșterea curentului și mărirea cantității de metal erodată.

Creșterea în continuare a presiunii dintre electrozi provoacă distrugerea completă a peliculei anodice într-o serie de microasperități a suprafețelor de contact, distrugerea microasperităților prin creerea contactelor directe dintre electrozi pe suprafețe relativ mai mari. În final densitatea de curent scade, iar topirea prin impulsuri încetează.

La aceeași parametrii și circuitului electric, caracterul diagramelor care determină legătura dintre erodarea metalului, regimul electric și presiunea electrodului-sculă, depinde de rezistența stratului de lichid din interstițiul dintre electrozi și a peliculei anodice. Astfel dacă scădem rezistența stratului de lichid din interstițiu, de exemplu prin diluarea cu apă, erodarea metalului se modifică (figura 1.4, diagrama 4). Din aceeași diagramă se poate deduce presiune optimă dintre electrozi pentru o erodare maximă.

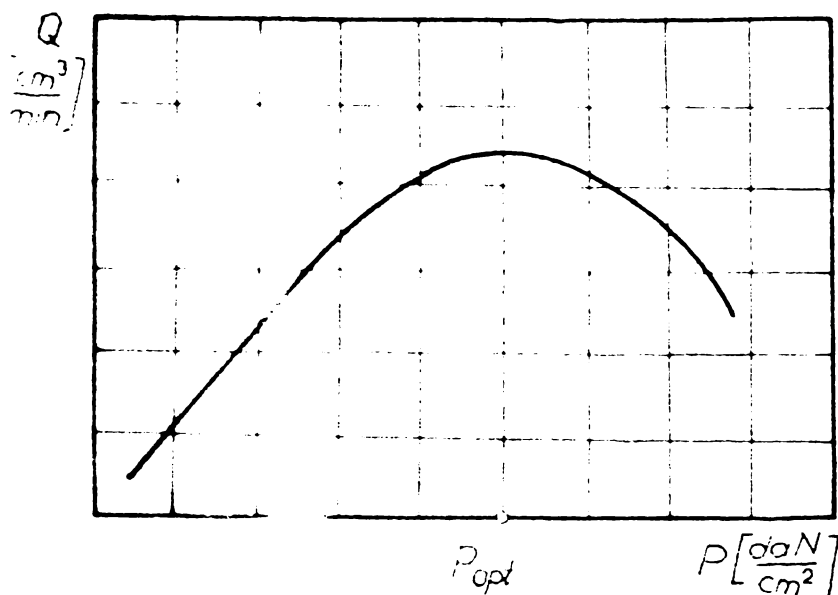


Fig.1.5.

Există o presiune optimă pentru care productivitatea este maximă, (figura 1.5). Controlul presiunii dintre electrozi se poate ușor realiza prin urmărirea indicațiilor ampermetrului și voltmetrului cunoscând dependența dintre regimul electric și presiunea electrodului-sculă.

Dacă în circuit se montează un oscilograf catodic pentru evidențierea variației tensiunii dintre cei doi electrozi ( $U_e$ ), la un proces normal de lucru, tensiunea  $U_e$  în nici un punct al oscilogramului nu este egală cu zero. Atunci când procesul de erodare este dereglat în momente când presiunea electrodului-sculă a crescut prea mult și pelicula anodică a fost complet

distrusă, tensiunea  $U_e$  scade aproape la zero. Dacă presiunea este prea mică, tensiunea  $U_e$  crește pînă la tensiunea de mers în gol a generatorului.

e) Viteza relativă dintre electrod și piesă supusă eroziunii ( $V_r$ ) influențează asupra:

- evacuării produselor eroziunii;
- accesului electrolitului în spațiul de lucru;
- altor parametri ai prelucrării.

Creșterea vitezei relative dintre electrod și piesă într-o anumită limită conduce la intensificarea procesului de erodare prin mărirea puterii electrice introduse pe spațiul de lucru [27, 51], datorită creșterii numărului de microcontacte stabilite în unitate de timp.

La viteze relative mai mari, accesul lichidului de lucru în zona de interacțiune electrod-piesă este îngreunat și deci procesul nu mai decurge normal, deoarece fenomenul electrochimic este deranjat. Viteze periferice mari pot provoca diminuarea intensității procesului de erodare și din cauza apariției vibrațiilor mari amplificate adeseori din cauza neregularității suprafeței de lucru a electrodului sculă.

Viteza relativă dintre electrozi este unul din factorii externi ce influențează asupra formei, duratei, frecvenței și energiei descărcărilor prin impulsuri și din acest motiv poate influența parametri tehnologici. [106, 182]

Din cercetările făcute pînă acum, rezultă că viteza relativă influențează productivitatea pînă la o anumită valoare a vitezei după care scade (figura 1.6), influențează uzura specifică a sculei (figura 1.7) și rugozitatea suprafeței tăiate (figura 1.8).

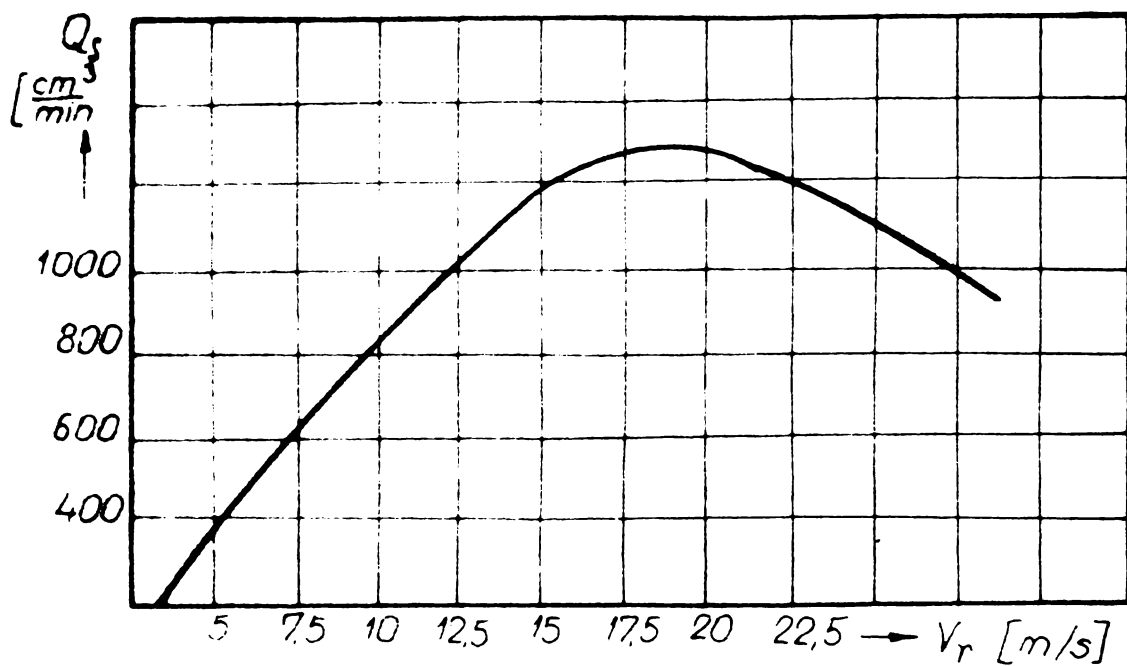


Fig.1.6

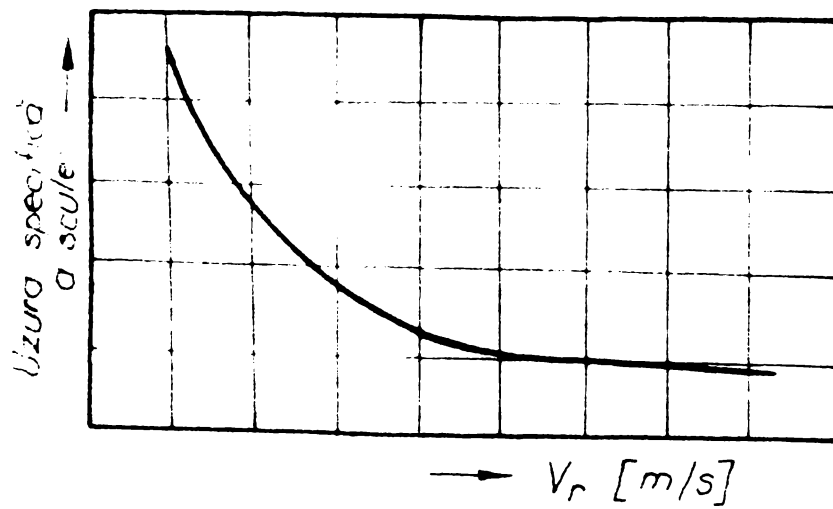


Fig.1.7

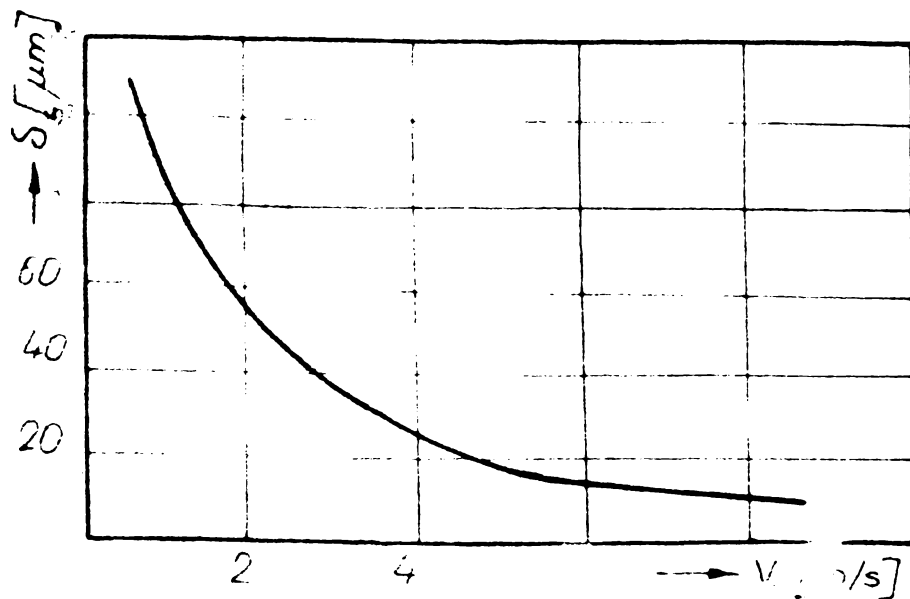


Fig.1.8

f) Lichidul de lucru. Experiența a demonstrat că proprietățile electrolitului au o influență hotărâtoare asupra procesului de eroziune electrică - electrochimică. Numai electroliții care conțin oxizi de siliciu (silicat de natriu și kaliu, suspensie de lut) asigură o productivitate mare și calitate ridicată a suprafeței prelucrate. Electrolitul preparat pe baza amestecurilor cu silicat de natriu asigură formarea pe anod a unei pelicule cu rezistență electrică ridicată, ceea ce asigură posibilitatea eroziunii locale intensive a metalului fără distrugerea peliculei anodice. Capacitatea de generare și întreținere a peliculei anodice este în funcție de vâscozitatea și densitatea lichidului și depinde de conținutul de particule coloidale moleculare sau în suspensie, care migrează spre anod și contribuie astfel la regenerarea continuă a acestor pelicule.

Lichidele cu oxizi de siliciu dau pelicule groase datorită penetrării lor de către ionii care migrează prin electrolit, [106]. Caracteristicile lichidului de lucru (figura 1.4) pot influența parametrii procesului și implicit parametrii tehnologici [27, 106, 95].

### 1.3.-Prelucrabilitatea diferitelor metale prin eroziune complexă electrică - electrochimică

Felul materialului prelucrat cu regulă, nu are o influență prea mare la formarea peliculei anodice, deoarece formarea acesteia este rezultatul descompunerii lichidului de lucru sub influența curentului electric și al căldurii.

Prin eroziune complexă electrică și electrochimică se pot prelucra diferite metale și aliaje, dar cu productivitate de eroziune diferită [94].

Se pot prelucra ușor metale și aliaje cu temperatură de topire scăzută și conductibilitate termică mică (de exemplu plumbul, cositorul).

Mai greu se prelucără wolframul (temperatură ridicată de topire).

O poziție intermediară ocupă oțelurile carbon slab aliate și aliaje.

O poziție specială ocupă zincul, cromul și aliajele cu mult crom.

Prelucrabilitatea deosebită a acestora se datorește procesului anodic care are loc la electroлиза soluțiilor cu sticlă lichidă cu anodi din metalele indicate.

De exemplu anodul de zinc la electroлиза soluțiilor de silicați de sodiu, se acoperă cu o peliculă foarte rezistentă din punct de vedere electric și mecanic. Pentru a se prelucra zincul prin procedeul de eroziune complexă electrică-electrochimică, este necesar să se modifice substanțial tehnologia obișnuită. Pentru a se micșora rezistența peliculei anodice de pe zinc, soluția de sticlă lichidă se diluiază pînă la densitatea de 1,15.- 1,2 (în loc de cca. 1,3), iar tensiunea se ridică la 30...35 V (în loc de 22...25 V).

Cromul și aliajele de crom sînt solubile fără formarea peliculei de silicați. Aceasta împiedică formarea unei pelicule anodice normale, fapt care îngreunează prelucrabilitatea cromului și a aliajelor sale folosind lichid de lucru normal.

Intr-o măsură și mai mare influențează proprietățile electrochimice ale metalelor și aliajelor, operațiile de finisare prin eroziune complexă electrică-electrochimică. În acest caz proprietățile peliculei anodice, în compoziția căreia intră și produsele de dizolvare, determină posibilitatea obținerii calității suprafeței solicitate. Densitatea insuficientă a peliculelor anodice și rezistența lor electrică scăzută conduc la atacul suprafeței de sub peliculă sau coboară sensibil efectul de nivelare.

Proprietățile necorespunzătoare ale peliculei sînt adeseori cauza imposibilității realizării unei finisări ale metalului dat.-

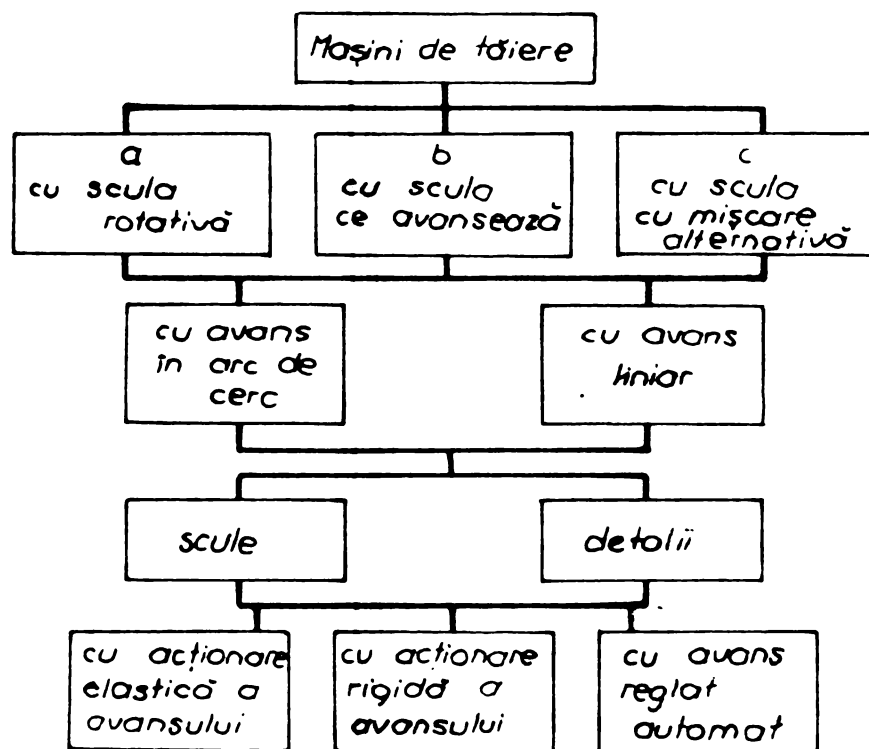


2.-STADIUL ACTUAL DE CONSTRUCȚIE AL UTILAJELOR  
PENTRU TAIEREA OTELURILOR PRIN EROZIUNE  
ELECTRICĂ - ELECTROCHIMICĂ

2.1.-Clasificarea mașinilor de tăiere prin eroziune  
electrică - electrochimică

Mașinile de tăiere pot fi clasificate după sistemul de acționare a sculei de tăiere în următoarele trei grupe (tabela 2.1):

TABELA 2.1



a) cu sculă rotativă

b) cu sculă ce avansează

c) cu sculă care face mișcare alternativă

Primei grupe aparțin toate mașinile la care scule de tăiere este un disc rotativ. La aceste mașini se pot tăia materiale de diametru 300-400 mm.

La a doua grupă aparțin mașinile cu scula - benzi de tăiere, destinată pentru tăierea materialelor de lungime mică și diametru peste 400-500 mm.

La a treia grupă aparțin mașinile la care scula este în formă de placă care execută o mișcare alternativă. În cazul mișcărilor alternative a sculei, viteza acesteia variază periodic de la zero la o valoare maximă, ceea ce constituie un dezavantaj deoarece pentru ca procesul de tăiere să se desfășoare în mod corespunzător, această viteză n-ar trebui să varieze sub limitele vitezei optime de tăiere. Variația vitezei sculei de tăiere provoacă scăderea intensității procesului de tăiere, un consum rapid al sculei și o variație mai mare a grosimii stratului modificat la suprafața tăieturii.

Mașinile de tăiere după procedeul prin eroziune electrică-electrochimică prezintă în general următoarele caracteristici constructive: [2, 14, 21, 23, 26, 27, 37, 38, 41, 42, 50, 58, 59, 60, 77, 78, 81, 103].

-Prezența unor subansamble specifice ca de exemplu sistemul de colectare a curentului, sistemul de aducere a lichidului de lucru, dispozitive de protecție contra stropirii lichidului de lucru etc.

-Simplificarea mecanismelor în cooperare cu mașinile obișnuite de tăiere.

Subansamblele cele mai importante ale mașinilor de tăiere prin eroziune electrică - electrochimică sînt: acționarea mișcării principale de tăiere, acționarea avansului, sistemul de conducere al lichidului de lucru, dispozitivele de protecție, echipamentul electric, mecanisme auxiliare.

## 2.2.-Sisteme de acționare a sculei de tăiere și a avansului

### 2.2.1.-Acționarea sculei de tăiere

La concepția acționării principale a sculei de tăiere se recomandă respectarea următoarelor condiții [107, 108, 110, 114, 115, 116, 117].

-mișcarea sculei să fie regulată, fără variații de turație sau alunecări în transmisii;

- construcția acționării ar trebui să asigure reglarea turației discului de tăiere, necesară pentru păstrarea constantă a vitezei periferice;
- scula de tăiere nu trebuie să aibă vibrații radiale;
- contactele electrice ale sistemului de alimentare cu curent să fie cât mai stabile și sigure.

Pentru acționarea principală a maginii de tăiere pentru produse până la 150 mm se folosește mecanismul de pendulare prezentat în figura 2.1 care a fost adaptat la construcția instala-

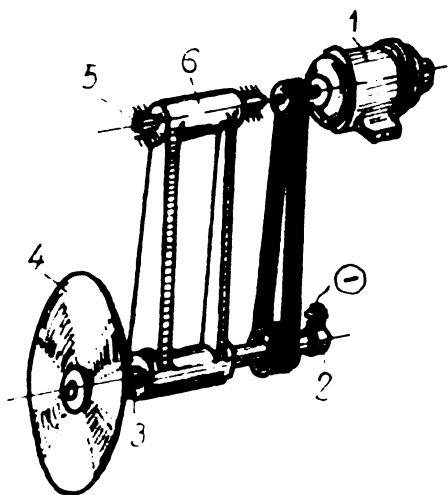


Fig.2.1.-Acționarea principală la mașini de tăiere pentru produse până la 150 mm: 1-motorul electric; 2-inel colector de curent; 3-arbore; 4-discul; 5-axe de pendulare; 6-corpul dispozitivului de pendulare

ției de experimentare (capitolul 5). Rotirea discului se realizează cu o transmisie cu curea trapezoidală, eventual cu o rolă de întindere. La asemenea construcție este foarte importantă coaxialitatea axei motorului cu axa de balansare a pendulului.

### 2.2.2.-Acționarea avansului

La tăierea prin eroziune electrică electrochimică, mărimea avansului sculei depinde de intensitatea prelevării metalului, care la rândul său este funcție de parametrii electrici și mecanici ai procesului de tăiere și de asemenea de cantitatea și calitatea lichidului de lucru.

Cerințele de bază ale acționării

avansului sînt următoarele:

- acționarea trebuie să asigure presiunea specifică constantă a sculei pe material pe durata întregului proces de tăiere;
- mărimea avansului se va regla continuu (fără trepte);
- avansul trebuie să fie fin;
- reglajul avansului trebuie să fie sensibil și stabil.

Avansul trebuie să se deconecteze automat în cazul unei supraîncălziri (la creșterea prea mare a curentului).

Acționarea avansului poate fi rigidă, elastică sau cu reglaj automat.

## **2.3. - Sisteme de alimentare cu lichid de lucru**

### **2.3.1. - Cerințe de lucru**

În procesul de tăiere prin eroziune electrică-electrochimică lichidul de lucru trebuie să umezească abundant atât fundul tăieturii cât și pereții laterali și acestuia. În acest scop se folosesc trei metode principale diferite pentru aducerea lichidului de lucru:

- a) scufundarea zonei de tăiere în lichid;
- b) aducerea lichidului în zona de tăiere de către discul care este parțial scufundat în acest lichid;
- c) introducerea lichidului prin ajutaj cu ajutorul pompei.

Pentru a asigura efectuarea normală a procesului, sistemul de alimentare cu lichid trebuie să îndeplinească următoarele condiții:

- 1) cantitatea de lichid care se introduce în zona de lucru trebuie să fie suficientă pentru formarea peliculei anodice și pentru răcirea sculei;
- 2) trebuie să se prevadă posibilitatea reglării cantității de lichid de lucru și a orientării jetului de lichid;
- 3) înainte de introducerea lichidului în zona de tăiere, acesta trebuie să fie curățat de reziduurile formate în timpul procesului;
- 4) trebuie să se prevadă răcirea lichidului la ieșirea din zona de tăiere; temperatura lichidului nu trebuie să depășească 35-40°C;
- 5) construcția sistemului trebuie să favorizeze reducerea împrăștierei lichidului în procesul de lucru.

### **2.3.2. - Soluții constructive pentru ajutaje**

Ajutajul prin care lichidul de lucru intră în zona de tăiere asigură direcția și forma necesară jetului, iar dimensiunea secțiunii de trecere a ajutajului determină volumul lichidului introdus la presiunea dată în conducta de presiune. Factorii de mai sus influențează în mare măsură cantitatea de lichid care pătrunde direct în zona de tăiere. Acești factori determină în general și construcția ajutajului.

Condițiile generale care se impun la construcția ajutajelor:

- 1) ajutajul trebuie să asigure introducerea jetului de lichid la abele plane frontale ale sculei sub unghi de 20-30°, cât mai aproape de suprafața produsului (figura 2.2 b);

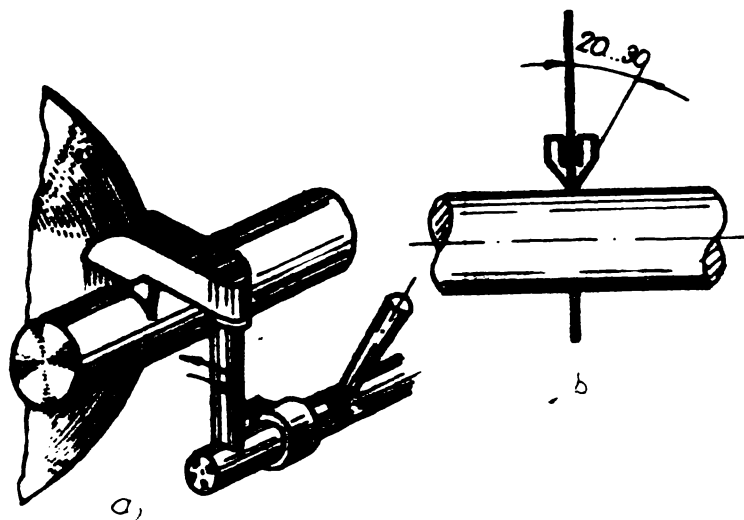


Fig.2.2.-Injector divizat: a) forma constructivă; b) direcția jetului de lichid

- b) viteza de scurgere a lichidului din orificiul de ieșire al ajutorajului nu trebuie să depășească 1-2 m/s;
- c) forma orificiului de ieșire al ajutorajului trebuie să creieze jetul de lichid care spală integral zona de pătrundere a sculei pe întreaga întindere a tăieturii.

Este de dorit ca jetul de lichid să umezească și locul de ieșire al sculei din piesa de prelucrat ceea ce favorizează stingerea arcului care poate să apară în acest loc. Apariția unui asemenea arc mărește uzura sculei și consumul de energie electrică;

- d) Construcția ajutorajului trebuie să admită curățirea ușoară a orificiului de ieșire; ajutorajele cu configurație complicată a orificiilor se recomandă a fi demontabile;
- e) ajutorajul trebuie să aibă un sistem de fixare comod care asigură demontarea și așezarea la loc, rapid și exact.

Condițiile arătate mai sus, duc în unele cazuri la necesitatea confecționării unor ajutoraje interschimbabile, fiecare fiind calculat pentru o anumită formă a secțiunii de tăiere și pentru un anumit interval al acestor secțiuni. Pentru asigurarea direcției necesare a jetului și a formei acestuia, câteodată se fac ajutoraje cu virfuri rotitoare.

Ajutorajul pentru tăierea pieselor cu diametrul până la 100-150 mm (figura 2,2, a) reprezintă un ajutoraj divizat de secțiunea dreptunghiulară, care cuprinde discul din ambele părți. Corpul ajutorajului se înșurubează pe un tub vertical și se fixează

cu piulițe. Tubul poate fi rotit în jurul axei orizontale, ceea ce asigură orientarea necesară a jetului pentru tăierea pieselor de diferite secțiuni și dimensiuni. Unghiul de înclinare a jetului față de planul sculei se creșteră prin oblicitatea orificiilor de ieșire ale ajutorului.

#### 2.4.-Dispozitive pentru fixarea piesei de tăiat

Prizele de reazem pentru fixarea piesei de tăiat servesc în același timp și pentru conducerea curentului electric la piesă.

Deși presiunea sculei asupra piesei nu depășește 10-12kgf dispozitivul de fixare al piesei trebuie astfel construit încât să asigure stabilitatea piesei în cazul unor șocuri ocazionale și în special să asigure un contact electric bun.

#### 2.5.-Surse de curent

Pentru alimentarea mașinilor de tăiere a oțelurilor prin eroziune electric-electrochimică se folosesc de obicei surse de curent continuu cu caracteristică externă rigidă sau foarte puțin coboritoare (cca 2-3V la un curent de lucru de 100 A).

Puterea sursei se determină de curentul maxim de lucru și de tensiunea maximă de cca 30-32 V.

Sursa se dimensionează pentru o durată activă de serviciu de 1000.

Practic s-a stabilit că intensitatea procesului de eroziune se poate mări, folosind surse de curent pulsatoriu. Datorită pulsațiilor se îngreunează menținerea unui arc electric stabil, ceea ce permite menținerea bună a procesului de eroziune la tăierea la tensiuni ridicate.

De obicei pentru alimentarea mașinilor de tăiere prin eroziune electrică-electrochimică se folosesc redresoare și generatoare de sudare cu caracteristici și tensiuni adaptate necesită-

ților procesului de eroziune și anume caracteristici externe rigide sau foarte puțin coborîtoare și cel puțin 3-4 regimuri de tensiuni de lucru în limitele 16...32 V.

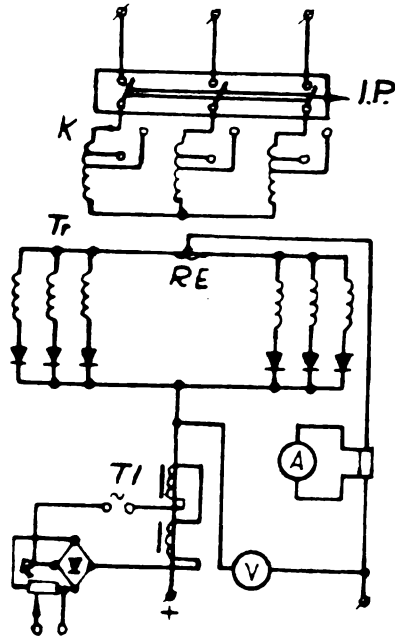


Fig. 2.3.-Schema electrică a redresorului VACOS  
K-comutator; RE-reactor de echilibrare; IP-întrerupător principal; tr-transformator; TI-transformator de impuls; R-rezistență

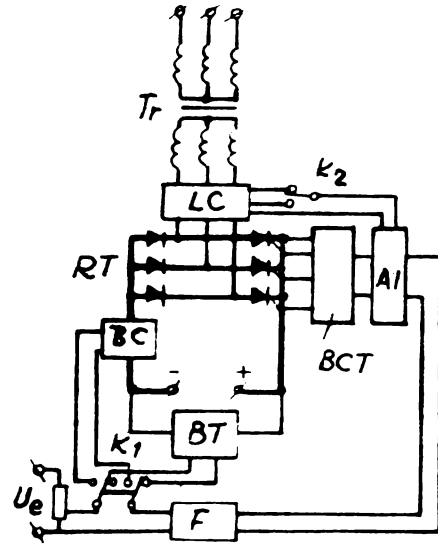


Fig. 2.4.-Schema electrică a sursei de alimentare cu tiristoare pentru 320 și 500A  
LC-limitator de curent; RT-redresor; BCT-bloc comandă tiristoare; BC și BT-bloc legătură inversă după curent și tensiune; K<sub>1</sub>K<sub>2</sub>-comutatoare; A<sub>1</sub>-amplificator intermediar; U<sub>e</sub>-tensiunea prescrisă

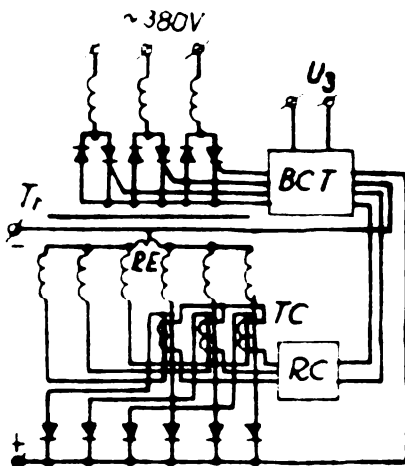


Fig. 2.5.-Schema electrică a sursei de alimentare cu tiristoare pentru 1600-3200A  
RE-reactor de echilibrare  
BCT-bloc comandă tiristoare  
TC-transformator de curent  
RC-redresor curent pentru declanșare

În figurile 2.3, 2.4, 2.5 sînt prezentate cîteva scheme de redresoare de construcție sovietică, recomandate la alimentarea mașinilor pentru tăierea oțelurilor prin eroziune electrică-electrochimică iar în tabela nr. 2 sînt date caracteristicile acestor redresoare [120].

408.264  
DIB F

T A B E L A 2.2

Caracteristicile surselor, redresoare cu ventile de siliciu, recomandate pentru mașini de tăiere prin eroziune electrică-electrochimică (URSS)

Date tehnice	Tipul sursei		
	VACOS 17-27	VACOS 58-36	VACOS 115-36
Tensiunea redresată în V	21, 24, 27	21, 24, 27 sau 30, 33, 36	30, 33, 36
Currentul redresat în A	630	1600	3200
Răcirea	Ventilație forțată	Ventilație forțată și răcire în apă	
Dimensiuni în mm	700x660x1300	1150x800x1800	1150x800x1800
Masă în kg	300	1000	1800

## 2.6.-Soluții constructive

### 2.6.1. Alegerea construcției

În baza practicii de exploatare a mașinilor de tăiere prin eroziune electrică-electrochimică se pot face câteva considerații de alegere a construcției lor, după cum urmează [114, 115, 116, 117, 122, 124, 131, 132, 134, 145, 174, 170, 152, 153]:

- a) Gradul de automatizare și deci complexitatea construcției mașinii depinde de destinația ei. La mașini destinate pentru tăierea secțiunilor mari în producții de serie se recomandă următoarele automatizări: reglarea avansului de lucru, fixarea pieselor, oprirea mașinii la terminarea tăierii etc;
- b) La mașini pentru tăierea materialelor de diametru pînă la 300 mm și a tablelor de grosime pînă la 100 mm este recomandabil ca scula să fie rotativă;
- c) La mașini pentru tăierea materialelor de diametru pînă la 300 mm rezultate bune s-au obținut cu sistemul pendular al sculei. Pentru deplasări mai mari ale organului de lucru se recomandă păpușă mobilă sau cărucior;
- d) La tăierea tablelor au dat rezultate bune mașinile la care mișcarea de avans se realizează prin deplasarea unui cărucior



pe care este fixat un sistem pendular. Avansul căruciorului se realizează cu un șurub, iar amortizarea pendulului cu un arc;

- e) La mașini pentru tăierea conductelor este recomandabilă rotirea încoșată a conductei;
- f) La mașinile destinate pentru tăierea pieselor (de diametru peste 100 mm) este recomandabilă acționarea avansului cu reglare automată.

Posibilitatea execuției tăierii prin eroziune electrică-electrochimică cu ajutorul unor mașini de construcție simplă permite execuția acestora prin autoutilare.

În tabela 2.3 sînt prezentate caracteristicile cîtorva utilaje de tăiere prin eroziune, fabricație URSS.

**2.6.2.-Mașina de prelucrare prin eroziune complexă electrică-electrochimică realizată cu concursul catedrei TM de la IPTVT pentru întreprinderea Ambalajul metalic 108.**

Mașina este destinată prelucrării aliajelor dure sau speciale prin următoarele operații: profilare (fasonare), tăiere și prelucrarea suprafețelor plane (rectificare).

Diametrul maxim la debitare, 50...60 mm.

Alimentarea mașinii este asigurată de un redresor de 4 kW cu 4 trepte de tensiune (5, 25, 30, 40 V), curentul maxim debitat 100 A.

Elementele sistemului de alimentare cu lichid: debitul de alimentare 1 m<sup>3</sup>/h, lichid de lucru - silicat de sodiu solubil cu densitatea de 1,2 kg/dm<sup>3</sup>.

Cursa mesei principale 100...150 mm (avansul mesei principale, automatizat), cursa mesei transversale, 80 mm.

Scule folosite: discuri profilate și discuri subțiri cu diametre de 200...250 mm, viteza periferică a discului 20...25 m/s.

Mașina este constituită din trei părți: mașina propriu zisă, pupitrul de comandă, în care s-a inclus și sursa de alimentare și instalația de alimentare cu lichid. Ansamblul mașinii este prezentat în figura 2.6.

TABELA 2.3

Caracteristicile utilajelor de tăiere prin eroziune  
fabricație URSS [180]

Nr. art.	I n d i c e	Tip cu disc			Tip cu bandă		
		4820	4821	4A821	4822	4823	M731
1	Diametrul maxim al obiectului (mm)	75	150	160	600	600	600 (750)
2	Diametrul discului dimensiunile benzii (mm)	350	650	x	30 x 5700	40 x 6000	40 x 7300
3	Grosimea discului (benzii) (mm)	0,8-1	0,8-1	-	0,8-1,5	0,8-1,2	0,8-1,2
4	Viteza periferică (m/s)	25	16;20	-	16	16	-
5	Puterea în kW	-	7,5	12	11	17 (28)	25
6	Intensitatea curentului în A	150	300	300	300	600	-
7	Tensiunea	24-26	pînă 30	-	22-30	24-28	-
8	Productivitatea (oțel inox) cm <sup>2</sup> /min	-	20-40	40	20-25	20	18-30
9	Volumul rezervorului (l)	60	60	-	-	-	-
10	Lățimea tăieturii (mm)	-	2-2,5	2-2,5	pînă 2	pînă 2	1-2
11	GOST 2789-59 Clasa de precizie a suprafeței tăieturii	-	1-2	-	1	1	1-2
12	Gabaritul (mm)	1080x1190x1190	1075x1150x1920	2260x2050x1910	1640x2240x2625	2500x2400x2800	2000x3600x2900
13	Masa (kg)	1170	1100	2500	3500	4800	9000
14	Cost aproximativ în mii ruble	-	10,0	-	-	18,0	25,0

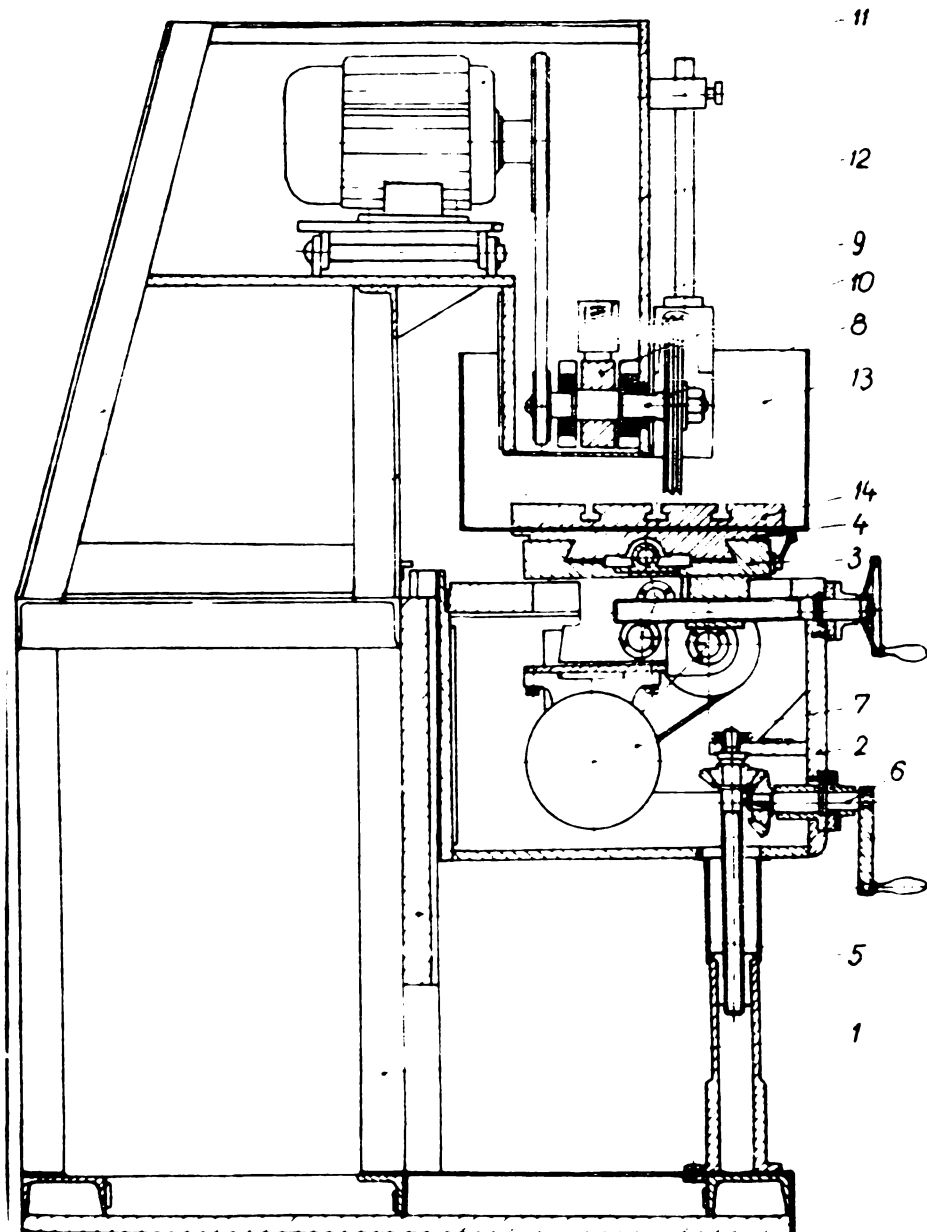


Fig.2.6 .-Mașină de prelucrare prin eroziune complexă electrică electrochimică realizată la întreprinderea "Ambalajul metalic" din Timișoara: 1-batin; 2-consolă; 3-canie transversală; 4-canie longitudinală; 5-ghidajul consolei; 6-acționarea consolei; 7-sistem de avans automat; 8-sistem de acționare al sculei; 9-perii colectoare; 10-colector; 11-motor ed antrenare al sculei; 12-suport basculant pentru tensionarea curelei; 13-cuvă; 14-masa cuvei; 15-sistem de alimentare cu lichid; 16-sistem evacuare lichid; 17-sistem de protecție a zonei de lucru [408].

**2.6.5. Mașina de prelucrare prin eroziune complexă electrică-electrochimică existentă în laboratoarele catedrei de Tehnologia Materialelor de la facultatea de mecanică a IPTVT**

Această mașină a fost construită prin autoutilare în cadrul laboratorului de tehnologii neconvenționale și este destinată operațiilor de debitare și profilare simplă a materialelor dure și extrem dure.

Mașina este formată din două subansamble: subansamblul pupitra de comandă (figura 2.7.) ce conține generatorul de curent continuu și subansamblul mecanic care conține sistemul de alimentare cu lichid de lucru, senia longitudinală L pentru prinderea obiectului de prelucrat și a contactului metalic pentru legarea la polul plus al sursei de curent continuu.

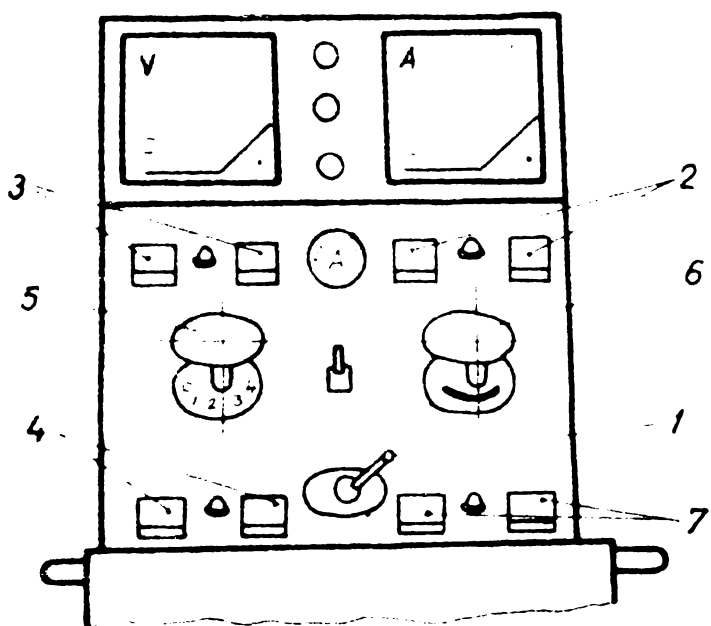


Fig.2.7.-Pupitrul de comandă; 1-comutator pornire-oprire; 2-comandă pornire oprire pompă lichid de lucru; 3-comandă pornire disc; 4-comandă pornire-oprire generator curent continuu; 5-reglarea în trepte a tensiunii din spațiul de lucru; 6-reglaj fin a tensiunii din spațiul de lucru; 7-comandă pornire-oprire a sistemului automat de avans

continuu pentru spațiul de lucru, alcătuit dintr-un transformator de putere, monofazat și un redresor în punte format din patru

Senia longitudinală asigură mișcarea de avans automat a OP de la stînga la dreapta, mișcarea inversă realizîndu-se prin intermediul unei manete. Mișcările secundare de potrivire sînt executate de OT manual, față-apate și sus-jos.

Schema electrică a mașinii conține:

- motor asincron trifazat pentru antrenarea discului (OT);
- motor asincron trifazat pentru antrenarea pompei pentru lichidul de lucru;
- generator de tensiune

diode de siliciu Si-200.

-Un sistem de reglare automată a avansului (figura 2.8 ).

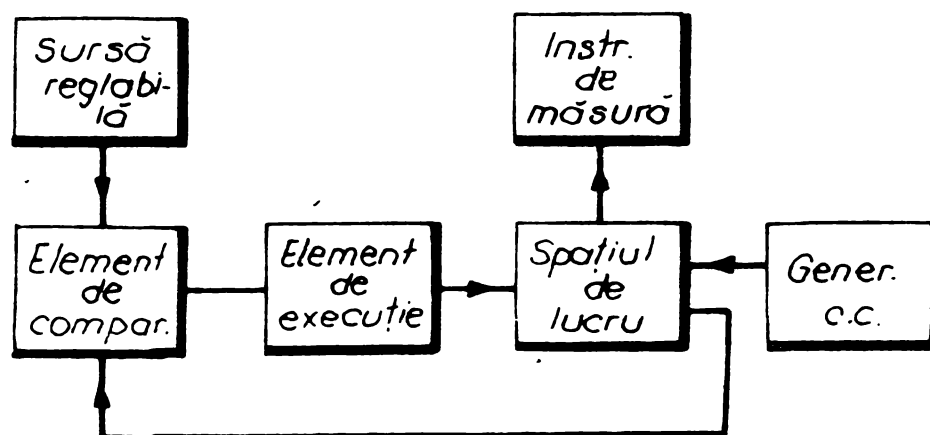


Fig.2.8

Elementul de execuție, adică un motor de curent continuu pentru antrenarea mesei de lucru, are indusul alimentat de la două surse de tensiuni: o sursă separată și tensiunea din spațiul de lucru. La scăderea tensiunii în spațiul de lucru, în timpul prelucrării (creșterea curentului) motorul își micșorează viteza în caz de scurtcircuit, sensul de rotație, deci și de mișcare a mesei de lucru se inversează, înlăturându-se automat scurtcircuitul.

Caracteristicile tehnice ale mașinii sînt:

- tensiunea pe spațiul de lucru în gol - max V - - - - - 30
- curentul de lucru, max A - - - - - 50
- viteza maximă de avans a mesei - mm/min - - - - - 20
- viteza de rotație a discului (neregulabilă)rot/min - - 2000
- debitul lichidului de lucru - l/min - - - 4,8
- dimensiunile rezervorului lichidului de lucru-l - - - 20

### 3.-REGLAJEA AUTOMATA A MASINILOR DE PRELUCRARE PRIN EROZIUNE ELECTRICA - ELECTROCHIMICA

#### 3.1.-Clasificarea dispozitivelor automate si a elementelor

Dupa destinatie elementele dispozitivelor automate pot fi: sensibile (receptive); intermediare; de executie. Elementele dispozitivelor automate sînt clasificate in schema 3.1. Clasificarea dispozitivelor de automatizare folosite la masini de prelucrare prin eroziune, este data in schema 3.2.

La masinile de prelucrare prin eroziune se folosesc toate variantele de dispozitive automate: reglatoare automate, dispozitive de comanda automată, control și protecție, [13, 28, 29, 40, 46, 57, 61, 79, 87, 97, 102, 133, 161, 145, 146].

#### 3.2.-Reglare și stabilizare

La masinile de prelucrare prin electroeroziune, pentru menținerea constantă a unor mărimi fizice (jocul dintre electrozi) curent, tensiune etc, se folosesc dispozitive speciale.

Aceste dispozitive se impart in două clase principial diferite (deși îndeplinesc aceleași funcții); stabilizare și reglare.

Principial de funcționare al regulatorului automat este prezentat in figura 3.1.

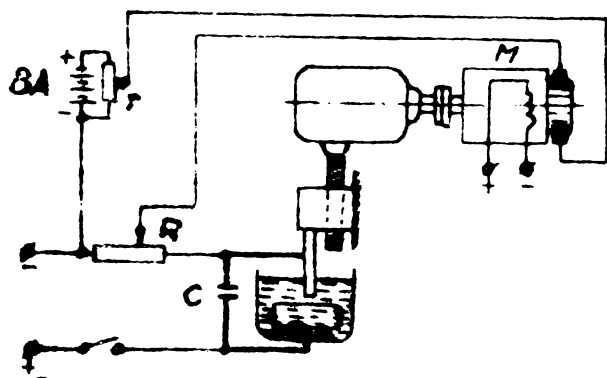
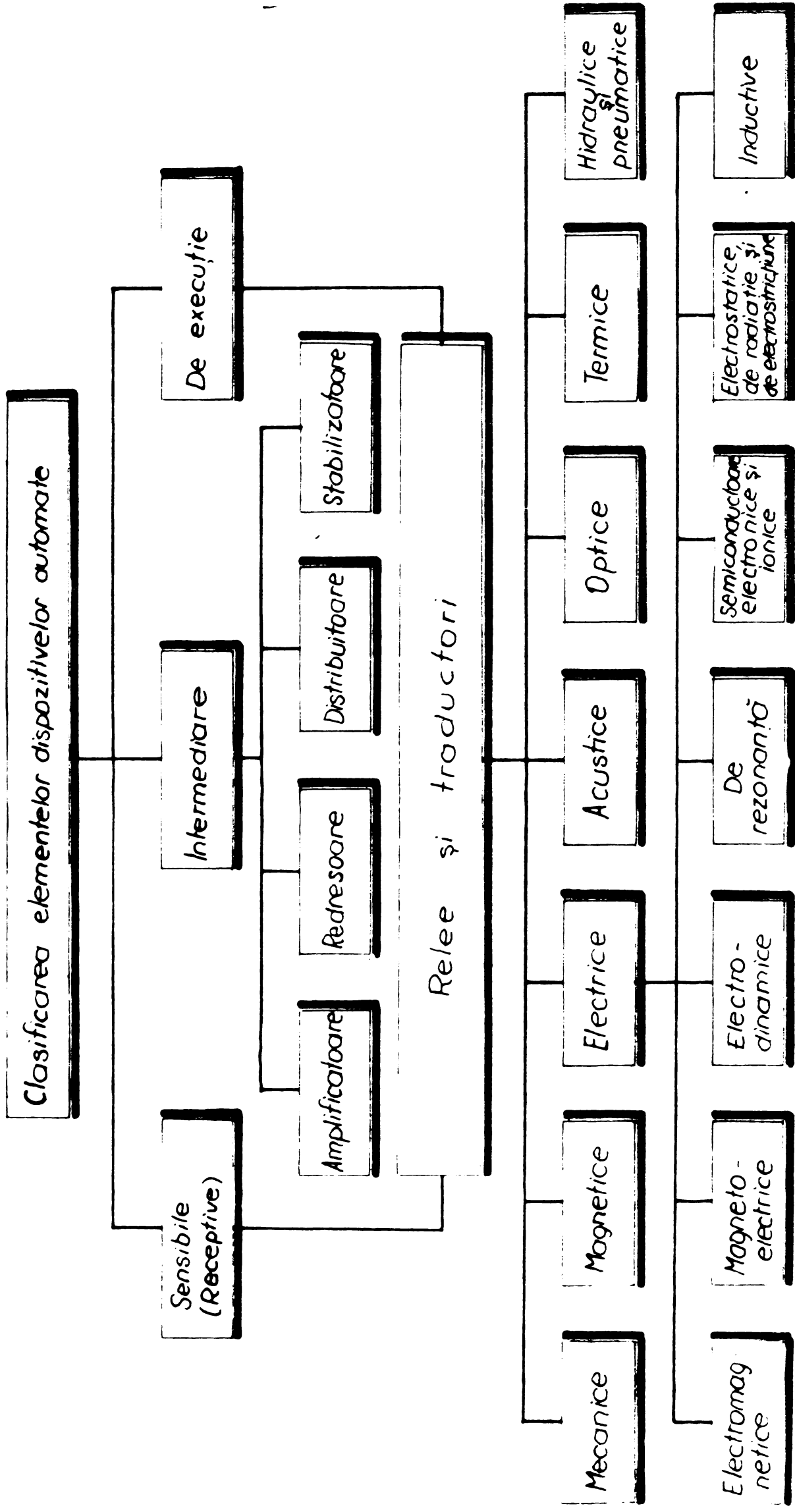


Fig.3.1.-Schema unui regulator automat cu acțiune directă pentru masina de prelucrare prin electroeroziune

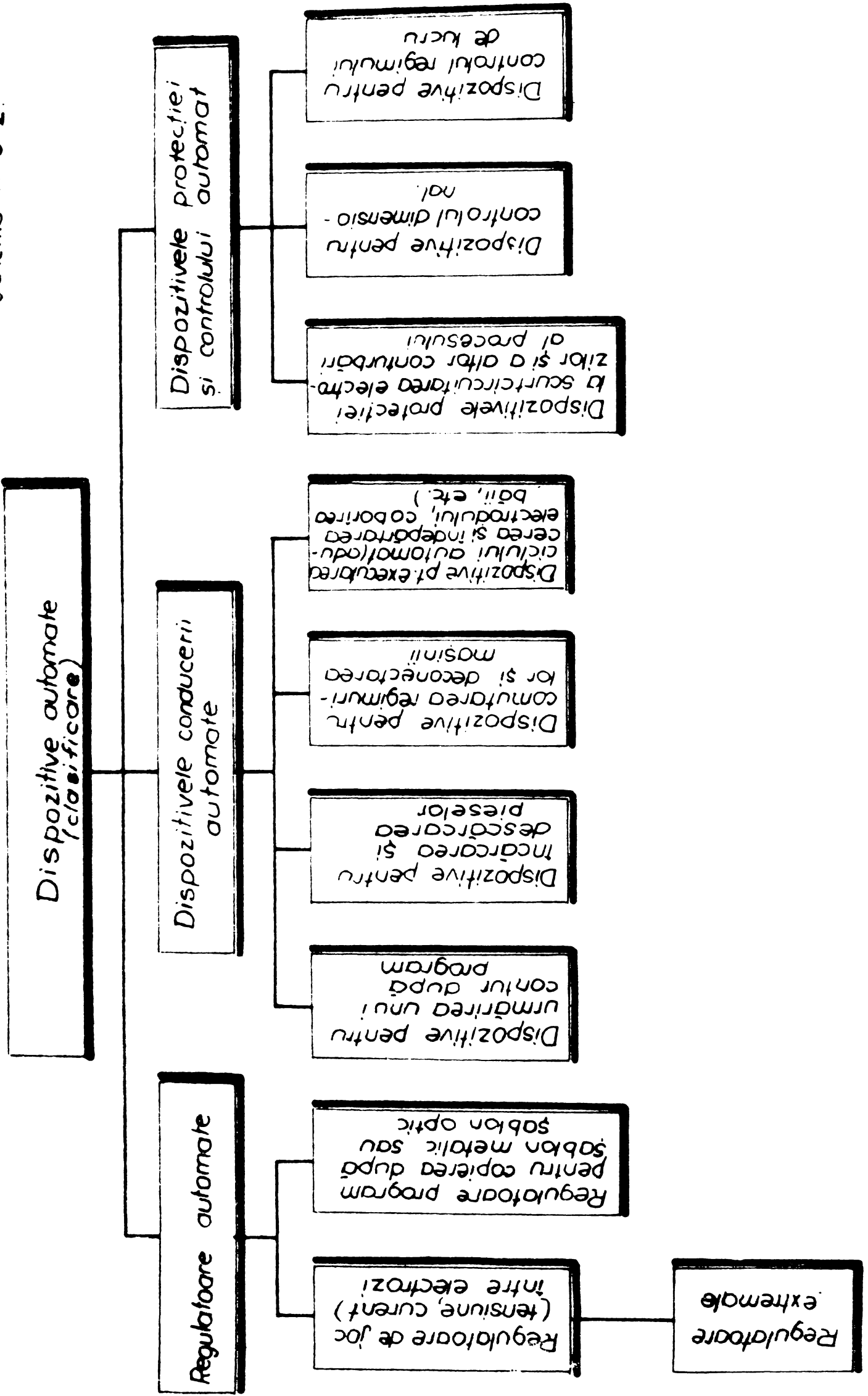
Rotorul motorului M se conectează la rezistența de balast R a masinii de electroeroziune printr-o baterie auxiliară BA. Rotorul se alimentează cu diferența a două tensiuni: tensiunea  $U_R$  de la rezistența de balast și tensiunea  $U_B$ , de la bateria auxiliară prin potențiometrul E. Dacă aceste două tensiuni sînt egale, rotorul stă; dacă tensiunea de la rezistența de

balast crește (de exemplu, la scurtcircuitarea electrozilor),

Schema nr. 3.1



Schema nr 3.2.





interstițiul dintre electrozi va începe să crească; scăderea tensiunii la rezistența de balast va conduce la apropierea electrozilor, interstițiul dintre electrozi se va micșora. Mărimea de avans sau viteza electrodului sculă  $V_{ae}$  va fi proporțională cu turația rotorului  $n$ , adică:

$$n = k_1 V_{ae} = \frac{U_0 - k_2 U_b - r_r i_r}{C_1 i_r \phi} \quad (3.1)$$

unde:  $i_r$  - curentul rotorului în A;

$r_r$  - rezistența rotorului în ohmi;

$\phi$  - fluxul magnetic;

$k_1$ ,  $k_2$  și  $C_1$  - coeficienți constanți.

Pentru momentul constant al sarcinii  $M_m$  curentul rotorului  $i_r = \text{const}$ , deoarece

$$M_m = C_2 \cdot i_r \phi \quad (3.2)$$

unde,  $C_2 = \text{constantă}$ .

Produsul  $r_r \cdot i_r$  se poate neglija, deoarece  $r_r$  este de obicei mic. În acest caz avansul sau viteza electrodului sculă va fi o funcție liniară a tensiunii  $U_b$ :

$$V_{ae} = a U_e - b U_b \quad (3.3)$$

unde  $a$  și  $b$  sînt niște constante.

În schema regulatorului (figura 3.1) forța de deplasare a piesei reglate - scula electrod, dezvoltată de elementul sensibil s-a folosit fără amplificarea puterii, adică în acest caz lipsește amplificatorul în circuitul reglat. Asemenea regulatoare se numesc regulatoare de acțiune directă.

La mașini de prelucrare prin eroziune mari, elementul sensibil nu poate acționa direct asupra organului reglat și de aceea sînt necesare dispozitive auxiliare pentru amplificare. Regulatoarele cu amplificatoare se numesc regulatoare cu acțiune indirectă.

În figura 3.2 este indicată schema structurală a unui regulator cu acțiune indirectă cu amplificatorul A. Acest amplificator indicat sub formă de modul, poate fi electronic, magnetic,

cu mașini electrice sau diode semiconductoare și care realizează

o anumită legătură funcțională (de dorit liniară), între semnalul de intrare (de obicei tensiunea la electrozii mașinii de prelucrare prin electroeroziune) și tensiunea la ieșire, care în cele mai multe scheme alimentează rotorul motorului de curent continuu cu excitație independentă.

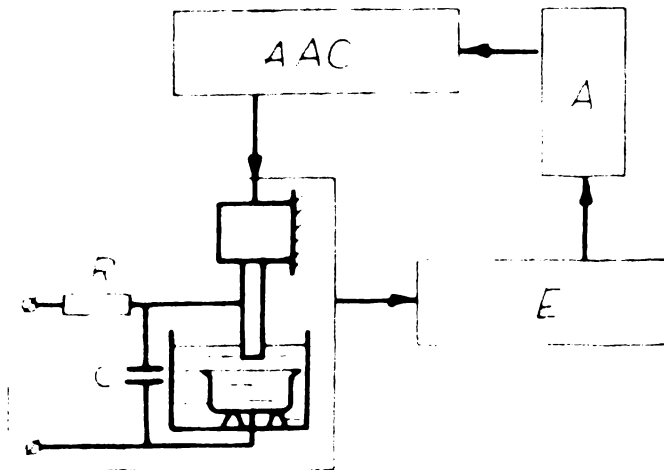


Fig. 3.2. - Schema structurală a unui regulator cu acțiune indirectă cu amplificator; AAC - acționare automată cu comandă; E - elementul sensibil

În locul acționării electrice, la mașinile de prelucrat prin electroeroziune pentru realizarea avansului electrod-sculă, adeseori se folosește acționarea hidraulică.

Această acționare asigură calități mai bune de reglare, însă necesită aparatură de gubarnit mai mare și relativ scumpă.

La mașinile de prelucrare prin eroziune electrică pînă-n prezent s-au folosit numai regulatoare proporționale (statice) care funcționează după relația:

$$V_{ee} = k_1 \cdot \Delta s \quad (3.4)$$

unde,  $V_{ee}$  - viteza de avans a sculei electrod;

$\Delta s$  - variația interstițiului dintre electrozi;

$k_1$  - constantă.

Pentru regulatoare proporționale (regulatoare P) este caracteristică neuniformitatea reziduală ceea ce împiedică păstrarea constantă a parametrului reglat. Însăși legea reglării condiționează prezența unor abateri ale parametrului reglat și, deoarece numai modificarea acestui parametru asigură limitele de modificare a mărimii  $V_{ee}$ .

Regulatele (astatice) integrale (I-regulate) funcționează după relația:

$$V_{ae} = k_2 \int \Delta s \cdot dt$$

la fel ca și regulatele proporțional integrale (PI-regulate) care funcționează după relația:

$$V_{ae} = k_1 \Delta s + k_2 \int \Delta s dt$$

Regulatele integrale (I-regulate) nu se folosesc pe aceste mașini din cauza nestabilității lor. Folosirea regulatelor proporțional - integrale (PI-regulate) pentru stabilizarea interstițiului dintre electrozi este posibilă deoarece acestea permit o reglare stabilă dacă lipsesc neuniformitățile reziduale, ceea ce trebuie să ridice precizia de reglare.

De asemenea este posibil să folosim la mașini de prelucrare prin electroeroziune și regulate proporțional-integrale-diferențiale (PID-regulate), influențând derivata abaterii mărimii reglate și care realizează reglajul după relația:

$$V_{ae} = k_1 \Delta s + k_2 \int \Delta s dt + k_3 \frac{d\Delta s}{dt}$$

Derivata abaterii reflectă tendința de modificare a mărimii reglate. Sensul și mărimea derivatei abaterii poartă informația încotro și cu cât se va abate mărimea reglată peste un timp oarecare, dacă nu se iau măsuri pentru a preveni această abatere.

Regulatele care influențează derivata, ca și cum "prevăd" a abaterile posibile, din timp le elimină și micșorează timpul de liniștire a sistemului de reglare după influența perturbației. Procesul de reglare a mai multor tipuri de regulate este prezentat în figura 3.3.

Obiectul de reglare este o mașină de prelucrare prin eroziune care în complexul de reglare automată formează sistemul automat de reglare (SAR) în circuit închis.

Semnalul de la obiectul reglat OR (figura 3.4) se transmite regulatorului care este compus din elementul sensibil ES, amplificatorul A și elementul de acționare comandat automat ACA.

De la regulator semnalul este transmis înapoi obiectului reglat OR asupra cărora acționează nu numai influența regulatorului

(semnalul de reglare) dar și semnalul de perturbație externă care decide modificarea jocului  $\mu$  dintre electrozi.

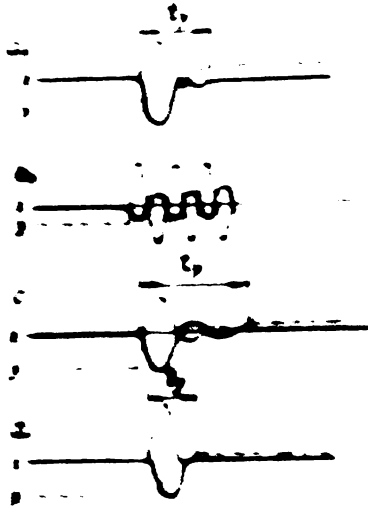


Fig. 3.3. - Procesul de reglare a diferitelor tipuri de regulatoare: a-P regulator; b-I regulator; c-PI regulator; d-PID regulator  
 $\mu$  - valoarea măsurii reglate  
 $\gamma$  - mărimea reglată (viteza sculei electrod);  
 $t_p$  - timpul de lărgire a sistemului automat de reglare (SAR) după terminarea acțiunii elementului perturbator

sau impuls.

În sistemele poziționale, circuitul de reglare nu este permanent închis și gata să reacționeze la abaterea de la mărimea reglată. Pentru sistemele cu impuls este caracteristică transferarea semnalului într-o anumită ordine de comandă a impulsurilor. De exemplu, se păstrează constantă frecvența și amplitudinea impulsurilor însă durata și numărul lor se modifică după semnal.

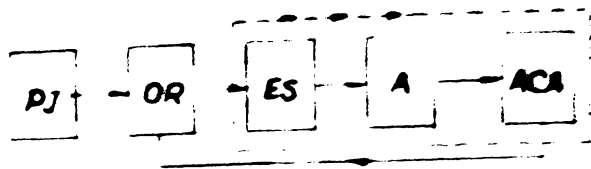


Fig. 3.4. - Schema de transmitere a acțiunii (influenței)

Asemenea semnale de perturbație la prelucrarea prin eroziune poate fi tensiunea rețelei, neregularitatea prelevării metalului de pe electrozi, modificarea condițiilor de lucru la mașină și altele.

S.A.R. prezentate în figurile 3.1, și 3.2, sînt sisteme de acționare neîntreruptă. În aceste sisteme este caracteristic faptul că toate verigile sistemului sînt constituite din elemente de acționare continuă (fără trepte). Prezența unui relee, transformă un asemenea sistem într-unul de acționare discontinuă: de poziție

### 3.3.-Probleme ale reglării automate

La prelucrarea prin eroziune electrică, pentru asigurarea condițiilor optime (productivitate maximă posibilă pentru regimul dat, randamentul ridicat, uzura minimă a electrodului sculă, calitate optimă de prelucrare etc) este necesară menținerea constantă sau realizarea variației după un anumit program a parametrilor care influențează esențial asupra procesului. În rândul acestor parametri care trebuie să fie reglați intră interstițiul dintre electrozi, concentrația produselor de eroziune, în spațiul dintre electrozi, temperatura mediului lichid, viteza de pompare a acestuia prin spațiul dintre electrozi etc.

Crearea sistemelor de stabilizare automată a parametrilor arătați nu prezintă greutăți tehnice deosebite. Însă în practică pînă în prezent se folosește numai reglarea automată a mărimei de bază adică a interstițiului  $g$ , dintre electrozi cu toate că acest lucru nu înseamnă că reglarea altor mărimi arătate nu este rațională.

Mărimea  $g$  este considerată mărimea de bază deoarece parametrii calitativi și cantitativi ai procesului de prelevare a metalului prin prelucrare electroerozională, sînt critici la valoarea interstițiului  $g$  adică depind în mare măsură de acesta. Întrădeavăr variația interstițiului  $g$  duce la variația esențială din punct de vedere al formei și volumului aceluia spațiu mic în care se produc fenomenele care provoacă eroziune electrică. În spațiul dintre electrozi se produce creșterea tensiunii și creșterea intensității cîmpului electric între electrozi, străpungerea mediului lichid, topirea și evaporarea materialului electrozilor, expulzarea metalului topit, evacuarea acestuia etc.

Creșterea cît de mică a interstițiului  $g$  modifică esențial condiția de străpungere pînă la dispariția totală a acestora din cauza intensității insuficiente a cîmpului electric. Pe de altă parte o reducere oarecare a interstițiului  $g$  poate provoca înrăutățirea bruscă a condițiilor de evacuare a produselor de eroziune electrică la scăderea productivității, pînă la încetarea totală a prelevării metalului.

Astfel variațiile mici ale parametrului  $s$  pot modifica radical caracterul procesului de prelucrare, iar aceste modificări în cazul mașinii fără un regulator automat se produc continuu datorită existenței acțiunilor perturbatoare care împiedică stabilitatea procesului de prelucrare electroerozională. Mașinile unelte de prelucrare cu scintei electrice sau impulsuri electrice, fără reglare automată a interstițiului  $s$ , ar fi fost prea puțin eficiente, ar fi necesitat o reglare manuală continuă și n-ar fi asigurat din punct de vedere tehnic productivitatea posibilă și alți indici calitativi ai procesului.

Problema folosirii reguletoarelor automate pentru temperatură mediului lichid, viteza de pompare a acestuia și pentru alți parametri, de care într-o măsură mai mică decât de parametrul  $s$  depind indicii calitativi și cantitativi ai mașinilor de prelucrare prin eroziune electrică, se determină pe baza efectului tehnic și economic care va fi realizat.

#### 3.4.-Statica reglării automate

Regimul stabil (staționar) de prelucrare electroerozională este caracterizat prin constanța mărimii reglabile, adică a interstițiului  $s$  dintre electrozi. Înainte de a trece la analiza condițiilor de existență a regimului staționar (condițiile de statică a reglării automate), se va preciza ce trebuie să se înțeleagă prin valoarea interstițiului  $s$ .

Se poate introduce noțiunea despre două mărimi fizice: interstițiul geometric  $s_g$  și interstițiul electric  $s_e$  dintre electrozi. Interstițiul geometric  $s_g$  la limită este egal cu interstițiul rezultat  $s_r$ .

Interstițiul geometric  $s_g$  este funcție de materialul sculei, regimul de prelucrare și materialului electrodului, compoziția mediului, temperatura acestuia, gradul de impuritate etc. Acesta este un parametru tehnologic important, care determină precizia prelucrării și productivitatea instalației. Cu o anumită precizie valoarea lui  $s_g$  poate fi prevăzută pentru condiții concrete.

Interstițiul electric  $s_e$  sau interstițiul în care se produce momentan scintei este determinat de distanță minimă la care trebuie să fie deplasat electrodul sculă în timpul efectuării procesului de prelucrare pentru a provoca scurtcircuitarea electrozilor. Interstițiul  $s_e$  nu poate fi mai mare decât  $s_g$ . La limita (în cazul lichidului pur, neîmbibsit cu metalul dispersat) acest interstițiu poate fi egal cu  $s_g$ , însă deoarece prelucrarea prin eroziune electrică se realizează întotdeauna într-un lichid impur,  $s_e$  este mai mic decât  $s_g$ .

Mărimea  $s_e$  este determinată de valoarea tensiunii dintre electrozi în momentul străpungerii, de dimensiunile și concentrația particulelor de metal în spațiul dintre electrozi, de compoziția și starea mediului lichid etc. Existența în interstițiu a particulelor metalice cu diametru mare mărește diferența între  $s_e$  și  $s_g$ . Legătura dintre mărimea  $s_e$  și  $s_g$  se exprimă prin inegalitatea:

$$s_g \geq s_e + d_{max}$$

unde,  $d_{max}$  - diametrul maxim al particulelor conductoare de curent care se formează în spațiul dintre electrozi.

### 3.4.1. - Variația interstițiului s dintre electrozi

În timpul prelucrării prin eroziune electrică, datorită prelevării metalului de pe suprafața catodului  $\Delta s_c$  și de pe suprafața anodului  $\Delta s_a$ , se produce creșterea interstițiului  $s$  (figura 3.5)

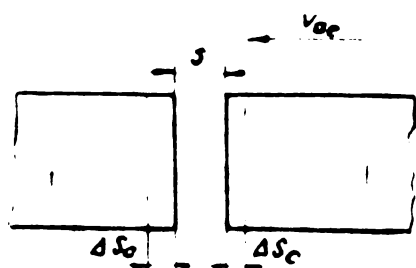


Fig. 3.5. - Variația jocului  $s$  dintre electrozi

Această creștere a interstițiului întrerupe continuitatea procesului și de aceea ea trebuie să fie mereu sau periodic compensată prin avansul electrozului sculă, sau a piesei de prelucrat cu viteză  $v_{ae}$ .

Variația interstițiului  $\Delta s$  în timpul  $\Delta t$  se determină după formula:

$$\Delta s = \Delta s_a + \Delta s_c - v_{ae} \cdot \Delta t \quad (3.5)$$

Considerăm ca:

$$\frac{\Delta s_a}{\Delta t} = v_a ; \quad \frac{\Delta s_c}{\Delta t} = v_c ; \quad v_a + v_c = v_e$$

unde:  $v_a$  - viteză liniară de prelevare a metalului de pe anod;  
 $v_c$  - idem de pe catod

$v_0$  - viteză liniară totală de prelevare a metalului de pe electrozi.

Împărțind ambele părți ale relației 3.5 la  $\Delta t$ , obținem:

$$\frac{\Delta s}{\Delta t} = v_a + v_c - v_{ae} = v_e - v_{ae} \quad (3.6)$$

În cazul procesului stabil de prelucrare prin eroziune electrică interstițiul  $s$  rămâne invariabil. Deci, condiția de stabilitate a procesului este relația:

$$\frac{\Delta s}{\Delta t} = 0$$

Substituind relația obținută în ecuația (3.6) găsim:

$$v_e = v_{ae} \quad (3.7)$$

adică, în cazul procesului stabil de prelucrare prin eroziune electrică viteza liniară totală de prelevare a metalului de pe electrozi este egală cu valoarea avansului.

Relațiile (3.5) și (3.6) sînt valabile numai pentru valorile finite de creștere  $\Delta s$  și  $\Delta t$ . Trecerea la forma diferențială este deci incorectă, deoarece procesul este intermitent.

Ecuația (3.7) exprimă formal condiția de statică, însă nu reflectă legătura funcțională dintre valorile avansului și viteza uzurii totală a electrozilor. Pentru determinarea acestei legături trebuie să știm în ce măsură viteza de prelevare a metalului depinde de valoarea interstițiului  $s$ . Această dependență funcțională poate fi obținută experimental.

#### 3.4.2.- Fenomenul de dependență neliniară între parametrii indirecti și parametrul de bază - interstițiul $s$

Caracterul neliniar de variație al interstițiului  $s$  la efectuarea uniformă a descărcărilor înrăutățește considerabil condițiile de lucru ale SAK deoarece condiția elementară de statică pentru porțiuni mici de timp nu este valabilă și un avans uniform nu poate asigura un regim stabil de prelucrare. Condițiile de reglare se complică și mai mult din cauză că este greu de a realiza reglarea pe baza măsurării numai a parametrului de bază adică a interstițiului  $s$ , deoarece încă nu s-au găsit mijloacele potrivite pentru măsurarea variației lui  $s$  în procesul de lucru al mașinii, fără ca această măsurare să nu influențeze însăși procesul de prelevare erozională.



În teoria elementară de reglare a mașinilor unelte de prelucrare prin eroziune electrice [29], s-a presupus că există parametri care sînt funcție liniară a parametrului  $g$ . Drept asemenea parametru s-a considerat tensiunea pe electrozi în momentul străpungerii  $U_{str}$ . Dacă lucrurile ar fi stat așa, n-ar fi existat diferență între obiectul de reglare: interstițiul  $g$  sau tensiunea  $U_{str}$ . Însă nu există dependență liniară între  $g$  și  $U_{str}$  ( $U_{str} \propto g$ ) deoarece numai fenomenul de grupare a descărcărilor este cauza neliniarității și a intermitenței dependenței arătate.

Dacă se analizează oscilogramele tensiunii pe electrozi, se vede clar că  $U_{str}$  nu se schimbă de la o descărcare la cealaltă în limite largi. În acest caz interstițiul  $g$  nu se schimbă rapid sau brusc, deoarece viteza eroziunii precum și viteza de deplasare a electrodului sculă (avans) sînt neglijeabile în intervale de timp analizate.

Deci schimbarea bruscă a lui  $U_{str}$  este provocată de o altă cauză. Acest fenomen este condiționat prin faptul că în apropierea zonei de descărcare crește concentrația produselor de eroziune (între care și a particulelor conducătoare), se creează concentrate de câmp electric între electrozi și se mărește probabilitatea unei noi descărcări în acest loc la o tensiune mai scăzută decît la străpungerea inițială.

### 3.4.3.-Probabilitatea apariției descărcării electrice

Străpungerea spațiului dintre electrozi trebuie să fie considerată drept un fenomen aleator deoarece nu se poate prevedea cu precizie nici momentul și nici locul de apariție sau tensiunea străpungerii. Nu se poate prevedea repartizarea în spațiu dintre electrozi a particulelor de metal dispersat și a produselor de pirroliză care depinde de aceea cînd și unde s-au produs descărcările precedente, cum s-a realizat evacuarea produselor de eroziune, care a fost viscozitatea și temperatura mediului lichid, care a fost valoarea interstițiului dintre electrozi etc.

Se poate vorbi numai despre posibilitatea fenomenului care ne interesează, adică a străpungerii și, folosind terminologia din teoria probabilităților o vom numi eveniment favorabil.

Probabilitatea străpungerii spațiului dintre electrozi în cazul valorii mari a interstițiului  $\underline{g}$  este egală cu zero (nu se produc descărcări între electrozi). La apropierea electrozilor apare momentul când încep să se ivească descărcări separate cu o frecvență redusă (în cazul elementelor cu generatoare de tip RC capacitatea are timp să se încareze pînă la tensiunea apropiată de tensiunea sursei de curent, iar în cazul schemei de generare independentă predomină impulsurile de mers în gol.

La analiza oscilogramelor, se vede clar efectul de grupare a descărcărilor care constă în aceea că după pauze prelungite între descărcări la valori mari ale interstițiului  $\underline{g}$  începe o serie de descărcări care urmează una după cealaltă după prima descărcare întâmplătoare. În acest caz, pentru schemele RC este caracteristică că prima descărcare apare la tensiunea  $U_{str}$  apropiată de tensiunea sursei de curent, iar celelalte la o tensiune cu mult mai mică. Aceasta se explică prin aceea că după prima descărcare se creiază condițiile pentru o probabilitate mai mare a evenimentului favorabil - străpungere. În zona de descărcare, mediul lichid se îmbărcștește cu produsele de eroziune electrică și rigiditatea dielectrică a acestuia scade. Un rol important va avea în acest caz ionizarea remanentă și încălzirea suprafeței electrozilor. Ca urmare, probabilitatea unei descărcări în apropierea descărcării produse este cu mult mai mare decît într-un alt loc. De aceea se produce gruparea descărcărilor, care cuprind o porțiune mică din suprafața electrozilor (cuib). Însă descărcările produc distrugerea electrozilor, interstițiul din zona descărcărilor crește și pînă la urmă apare momentul când creșterea acestuia duce la întreruperea străpungerilor în acest loc și descărcările cresc într-un alt punct al spațiului dintre electrozi.

Astfel constatăm că la prelucrarea prin eroziune electrică, variația tensiunii  $U_{str}$  se poate produce nu numai din cauza variației interstițiului electric  $\underline{g}$  dintre electrozi, dar și sub acțiunea unei serii de alți factori. Luarea în considerare a acestor factori este grea sau chiar imposibilă. Valoarea tensiunii în momentul străpungerii  $U_{str}$  se schimbă în limite largi în raport cu acțiunea factorilor aleatori și de aceea, vorbind despre valoarea

lui  $U_{str}$  ne putem referi numai la valorile cele mai probabile ale acestuia, deoarece orice măsurare a valorii acestei tensiuni va da o eroare mare.

După cum se știe din teoria probabilităților, în cazul unei legi normale de repartizare a erorilor (legea lui Gauss) cea mai probabilă valoare a mărimii măsurate este valoarea medie  $U_{str}$  care se calculează pe baza mai multor valori măsurate adică:

$$\bar{U}_{str} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} U_{str}}{n} \quad (3.8)$$

Procesul de prelucrare prin eroziune electrică este instabil după natura lui. Instabilitatea trebuie să fie înțeleasă într-un sens larg, având în vedere nu numai instabilitățile periodice (mai precis ciclice) de efectuare a procesului, dar și cele care nu se supun legilor, adică variațiile aleatoare ale parametrilor care caracterizează procesul. În rândul celor din urmă intră în primul rând tensiunea  $U_{str}$ , precum și parametrii care depind de aceasta (tensiunea medie pe electrozi, valoarea de amplitudine și cea medie a curentului între electrozi etc) iar până la urmă și parametrii tehnologici de bază (viteza de prelevare a metalului, calitatea prelucrării etc).

La analiza procesului de prelucrare prin eroziune electrică trebuie să se descoperească instabilitatea elementară care este caracterizată prin diferența între parametrii descărcărilor electrice separate (în schemele cu RC) sau prin existența impulsurilor în gol sau de scurtcircuit alături de impulsurile de lucru (la generarea independentă) și stabilitatea integrală, care este caracterizată prin instabilitatea procesului și prin scăderea bruscă a productivității acestuia.

Instabilitatea elementară a procesului este caracteristică pentru prelucrare prin eroziune electrică și este condiționată de mai mulți factori. Ea duce la variații bruște a valorilor parametrilor de bază și fiecărui impuls electric. Stabilizarea acestor parametri este imposibilă deoarece însuși procesul de eroziune produce schimbări haotice neîntrerupte în spațiul dintre electrozi. Pot fi constatate și prezise numai valori medii, cele mai apropiate ale parametrilor arătați, deoarece procesul în

intregime se supune legilor probabilității. Inșă o reducere oarecare a dispersiei în valoarea parametrului, adică o reducere a dispersiei este posibilă.

Instabilitatea integrală este un fenomen nefavorabil și inadmisibil pentru prelucrare prin eroziune electrică. De aceea prin toate mijloacele trebuie să se asigure stabilitatea integrală a procesului care depinde de regimul ales de prelucrare, de materialul electrodului, de măsurile care se iau pentru îmbunătățirea evacuării produselor de eroziune etc.

Instabilitatea integrală se constată prin oscilațiile de curent și de tensiune care se văd după indicațiile aparatelor de măsură, prin variații bruște ale avansului, prin existența unor scurtcircuități, frecvente între electrozi, după scăderea bruscă a vitezei de prelevare a metalului etc.

Între instabilitatea elementară și cea integrală există de asemenea o anumită legătură. În mai multe cazuri, când dispersia parametrilor în urma instabilității elementare depășește valoarea critică spre exemplu în cazul scurtcircuitării periodice scurte a electrozilor datorită formării unor particule mari, se constată influența acesteia asupra instabilității integrale. Există și o influență inversă. Inșă acestea sînt niște fenomene secundare și de aceea instabilitatea elementară și cea integrală sub acțiunea diferitelor cauze nu trebuie să fie considerate drept același fenomen.

Reglarea mașinilor unelte de prelucrare prin eroziune electrică urmărește drept scop în primul rînd stabilizarea procesului de prelucrare prin eroziune electrică și de aceea sînt probleme care dintre parametri trebuie să fie stabilizat (interstițiul  $s$  sau  $s_g$ , tensiunea  $U_m$  sau  $U_{str}$ , curentul  $I$ , etc) și ce condiții trebuie să îndeplinească SAR.

În prezent se folosesc următoarele mijloace pentru a asigura stabilitatea procesului de prelucrare prin eroziune electrică:

a) Pomparea forțată a mediului lichid prin spațiul dintre electrozi;

b) Aplicarea la unul dintre electrozi a unei mișcări relative de oscilație sau de rotație, ceea ce duce la creșterea interstițiului geometric;

c) Creșterea valorii tensiunii pe electrozi, ceea ce duce la posibilitatea creșterii interstițiului dintre electrozi în limitele admise de formarea peliculei anodice prin procedeul de eroziune electrică-electrochimică;

d) Alegerea corectă (în prezent numai pe baza experienței), a perechilor de material pentru electrozi, a compoziției mediului lichid și a regimurilor electrice.

Stabilitatea procesului este o condiție obligatorie pentru funcționarea efectivă a mașinii unelte de prelucrare prin eroziune electrică și nici un SĂR chiar cel mai perfect nu poate asigura funcționarea bună a mașinii, dacă procesul nu este stabil.

### 3.5.-Dinamica reglării automate

În cazul prelucrării cu ajutorul eroziunii electrice regimul staționar poate exista un timp relativ lung, numai în condiții deosebit de favorabile. Chiar la o stabilizare bună a procesului de prelucrare electroerozională se observă abateri însemnate ale parametrului reglabil față de valoarea dată, până la apariția scurtcircuitărilor dintre electrozi. Aceste abateri sînt provocate de acțiunea unei serii de influențe perturbatoare. Majoritatea acestora sînt întîmplătoare, deoarece prevederea lor este imposibilă.

În rîndul acestor acțiuni intră:

- a) Variația continuă a condițiilor de străpungere a mediului lichid care este provocată de schimbări haotice locale a concentrației produselor de eroziune la trecerea în spațiul dintre electrozi a gazelor, vaporilor și a particulelor solide;
- b) Schimbarea treptată a condițiilor de evacuare a produselor de eroziune pe măsură ce electrodul sculă pătrunde în piesa de prelucrat;
- c) Modificarea compoziției, temperaturii și viscozității mediului lichid;
- d) Variația materialului și structurii electrozilor;
- e) Variația tensiunii rețelei de alimentare;
- f) Variația parametrilor mecanici ai mașinii unelte (frecare în ghidaje, momentul de rezistență al reductorului, apariția jocurilor, vibrației etc).

Chiar asemenea factori, ca variația suprafeței secțiunilor de lucru a electrodului sculă și a formei cavității care se prelucrescă, care pot fi luate în considerare, intră în rîndul acțiunilor perturbatoare deoarece în practică variația regimurilor pe măsura pătrunderii electrodului sculă nu se programează și factorul de variație a suprafeței și a formei cavității de prelucrare influențează ca o acțiune aleatoare de perturbație.

Instabilitatea integrală a procesului de eroziune electrică duce la schimbări aleatoare continue a mărimii reglabile. Cu toate că SAR este destinat pentru menținerea valorii date a acestei mărimi, înlăturînd abaterile apărute, acest sistem nu poate asigura o constanță strîictă a mărimii reglabile numai din cauză că aceste abateri apar spontan și independent de SAR. Însă acest sistem poate înlătura în timp util unele abateri spontane de valoare mică pentru ca ele să nu crească pînă la întreruperea continuității procesului.

În SAR, care este un sistem dinamic închis, se pot ivi oscilații. În raport cu parametrii sistemului (parametrii regulatorului automat și a obiectului de reglare) sînt posibile trei feluri de realizare a procesului tranzitoriu, care începe după ce sub acțiunea unor perturbații exterioare sistemul a ieșit din regimul de echilibru și mărimea reglabilă (interstițiul dintre electrozi) s-a abătut față de valoarea dată.

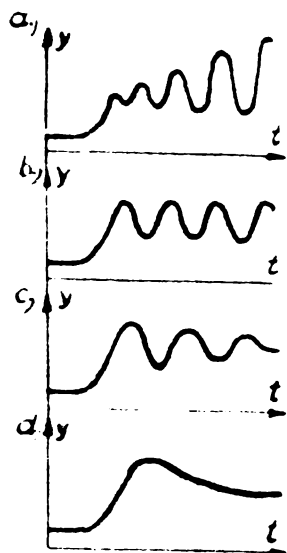


Fig. 3.6.-Eroarea proceselor tranzitorii în sisteme automate de reglare (SAR)

Primul fel (figura 3.6 a) este caracterizat prin apariția oscilațiilor cu amplitudinea mereu crescîndă pînă cînd se produce scurtcircuitarea electrozilor; după înlăturarea scurtcircuitării aceste oscilații ale mărimii reglabile apar din nou, ș.a.m.d. O asemenea instabilitate SAR este cu totul inadmisibilă în practică. Cel de al doilea fel al procesului tranzitoriu (figura 3.6 b) se deosebește de primul prin aceea că

oscilațiile continue apar cu o amplitudine constantă. Cu toate că această amplitudine este mică, ea caracterizează pe deplin funcționarea instabilă a SAR care este inadmisibilă în lucru.

Cel de al treilea fel (figura 3.6, c) este caracterizat prin procesul de atenuare a oscilațiilor apărute sau prin revenirea mărimii reglabile la valoarea dată a perioadei, fără oscilații (figura 3.6, d). Acest fel de realizare a procesului caracterizează funcționarea stabilă a SAR și este potrivit pentru practică.

### 3.6.-Tipuri constructive de reglatoare

#### 3.6.1.-Regulatorul solenoidal

Schema electrică de conectare a unui regulator solenoidal se arată în figura 3.7.

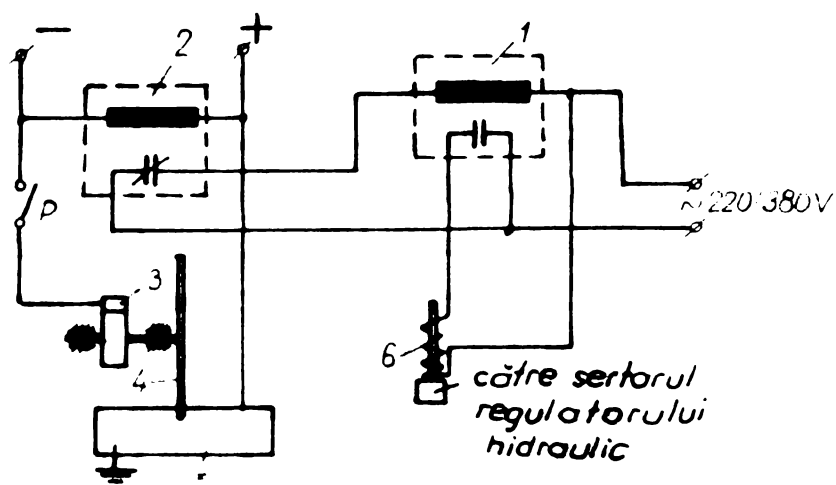


Fig.3.7.-

pomparea uleiului în cilindrul hidraulic.

Sertarul este acționat cu ajutorul unui electromagnet de curent alternativ care primește impulsuri printr-un releu intermediar.

Regulatorul se folosește la mașini cu acționarea avansului hidraulic. Variația valorii avansului se realizează cu ajutorul sertarului, care acoperă orificiul de trecere pentru

Acest releu declanșează sub acțiunea releului de tensiune care închide circuitul de fiecare dată atunci când tensiunea depășește limitele intervalului dat. Scăderea tensiunii se produce atunci când presiunea sculei asupra piesei este prea mare, iar creșterea tensiunii se produce atunci când această presiune este insuficientă.

În primul caz selencoidul atrage supapa și reduce presiunea în cilindrul hidraulic. Avansul discului se micșorează și tensiunea din nou se restabilește. La reducerea presiunii sculei asupra piesei supapa închide orificiul, mărinđ presiune cilindrului. Prin aceasta crește avansul discului, crește presiunea sculei asupra piesei și regimul electric se restabilește.

Sistemul hidraulic al mașinii prevede o supapă de reducere cu care se poate regla aproximativ avansul necesar pe cale manuală. Acest lucru este necesar pentru funcționarea stabilă a sertarului.

### 3.6.2.-Regulatorul cu cuplaj electromagnetic

Unul dintre exemplele de utilizare a cuplajelor electromagnetice în calitate de regulator îl constituie acționarea rigidă automată cu cimpuri magnetice contrare.

Funcționarea acționării (figura 3.8) se bazează pe transmi-

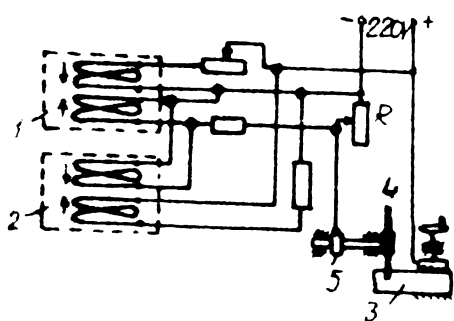


Fig.3.8.

țierea mișcării mecanismului de avans de la un cuplaj electromagnetic dublu 1 și 2. Sistemele polare ale cuplajului se pun în rotație cu ajutorul unui motor electric de curent continuu cu șunt, cu puterea pînă la 100 W. Rotația se transmite de la motor la semicuplaje printr-un reductor cu melc, cu raportul de transmisie 1:1000. Arborele condus al reductorului face 1,5...2 rpm. Acționarea sistemului polar al semicuplajelor se realizează cu ajutorul unei transmisii limitate conice. Sistemele polare se rotesc în sens opus. Datorită acestui fapt sensul de rotație a arborelui acționării este decis de sistemul spre care este atras indusul.



Azul este legat cu indusul printr-o îmbinare patrată și se rotește într-un sens sau altul în raport cu faptul dacă indusul este atras spre sistemul inferior sau superior al semicuplajului.

rotația axului se transmite șurubului de avans. Astfel se asigură avansul sau îndepărtarea sculei care este legată de glisor. Legătura dintre indus și ax este realizată în așa fel încât indusul are o oarecare libertate de mișcare în direcția verticală. Aflându-se între cele două semicuplaje indusul se atinge concomitent de sistemele polare reciproce opuse. Atragerea și cuplarea cu unul dintre aceste sisteme se produce fără deplasarea indusului în unghiul axei, deoarece el este compus din două discuri care se îndepărtează sub acțiunea arcurilor. În construcția analizată bobinele de magnetizare sînt fixe, ceea ce elimină necesitatea inelelor de contact și a periilor pentru alimentarea cu curent. Jugul, care închide fluxul magnetic este de asemenea fix, iar miezul și virfurile polare se rotesc.

Pentru rigidizarea sistemului și preîntîmpinarea dezaxărilor interstițiul dintre miezuri și jug se umple cu materiale diamagnetice (inele de alamă) ceea ce nu împiedică trecerea fluxului electromagnetic prin interstițiu.

### 3.6.3.-Reglare cu motor electric

Sistemele automate cu asemenea reglatoare pot avea diferite scheme. În figura 3.9 se arată schema unui regulator denumit proporțional cu diferențial.

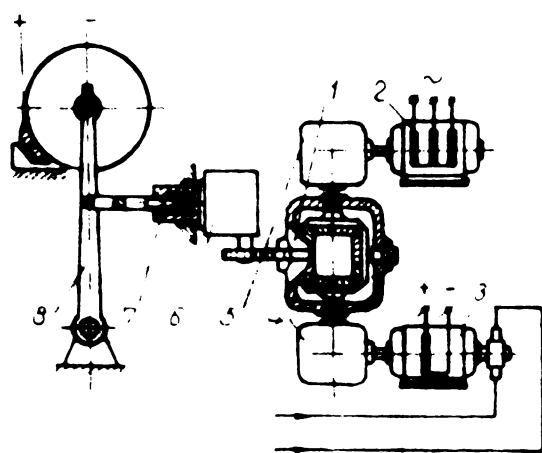


Fig. 3.9

Drept mecanism de însumare în această schemă se folosește un diferențial.

Roțile diferențialului se pun în mișcare în sens opus prin reductoarele 4 și 5 ale motoarelor, dintre care unul este reglabil. De la brașul portatitelui diferențialului rotația se transmite prin reductorul 6, șurubului care acționază pendu-

lul cu disc (in sens de avans). Elementul reglabil este motorul electric cu gunt 3. Indusul acestui motor este alimentat cu semnalul primit de la mașina unesaltă, adică cu tensiunea pe electrozi. La rotația opusă a roților regulatorului, viteza brațului portastelita va fi egală cu jumătatea diferenței dintre vitezele de rotație ale roților

$$n_r = \frac{n_b - n_3}{2}$$

Viteza unei roți care este acționată de către motorul nereglabil 2, rămâne constantă;  $n_b = \text{constant}$ .

Viteza celei de a doua roți  $n_3$  poate fi variată de la 0 pînă la o valoare maximă oarecare care se alege mai mare decît  $n_b$ . In asemenea condiții sensul de avans al sculei se schimbă la sensul constant de rotație a motorului 3. In cazul scurtcircuitării electrozilor (piesă și disc)  $n_b$  va fi negativă; la în depărtarea electrozilor,  $n_b$  își schimbă semnul. La funcționarea normală a regulatorului avansul se produce cu o viteză variabilă in așa fel încît parametrul reglabil (spre exemplu tensiunea pe electrod) să rămînă constant.

Principiul analizat de reglere poate fi folosit și pentru variația intensității curentului.

#### 3.6.4.-Reglare cu motor cu două înfășurări de excitație contrare

In figura 3.10 se arată un regulator cu motor electric avînd două înfășurări de excitație conectate în sens contrar.

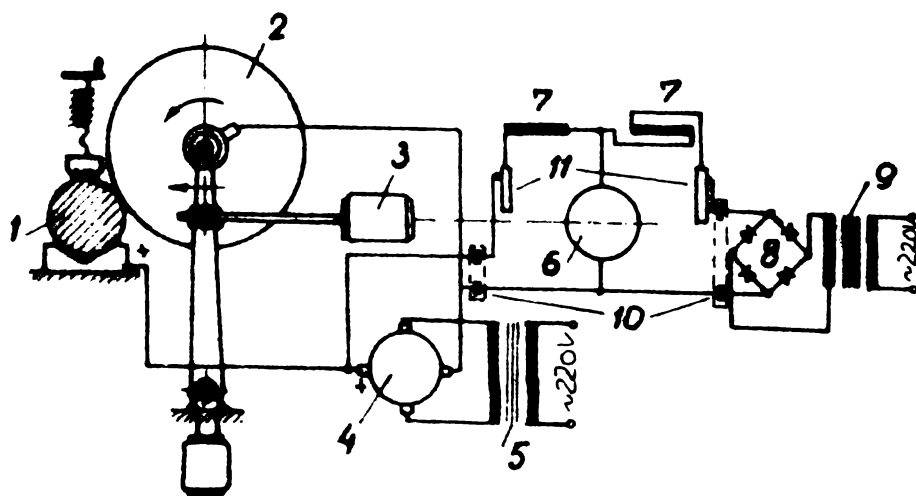


Fig.3.10

Una dintre aceste înfășurări se alimentează la o sursă independentă, iar cealaltă este conectată în paralel la circuitul principal de curent continuu. Ambele circuite su reostate pentru

reglare. In prima infășurare tensiunea rămâne constantă și nu depinde de parametrii electrici ai procesului. In cea de a doua infășurare tensiunea se schimbă în raport cu valoarea curentului de lucru.

Dacă tensiunea ambelor bobine este identică, atunci indusul motorului nu se va roti deoarece câmpul electromagnetic rezultat este egal cu 0. In cazul diferenței între valoarea tensiunilor în infășurări apare un câmp electromagnetic, orientarea căruiă determină sensul de rotație al motorului.

Cu ajutorul reostatelor se stabilește în prealabil o diferență oarecare de tensiuni în infășurările de excitație. Valoarea acesteia asigură o turație normală oarecare a turației motorului.

Dacă tensiunea de lucru a curentului continuu va deveni mai mică decât cea nominală dată, atunci diferența de tensiuni în infășurările motorului scade. Prin aceasta se reduce valoarea câmpului magnetic creat de către infășurările de excitație. Ca urmare scade turația motorului, deci scade valoarea avansului și a presiunii discului asupra piesei.

Alimentarea uneia dintre infășurări se poate realiza printr-un redresor de seleniu, conectat în rețeaua de curent alternativ printr-un transformator coborâtor de tensiune.

Puterea motorului de avans este de cca 30-50 W, în funcție de masele mobile ale mașinii unelte. Sistemul dat permite automatizarea procesului de lucru și a mișcărilor de instalare, (apropierea rapidă a discului, comutarea pentru avans de lucru, reglarea procesului și îndepărtarea sculei în poziție inițială).

3.6.5.-Sistemul de reglare și stabilizare automată a avansului realizat la catedra de Tehnologie Mecanică de la Facultatea de Mecanică a IPTV Timișoara

Schema bloc a sistemului de reglare și stabilizare este prezentată în figura 3.11 [106].

Alimentarea cu energia a spațiului de lucru este asigurată de sursa K.

Stabilizarea tensiunii și curentului pe spațiul de lucru SL se realizează cu sursele de tensiune F și B. Traductorul de

tensiune-curent (A) servește pentru obținerea unei tensiuni proporționale cu intensitatea curentului în spațiul de lucru SL. Elementul de execuție (I) este motorul de acționare a electrodului scule sau piesă. Selectorul de tensiune minimă (G) compară tensiunile de la elementele E și F.

Se observă că întreruperea circuitelor în punctul a sau b face posibilă funcționarea sistemului și cu menținerea constantă fie numai a tensiunii medii, fie numai a curentului mediu din spațiul de lucru. Există și posibilitatea unui avans rigid în care caz se întrerup circuitele în ambele puncte.

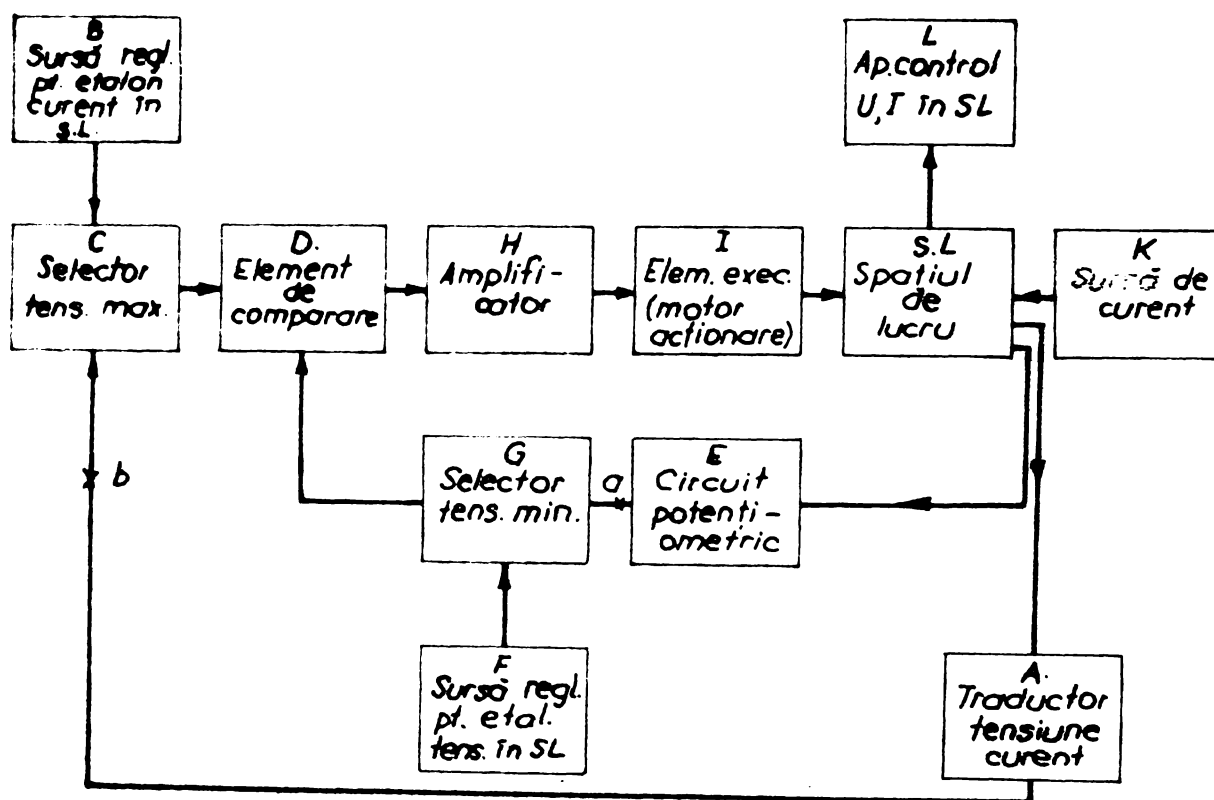


Fig.3.11.- cheme bloc a sistemului de reglare și stabilizare automată a avansului

În figura 3.12 se prezintă schema electrică de principiu simplificată a sistemului de reglare realizat cu o mașină electrică amplificatoare cu două înfășurări de comandă.

Circuitul de lucru (23, 24) al mașinii este alimentat de la o sursă de curent continuu prin două borne 29 a(+) și 29 b(-).

Reostatul 1 are rolul de traductor curent-tensiune, iar condensatorul 2 șuntează în parte componenta alternativă a ten-

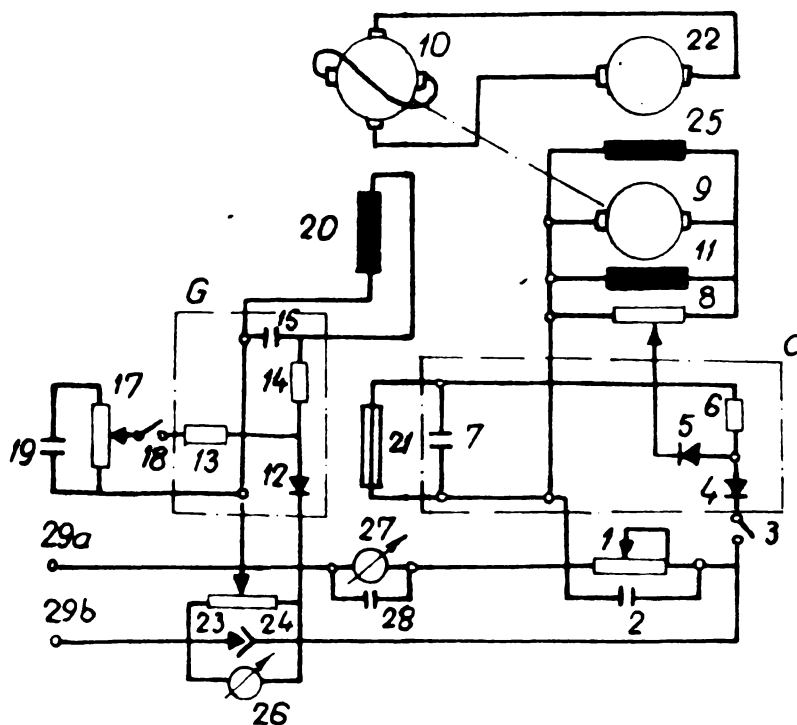


Fig. 3.12. - Schema electrică de principiu a sistemului de reglare și stabilizare automată a avansului [106]

tensiunii care se aplică prin intermediul unui întrerupător 3 la un colector de tensiune maximă C compus din două diode 4 res-

pectiv 5, o rezistență 6 și un condensator 7. Tensiunea de etalonare culesă de pe un potențiomtru 8 de la generatorul 9, acționat împreună cu o amplidină 10 de un motor

nerepresentat pe schemă, se aplică selectorului de tensiune maximă C. Excitația generatorului 9 este asigurată de o înfășurare în derivație 11.

Un selector de tensiune minimă G, compus dintr-o diodă 12, două rezistențe 15 respectiv 14 și un condensator 15, primește tensiunea de reacții prin intermediul unui potențiomtru 17 și a unui întrerupător 18 de la o sursă de tensiune constantă 10. Tensiunea de la selectorul G se aplică unei înfășurări de comandă 20 a amplidinei, iar tensiunea selectorului C se aplică alte înfășurări de comandă 21, în opoziție cu 20, cele două înfășurări împreună cu amplidina 10 având rolul de comparator și amplificator.

Schema electrică mai cuprinde un motor de curent continuu 22 alimentat de la amplidina 10, servind pentru antrenarea electrodului sculă 23 sau electrod pieșă 24, prin intermediul unui mecanism nerepresentat pe schemă. Înfășurarea de excitație 25

alimentată de la generatorul 19 asigură excitația motorului 22.

Tensiunea în spațiul de lucru dintre electrozii 23 și 24 este indicată de un voltmetru 26, iar curentul de lucru de un ampermetru 27 șuntat cu un condensator 28.

Sistemul de reglare experimentat prezintă următoarele avantaje:

- asigură o productivitate mărită prin mărirea stabilității procesului;
- mărirea reglată este puțin sensibilă la perturbațiile accidentale de scurtă durată;
- schema permite reglarea automată a avansului cu menținerea constantă fie a curentului, fie a tensiunii, fie combinat tensiune și curent;
- în caz de necesitate se poate realiza și un avans rigid;
- prin avansul automat, deranjarea regimului de lucru prin scurt-circuitarea electrozilor sau prin descărcări în arc stabilizat, este practic eliminată.

În tehnica reguletoarelor automate a mașinilor de prelucrare prin eroziune electrică, s-au mai folosit reguletoare cu ax plutitor [61, 62, 63] și reguletoare electrodinamice [58, 60], la care solenoidul este fixat pe ax și se deplasează într-un câmp magnetic constant creat de un electromagnet sau de un magnet permanent. Actualmente sînt elaborate scheme cu reguletoare cu amplificatoare, cu semiconductoare, reguletoare cu cascadă de ieșire pe diode comandate și reguletoare poziționale și de impulsuri folosind ca elemente de execuție motoare în pas.

### 3.7.-Criteriile de apreciere ale reguletoarelor automate

Pentru a putea compara funcționarea diferitelor tipuri de reguletoare de pe diferite mașini unelte de eroziune electrică (există câteva sute de asemenea reguletoare), trebuie să se cunoască criteriile pentru aprecierea calității de lucru a reguletoarelor.

Funcționarea unui reguletor automat depinde în mare măsură de mașina unealtă de prelucrare cu eroziune electrică (de realizarea reductorului, șurubului de acționare și a piuliței de conducere a ghidajelor suportului electrod etc) precum și de

condițiile de prelucrare electro-erozională, materialul electrozilor, geometria acestora, compoziția mediului lichid etc. De aceea compararea reguletoarelor trebuie să fie făcută în aceleași condiții, la aceeași mașină unealtă și la aceleași regimuri de prelucrare.

Verificarea regulatorului fără mașina unealtă nu poate da rezultate satisfăcătoare deoarece aprecierea calității regulatorului poate fi făcută numai pe o mașină aflată în lucru adică nu se verifică regulatorul ci SAR.

Funcționarea SAR este caracterizată prin următorii parametri cantitativi:

- abaterea parametrului reglabil de valoare dată la regim staționar (abatere statică), la variația condițiilor de prelucrare adică la diferite regimuri (neuniformitatea remanentă a regulatorului) și în regim tranzitoriu (dinamic);
- durata de amortizare a sistemului la o variație bruscă a semnalului de intrare (durata procesului tranzitoriu);
- valoarea maximă a avansului ;
- puterea maximă a acționării avansului;
- puterea consumată la intrare.

În afară parametrilor cantitativi arătați trebuie să se aprecieze și un indice calitativ important: stabilitatea SAR în intervalul de lucru al valorilor nominale posibile ale parametrului reglabil.

Indicii arătați caracterizează destul de complet calitatea de lucru a regulatorului, însă măsurarea practică a unora din acești indici este destul de grea. Pentru determinarea valorii abaterilor parametrului reglabil trebuie să fie înregistrate diferite oscilograme pe baza cărora se determină valori medii, deoarece la mașinile unelte de eroziune electrică întotdeauna există o împrăștiere a valorilor tensiunii pe electrozi în momentul străpunerii, care nu depinde de funcționarea sistemului de reglare și care este condiționată de o anumită instabilitate a însăși procesului erozional.

De aceea pentru simplificarea încercării diferitelor reguletoare se pot folosi parametri care se determină mai ușor și

care sînt legați de parametrii arătați mai sus, ca de exemplu:

a) Perioada oscilațiilor  $T$  a sistemului de reglare atunci cînd între electrozi nu există mediu lichid. Cînd se lucrează fără lichid încep inevitabil oscilațiile sistemului de scurtcircuit pînă la deconectarea totală. Cu cît este mai rapidă acționarea sistemului de reglare, cu atît mai mică va fi perioada  $T$  a acestor oscilații (la diferite mașini unelte de eroziune electrică cu acționare rigidă această perioadă are valori de la fracțiuni de secundă pînă la cîteva secunde), adică parametrul  $T$  determină rapiditatea de acțiune a sistemului de reglare. Pentru determinarea precisă a acestui parametru, încercările trebuie să fie făcute la același regim de prelucrare și cu fixarea organelor de acordare a reguletoarelor în poziția care corespunde la aceleași valori a parametrului reglabil. Cu cît este mai mică valoarea lui  $T$  cu atît (la celelalte condiții identice) este mai bun sistemul de reglare.

Asupra lui  $T$  influențează întârzierile din circuitele de amplificare și de transformare a semnalului, inerția acționării și jocurile în transmisie mecanică (acestea din urmă sînt deosebit de dăunătoare). În procesul de exploatare prelungită a mașinii unelte în urma uzurii organelor din reductor, a șurubului de acționare și a piuliței, jocurile cresc. Stabilirea creșterii inadmisibile a acestor jocuri se face cel mai ușor prin verificarea valorii  $T$ .

b) Coeficientul total de amplificare a sistemului de reglare determinat cu circuitul întrerupt. În acest scop intrarea reguleterului se deconectează de mașina uneltă iar în locul reguleterului se conectează la mașină un aparat de cîntărire care măsoară parametrul reglabil  $U_e$ . La intrarea reguleterului se aplică tensiunea semnalului  $U_s$  de la o sursă care are de tensiune reglabilă. În 3 - 5 puncte ale intervalului de lucru al valorilor parametrului reglabil se determină coeficientul de amplificare al sistemului care este egal cu

$$k_y = \frac{\Delta U_e}{\Delta U_s} \quad (3.9)$$



Determinarea coeficientului de amplificare se face numai la stabilitatea bună a procesului de prelucrare electroerozională. Coeficientul  $k_y$  depinde de regimul de prelucrare.

Cu cât este mai mare coeficientul de amplificare  $k_y$  cu atât este mai mică neuniformitatea remanentă a regulatorului, adică cu atât mai precis lucrează sistemul de reglare; însă creșterea lui  $k_y$  poate provoca instabilitatea reglării.

c) Rezerva de stabilitate a sistemului de reglare se determină după lățimea zonei valorilor nominale ale parametrului reglabil, în care nu se observă fenomenul de balansare. Cu cât este mai bun sistemul de reglare cu atât este mai largă zona de valori nominale ale parametrului reglabil în care se asigură o funcționare stabilă.

Criteriul funcționării stabile a sistemului de reglare este inexistența reversărilor prelungite ale avansului (în cazul reglatoarelor reversibile cu motor electric) sau oscilații neînsemnate ale parametrului reglabil (pentru reglatoare nereversibile și hidraulice).

d) Zona de insensibilitate a regulatorului care se determină în condiții statice (intrarea se deconectează de la mașina unealtă și la aceasta se aplică tensiunea unei surse reglabile). Pentru determinarea zonei de insensibilitate, se determină valoarea tensiunii care este necesară pentru scoaterea acționării regulatorului din starea de repaus atunci când electrozii sînt deconectați (îndepărtați).-

#### 4.-PARTICULARITĂȚILE EROZIUNII COMPLEXE ELECTRICE-

##### ELECTROCHIMICE MODIFICATE PRIN RIC REGLABILE

#### 4.1.-Fenomene fundamentale în spațiul de lucru la prelucrarea prin eroziune complexă electrică-electrochimică

La eroziunea complexă electrică-electrochimică, prelevarea de material se datorește acțiunii simultane a dizolvării anodice și a descărcărilor electrice prin impulsuri la nivelul microporițităților între electrodul seculă (catod) și obiectul supus prelucrării (anod) într-un mediu de lucru cu proprietățile speciale (electrolit).

În funcție de parametrii mecanici (presiune, viteză relativă) și electricei (tensiune, curent) și procesului de eroziune, poate deveni preponderent fie fenomenul electrochimic de dizolvare anodică (putere mică), fie fenomenul termic de eroziune electrică prin impulsuri (putere mare).

Datorită concentrării locale a curentului, densitatea de curent poate atinge valori de ordinul  $10^3 \dots 10^5 \text{ A/cm}^2$  și deși durata descărcării este mică  $10^{-3} \dots 10^{-5} \text{ s}$ , temperatura în canalul descărcărilor poate atinge valori de ordinul  $10^4 \dots 10^5 \text{ }^\circ\text{K}$ .

Cea mai mare parte a energiei se transmite obiectului supus prelucrării (anodul) care astfel este supus eroziunii mai intense.

Aceste concentrări locale de energie provoacă pe lângă procesul de eroziune, fenomene metalurgice care duc la apariția unor straturi modificate termic cu caracteristici speciale [ 75 , 80 , 105 ] și microfisuri.

Decă considerăm anumite materiale date (electrod, obiect de prelucrat) și un anumit mediu între electrozi (electrolit) caracteristicile tehnologice ale eroziunii sînt condiționate de parametrii impulsurilor de curent, de configurația geometrică a spațiului de lucru și de interstițiul dintre electrozi, determinat de pelicula pasivantă.

Desfășurarea stabilă a prelucrării presupune asigurarea unui echilibru dinamic optim între procesele de formare a peliculei pasivante și procesele de îndepărtare a acesteia de pe anod, fapt datorat înalt de reglarea corespunzătoare a interstițiului de lucru.

Teoriile elaborate asupra naturii fenomenelor fundamentale din proces arată gradul ridicat de complexitate a acestora [27, 69, 88, 91, 93, 94, 95, 96, 112, 121, 123, 125].

În încercările de a stabili o legătură matematică a fenomenelor din proces, se pleacă de la ecuația diferențială a conducției termice în metale și considerând ca surse termice, descărcările prin impulsuri instantanee și punctiforme, se ajunge la stabilirea unor relații matematice pentru fenomenele fundamentale din spațiul de lucru: dizolvarea anodică, eroziune termică ca urmare a efectului Joule-Lenz din descărcările electrice și datorită bombardamentului electronic, fenomene care apar la ruperea microcontactelor metalice stabilite între microasperități.

Ecuația generală propusă pentru prelevarea prin eroziune complexă electrică-electrochimică are forma:

$$M = j \cdot S \left\{ K_1 + K_3 \frac{\left\{ 1 - w_2 \gamma_s^2 \left[ p - \left( \alpha_3 - \frac{\alpha_4}{\gamma_s} \right)^2 \right] \right\}}{K_4 \cdot C \cdot t_0} \left[ K_5 E_s^2 + K_6 \cdot \rho \cdot V_a \right] \right. \quad (4.1)$$

în care:

$M$  - masa totală de material erodat din anod în unitate de timp datorită dizolvării anodice a descărcărilor prin impulsuri electrice, în grame;

$K_1, K_3, K_5, K_6, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$  - constante;

$j$  - densitatea de curent  $A/cm^2$ ;

$S$  - suprafața totală supusă acțiunii lui  $j$  în  $cm^2$ ;

$\gamma_s$  - densitatea lichidului de lucru în  $g/cm^3$ ;

$p$  - presiunea dintre electrozi în  $daN/cm^2$ ;

$E_s$  - intensitatea câmpului electric între electrozi în  $V/cm$ ;

$\rho$  - rezistența specifică a materialului obiectului în  $ohm \cdot cm$ ;

$V_a$  - volumul asperității în  $cm^3$ ;

$K_4$  - temperatura de topire a materialului obiectului în  $^{\circ}C$ ;

$C$  - căldura specifică a obiectului în  $J/kg^{\circ}K$ ;

$t_0$  - durata unui impuls în s.

Masa totală de material erodat din anod în unitate de timp ( $M$ ) conform ecuației (4.1) se poate descompune după [81] în următoarele componente:

$$M = M_{da} + M_{be} + M_j \quad (4.2)$$

unde:

$M_{da}$  - este cantitatea de material erodată datorită dizolvării anodice;

$$M_{da} = K_1 j S \quad (4.3)$$

$M_{be}$  - este cantitatea de material erodată datorită bombardamentului electronic;

$M_j$  - este cantitatea de material prelevată datorită efectului Joule Lens

Aceste ecuații reprezintă o corelație între principalii parametri ce condiționează procesul de prelucrare.

Încercările experimentale au confirmat în mare măsură majoritatea ipotezelor care au stat la baza determinării ecuației [44, 45, 46, 56, 51, 52, 59, 77, 94].

O serie de cercetări au fost elaborate în domeniul influenței:

-parametrilor electrici - tensiune, curent, densitate de curent [25, 27, 31, 49, 50, 51, 74, 81, 96, 127, 128, 129, 130];

-lichidului de lucru - debit, densitate, modul [5, 27, 42, 68, 70, 72, 77, 82, 94, 95, 96, 119, 135];

-presiunii dintre electrozi [27, 45, 50, 76];

-vitezei relative dintre electrod și obiect [27, 51, 94, 106];

-naturii materialului electrodului [74, 76, 106];

-naturii materialelor obiectului [55, 65, 74, 76].

Problemele legate de intensificarea prelucrării au rămas limitate la studiul influenței unui număr relativ redus de parametri. Experimental s-a demonstrat că majorarea productivității procesului de eroziune se poate obține și prin alegerea unui sistem adecvat de reglare și stabilizare a interstițiului de lucru. Sistemele propuse în baza acestor cercetări asigură regle-

rea automată comandată fie de mărimea curentului fie de mărimea tensiunii pe spațiul de lucru, iar unele sisteme asigură o autoreglare a avansului [79].

O eficiență economică mai ridicată a prelucrării prin eroziune complexă presupune o rugozitate corespunzătoare a suprafeței, o precizie de prelucrare ridicată, o anumită grosime a stratului modificat termic și o adâncime minimă a microfisurilor în stratul de suprafață prelucrat, în special la materialele casante.

Cercetarea raportului cantitativ al prelevării de material prin eroziune electro-chimică și prin eroziune electrică, a fost dezvoltată la catedra de tehnologia materialelor de la facultatea de mecanică a IPTVT [106].

Relația finală obținută pentru determinarea cantității de material prelevat prin dizolvarea anodică, este:

$$m_t = K I t S \frac{l}{R_z \cdot 10^{-3}} \cdot 10^{-3} = K C S \frac{l}{R_z} \quad (4.4)$$

în care:

- $m_t$  - cantitatea de metal adus în stare ionică ca urmare a acțiunii electrochimice a curentului;
- K - coeficient de proporționalitate în mg/As, este echivalentul electrochimic al substanței (cantitatea de metal dizolvată la anod la trecerea unui curent de 1 A timp de 1 s adică 1 C)

$$K = \frac{A}{z \cdot F}$$

A - greutatea atomică a elementului supus dizolvării;

F = 96.500 C, constanta lui Faraday;

I - intensitatea curentului în A ;

t - timpul în s ;

S - suprafața supusă dizolvării în cm<sup>2</sup>;

l - spațiul parcurs de electrodul sculă sau piesă în timpul prelucrării în mm;

R<sub>z</sub> - mărimea asperităților în μm.

Se observă că raportul  $\frac{I}{R_s}$  reprezintă numărul  $\underline{n}$  de straturi de cite ori suprafața de prelucrare se reproduce.  
 $C = I \cdot t$  cantitatea de electricitate în C/cm<sup>2</sup> determinată de diagrame corespunzătoare a tensiunii de lucru.

Dacă  $Q_t$  este cantitatea totală de material erodat în g, datorită ambelor fenomene, atunci cantitatea de material erodat  $Q_g$  ca urmare a acțiunii termice a descărcărilor electrice va fi dată de relația:

$$Q_g = Q_t - m_t \quad (4.5)$$

Repartul dintre  $m_t$  și  $Q_t$  este coeficientul de participare al componentei de dizolvare  $K_d$  la erodarea de material.

$$K_d \cdot Q_g = \frac{m_t}{Q_t} \text{ lee} \quad (4.6)$$

Cantitatea de material ce poate fi erodată prin dizolvarea anodică în raport cu cea erodată prin scintei pentru 10...350 A și 10...30 V, este de cca 2...16%.

#### 4.2.-Sistemul energetic sursă-circuit-spațiu de lucru (SCSL)

La prelucrarea prin eroziune complexă electrică-electrochimică există o legătură între sistemul energetic sursă-circuit-spațiu de lucru (SCSL) și fenomenele din proces. Descărcările electrice și acțiunea de dizolvare anodică este determinată de interdependentele locale din spațiul de lucru (SL), iar energia repartizată între electrod și obiect are la bază procesele termice și electrochimice produse de ambii electrozi.

Intensitatea procesului de eroziune depinde de parametrii impulsurilor (formă, durată, amplitudine, energie etc) iar topirea stratului superficial poate fi asigurată și de o cantitate mai mică de energie, dacă aceasta se transmite într-un timp foarte scurt pe o suprafață relativ mică preferențial la nivelul microasperităților.

Prin creșterea concentrației de ioni și electroni se creiază posibilitatea ionizării spațiului de lucru respectiv se favorizează descărcările electrice prin străpungerea peliculei pasivante.

Caracteristicile electrice ale spațiului de lucru sînt determinate de parametrii impulsurilor influențate de caracteristicile electrice ale sursei și ale circuitului de lucru. Durata, amplitudinea și puterea impulsurilor pot fi modificate de condițiile termo-fizico-chimice din spațiul de lucru, condiții influențate sensibil de viteza relativă dintre electrozi și de parametrii circuitelor de lucru. Intensitatea procesului scade cu atît mai mult cu cît parametrii impulsurilor de curent și tensiune se apropie de parametrii descărcărilor în arc.

Studiul caracteristicilor electrice ale circuitului de lucru prezintă o importanță deosebită din următoarele puncte de vedere:

- crearea condițiilor favorabile în zona de interacțiune, electrod obiect, pentru eliminarea sau cel puțin diminuarea fenomenelor nedorite;
- stabilirea posibilităților de reglare a parametrilor tehnologici finali (productivitate, rugozitatea suprafeței, stratul modificat) prin modificarea caracteristicilor electrice ale circuitului de lucru care influențează variația tensiunii și a curentului.

#### 4.3.-Schema electrică echivalentă a sistemului SCSL

În figura 4.1 se prezintă schema electrică echivalentă a sistemului SCSL cu sursă redresor trifazat.

După cum se observă, caracterul circuitului de lucru poate fi modificat prin R, L, C reglabile în limitele (vezi cap.5):

$$R = 0. \dots 1,387 \text{ ohmi}$$

$$L = 0. \dots 8,5 \text{ mH}$$

$$C = 0. \dots (50.050 + 992) \mu\text{F}$$

Se observă că deși R este reglabil în limitele indicate, la experimentări s-au folosit limitele  $R = 0,05 \dots 0,15$  ohmi, rezistența fiind un consumator care duce la scăderea randamentului prelucrării.

În schema electrică echivalentă [106], spațiul de lucru (discul electrod-obiect) este reprezentat în final prin impedanța sa echivalentă Z, deoarece variațiile tensiunii și curentului pe spațiul de lucru, depind de caracteristicile electrice ale acestuia.

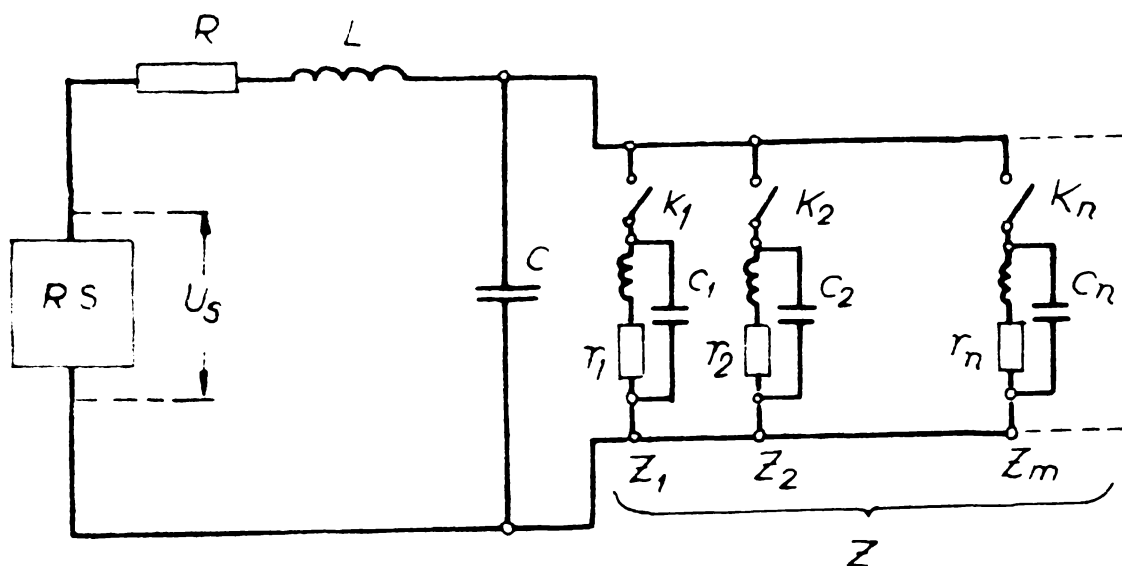


Fig.4.1.-Schema electrică echivalentă a sistemului SCSL la prelucrarea prin eroziune complexă electrică-electrochimică cu sursa un redresor trifazat; RS-redresor trifazat;  $U_s$ -tensiunea sursei; R, L, C - rezistența, inductivitatea și capacitatea bateriei de condensatoare reglabile ale circuitului de alimentare;  $K_1 \dots K_n$ -contacte elementare;  $Z_1 \dots Z_m$  impedanțele circuitelor descărcărilor singulare; Z-impedanța totală a sistemului electrodisco-obiect de tăiere;  $r_1 \dots r_n$ ;  $L_1 \dots L_n$ ;  $C_1 \dots C_n$ -rezistențele, inductivitățile și capacitățile circuitelor singulare de descărcare

Impedanța echivalentă Z, a spațiului de lucru este o urmare a generării a  $n$  impulsuri electrice nedirijate ce apar la ruperea contactelor metalice parcurse de curent la nivelul microasperităților între electrodul disc și obiect, circuitele electrice singulare fiind reprezentate de  $K_1 r_1 L_1 C_1 \dots K_n r_n L_n C_n$ .

Contactele elementare  $K_1 \dots K_n$  se închid și se deschid la întâmplare, cu un anumit grad de simultaneitate, reprezentînd modul de generare a impulsurilor electrice în spațiul de lucru, cu frecvența de ordinul  $10^3 \dots 10^4$  Hz. Parametrii acestor impulsuri sînt funcție de constantele de timp a circuitului de lucru, respectiv de valorile reglabile ale lui R, L, C.

Descărcările elementare producîndu-se în condiții fizico-chimice diferite, în puncte din spațiul de lucru diferite, evident și impedanțele  $Z_1 \dots Z_n$  vor fi diferite.



$$Z_1 \neq Z_2 \neq Z_3 \neq \dots \neq Z_n$$

Luind în considerație modul de generare a impulsurilor prin ruperea microcontactelor rezultă că circuitul unei descărcări are o impedanță de natură rezistivă ( $Z_1=r_1$ ;  $Z_2=r_2$ ; ... ..  $Z_n=r_n$ ), variabilă în timp, pentru calcul putîndu-se folosi medie statistică a valorii tuturor impedanțelor singulare.

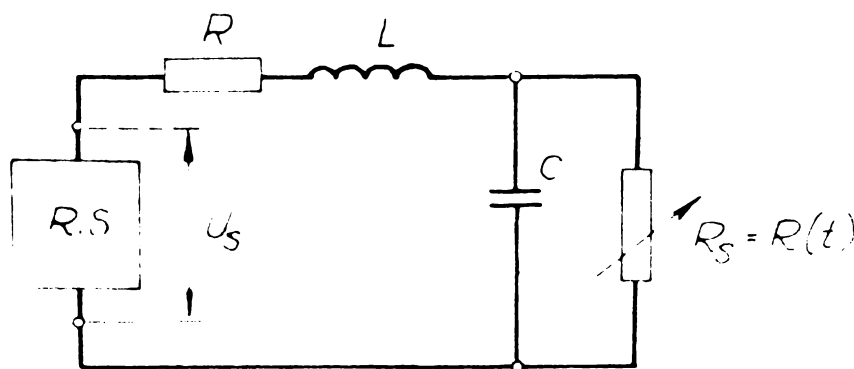
Considerentele de mai sus arată că schema echivalentă a unui circuit electric la prelucrarea prin eroziune complexă electrică-electrochimică se poate esimila cu schema unui circuit în care spațiul de lucru este o rezistență variabilă aleatoare funcție de timp.

$$R_s = R(t)$$

$R(t)$ , se poate considera ca o mărime aproximativ periodică conținînd diferite armonici și inclusiv o valoare medie, iar circuitul care conține  $R(t)$  poate fi considerat ca un circuit electric cu parametru variabil în timp. Se poate admite pentru simplificarea calculelor [51, 88, 106] o variație sinusoidală pentru  $R_s$  de forma:

$$R_s = R(t) = R_0(1-K \cdot \sin \omega t) \quad \text{unde } K < 1 \quad (4.7)$$

Schema electrică echivalentă se simplifică în acest caz conform figurii 4.2:



$U_s$ -tensiunea sursei;  
 $R_s$ -reducer trifazat;  
 $R, L, C$ -rezistența, inductivitatea, capacitatea bateriei de condensatoare a circuitului reglabil;  
 $R_s$ -rezistența electrică a spațiului de lucru variabilă sinusoidal

Fig.4.2.-Schema electrică echivalentă simplificată a sistemului SCSL prin eroziune complexă electrică-electrochimică

Intrucit în circuitul reprezentat în figura 4.2, R și L sînt în serie, iar C în derivație, pentru a ușura studiul circuitului acesta se modifică într-o altă variantă de schemă echivalentă în care R, L, C să fie legate în serie.

Impedanța echivalentă  $R_e(t)$  și  $C_e$  pentru partea de circuit unde C și  $R(t)$  sînt în derivație (figura 4.3) se determină după cum urmează:

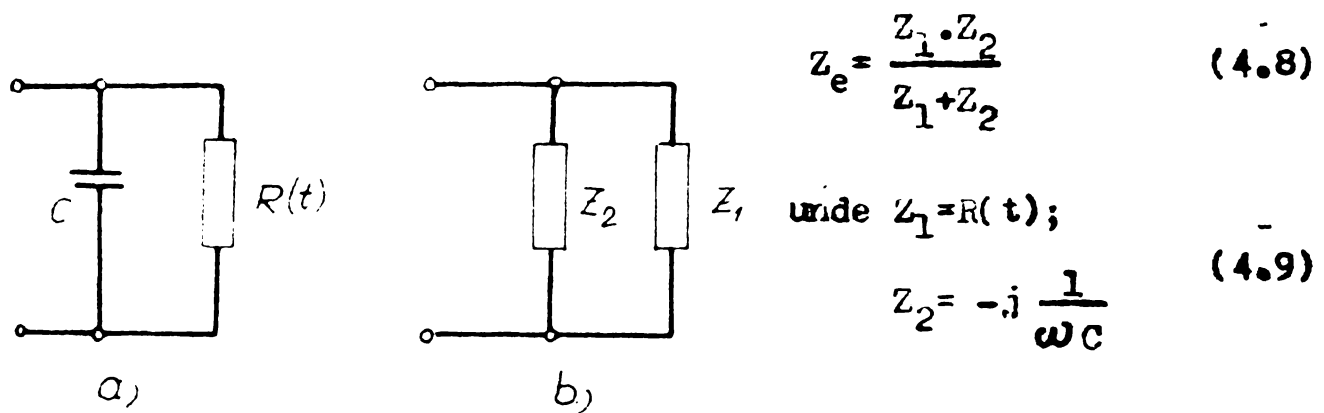


Fig.4.3.-Scheme pentru calculul echivalentei impedanțelor  $Z_1$  și  $Z_2$  în derivație [loc]

$$Z_e = \frac{-j R(t) \frac{1}{\omega C}}{R(t) - j \frac{1}{\omega C}} = \frac{-j R(t) \frac{1}{\omega C} [R(t) + j \frac{1}{\omega C}]}{R^2(t) + (\frac{1}{\omega C})^2} = \frac{R(t) (\frac{1}{\omega C})^2}{R^2(t) + (\frac{1}{\omega C})^2} + j \frac{[R^2(t) \frac{1}{\omega C}]}{R^2(t) + (\frac{1}{\omega C})^2} = P_e(t) + j(X_e) \quad (4.10)$$

unde:

$$R_e(t) = \frac{R(t) (\frac{1}{\omega C})^2}{R^2(t) + (\frac{1}{\omega C})^2} \quad (4.11)$$

$$X_e = - \frac{R^2(t) \frac{1}{\omega C}}{R^2(t) + \frac{1}{\omega C}}$$

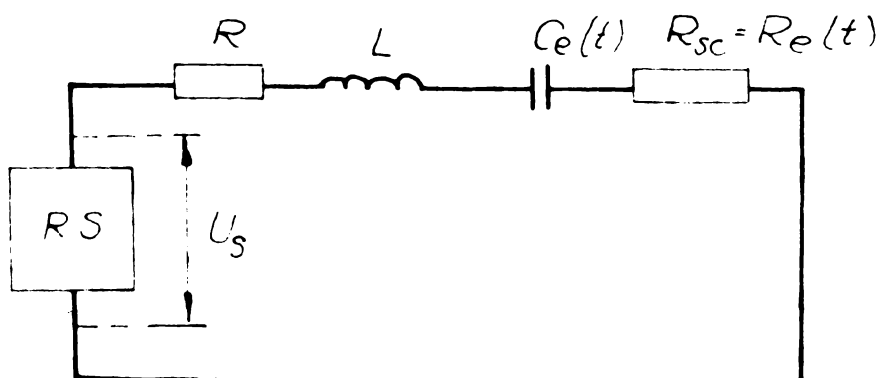
$R_e(t)$  este o rezistență echivalentă funcție de timp, iar  $X_e$  este o reactanță funcție de timp.

$$X_e = - \frac{1}{\omega C_e} = - \frac{R^2(t) \frac{1}{\omega L}}{R^2(t) + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2} \quad (4.12)$$

de unde  $C_e$  va fi de asemenea o funcție de timp.

$$C_e = \frac{R^2(t) + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}{R^2(t) \frac{1}{\omega L}} \quad (4.13)$$

Schema electrică echivalentă a circuitului electric la prelucrarea prin eroziune complexă electrică-electrochimică este prezentată în figura 4.4



$R_s$  - redresor trifazat;  $U_s$  - tensiunea sursei;  $R, L$  - rezistența și inductivitatea reglabile;  $R_{sc} = R_e(t)$  - rezistența echivalentă variabilă în timp;  $C_e(t)$  - capacitatea echivalentă reglabilă

Fig.4.4.-Schema electrică echivalentă a circuitului de lucru la prelucrarea prin eroziune complexă electrică electrochimică

Ecuația diferențială pentru circuitul din figura 4.4. este de forma:

$$U_s = L \frac{di}{dt} + [R(t) + R_e(t)] i(t) + \frac{1}{C_e(t)} \int i(t) dt \quad (4.14)$$

Această ecuație este dificil de rezolvat din cauza termenului  $C_e(t)$  care este funcție de timp.

În cele ce urmează se va analiza variația tensiunii și a curentului pentru două cazuri mai simple [100]:

cazul  $R=L=C=0$ ; adică un circuit numai cu rezistență parametrică și,  
cazul  $R=C=0$ ;  $L \neq 0$ ; adică un circuit cu rezistență parametrică și inductivitate.

In primul caz:  $U_s = R(t) \cdot i(t)$

$$i(t) = \frac{U_s}{R(t)} \quad (4.15)$$

unde,  $R_t = R_0(1 - k \sin \omega t)$

$$i(t) = \frac{U_s}{R_0(1 - k \sin \omega t)} = \frac{U_s}{R_0} \frac{1}{1 - k \sin \omega t} \quad (4.16)$$

respectiv:

$$\frac{i(t)}{\frac{U_s}{R_0}} = \frac{1}{1 - k \sin \omega t} \quad (4.17)$$

Relația de mai sus este de forma  $\frac{1}{1-x}$  care pentru  $|x| < 1$  se poate dezvolta în serie:

$$\frac{1}{1-x} = 1 + x + x^2 + x^3 + \dots + x^n \quad (4.18)$$

Prin analogie relația (4.17) se poate scrie sub forma:

$$\frac{i(t)}{\frac{U_s}{R_0}} = 1 + k \sin \omega t + k^2 \sin^2 \omega t + \dots \quad (4.19)$$

Cu ajutorul relațiilor trigonometrice se face transformarea expresiilor sinusurilor la diferite puteri și înlocuind expresiile acestor transformări în dezvoltarea în serie din relația (4.19) și ordonând termenii se obține pentru variația lui  $i$  în circuit, o relație de forma:

$$\begin{aligned} \frac{i(t)}{\frac{U_s}{R_0}} &= (1 + \frac{k^2}{2} + \frac{3k^4}{8} + \dots) + (k + \frac{k^3}{4} + \dots) \sin \omega t - \\ &- (\frac{k^2}{2} + \frac{k^4}{2} + \dots) \cos 2\omega t - (\frac{k^3}{4} + \dots) \sin 3\omega t + \\ &+ (\frac{k^4}{8} + \dots) \cos 4\omega t \end{aligned} \quad (4.20)$$

$$\frac{i(t)}{\frac{U_s}{R_0}} = A_1 + A_2 \sin \omega t - A_3 \cos 2\omega t - A_4 \sin 3\omega t + \dots \quad (4.21)$$

Din relația de mai sus rezultă că pentru cazul studiat, curentul pe spațiul de lucru este format dintr-o componentă constantă  $A_1$ , la care se adună și se scad componente variabile sinusoidal cu frecvența de un anumit ordin. Deși tensiunea sursei  $U_s$  este constantă, curentul din circuit are pe lângă componenta continuă, componente periodice. Componenta continuă și amplitudinea armonicilor depind neliniar de  $K$  ( $K$  la diferite puteri) și liniar de  $U_s$ .

În al doilea caz  $R=C=0$ ;  $L \neq 0$ ; ecuația circuitului este:

$$U_s = L \frac{di}{dt} + (R - K \sin \omega t) i(t) \quad \text{unde } R = R_0 + r_i \quad \text{și}$$

$$R_0 K = K'$$

sau

$$U_s = L \frac{di}{dt} + R \left(1 - \frac{K'}{R} \sin \omega t\right) i(t) \quad (4.22)$$

Dacă notăm  $\frac{K'}{R} = -m$ ; se obține ecuația:

$$U_s = L \frac{di}{dt} + R(1+m \sin \omega t) i(t) \quad (4.23)$$

unde  $0 < |m| < 1$  iar  $L = \text{constant}$

Ecuația (4.23) se pune sub formă:

$$\frac{U_s}{L} = \frac{di}{dt} + a(1+m \sin \omega t) i(t) \quad (4.24)$$

unde,  $a = \frac{R}{L}$

Ecuația (4.24) se poate scrie sub formă generală:

$$\frac{di}{dt} + f_1(t) i + f_2(t) \quad (4.25)$$

unde:  $f_1(t) = a(1+m \sin \omega t)$ ;  $f_2(t) = -\frac{U_s}{L}$ ;  $a = \frac{R}{L}$ ;

$f_2(t)$  de fapt nu este o funcție de timp ci o constantă notată ca artificioasă de calcul cu  $f_2(t)$ .

Ecuația diferențială (4.25) admite o soluție de forma:

$$y = e^{-\int f_2(x) dx} \left[ C_1 - f_2(x) e^{\int f_1(x) dx} dx \right] \quad (4.26)$$

respectiv

$$y = e^{-\int f_1(t) dt} \left[ C_1 - f_2(t) e^{\int f_1(t) dt} dt \right] \quad (4.27)$$

Rezolvarea ecuației (4.25) dă în final pentru variația curentului în spațiul de lucru o funcție de forma:

$$i(t) = \left[ I_0\left(\frac{aM}{\omega}\right) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} I_n\left(\frac{aM}{\omega}\right) \cos n\omega t \right] \left\{ C_1 e^{-at} + \frac{U}{L} \left[ \frac{1}{s} I_0\left(\frac{-aM}{\omega}\right) + 2 \sum_{p=1}^{\infty} I_p\left(\frac{-aM}{\omega}\right) A_p \cos(p\omega t - \varphi_p) \right] \right\} \quad (4.28)$$

unde,  $I_0$ ,  $I_n$ ,  $I_p$  sînt funcții Bessel de argument  $\frac{aM}{\omega}$  sau  $-\frac{aM}{\omega}$

$$a = -\frac{R \cdot K}{R}; \quad s = \frac{R}{L}; \quad A_p = \frac{1}{\sqrt{s^2 + p^2 \omega^2}}$$

Se menționează că  $I_0(x) = I_0(-x)$  respectiv

$$I_0\left(\frac{aM}{\omega}\right) = I_0\left(-\frac{aM}{\omega}\right)$$

Variația tensiunii pe spațiul de lucru  $u(t)$  poate fi exprimată prin relația:

$$u(t) = i(t) \cdot R(t) \quad (4.29)$$

Înlocuind  $i(t)$  și  $R(t)$  cu expresiile corespunzătoare se poate deduce ecuația variației tensiunii pe spațiul de lucru la circuite parametrice cu  $L = \text{constant}$ . Tensiunea pe spațiul de lucru este variabilă indiferent de forma de variație a curentului.

#### 4.4.-Geometria zonei de interacțiune electrod-obiect

Forma geometrică și dimensiunile electrodului și obiectului supus eroziunii modifică condițiile de desfășurare a procesului respectiv condițiile de prelucrare prin modificarea parametrilor electrice (tensiune, curent, densitate de curent etc) și mecanici ai procesului de eroziune (presiune, etc).

Suprafața zonei de interacțiune electrod-obiect joacă un rol important în distribuția puterii specifice din spațiul de lucru respectiv productivității prelucrării precum și asupra altor parametri tehnologici finali [106].

Dacă se notează cu:

$V$  - volumul de material prelevat în  $\text{cm}^3$ ;

$W_m$  - energia electrică medie introdusă în spațiul de lucru în Joule;

$Q$  - productivitatea prelucrării în  $\text{mm}^3/\text{min}$ ;

$j$  - densitatea curentului electric în  $\text{A}/\text{mm}^2$ ;

$P_s$  - puterea electrică medie specifică introdusă în spațiul de lucru;

$P_m$  - puterea electrică medie introdusă în spațiul de lucru;

$S$  - suprafața de prelucrare în  $\text{mm}^2$ ;

$U_m, I_m$  - valorile medii ale tensiunii curentului în spațiul de lucru în  $V$  respectiv în  $A$ .

Se poate scrie [106]:

$$V = f(W_m) \quad (4.30)$$

$$Q = f(P_m) \quad (4.31)$$

$$Q = f\left(\frac{I}{S}\right) = f(j) \quad (4.32)$$

$$P_s = \frac{P_m}{S} = \frac{U_m \cdot I_m}{S} = U_m \cdot j \quad (4.33)$$

Una din mărimile specifice ale procesului de prelucrare prin eroziune este cantitatea de energie necesară prelevării unității de volum din materialul colectului ( $W_u$ ) respectiv coeficientul de utilizare al energiei electrice în procesul de prelucrare.

$$W_u = \frac{W_m}{V} \quad (4.34)$$

Suprafața de interacțiune în cazul pieselor circulare este variabilă după diametru. Valoarea maximă a acestei suprafețe este la centrul piesei. Fracție se ia în considerare un

Zona de interacțiune electrod-obiect la diferite variante de tăiere complexă electrică-electrochimică

TABELUL 4.1.

	$l = \frac{\pi \cdot n \cdot \varphi^0}{360} ; b_t = b + 2b_0$ $S_{ti} = l \cdot b = \frac{\pi \cdot n \cdot \varphi^0}{360} \cdot b$ $\varphi^0 = 2 \arcsin \frac{d}{D}$ $S_{ei} = \frac{\pi^2 \cdot D \cdot \varphi^0}{720} (b + 2b_0)$
	$\varphi = 2 \arcsin \frac{a}{D}$ $\varphi^0 = \text{constant in timpul prelucrării}$ $S_{ei} = \frac{\pi^2 \cdot D \cdot \varphi^0}{720} (b + 2b_0)$
	$S_{ei} = \frac{\pi \cdot d \cdot b_t}{2} ; b_t = b + 2b_0$ $S_{ai} = \frac{\pi \cdot d_m \cdot (b + 2b_0)}{2}$
	$S_{ei} = \frac{\pi \cdot a \cdot b_t}{2} ; b_t = b + 2b_0$ $S_{ai} = \frac{\pi \cdot a \cdot (b + 2b_0)}{2}$
	$S_{ei} = \frac{\pi \cdot \delta \cdot d_m}{2}$
	$S_{ei} = \frac{\pi \cdot \delta \cdot a}{2}$

$l$  - lungimea arcului de contact în mm

$S_{ti}$  - suprafață teoretică de interacțiune

$S_{ei}$  - suprafață activă de interacțiune



diamentru  $d_m$  mediu echivalent [73].

Suprafețele teoretice și active de interacțiune pentru diferite variante de electrod-obiect, respectiv valorile lui  $\ell$ ,  $b_t$  și  $\gamma$  sînt prezentate în schițele și relațiile din tabele 4.1.

La varianta electrod disc-piesă dreptunghiulară, unghiul  $\gamma$  se determină înlocuind diamentrul  $d_m$  cu latura de contact  $a$ .

Unghiul  $\gamma$  rămîne constant în timpul prelucrării la piesele dreptunghiulare și variază în limitele  $0 - \gamma_{max} - 0$  la piesele de secțiune circulară.

Analizînd variantele prezentate în tabela 4.1, se pot trage următoarele concluzii [106]:

- Utilizarea electrozilor bandă este mai avantajoasă deoarece lățimea benzii este de obicei mai mică decît diamentrul piesei și astfel suprafața laterală de contact parazită este mai mică, ceea ce duce la creșterea coeficientului de utilizare al energiei electrice;
- Deaceiași accesul în zona de lucru a lichidului este mai bun, deoarece zona de interacțiune nu variază și este liniară;
- Utilizarea electrozilor filiformi prezintă avantajul că frecarea laterală este minimă și astfel majoritatea puterii introduse în spațiul de lucru este folosită pe suprafața activă de tăiere și deci crește coeficientul de utilizare al energiei electrice;
- Forma geometrică a suprafeței de interacțiune electrod-obiect influențează puterea specifică introdusă în spațiul de lucru, accesul lichidului de lucru în zona de prelucrare și condițiile de evacuare a produselor respectiv valorile parametrilor tehnologici finali.

#### 4.5.-Flux termic la prelucrarea prin eroziune complexă electrică-electrochimică

Fluxul termic preluat de obiectul supus prelucrării prin eroziune complexă electrică-electrochimică este prezentat în figura 4.5.

Fluxul termic se datorează căldurii dezvoltate prin ruperea microcontactelor la nivelul microasperităților ( $Q_1$ ) și căldurii datorată unor descărcări singulare rezultate ca o urmare a străpungerii peliculei pasivante sau a contactelor sculă- electrod a piesă electrod ( $Q_2$ ) [67, 69, 81].

Modificările de structură în zona influențată termic (ZIT) și eventualele microfisuri se datoresc lui  $Q_2$ .  $Q_2$  este influențat

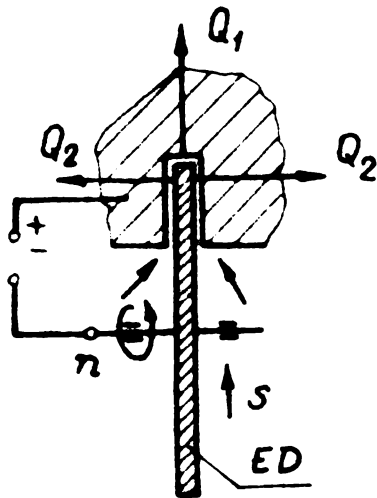


Fig.4.5.-Flux termic la prelucrarea prin eroziune complexă electrică-electrochimică:  $Q_1$ -căldura dezvoltată ca urmare a rușilor de microcontacte la nivelul microasperităților;  $Q_2$ -căldura datorată unor descărcări parazite; O-obiectul de prelucrat; ED-electrod disc

de regimul de lucru (tensiune, curent etc), lichidul de lucru (cantitate, temperatură, calitate, viteza de circulație etc) și caracteristicile termofizice ale materialului obiectului de prelucrat.  $Q_2$  este de asemenea influențat și de precizia sistemului de avans care depinde de construcția mașinii.

Dacă un corp omogen și izotrop este supus unei surse instantanee punctiforme de intensitate  $Q$ , atunci câmpul termic care va apărea va fi determinat de relația:

$$T(r, \tau) = \frac{Q}{C \cdot \rho (4\pi a \tau)^{3/2}} e^{-\frac{r^2}{4a\tau}} \quad (4.35)$$

Pentru  $r=x$

$$T(x, \tau) = \frac{Q}{C \cdot \rho (4\pi a \tau)^{3/2}} e^{-\frac{x^2}{4a\tau}} \quad (4.36)$$

unde:

$T$  - temperatura într-un punct al câmpului termic  $^{\circ}K$  ;

$x$  - vectorul de poziție, cu originea în punctul de aplicare a sursei (mm);

$\tau$  - timpul cît sursa exercită efectul de încălzire(s) ;

$Q$  - intensitatea sursei J ;

$C$  - căldura specifică  $J/kg^{\circ}K$

$\rho$  - masa specifică  $kg/m^3$

$a$  - coeficient de difuzie termică

Admițind că valorile constantelor termofizice  $Q$  și  $T$  rămân neschimbate  $Q=const.$  și  $\tau=const.$ , va rezulta în final o relație simplă:

$$T = f(x) \quad (4.37)$$

In realitate intensitatea sursei ( $Q$ ) nu este constantă, fiindcă în special descărcările laterale nu sînt constante. In acest caz se admite o variație aleatorie a lui  $Q$  după următoarea relație:

$$Q = Q_0(1 - k \sin \omega t) \quad (4.38)$$

pentru  $k < 1$

analogic, timpul cît surse exercită efectul de încălzire va fi:

$$\tilde{t} = \tilde{t}_0(1 - k \sin \omega t) \quad (4.39)$$

pentru  $k < 1$

Timpul  $T$  se referă la începutul debitării.

$\tilde{t}$  - timpul minim de existență al arcului electric;

$Q_0$  - intensitatea sursei cedată în timpul  $\tilde{t}_0$ .

Cu aceste condiții  $T(x, \tilde{t}) \rightarrow T(x, t)$  adică:

$$T(x, t) = \frac{Q_0(1 - k \sin \omega t)}{C \cdot T [4\pi a \tilde{t}_0(1 - k \sin \omega t)]^{5/2}} \cdot \frac{x^2}{4s\tilde{t}_0(1 - k \sin \omega t)} \quad (4.40)$$

Experimental s-a demonstrat că zona influențată termic este mare la regimuri dure și la circuite de lucru cu caracter capacitiv cînd descărcările în spațiul de lucru sînt mai active.

Spururile termice datorită descărcărilor în spațiul de lucru rîdit intensiv de electrolit, sînt de obicei complexe cele mai importante ale formării microstructurilor.

#### 4.1. Probleme de stabilitate ale procesului de tăiere

Funcționarea stabilă a sistemului energetic CCU este o problemă de o deosebită importanță atît din punct de vedere al menținerii regimului stabil de tăiere cît și pentru reglarea și concepția utilajului.

Există două categorii de factori care determină stabilitatea procesului de tăiere prin eroziune electrică-electrochimică.

Prima categorie cuprinde condițiile în care se desfășoară procesele electrice, chimice și termice în spațiul de lucru de tăiere.

A doua categorie se referă la caracteristicile circuitului electric format din sursa de curent și RLC reglabil.

4.6.1.-Forma generală clasică a condițiilor de stabilitate a unui sistem energetic care cuprinde sub o variantă oarecare arcul electric [177] derivă din corelația ce trebuie să existe între forma caracteristicii externe a sursei de alimentare cu curent, cu forma caracteristicii statice a sumei arcelor electrice elementare care se formează în cazul nostru în spațiul de lucru în cursul procesului de tăiere.

Pornind de la relația echilibrului dinamic al sistemului SCSL pentru ca sistemul să fie stabil este necesar să fie îndeplinite următoarele condiții:

$$L > 0 \quad (4.41)$$

$$\frac{\partial U_a}{\partial I} - \frac{\partial U_s}{\partial I} > 0 \quad (4.42)$$

unde:  $U_a$  - tensiunea în spațiul de lucru de tăiere în V;

$U_s$  - tensiunea sursei de curent în V;

$L$  - inductanța sursei de alimentare și a celei suplimentare;

$I$  - intensitatea curentului în A;

$\frac{\partial U_a}{\partial I} = R_{SL}$  rezistența dinamică a spațiului de lucru în ohmi;

$\frac{\partial U_s}{\partial I} = R_S$  rezistența dinamică a sursei de alimentare în ohmi.

Condiția  $L_s > 0$  se realizează ușor și fără inductanțe suplimentare la surse de alimentare cu inerție magnetică (generatoare de c.c. rotative). În cazul alimentării circuitului de la o sursă redresor trifazat pentru asigurarea  $L_s > 0$ , este de obicei necesar să se prevadă o inductanță suplimentară, o bobină cu inductanță variabilă.

Pentru un regim dat relația (4.42) poate fi scrisă sub forma:

$$K_s = \frac{\partial U_a}{\partial I} - \frac{\partial U_s}{\partial I} > 0 \quad (4.43)$$

este condiția stabilității statice, unde  $K_s$  este numit coeficientul de stabilitate.

Se observă că pentru caracteristica externă a sursei rigide sau puțin urcătoare ( $\frac{\partial U_s}{\partial I} \approx 0$ ) și caracteristicile statice ale arcelor electrice elementare în spațiul de lucru, urcătoare ( $\frac{\partial U_a}{\partial I} > 0$ ) condiția exprimată prin relația (4.43) este totdeauna îndeplinită.

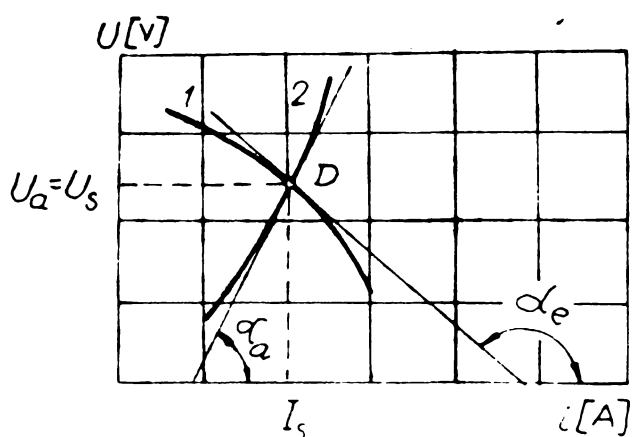


Fig. 4.6. - Reprezentarea grafică a elementelor coeficientului de stabilitate

Dacă ne referim la figure 4.6 relația (4.43) poate fi scrisă sub forma:

$$K_s = \operatorname{tg} \alpha_a - \operatorname{tg} \alpha_s > 0 \quad (4.44)$$

mai ușor aplicativă în practică.

Deci sistemul este stabil, dacă diferența derivatelor (4.43) caracteristicii statice externe a arcului electric format în spațiul de lucru și a caracteristicii externe a sursei

de alimentare cu curent, în punctul de funcționare analizat, numită coeficientul de stabilitate  $K_s$ , este pozitivă.

În limitele posibile de variație a parametrilor care determină forma caracteristicii statice a consumatorului energetic, acesta posedă o familie de caracteristici statice. Fiecare din ele corespunde diferitelor valori ale aceluiași parametru.

În cazul existenței unui regulator, acesta acționează asupra obiectului reglat și realizează astfel formarea caracteristicii lui statice, înlocuind familia de caracteristici statice posibile ale parametrului printr-o caracteristică statică complexă, pentru valori impuse de regulator pentru acel parametru. Această caracteristică statică "automată" a sistemului este de fapt curbă regimurilor statice stabile menținute automat în sistem.

Coeficientul de stabilitate  $K_g$ , de fapt reprezintă rezistența dinamică a întregului sistem SCSL, iar condiția stabilității poate fi enunțată astfel: - sistemul va fi static stabil dacă rezistența dinamică exprimată prin  $K_g$ , numit coeficientul de stabilitate, va fi pozitiv [177].

Se menționează:  $K_g$  este sigur pozitiv pentru:

- surse de alimentare - generatoare de c.e. cu excitația independentă;
- surse de alimentare - redresoare avînd în circuit o inductanță suplimentară reglabilă.

Se mai menționează: condiția  $K_g > 0$  este necesară, dar insuficientă pentru asigurarea stabilității sistemului SCSL în condiții reale, avînd în vedere particularitățile tehnologice ale procesului de tăiere prin eroziune electrică-electrochimică.

Analizînd diagrama din figura 4.7 se observă pe oscilo

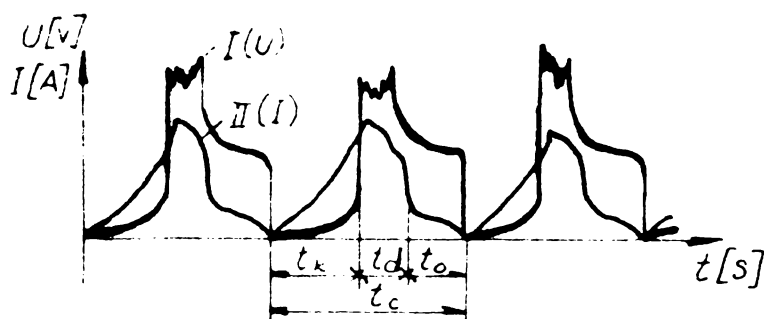


Fig.4.7.-Oscilogrammele tensiunii și intensității de curent;  $t_k$ -perioada de scurtcircuit;  $t_d$ -perioada de descărcări electrice;  $t_o$ -perioada de întrerupere a procesului electric;  $t_c$ -perioada ciclului

gramele prezentate pentru curent și tensiune, că o dată cu creșterea inductanței circuitului L se măresc  $t_d$  și  $t_k$ . Prin urmare suma ( $t_d + t_k$ ) este influențată în mare măsură de L.

Dacă L este sub valoarea minimă necesară

$L_{min}$ , atunci

$t_d + t_k < t_c$  și în

aceste condiții în fiecare ciclu al procesului de tăiere vor apărea întreruperi ale procesului electric. Durata  $t_o$  va fi:

$$t_o = t_c - (t_d + t_k) \quad (4.45)$$

Existența perioadelor de întrerupere înseamnă întreruperea procesului de tăiere, ceea ce nu este dorită atât din punct de vedere al productivității tăierii cât și din punct de vedere al rugozității suprafeței tăiate.

Condiția de stabilitate a procesului de tăiere prin eroziune electrică-electrochimică este ca  $t_0=0$ , deci:

$$t_c = t_d + t_k \quad (4.45 \text{ a})$$

Rezolvând ecuațiile:

$$U_s = I_k \cdot R + L \frac{di_k}{dt} \quad (\text{la scurtcircuitarea SL}) \quad (4.46)$$

și

$$U_s = U_a + iR + L \frac{di}{dt} \quad (4.47)$$

(la desfășurarea normală a procesului de tăiere)

în funcție de  $i_k$  și  $i$ , se obțin valorile instantanee ale curenților.

$$i_k = I_k(1 - e^{-\frac{t}{T}}) + I_{\min} e^{-\frac{t}{T}} \quad (4.48)$$

$$i = (I_k - I)(1 - e^{-\frac{t}{T}}) + I_{\max} e^{-\frac{t}{T}} \quad (4.49)$$

unde:

$$I = \frac{U_0}{R} \quad U_0 - \text{tensiunea de mers în gol a sursei în V}$$

$$I = \frac{U_a}{R} \quad U_a - \text{tensiunea la spațiul de lucru în V}$$

$$T = \frac{L}{R} \quad i_k \text{ și } i - \text{valorile instantanee ale curenților în perioadele de scurtcircuit și de descărcări electrice în A}$$

R - rezistența electrică a circuitului de sudare în ohmi

L - inductanța suplimentară în H

Din expresiile curenților se poate deduce durata perioadelor de scurtcircuit  $t_k$  și de descărcări electrice  $t_d$ .

$$t_k = T \ln \frac{I_k - I_{\min}}{I_k - I_{\max}} \quad (4.50)$$

$$t_d = T \ln \frac{(I_{\max} + I) + I_k}{(I_{\min} + I) - I_k} \quad (4.51)$$

in care:

$I_{\min}$  - intensitatea curentului la inceputul scurtcircuitelor elementare;

$I_{\max}$  - intensitatea curentului la sfirşitul scurtcircuitelor elementare;

$I_k$  - intensitatea curentului la scurtcircuit;

$I$  - intensitatea medie a curentului de tăiere;

$T$  - constanta de timp a circuitelor de sudare.

Din relaţiile (4.50), (4.51) se determină valoarea lui  $t_c$ . Valoarea minimă a constantei de timp cînd procesul se petrece la limită ( $I_{\min}=0$ ) este:

$$t_c = T_{\min} \left( \ln \frac{I_k}{I_k - I_{\max}} + \ln \frac{I_{\max} + I - I_k}{I - I_k} \right) \quad (4.52)$$

de unde:

$$\frac{T_{\min}}{t_c} = \frac{1}{\ln \frac{I_k}{I_k - I_{\max}} \left( 1 - \frac{I_{\max}}{I_k - I} \right)} \quad (4.53)$$

Dacă în primă aproximaţie se admite  $I_{\max} = 2I$  [177] relaţia poate fi scrisă sub forma:

$$\frac{T_{\min}}{t_c} = \frac{1}{\ln \frac{\beta - 1 + \alpha(1 - 2\beta)}{(1 - 2\alpha)(\alpha + \beta - 1)}} \quad (4.54)$$

unde:  $\alpha = \frac{I}{I_k}$  ;  $\beta = \frac{t_a}{t_c} = \frac{U_a}{U_s}$

Neglijînd valoarea lui  $R$ , se poate obţine expresia pentru inductanţa minimă la care curentul şi spaţiul de lucru trece fără întreruperi.

$$L_{\min} = \frac{t_c \cdot U_0}{2I} (1 - \beta) \quad (4.55)$$

Se precizează  $U_a = \frac{U_0}{\beta}$  întrucît însă  $\beta$  este totdeauna subunitar, valoarea medie a tensiunii în spaţiul de lucru este mai mare decît tensiunea de mers în gol.

Ultima relaţie se poate uşor folosi dacă se determină  $t_c$  şi  $U_a$  din oscilogramme.



Ținând cont să  $\frac{U_s}{U_0} = 0,75 \dots 0,850$  se poate admite că  
 $U_0 \approx 1,18 U_s$  și cum  $f = \frac{1}{t_c}$

$$L_{\min} = \frac{1,18 U_s}{2I \cdot f} \left(1 - \frac{U_s}{U_0}\right) \quad \text{sau}$$

$$L_{\min} = \frac{0,59 \cdot U_s}{f \cdot I} \left(1 - \frac{U_s}{U_0}\right) \quad (4.56)$$

unde:  $U_0$  - tensiunea de mers în gol a sursei în V ;

$U_s$  - tensiunea la spațiul de lucru în V ;

$U_s$  - tensiunea medie de lucru în V ;

I - intensitatea medie a curentului în A ;

$\frac{t_s}{t_c}$  - timpul relativ de desfășurare a procesului de tăiere;

$f = \frac{1}{t_c}$  frecvența de repetare a ciclului.

Relația 4.56 reprezintă condiția ce asigură trecerea continuă a curentului în spațiul de lucru electrod disc-obiect, eliminând perioadele de mers în gol. Este valoarea minimă a inductanței ce asigură ca procesul de tăiere prin eroziune electrică-electrochimică să decurgă stabil, considerând ceilalți parametri electrici și mecanici bine aleși.

În concluzie, forma generală a condițiilor de stabilitate ce cuprinde o gamă largă de procedee inclusiv cele cu impulsuri, deci și procedeul de tăiere prin eroziune electrică-electrochimică constă din următoarele relații:

$$\frac{\partial U_s}{\partial I} - \frac{\partial U_s}{\partial I} > 0$$

(4.57)

$$L_{\min} = \frac{0,59 \cdot U_s}{f \cdot I_s} \left(1 - \frac{U_s}{U_0}\right)$$

#### 4.6.2.-Ecuațiile elementelor sistemului automat de reglare a avansului electrodului sculă

În practica de concepție și proiectare, sistemele automate de reglare lineare pot fi împărțite în elemente separate simple definite prin ecuații. Împărțirea în elemente separate trebuie astfel făcută încât fiecare element să fie determinat de o singură variabilă (tensiune, curent, viteză etc). De asemenea este necesar din punct de vedere matematic ca ecuațiile diferențiale folosite să nu depășească ordinul 2.

În cele ce urmează se analizează tipurile de bază ale elementelor [28].

Pentru cel mai simplu caz, ecuația elementului de reglare are forma:

$$y = K \cdot x \quad (4.58)$$

unde:  $x$ -mărimea de intrare;  $y$ -mărimea de ieșire.

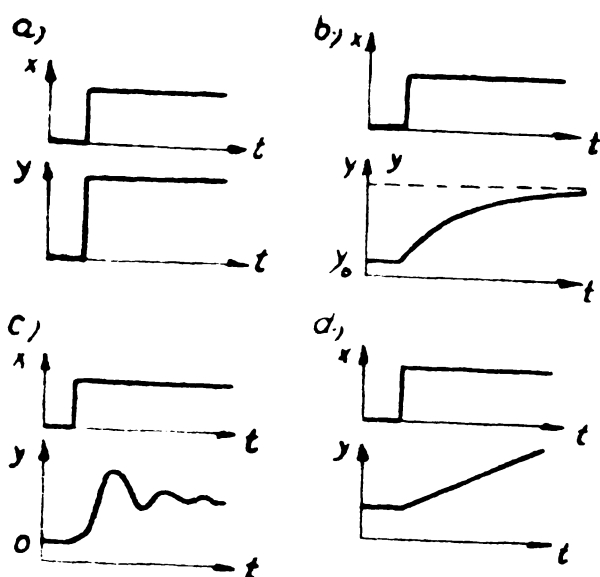


Fig.4.8.-Funcțiile de transmitere la SAR: a) verigă tip legătură statică; b) verigă aperiodică; c) verigă oscilantă; d)verigă de integrare

În acest element cu o asemenea dependență liniară, la o variație bruscă a mărimei de intrare, mărimea de ieșire se modifică fără întârziere (figura 4.8 a).

Exemple de asemenea elemente sînt: reductorul, pîrghia, un potențiomtru etc.

La elementele de legătură rapidă (elemente de diferențiere (figura 4.8b), mărimea de ieșire este proporțională cu viteza de variație a mărimei de intrare

$$y = K \frac{dx}{dt} \quad (4.59)$$

La variația în salturi a mărimei de intrare la ieșirea elementului ideal de diferențiere se obține fără întârziere un impuls de amplitudine foarte mare.

In elementele reale de diferențiere se produce o întârziere și amplitudinea obținută a impulsului de ieșire are o valoare limită. Exemple de elemente de diferențiere sînt: transformatorul, un circuit electric, etc.

La elementele aperiodice, la o variație bruscă a mărimii de intrare  $x$ , mărimea  $y$  crește o perioadă de timp după o lege exponențială și tinde spre o valoare staționară (figura 4.8 c).

Elementele aperiodice au ecuația de forma:

$$T \frac{dy}{dt} + y = Kx \quad (4.60)$$

Exemple de elemente aperiodice sînt: solenoid fără miez de fier, condensator care se înarcă printr-o rezistență activă generator de excitație independentă cu turație constantă.

In cazul regimului staționar:

$$\frac{dy}{dt} = 0 \quad \text{și} \quad K = \frac{y}{x} \quad (4.61)$$

$K$  - coeficient de amplificare.

Elementul care are ecuația de forma:

$$T^2 \frac{d^2y}{dt^2} + aT \frac{dy}{dt} + y = Kx \quad (4.62)$$

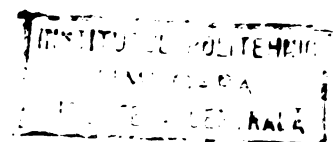
se numește element oscilator (figura 4.8, d). Coeficientul  $T$  are dimensiunea timpului fiind deci o constantă de timp.

In acest element la o variație bruscă a mărimii de intrare, mărimea de ieșire va exercita oscilații sinusoidale atenuante, ajungînd treptat la o valoare staționară sau la oscilații neatenuate.

Exemple de elemente oscilatoare sînt: rezervor care se umple cu lichid, motor electric cu excitație independentă, servomotor hidraulic.

Mărimile de intrare și ieșire a exemplelor date prin relațiile (4.58; 4.59; 4.60; 4.62) sînt indicate în tabela 4.2.

Obiectul de reglare ca și celelalte elemente ale sistemului automat de reglare este caracterizat printr-o anumită dependență funcțională între mărimea de intrare și cea de ieșire.



Exemplele elementelor de reglare a avansului electrocului sculă

Element de reglare	Ecuația elementului	Exemple	Mărimea de intrare	Mărimea de ieșire
Legătura staționațională	$y = Kx$ (4.58) (Fig. 4.8 a)	Reductor care transmite rotația de la un arbore la celălalt Pirghia Potentiometrul	Unghiul de rotație al arborelui motor Forța pe un bray Tens. sursei de curent	Unghiul de rotație al arborelui condus Forța pe celălalt bray Tensiunea la ieșire
Elemente de diferențiere	$y = K \frac{dx}{dt}$ (4.59) (Fig. 4.8 b)	Transformator Circuit electric format din condensator în serie cu o rezistență activă	Tens. pe înfășurarea primară Tensiunea pe capacitate și rezistențe	Tens. pe înfășurarea secundară Tensiunea pe rezistențe
Elemente de integrare	$T \frac{dy}{dt} + y = Kx$ (4.60) OBS. Regim staționar $\frac{dy}{dt} = 0$ . $K = \frac{Y}{X}$ (Fig. 4.8 c)	Solenoid fără miez de fier Condensator care se încarcă printr-o rezistență activă Generator excit. ind. cu n=const.	Tensiune aplicată Tensiunea sursei de curent Tensiunea pe înfășurarea de excitație	Flux magnetic Tensiunea pe condensator Tensiunea pe indus
Elemente oscilator	$T^2 \frac{d^2y}{dt^2} + aT \frac{dy}{dt} + y = Kx$ (4.62) T=constanta de timp. (Fig. 4.8 d)	Rezervor care se umple cu lichid Motor el. cu excit. ind. Servomotor hidraulic	Debitul de lichid Tensiunea pe indus Deplasarea piston de sertar	Nivelul lichidului din rezervor Unghiul de rot. indus Deplasarea piston cilindru

Pentru SAR care asigură stabilitatea interstițiului, mărimea de intrare este viteza de apropiere a electrozilor adică valoarea avansului  $V_{ae}$ , iar mărimea de ieșire, interstițiul dintre electrozi  $s$ .

Ecuația vitezei de variație a interstițiului  $s$  dintre electrozi are forma:

$$\frac{ds}{dt} = \frac{ds_e}{dt} - v_{ae} \quad (4.63)$$

unde:  $\frac{ds_e}{dt}$  - viteza uzurii totale a electrozilor în lungime (cm/s)

$v_{ae}$  - viteza de avans a electrozilor sculă în cm/s

Viteza uzurii totale a electrozilor în lungime, este funcție de viteza de prelevare a metalului de pe piesa de prelucrat, definită prin următoarea relație:

$$v_e = K_u \cdot F \frac{ds_e}{dt} \quad (4.64)$$

unde:  $v_e$  - viteza de prelevare a metalului de pe piesa de prelucrat în  $\text{cm}^3/\text{s}$ ;

$K_u$  - coeficientul adimensional de uzură a electrozilor sculă;

$F$  - suprafața secțiunii electrozilor sculă în  $\text{cm}^2$

Viteza de prelevare a metalului  $v_e$  este funcție de interstițiul  $s$ . Pentru intervale mici de variație a valorii interstițiului această funcție poate fi reprezentată în formă liniară.

$$v_e = K_2 - K_1 \cdot s \cdot \tan \alpha$$

de unde:

$$\frac{ds_e}{dt} = \frac{K_2}{K_u \cdot F} - \frac{K_1 \cdot s}{K_u \cdot F} \tan \alpha$$

$$\text{sau} \quad \frac{ds_e}{dt} = \frac{u_n}{F} - \frac{s' \cdot s}{F} \tan \alpha \quad (4.65)$$

unde:  $\alpha$  - unghiul de inclinație al tangentei la curba  $v_e = f(s)$  (figura 4.9);

$a_n$ -coeficient care depinde de materialul electrozilor, de regimul de erodare și de alți factori care influențează prelevarea materialului în  $\text{cm}^3/\text{s}$ ;

$a'$ -coeficient care depinde de aceiași factori ca și coeficientul  $a_n$ , în  $\text{cm}^2/\text{s}$ .

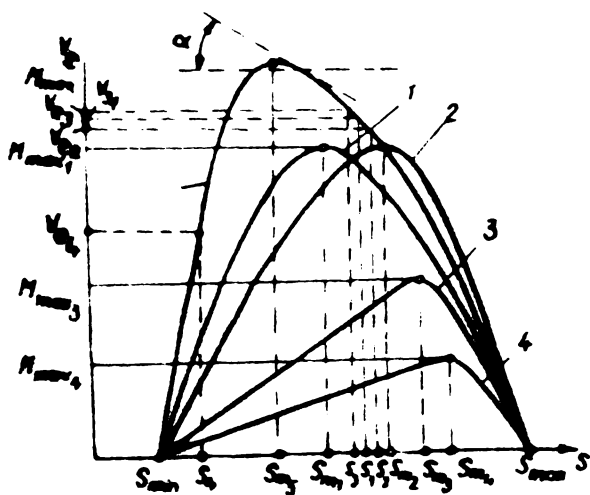


Fig.4.9. -  $v_0 = f(s)$ ; diagrama vitezei liniare de eroziune funcție de interstițiul  $s$

Din (4.63) și (4.65) se obține relație căutată de legătură funcțională dintre mărimea de intrare ( $v_{ae}$ ), viteza de avans a electrodului și mărimea de ieșire ( $s$ ) interstițiul.

$$\frac{ds}{dt} + \frac{a' \tan \alpha}{F} \cdot s - \frac{a_n}{F} = -v_{ae} \quad (4.66)$$

După cum se vede din relația (4.66) mărimea de eroziune în SAR este un element aperiodic. Rezultatul deducției matemati-

ce corespunde cu cele constatate experimental. Dacă de exemplu se mărește avansul (mărimea de intrare), tensiunea pe electrozi (mărimea de ieșire)  $U_0$  începe treptat să scadă după o lege aperiodică pînă cînd ajunge la o nouă valoare la care procesul se stabilizează din nou.

La reducerea avansului tensiunea pe electrozi începe să crească și ajungînd la o nouă valoare, rămîne constantă. Cele de mai sus sînt valabile numai pentru un anumit interval de variație a avansului, Dacă acesta depășește valoarea corespunzătoare productivității maxime la regimul ales, atunci procesul tranzitoriu se va termina prin scurtcircuitarea electrozilor.

Regulatorul care realizează avansul automat al electrodului sculă poate să fie compus din cîteva elemente. In cele ce urmează se va analiza un caz simplu frecvent întîlnit în practica regimilor de tăiere prin eroziune cînd regulatorul se compune dintr-un singur element - motor electric de c.c. cu excitație independentă.

Mărimea de intrare pentru acest element este tensiunea  $U_i$  pe indus primită de exemplu printr-o schemă în punte. Mărimea de ieșire este viteza  $n$  de rotație a indusului, proporțională cu  $v_{ae}$  avansul electrodului sculă.

Legătura între mărimile  $U_i$  și  $n$  este dată de relația:

$$n = \frac{30}{\pi} \cdot \frac{U_i - r_i \cdot i_i}{c\phi} \quad (4.67)$$

unde:

$n$  - viteza de rotație a indusului;

$U_i$  - tensiunea de alimentare a indusului motorului în gol;

$r_i$  - rezistența electrică a indusului;

$i_i$  - curentul în indus;

$\phi$  - fluxul magnetic în întrefier;

$c$  - un coeficient adimensional, proporțional cu numărul perechilor de poli, număr de spire indus și invers proporțional cu număr perechi de căi de curent din înfășurarea indusului.

În relația (4.67) intră și mărimea  $i_i$ , care depinde de momentul motor pe arborele motorului electric  $M_m$  (Joule).

$$M_m = c \cdot \phi \cdot i_i \quad (4.68)$$

În cazul mișcării nestaționare momentul  $M_m$  este determinat prin relația:

$$M_m = M_s + \xi \Theta \quad (4.69)$$

unde:  $M_s$  - momentul static pe arborele motorului reglat (Joule);

$\Theta$  - momentul de inerție raportat la arborele motorului în  $\text{Joule sec}^2$ ;

$\xi$  - accelerația unghiulară a arborelui motorului  $\text{sec}^{-2}$

Din relațiile (4.67), (4.68), (4.69) se stabilește ecuația:

$$U_i = \frac{\pi c \phi}{30} n + \frac{r_i \cdot c}{c\phi} \xi + \frac{M_s}{c\phi} \quad (4.70)$$

În relația obținută intră variabilele  $U_i$ ,  $n$  și  $\xi$  care pot exprima prin interstițiul  $g$  și avansul  $v_{ae}$ . Se observă că într-un interval mic de variație a interstițiului  $g$ , variațiile acestuia pot fi considerate funcție liniară a tensiunii pe electrod.

Deci în cazul regulatorului cu un singur motor (scheme în punte) sînt valabile următoarele relații pentru  $U_i$ ,  $n$  și :

$$U_i = a_4 \cdot S - a_0$$

$$n = 60 \frac{i}{h} v_{ae} \quad (4.71)$$

$$\mathcal{E} = \frac{\pi}{60} \cdot \frac{i}{h} \cdot \frac{dv_{ae}}{dt}$$

unde:  $a_4$  - coeficient de rigiditate dielectrică a mediului lichid, v/cm;

$a_0$  - componenta continuă a tensiunii, V;

$i$  - raportul de transmitere al reductorului care realizează acționarea motor-avans electrod sculă;

$h$  - pasul șurubului conducător al glisorului care realizează avansul electrodului sculă, cm;

$v_{ae}$  - viteza de avans, cm/s.

Substituind valorile determinate pentru  $U_i$ ,  $n$  și  $\mathcal{E}$  din (4.71) în relația (4.70) se obține ecuația regulatorului cu un singur motor electric:

$$S = \frac{\pi \cdot r_i \cdot \theta}{60 \cdot a_4 \cdot c \rho h} \cdot \frac{d \cdot v_{ae}}{dt} + \frac{2 \pi c \rho}{a_4 \cdot h} v_{ae} + \frac{M_s}{a_4 \cdot c \rho} + \frac{a_0}{a_4} \quad (4.72)$$

Din relația de mai sus se observă că regulatorul cu un singur motor electric folosit adeseori la mașinile de tăiere prin eroziune electrică, este un element aperiodic.

Din sistemul de ecuații (4.66) și (4.72) eliminînd din cea de a doua ecuație  $v_{ae}$  se obține o ecuație diferențială de ordinul 2.

$$\frac{\pi \cdot r_i \cdot \theta}{60 \cdot a_4 \cdot c \rho h} S'' + \left( \frac{\pi a' r_i \cdot \theta \operatorname{tg} \alpha}{60 \cdot F \cdot a_4 \cdot c \rho h} + \frac{2 \pi c \rho}{a_4 h} \right) S' + \left( 1 + \frac{2 \pi a' c \rho \operatorname{tg} \alpha}{a_4 \cdot F h} \right) S + \frac{2 \pi a_0 \cdot c \rho M_s}{a_4 \cdot h} - \frac{a_n}{F} = 0 \quad (4.73)$$



Sistemul de reglare va fi stabil dacă coeficienții lui  $S''$ ,  $S'$  și  $S$  vor fi pozitivi.

Dacă  $\text{tg} \alpha < 0$ , coeficienții lui  $S'$  și  $S$  pot fi negativi. Se obțin astfel două condiții de stabilitate:

$$\text{tg} \alpha = \frac{120 \cdot c^2 \cdot \beta^2 \cdot F}{a' \cdot r_i \cdot \theta} > 0 \quad (4.74)$$

$$\frac{a_4 \cdot F \cdot h}{2\pi \cdot a' \cdot c \beta} + \text{tg} \alpha > 0 \quad (4.75)$$

Din inegalitățile (4.74) și (4.75) se poate trage concluzia că sistemul de reglare automată a mașinilor de prelucrare prin eroziune (având ca regulator un singur motor) va fi totdeauna stabil dacă regimul de lucru se află în domeniul cu autoreglare pozitivă, adică acolo unde  $\text{tg} \alpha > 0$ .

În domeniul de autoreglare negativă când  $\text{tg} \alpha < 0$ , condiția de stabilitate poate să se piardă. Din inegalitatea (4.74) se observă că pentru asigurarea funcționării sistemului cu autoreglare negativă ( $\text{tg} \alpha < 0$ ) este necesar să se ia următoarele măsuri la proiectarea SAR:

- reducerea la minimum a momentului de inerție  $\theta$  al indusului motorului electric;
- folosirea unui motor electric cu rezistență mică  $r_i$  a înfășurării indusului;
- folosirea unui sistem puternic de excitație, adică  $\delta$  mare.

Pentru respectarea condiției (4.75) atunci când se lucrează în domeniul autoreglării negative, este necesar să se asigure o amplificare suficientă a semnalului asigurându-se astfel trecerea în domeniul autoreglării pozitive.

Dacă se notescă cu  $k_y$  coeficientul de amplificare al regulatorului cu un singur motor, acesta va fi definit prin relația:

$$k_y = \frac{\Delta U_e}{\Delta U_s} \approx \frac{dU_e}{dU_s} \quad (4.76)$$

unde:  $\Delta U_e$  - variația tensiunii la electrozi;

$\Delta U_g$  - variația tensiunii (semnalului) care se aplică la indusul motorului, considerînd motorul decuplat de la mașina de eroziune.

Se presupune că măsurătorile mărimilor  $U_e$  și  $U_g$  se fac la un proces stabilizat de prelucrare prin eroziune, adică se consideră că  $\frac{ds}{dt} = 0$  și  $\frac{di_i}{dt} = 0$

Din relațiile (4.66) și (4.71):

$$\Delta U_e = -\Delta v_{se} \frac{s_4 \cdot F}{s' \cdot \operatorname{tg} \alpha}$$

De asemenea din relația (4.72):

$$dU_g = \Delta v_{se} \frac{2\tilde{I} \cdot c \rho}{h}$$

Substituind aceste valori în relația (4.76) coeficientul de amplificare  $k_y$  va fi:

$$k_y = \frac{s_4 \cdot F \cdot h}{2\tilde{I} \cdot c \rho \cdot s' \cdot \operatorname{tg} \alpha} \quad (4.77)$$

Deci cea de a doua condiție de stabilitate (ecuația 4.75) poate fi exprimată astfel:

$$k_y > 1 \quad (4.78)$$

Această condiție este evidentă deoarece la  $k_y < 1$ , regulatorul nu asigură un avans suficient al electrodului sculă, din care cauză interstițiul dintre electrozi va crește și procesul de eroziune se intrerupe.-

**5.-CONCEPTIA, PROIECTAREA SI REALIZAREA UNEI INSTALATII EXPERIMENTALE DE TAIERE PRIN EROZIUNE COMPLEXA ELECTRICA-ELECTRO-CHIMICA MODIFICATA PRIN RLC REGLABIL**

**5.1.-Componenta instalatiei experimentale**

Instalatia experimentală se compune din următoarele module mai importante:

- Sursa de curent (SC);
- Bateria de condensatoare (BC);
- Bobina de reactanță (BR);
- Rezistența de balast (RB);
- Mecanismul de tăiere (MT);
- Pupitrul de comandă (PC);
- Regulatorul de inducție (RI).

Schemă bloc a instalației experimentale este prezentată în figura 5.1, iar schema de principiu în figura 5.2.

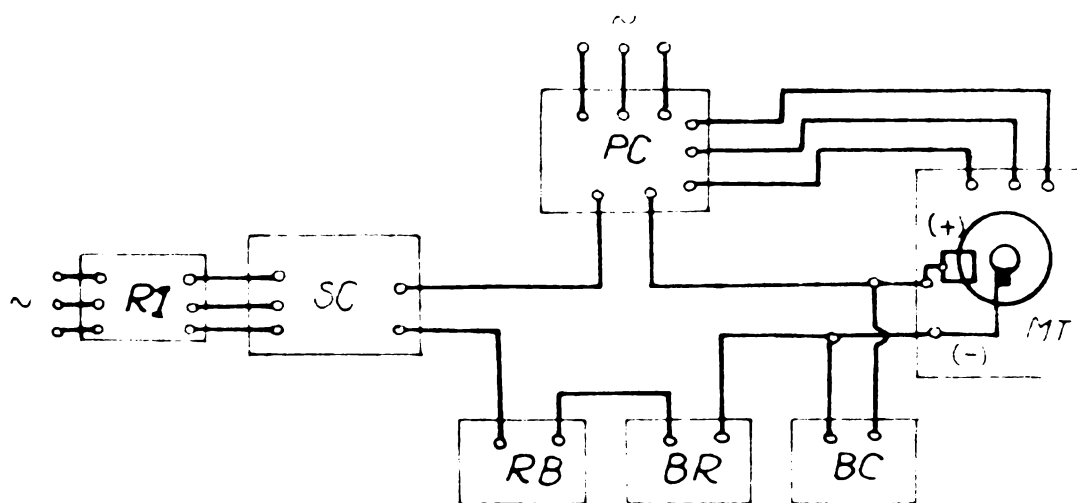


Fig.5.1.-Schemă bloc a instalației experimentale de tăiere: R<sub>1</sub>-regulator de inducție; SC-sursa de curent; MT-mecanismul de tăiere; RB-rezistența de balast; BR-bobina de reactanță; BC-bateriile de condensatoare; PC-pupitrul de comandă



### 5.1.1.-Sursă de curent statică pentru alimentarea instalației experimentale de tăiere

Sursa de curent se obține prin modificarea redresorului tip RSC 400 fabricat de Intreprinderea Electrotehnica București (figura 5.3).

Caracteristicile tehnice ale sursei sînt:

- tensiunea de alimentare, 3 x 380 V, la 50 Hz;
- tensiunea în gol în circuitul de tăiere 23-30-37-44-51 Volți;
- curentul de tăiere maxim 400 A;
- durata activă DA 60%;
- ciclu de lucru, 10 minute;
- curentul de tăiere la DA 100%, 300 A;
- reglajul caracteristicilor de lucru: 5 trepte și reglaj continuu în cadrul fiecărei trepte prin folosirea regulatorului de inducție;
- răcirea: ventilație forțată, sensul curentului de aer de la transformator la redresor;
- clasa de izolație : F (temperatura max.155°C);
- protecția carcasei: I.P.22.

Redresorul conține un transformator principal TS cu următoarele caracteristici:

- puterea transformatorului, 19 kVA;
- tensiunea primară 3 x 380 V;
- tensiunea secundară între faze 17-22,2-27,4-32,6-38 V;
- curentul de mers în gol: max.4 A;
- curent nominal primar (la DA 60%): 35 A;

Infășurarea primară este conectată în stea iar treptele în secundar (cinci trepte) se obțin prin mutarea stelei cu ajutorul comutatorului principal  $a_4$  de 400 A.

Reglarea fină a curentului și tensiunii se face cu ajutorul amplificatorului magnetic tip derivație, comandat prin intermediul unui preamplificator magnetic cu miez toroidal.

Amplificatorul magnetic tip derivație  $AM_1$  este de construcție trifazată monobloc cu următoarele caracteristici:

- tensiunea pe fază - - - - - 5 V
- curent pe infăgurare (la DA 100%) - - - - - 115 A
- curent de comandă maxim - - - - - 18 A
- rezistența infăgurării de comandă la cald - - - 20 - 22Ω

Preamplificatorul magnetic AM<sub>2</sub> este de tip autosaturat monofazat cu ieșire în c.c. cu următoarele caracteristici:

- tensiunea de alimentare - - - - - 60 V la 50 Hz
- tensiunea de ieșire la comandă maximă - 30 V
- curent de ieșire (în c.c.) - - - - - 1,8 A
- curent de comandă - - - - - 250-300 mA
- curent de polarizare - - - - - 40-50 mA

Preamplificatorul este prevăzut cu reacție negativă de curent și are miezul toroidal din ARMCO M6X.

Comutatorul de trepte este trifazat cu 5 trepte dimensionate pentru 400 A.

Transformatorul alimentează o punte redresoare având următoarele caracteristici:

- număr de diode pe braț - - - - - 1
- număr diode total - - - - - 6
- tip diodă - - - - - 200 A/150 V
- curent pe diodă (la DA 60%) 133 A

Pentru a se asigura la probele experimentale și posibilitatea alimentării mecanismului de tăiere cu curent pulsatoriu, s-a prevăzut posibilitatea întreruperii fazei a treia prin plesarea a patru berne conectate prin două plăci P<sub>1</sub> și P<sub>2</sub> demontabile (figura 5.3).

Prin demontarea plăcuțelor puntea devine monofazată, iar curentul pulsatoriu cu posibilități de netezire prin intercalarea în circuitul de alimentare a bobinei de reactanță ER cu întrefier reglabil.

Răcirea redresorului se face cu ajutorul unui ventilator axial antrenat de un motor trifazat. Sensul curentului de aer, de la transformator spre redresor, este controlat de către un releu de vânt cu paletă.

Pentru a se evita rămânerea între ploturi a comutatorului a<sub>4</sub> în circuitul bobinei comutatorului C<sub>1</sub> este montat microîntrerupătorul a<sub>5</sub>.

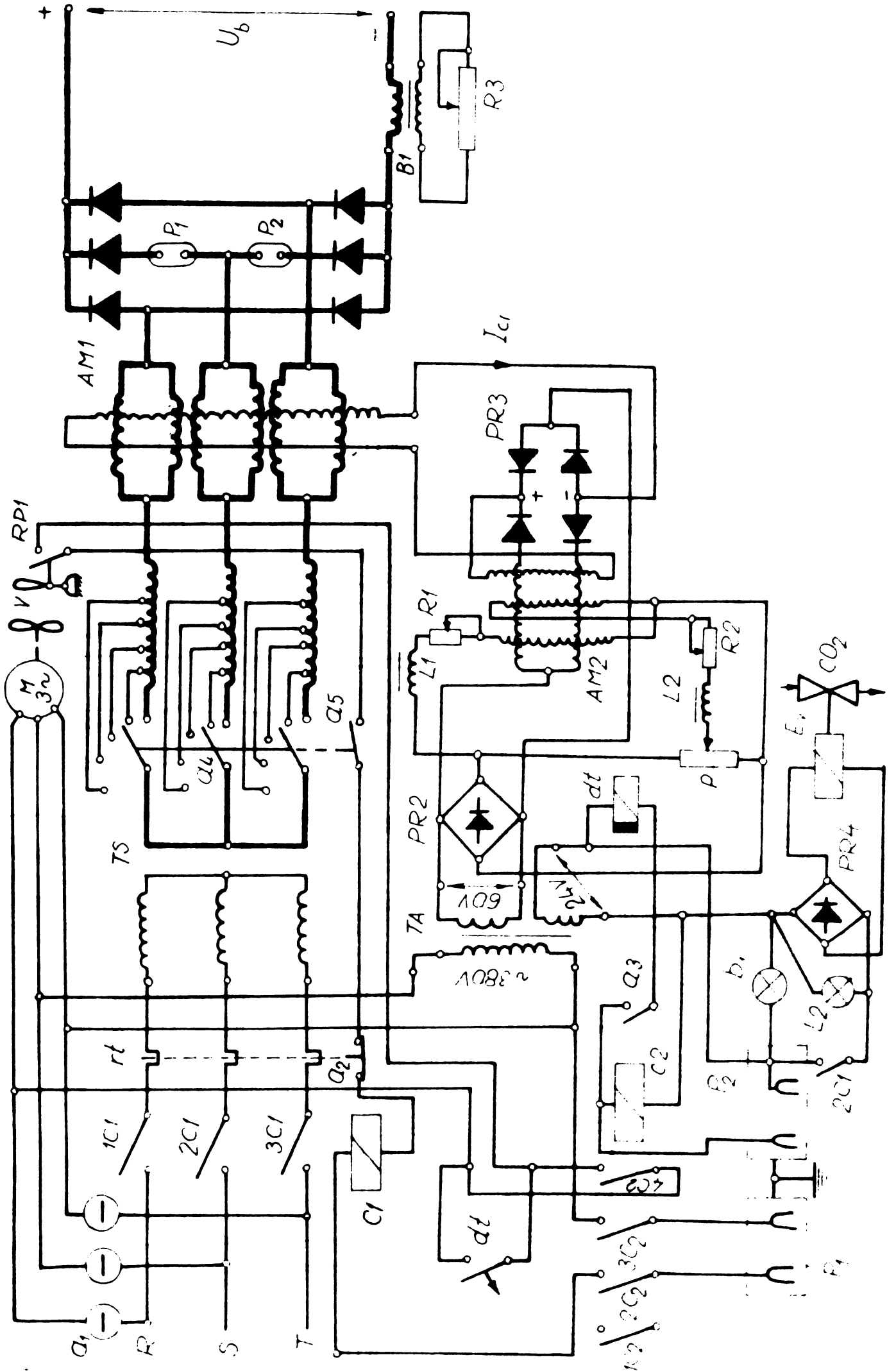


Fig.5.3.-Schema de principiu a sursei de curent

Caracteristica externă a sursei de curent  $I=f(U)$  pentru varianta de funcționare a redresorului trifazat este prezentată în figura 5.4, iar măsurătorile respective în tabela 5.1.

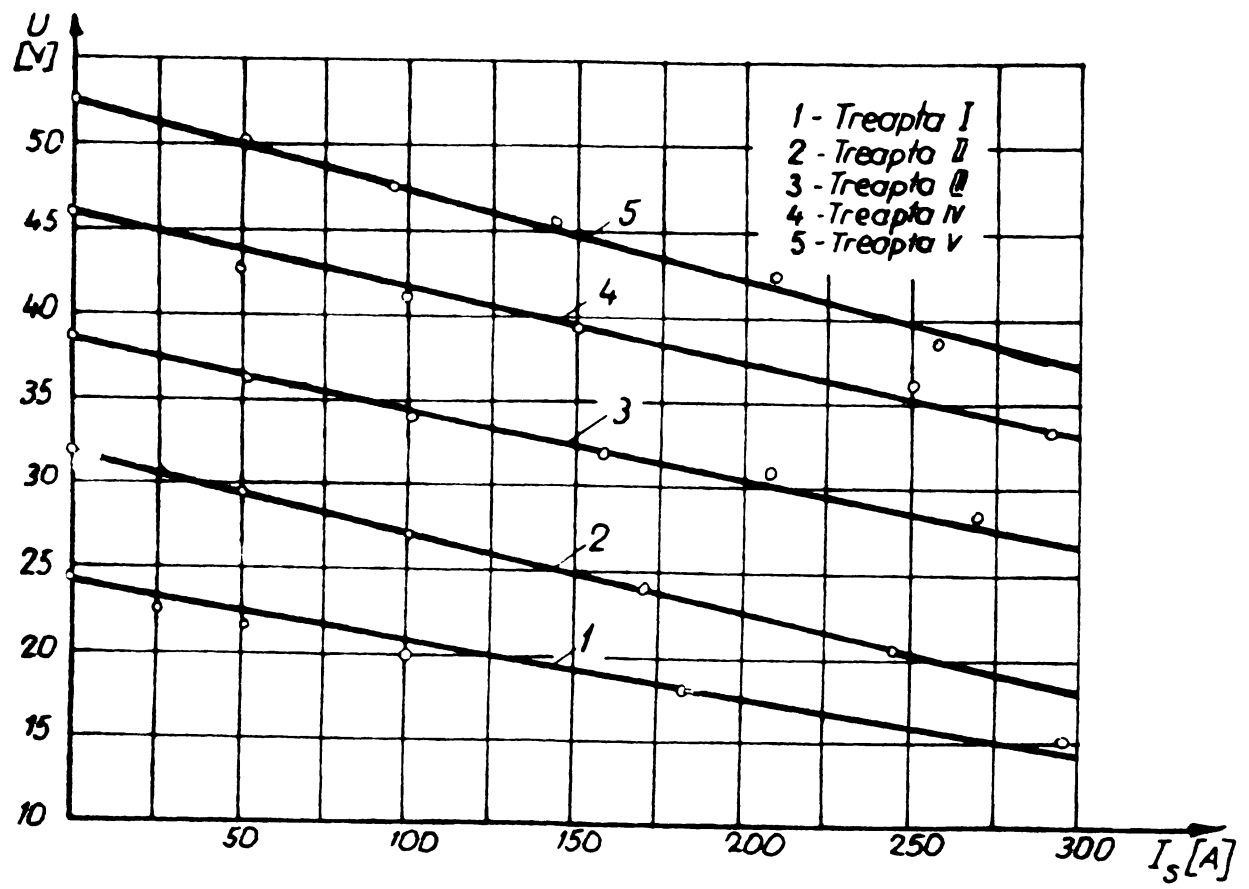


Fig.5.4, a.- Caracteristica externă a sursei de curent  $U=f(I)$  redresor trifazat

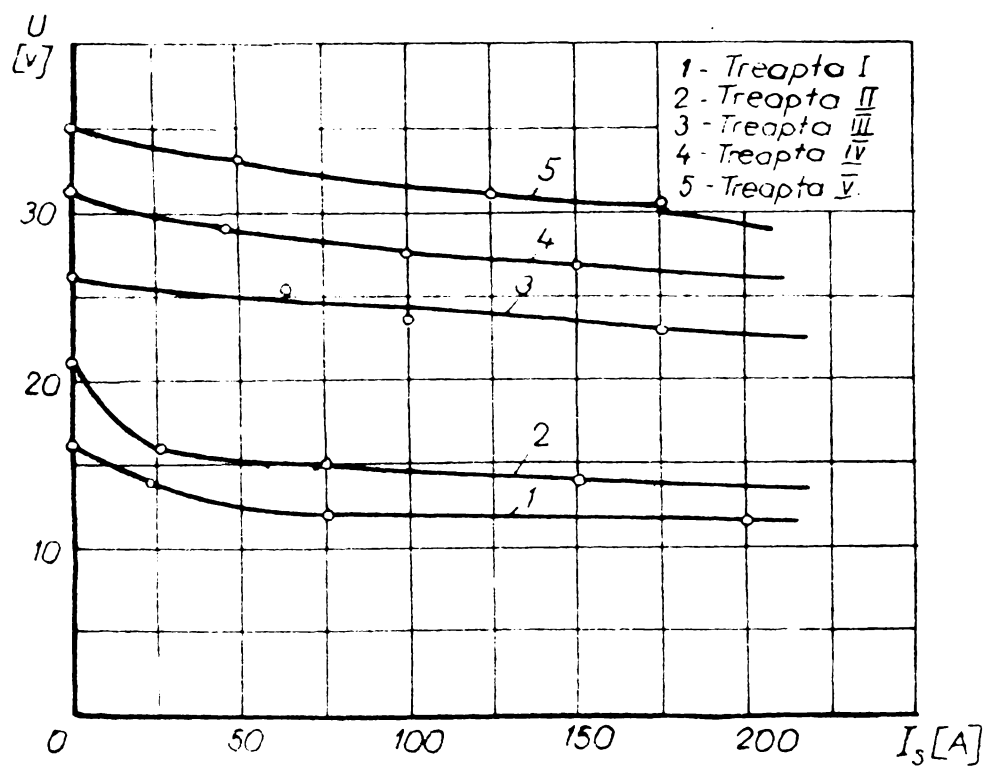


Fig.5.4, b.-Caracteristica externă a sursei de curent  $U=f(I)$  redresor în varianta monofazată



TABELA 5.1. a

Măsurători pentru determinarea caracteristicii externe a redresorului trifazat

Nr. crt. Caract.	1	2	3	4	5	6	Treapta
U [V]	24,5	22,5	21,5	20	17,8	14,5	I
I [A]	0	25	51	100	180	300	
U [V]	31,8	30,5	29,5	27,2	24	22,8	II
I [A]	0	25	50	102	170	240	
U [V]	38,8	36	34	31,8	30,5	28	III
I [A]	0	52	102	165	210	280	
U [V]	45,8	42,8	40,5	39	35,8	35	IV
I [A]	0	50	102	150	250	280	
U [V]	52,5	49,9	47,5	45,5	42	38	V
I [A]	0	50	92,5	140	215	260	

TABELA 5.1. b

Măsurători pentru determinarea caracteristicii externe a redresorului în variantă monofazată

Nr. crt. Caract.	1	2	3	4	Treapta
U [V]	16	14	12	11,5	I
I [A]	0	24,5	75	200	
U [V]	21	16	15	14	II
I [A]	0	25	75	150	
U [V]	26	24,5	23,5	23	III
I [A]	0	37,5	100	175	
U [V]	31	29	27,5	27	IV
I [A]	0	49	100	150	
U [V]	35	32	31	30	V
I [A]	0	50	100	175	

### 5.1.2.-Baterii de condensatoare

#### 5.1.2.1.-Bateria de condensatoare de $992\mu F$

Schema bateriei de condensatoare (figura 5.5) conține următoarele capacități conectabile prin întrerupătoarele  $K_1 \dots K_8$ .

$$C_1 = 32\mu F$$

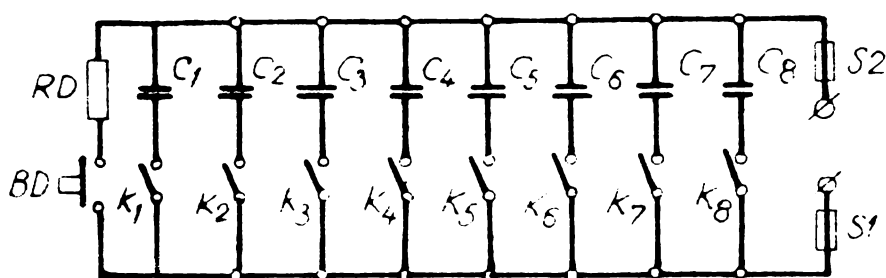
$$C_2 = 64\mu F$$

$$C_3 = 128\mu F$$

$$C_4 = 128\mu F$$

$$C_5 = 256\mu F$$

$$C_6 = 384\mu F$$



Capacitățile  $C_1 \dots C_6$

se conectează cu întrerupătoarele  $K_1 \dots K_6$

(rezervă pentru mărirea capacității  $K_7, K_8$ ).

Capacitățile realizabile cu bateria de condensatoare de  $992\mu F$  și modul de conectare al întrerupătoarelor este indicat în tabela 5.2.

Fig.5.5.-Schema bateriei de condensatoare de  $992\mu F$

TABELA 5.2

Capacități realizabile cu bateria de condensatoare de  $992\mu F$

$\mu F$	Intr. conectate	$\mu F$	Intr. conectate	$\mu F$	Intr. conectate	$\mu F$	Intr. conectate
32	K1	288	K1K5	544	K1K3K6	800	K1K5K5K6
64	K2	320	K2K5	576	K2K3K6	832	K2K5K6
96	K1K2	352	K1K2K5	608	K1K2K3K6	864	K2K2K3K5K6
128	K3	384	K6	640	K5K6	896	K3K4K5K6
160	K1K3	416	K1K6	672	K1K5K6	928	K1K3K4K5K6
192	K2K3	448	K2K6	704	K2K5K6	960	K2K3K4K5K6
224	K1K2K3	480	K1K2K6	736	K1K2K5K6	992	Toate
256	K5	512	K3K6	768	K3K5K6		

La realizarea acestei baterii de condensatoare s-au folosit condensatoare uscate de  $4\mu F$  (fabricație sovietică) cu tensiunea de probă 1500 V.

### 5.1.2.2.-Bateria de condensatoare de $54.050\mu F$

Schema bateriei de condensatoare (figura 5.6) conține următoarele giruri de capacități conectabile prin întrerupătoarele  $K_1 \dots K_{10}$  (rezervă pentru mărirea capacității  $K_1$  și  $K_6$ ).

$$C_2 = 2550\mu F$$

$$C_3 = 4700\mu F$$

$$C_4 = 4700\mu F$$

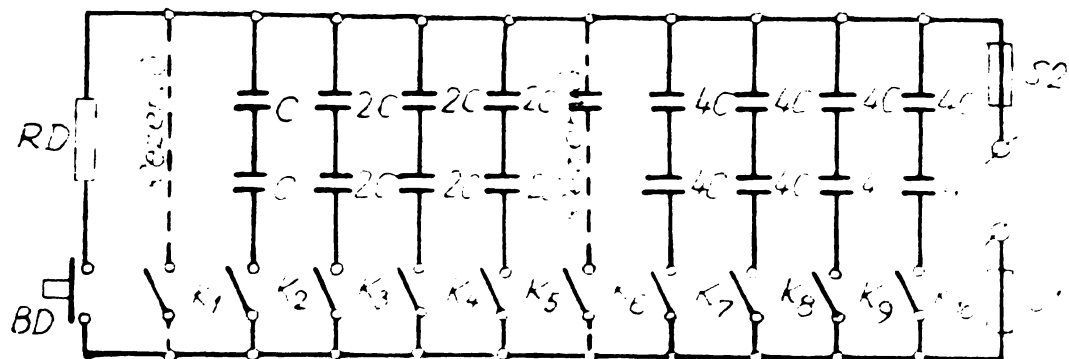
$$C_5 = 4700\mu F$$

$$C_7 = 9400\mu F$$

$$C_8 = 9400\mu F$$

$$C_9 = 9400\mu F$$

$$C_{10} = 9400\mu F$$



$$\begin{aligned} 1C &= 4700\mu F \\ 2C &= 9400\mu F \\ 4C &= 18800\mu F \end{aligned}$$

Fig.5.6.-Schema bateriei de condensatoare de  $54050\mu F$

La realizarea acestei baterii de condensatoare s-au folosit condensatoare electrolitice de  $4700\mu F$  COD EG 7270 cu tensiunea nominală în c.c. de 40V, curent modulat maxim 1200 mA de  $635\text{ mm} \times 69\text{ mm}$  fabricație IPRS Băneasa.

Având în vedere tensiunea mică nominală (40) toate girurile de condensatoare su fost formate din câte două condensatoare (sau grupe de condensatoare) conectate în serie, deci tensiunea nominală 80 V/coloană.

Capacitățile realizabile și modul de conectare al întrerupătoarelor este indicat în tabela 5.3.

TABELA 5.3

$\mu F$	Intr. conectate	$\mu F$	Intr. conectate	$\mu F$	Intr. conectate
2350	K2	21150	K2K7K9	39950	K2K7K8K9K10
4700	K3	23500	K3K7K8	42300	K3K7K8K9K10
7050	K2K3	25850	K2K3K7K8	44650	K2K3K7K8K9K10
9400	K7	28200	K7K8K9	47000	K3K4K7K8K9K10
11750	K2K7	30550	K2K7K8K9	49350	K2K3K4K7K8K9K10
14100	K3K7	32900	K3K7K8K9	51700	K3K4K5K7K8K9K10
16450	K2K3K7	35250	K2K3K7K8K9	54050	K2K3K4K5K7K8K9K10
18800	K7K8	37000	K7K8K9K10		

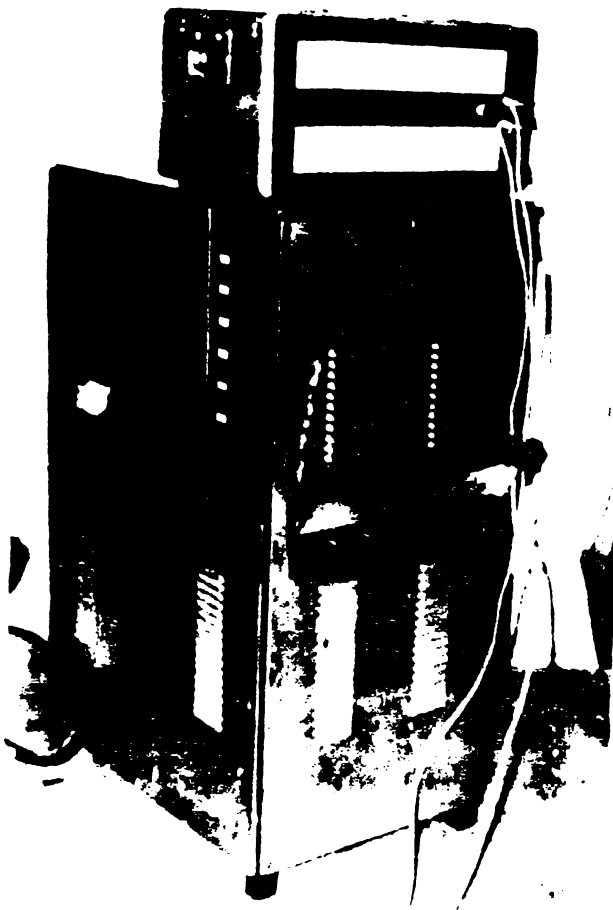
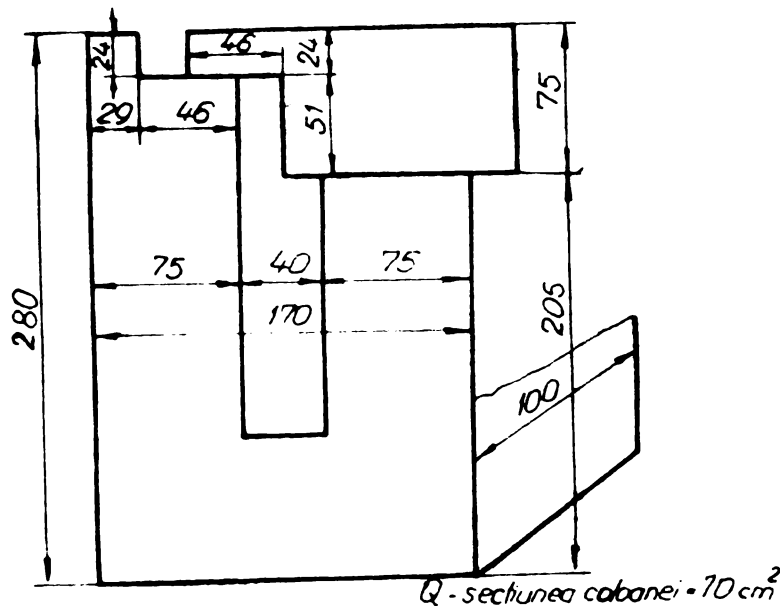


Fig.5.7.-Bateriile de condensatoare de 992 $\mu F$  și 54050 $\mu F$

Ambele baterii de condensatoare au fost dotate cu siguranțe. La bateria de 54050 $\mu F$ , s-au montat două siguranțe fuzibile S41 pentru I=315 A tip MPR. Pentru a preveni rămânerea în stare încărcată a condensatoarelor după terminarea lucrului, s-a montat în paralel cu bateria o rezistență de descărcare RD conectabilă prin butonul BD. Mărimea acestei rezistențe s-a ales din considerentul că descărcarea bateriei să nu dureze un timp prea îndelungat, de exemplu 10...12 secunde. În figura 5.8 sînt prezentate cele două baterii de condensatoare de 54050 $\mu F$  (sus) și 992 $\mu F$  (jos).

### 5.1.3.-Bobina de reactanță

Ca bobină de reactanță s-a folosit o bobină existentă de 300 A, de la un transformator de sudare, proiectată și realizată la ASP. Miezul magnetic al bobinei este prezentat în figura 5.8.



Intrefierul bobinei de reactanță s-a realizat în trepte pentru a se asigura o variație mai lină a inductivității în domeniul întrefierurilor mai mici.

Inductivitatea bobinei s-a determinat cu relația:

$$L = \frac{0,4\pi w_b^2 \cdot l_1 \cdot l_2}{\delta} \cdot 10^{-8} \quad [H]$$

unde,

$l_1 = 7,5$  cm (lățimea coloanei miezului magnetic);

Fig.5.8.-Miezul magnetic al bobinei de reactanță

$l_2 = 10$  cm (grosimea coloanei miezului magnetic)

$w_b = 30$  spire

$\delta$  - întrefierul în cm.

Inductivitatea  $L = f(\delta)$  este prezentată în tabela 5.4.

TABELA 5.4

$\delta$ mm	1	5	10	15	20	25	30	35	40	50	60
L mH	8,5	1,7	0,85	0,57	0,43	0,34	0,28	0,24	0,21	0,17	0,14

Rezistența electrică a înfășurării  $R_b$  este:

$$R_b = \rho \frac{l}{q_{Cu}} \quad w_b = 0,0252 \cdot \frac{0,504}{80,1} \cdot 30 = 4,75 \cdot 10^{-3} \text{ ohmi}$$

unde:  $q_{Cu} = 80,1$  mm<sup>2</sup>, secțiunea cuprului și înfășurării.

Bobina de reactanță poate fi scurtcircuitată pe schemă cu ajutorul clemei P.

Încălzirea maximă a înfășurării bobinei de reactanță pentru DA=100% este  $\theta_2 = 85^\circ C$  (clasa de izolație B7).

#### 5.1.4.-Rezistența de balast

Ca rezistență de balast reglabilă se va folosi un reostat de sarcină calculat pentru curenți max. de scurtcircuit de peste 500 A.

Rezistența de balast are 14 trepte respectiv 16 ploturi însumând o rezistență totală de 1,387 ohmi. Rezistențele dintre ploturi sunt constituite din sîrmă de Cr-Ni de diametru 4 mm.

Schema și detaliile de construcție a rezistenței de balast pe trepte sînt indicate în figura 5-9 și tabela 5.5.

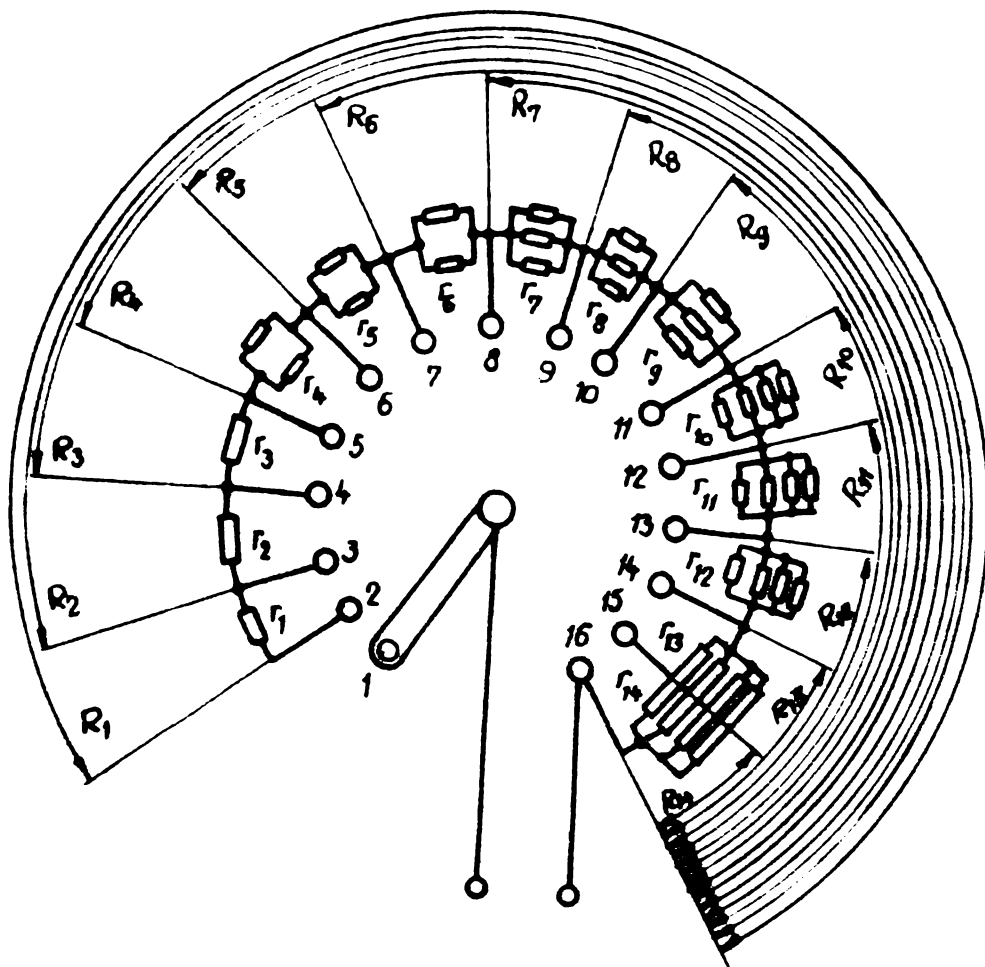


Fig.5.9.-Schema rezistenței de balast

TABELA 5.5

Plot nr.	Rezistența în-tre ploturi în ohmi	Rezistența totală pe ploturi în-sumată	Nr. elementelor paralele	Rezistența elementului în ohmi	Lungimea sîrmei în (m)
1	$\infty$	$\infty$	-	-	-
2	$r_1=0,350$	$R_1=1,387$	1	$2r_0,175$	2,95
3	$r_2=0,189$	$R_2=1,037$	1	0,189	1,65
4	$r_3=0,189$	$R_3=0,848$	1	0,189	1,65
5	$r_4=0,094$	$R_4=0,659$	2	0,189	3,30
6	$r_5=0,094$	$R_5=0,565$	2	0,189	3,30
7	$r_6=0,094$	$R_6=0,471$	2	0,189	3,30
8	$r_7=0,063$	$R_7=0,377$	3	0,189	5,00
9	$r_8=0,063$	$R_8=0,314$	3	0,189	5,00
10	$r_9=0,063$	$R_9=0,251$	3	0,189	5,00
11	$r_{10}=0,047$	$R_{10}=0,188$	4	0,189	6,60
12	$r_{11}=0,047$	$R_{11}=0,141$	4	0,189	6,60
13	$r_{12}=0,047$	$R_{12}=0,094$	4	0,189	6,60
14	$r_{13}=0,0235$	$R_{13}=0,047$	4	0,094	6,60/2
15	$r_{14}=0,0235$	$R_{14}=0,0235$	4	0,094	6,60/2
16	0	0			

In cazul unui curent de lungă durată (peste 40% DA) este necesară echiparea rezistenței de balast cu un motoventilator pentru ventilație forțată (0,3 kW, 1450 rot/min).

#### 5.1.5.-Mecanismul de tăiere

Mecanismul de tăiere este constituit (figura 5.10) dintr-un disc de tăiere din oțel moale de grosime 0,5...2 mm, antrenat printr-o transmisie cu două curele trapezoidale de un motor asincron 2. Discul de tăiere este ștanțat sau tăiat la o formă circulară din tablă deșapată. După ștanțare sau tăiere, discurile trebuie să fie îndreptate, astfel ca bătăile lor să fie minime. Se recomandă recoacerea discurilor în pachete strînse cu două plăci de oțel la cea 200°C. După recoacere discurile au o suprafață destul de dreaptă.

Discul de tăiere este conectat la catod printr-un sistem de inele colectoare și perii.

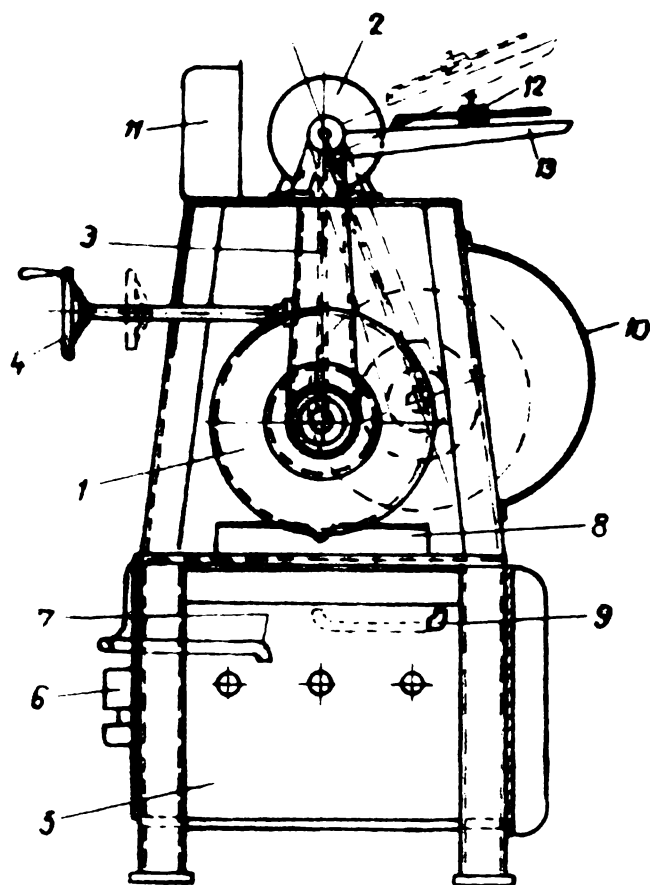


Fig. 5.10.-Schiață mecanismului de tăiere:  
1-disc de tăiere; 2-motor asincron; 3-sistem de balansare; 4-manivelă; 5-bazin pentru electrolit; 6-motopompa pentru electrolit; 7-diuză pentru stropirea electrolitului; 8-suporți pentru piesa de tăiat; 9-filtru; 10-scut protector; 11-aparate pentru supravegherea mersului tăierii

In bazin se află un filtru 9 pentru reținerea impurităților din electrolit.

Scutul 10 culege stropii electrolitului rezultați din tăiere și-i readuce în bazinul 5.

Pentru supravegherea procesului normal de tăiere servesc câte un voltmestru și ampermetru 10.

Discul se poate deplasa după un arc de cerc în axa motorului de antrenare cu ajutorul unui sistem de balansare 3, manevrând manivela 4. Pentru a se micșora frecările laterale ale discului pe obiectul de tăiat, marginile exterioare ale discului se pot profila (figura 5.11).

Electrolitul se află în bazinul 5 de unde cu ajutorul motopompei 6 poate fi stropit în zona de tăiere prin diuza de stropire 7. Piesa de tăiere se fixează în suportii 8 și este conectată la anod cu ajutorul unui contact fix, corespunzător curentului maxim de tăiere pentru diametrul respectiv.

In bazin se află un fil-



Presiunea discului pe piesă se poate regla cu ajutorul unei contragreutăți deplasabile 12 pe 13, ambele solidare cu sistemul de balansare 3. În acest fel presiunea discului pe piesă de

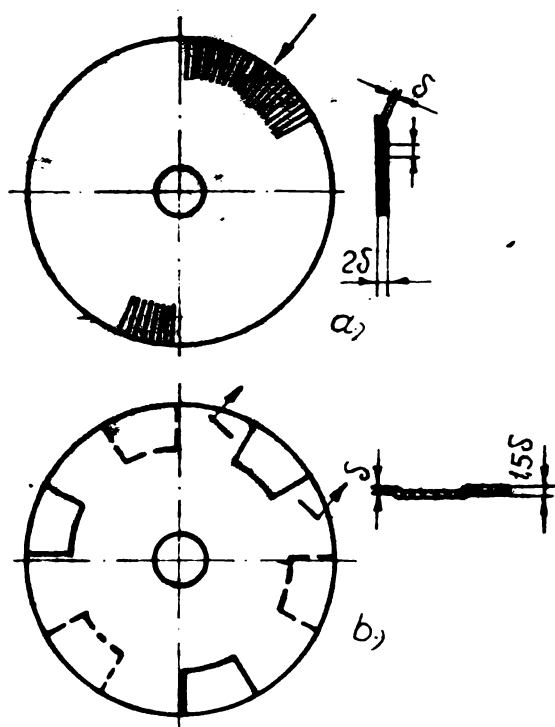


Fig.5.11.-Biscuri de tăiere

greutatea materialului eliminat prin eroziune electrochimică.

Pentru o mai bună observare a procesului de tăiere pe mecanism se montează un voltmetru și un ampermetru identice cu  $V_2$  (100 V) respectiv  $A_2$  (500 A cu șunt corespunzător).

O atenție deosebită s-a scordat etanșării camerelor de rulmenți și a contactului perii-inele colectoare, care asigură alimentarea discului de tăiere. Pentru etanșarea rulmentului către disc s-au prevăzut labirinți speciali în spre partea stropirii discului (poz.3 figura 5.12) iar pentru protecția contactului perii-inele (poz.4-5, figura 5.12), s-a construit în cureul experimentărilor o protecție suplimentară din tablă.

Ansamblul mecanismului de tăiere este prezentat în figura 5.13.

tăiat se poate regla în limita 0,5...2 kg/cm<sup>2</sup>.

Viteza periferică optimă a discului este de 16...20 m/s. După montarea discului pentru a elimina eventualele bății radiale ale discului se recomandă ca un scurt timp să se lucreze cu polaritate inversă (disc anod). Pentru acest scop între sursa de alimentare și mecanismul de tăiere se intercalează un comutator bifazat de 400 A.

Dacă procesul de lucru este normal, discul se consumă în proporție de 20...25% din

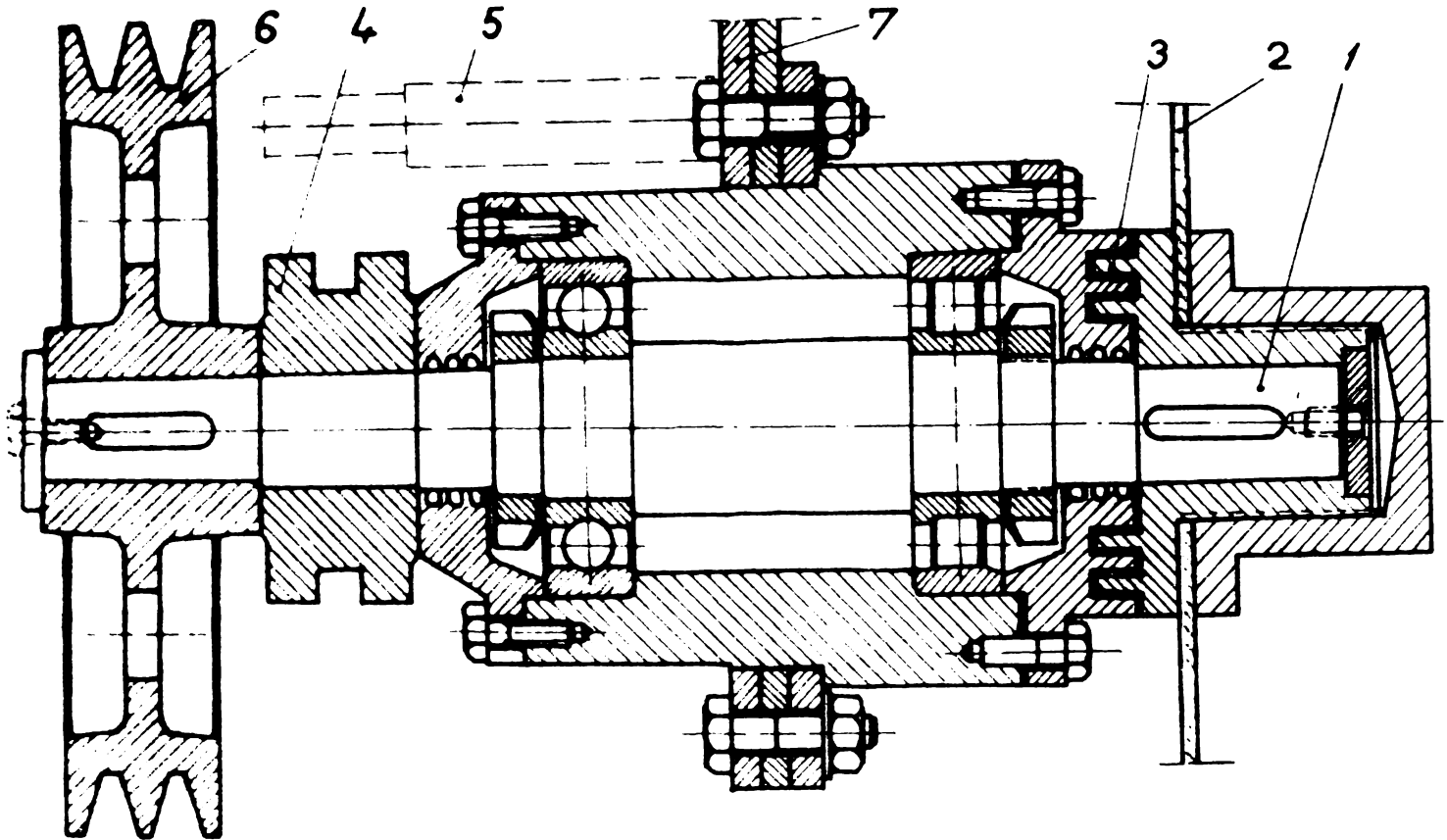


Fig.5.12.-Subansamblu pentru antrenarea discului; 1-axul discului; 2-disc de tăiere; 3-labirinți de etanșare; 4-inel colector cu plou; 5-bulon suport și perii; 6-roata de transmisie pentru cupele trapezoidale; 7-fixarea subansamblului în sistemul de belansare

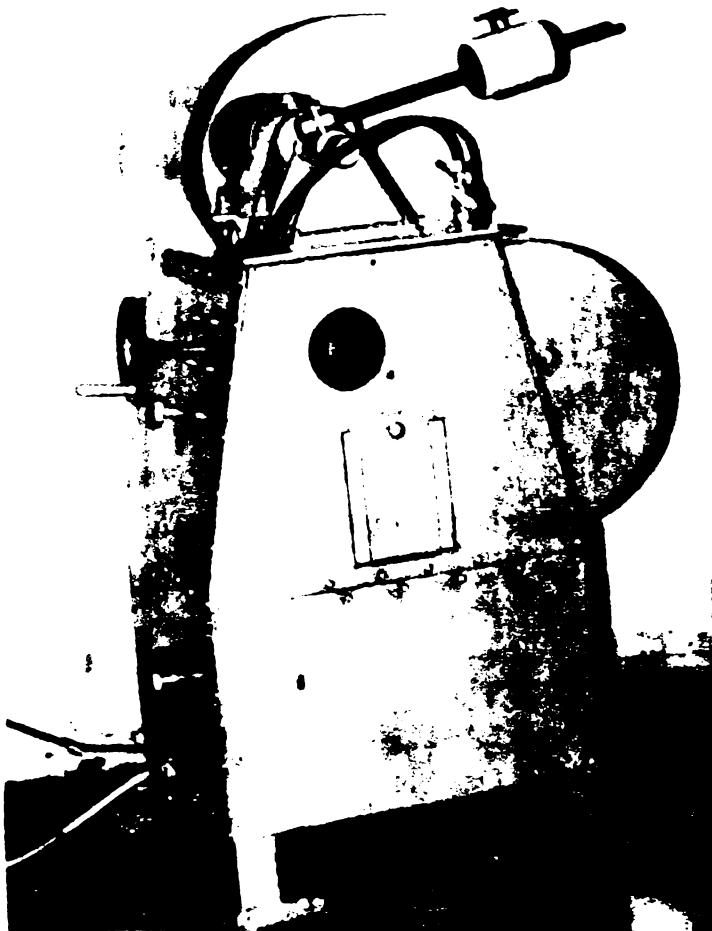


Fig.5.13.-Ansamblul mecanismului de tăiere

Puterea necesară pentru tăierea metalului este cheltuită la îndepărtarea peliculei de electroliț și detagarea particulelor rezultate în procesul de electroeroziune din zona de tăiere. Mărirea acestei puteri se determină cu relația:

$$P = \frac{p \cdot F \cdot v \cdot \mu}{10^2}$$

unde:

$p$ -presiunea specifică a sculei asupra piesei de tăiat ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ );  
 $F$ -suprafața de contact a sculei cu piesa (după suprafața de lucru) în  $\text{cm}^2$ ;

$\mu$ - coeficient de frecare între piesă și sculă;

$v$ - viteza de lucru în  $\text{m}/\text{sec}$ .

Puterea necesară pentru prelevarea metalului, chiar la mașini mari, este sub 0,25 kW. Puterea necesară la tăiere este însă mult mai mare. Aceasta este determinată de faptul că o parte în putere este consumată la învingerea frecării dintre sculă și pereții tăieturii. Consumul total de putere crește pe măsura înșintării sculei în material și depășește de obicei 5-8 ori puterea necesară direct pentru prelevarea metalului.

Puterea de acționare  $P_0$  se determină astfel:

$$P_0 = P_1 + P_2 + P_3$$

unde:  $P_1$  - puterea consumată la prelevarea metalului;

$P_2$  - puterea consumată la învingerea frecării sculă-pereți laterali ai tăieturii

$P_3$  - puterea necesară pentru învingerea rezistențelor mecanismului.

Correspondența între  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$  se schimbă în funcție de construcția și caracteristicile de exploatare a mașinilor.

La mașini de tăiere cu bandă continuă pierderile de frecare față de pereții tăieturii sînt mai mici decît la mașini cu mișcare principală de lucru rotativă. Aceasta se explică printr-o rigiditate mai mică a benzii. În același timp pierderile în gol la mașini cu bandă continuă sînt relativ mai mari.

Experimental s-a stabilit că pentru mașini cu acționare en-dulară și transmisie cu curele trapezoidale pentru tăieri de materiale în jurul a 100 mm:

$$P_1 = 0,2 P_0; \quad P_2 = 0,3 P_0; \quad P_3 = 0,5 P_0$$

Valorile absolute ale lui  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$  depind de construcția mașinii și a sculei, de electrolit, de regimul de lucru și de secțiunea piesei tăiate.

Influența acestor factori asupra consumului de putere nu este încă suficient de bine studiată.

Pentru alegerea puterii motorului se poate utiliza tabela 5.6.

TABELA 5.6

Puterea de acționare a discului de tăiere

Dimensiunea maximă a secțiunii transversale a piesei de tăiat (mm)	Puterea motorului (kW)
50	0,5 ..
100	1,5...2
150	2 ... 2,5
200	2,5...3
300	3 ... 3,5

Se observă că sudura sculei cu piesa poate fi provocată de micșorarea turației motorului sau anumitor suprasarcini din cauza bătăilor discului de tăiere, respectiv cantitatea insuficientă de electrolit în locul de tăiere etc.

Având în vedere cele de mai sus, puterea motorului de antrenare a discului s-a luat de 3 kW la 1450 rot/min.

#### 5.1.6.-Regulatorul de inducție

Regulatorul de inducție este constituit dintr-un motor asincron de 22 kW; 380 V; 50 Hz cu rotor (bobinat) rebobinat pentru 380 V. Motorul este montat într-o carcasă, în poziție verticală (cu ventilatorul propriu demontat) și răcit de un metoventilator.

Reglarea tensiunii se face printr-o acționare manuală, prin rotirea rotorului cu 0-90°.

Acționarea manuală poate fi înlocuită pe viitor printr-o acționare electro-mecanică cu reductor, servomotor și comandă de la tabloul de comandă.

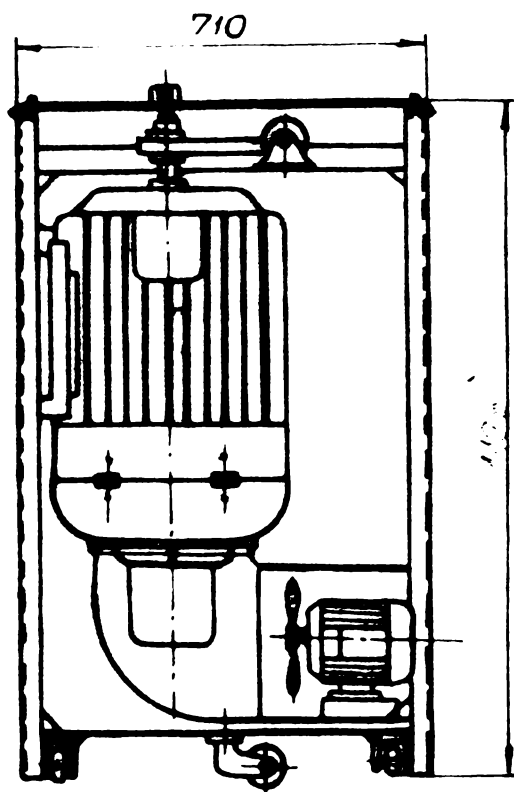


Fig.5.14.-Schita regulatorului de inducție

Regulatorul de inducție funcționează ca un transformator trifazat de reglare continuă a tensiunii de 30 kVA; 50 Hz în limitele 0...380 V.

5.1.7.-Pupitrul de comandă

Pupitrul de comandă centralizează toate comenzile, aparatură de control și siguranțele circuitelor electrice.

Pe panoul din față al pupitrului sînt montate: voltmetrul  $V_1$  de c.c., 100 V, pentru măsurarea tensiunii sursei de curent; ampermetrul  $A_1$  de c.c. 400 A pentru măsurarea curen-

tului sursei; voltmetrul  $V_2$  de c.a., 500 V, pentru măsurarea tensiunii rețelei; ampermetrul  $A_2$  de c.a., 100 A, pentru măsurarea curentului absorbit de la rețea; intrerupătoarele  $I_1...I_7$  conform schemă de detaliu a instalației experimentale de tăiere; 8 lămpi de semnalizare (LS) și o priză de 36 V (P).

Se mai menționează că anumite aparate electrice de măsură și în special cele pentru măsurarea parametrilor de tăiere (tensiune, curent) pot fi montate (dublare  $V_1$  și  $A_1$ ) și pe mecanismul de tăiere, pentru ușurința observării lor în procesul de tăiere.

5.1.8.-Caracteristicile tehnice ale instalației experimentale  
Ansamblul instalației experimentale este prezentat în

figura 5.15.

-Diametrul maxim al piesei tăiate, mm	- - - - -	100
-Diametrul maxim al discului de tăiere, mm	- - - - -	500
-Materialul discului de tăiere: tablă obignuită		
de oțel moale grosime, mm	- - - - -	0,5... 1,5
-Turația discului de tăiere, rpm	- - - - -	1450
-Viteza periferică maximă a discului de tăiere m/s	-	45,5

- Motorul pentru antrenarea discului:
  - puterea kW - - - - - 3
  - turația rpm - - - - - 1450
- Motorul pentru pompa de electrolit
  - puterea kW - - - - - 0,2
  - turația rpm - - - - - 1450
- Sursă de curent: redresor RSC-400 fabricat de IIS Electrotehnica București (modificat)
  - Intensitatea maximă a curentului, A - - - - - 400
  - Intensitatea curentului la  $DA=100\%$  - - - - - 300
  - Tensiunea în gol, V - - - - - 23...51
- OBS.-Redresorul este alimentat de la rețea printr-un regulator de inducție de 20 kVA cu posibilități de reglare a tensiunii de la 0 la 380 V, la 50 Hz.
- Bateria de condensatoare nr.1,  $\mu F$  - - - - - 992
- Bateria de condensatoare nr.2,  $\mu F$  - - - - - 54050
- Bobina de reactanță în circuitul de forță pentru  $\delta=1...60$  mm, mH - - - - - 8,5...0,14
- Debitul pompei pentru electrolit  $l/min$  - - - - - 20
- Volumul rezervorului pentru electrolit  $l$  - - - - - cea 60
- Gabaritul mecanismului de tăiere
  - lungimea, mm - - - - - 940
  - lățimea, mm - - - - - 650
  - înălțimea, mm - - - - - 1345
- Greutatea mecanismului de tăiere, kg - - - - - cea 300

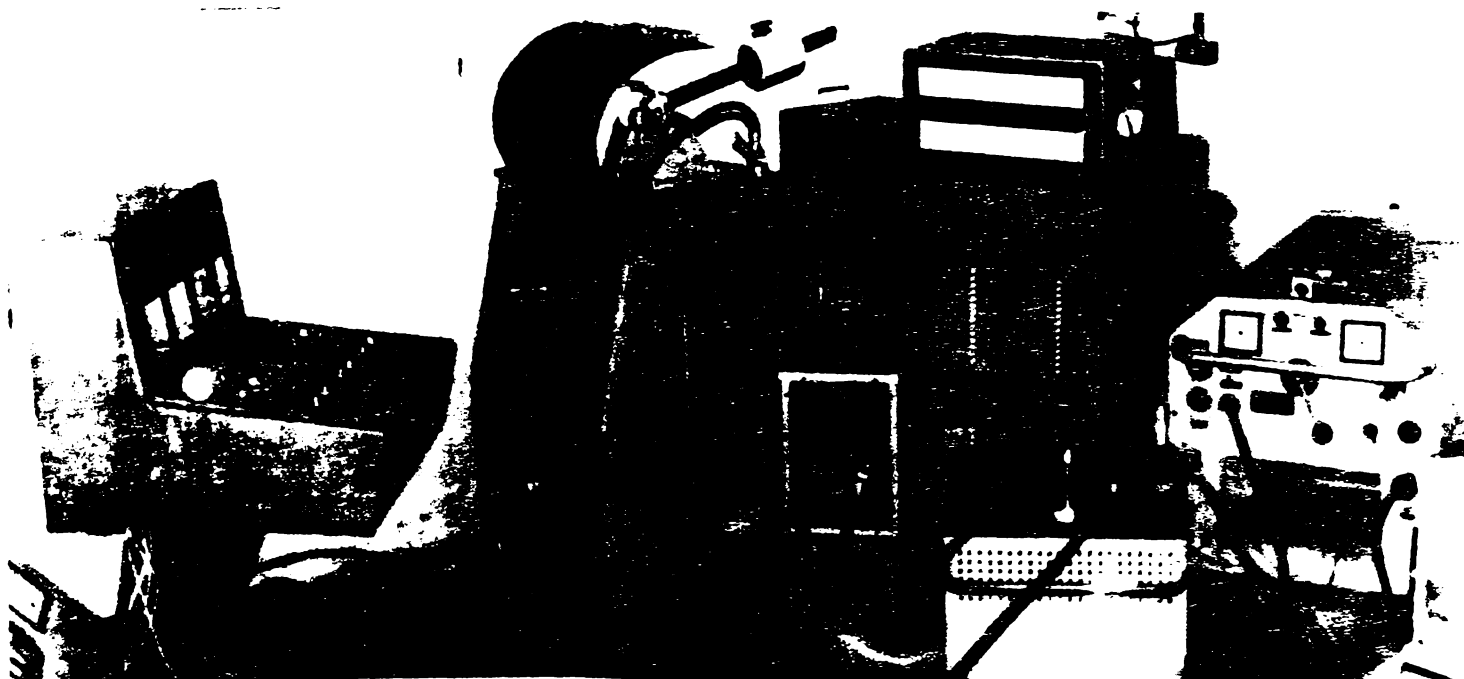


Fig.5.15.-Asemblul instalației experimentale

## 5.2.-Lichide de lucru (electrolitul)

Experiența a demonstrat că proprietățile electrolitului au o influență hotărâtoare asupra procesului de tăiere.

Electrolitii care conțin oxid de siliciu (silicat de natriu sau kaliu, suspensie de lut etc), asigură o productivitate mare și o calitate ridicată a suprafeței tăiate.

Electrolitul preparat pe baza amestecurilor cu silicat de natriu asigură formarea pe anod a unei pelicule destul de rezistente cu rezistență electrică ridicată, ceea ce asigură posibilitatea eroziunii intensive locale a metalului în locul distrugerii acestei pelicule.

În cursul experimentărilor se vor încerca mai mulți electroliti după cum urmează:

- a) soluție din sticlă lichidă cu apă: densitatea 1,28...1,32 gr/cm<sup>3</sup>
- b) soluție din sticlă lichidă cu apă: densitatea 1,36...1,38 gr/cm<sup>3</sup> cu ados de salpetru de natriu sau kaliu în proporție de 10 gr/litru lichid.

Sticla lichidă va avea modulul în limitele 2,25-2,75 pentru limitarea vitezei de uscare.

Modulul este raportul  $\frac{\text{SiO}_2}{\text{Na}_2\text{O}}$

Adosul de salpetru îmbunătățește procesul de formare al scintei iar calitatea suprafeței tăiate se îmbunătățește.

Caracteristica de bază a electrolitului este densitatea care trebuie controlată zilnic.

Pe măsură ce se evaporă apa, amestecul se corectează adăugând apă curată pînă la refacerea densității electrolitului.

În timpul tăierii, în electrolit se detasează particulele de metal de pe piesă și disc; de aceea bazinul cu electrolit trebuie curățat periodic.

Scăderea productivității de tăiere este cauzată de obicei de slăbirea calității electrolitului, în acest caz electrolitul trebuie complet înlocuit.

Intrucit sticla lichidă în soluție creiază anumite deficiențe în legătură cu proprietatea ei de lipire trebuie luate o serie de măsuri pentru eliminarea acestor neajunsuri după cum urmează:

-Se va evita stropirea părților exterioare ale instalației cu electrolit prin bună etanșare a spațiului unde se injectează electrolitul, respectiv spațiul de tăiere disc-piesă.

-Se vor vopăi toate părțile mașinii cu nitrolac și se vor proteja după aceea suprafețele cu un strat subțire de lac special (10% polistirel și 90% diclorețan) sau ulei mineral. În acest caz scoarța sticlei lichide nu se lipește și poate fi ușor îndepărtată.

Se va încerca introducerea în electrolit a 5-10% ulei mineral care îngreunează uscarea soluțiilor de sticlă lichidă.

### 5.3.-Parametrii de lucru

5.3.1. Tensiunea se alege în funcție de diametrul piesei, după cum urmează:

Diametrul piesei în (mm)	Tensiunea de tăiere în (V)
până la 100 - - - - -	20...22
100 - 150	22...24
peste 150 - - - - -	24...28

Tensiunea se reglează de la sursa de alimentare sau de la regulatorul de inducție.

### 5.3.2.-Intensitatea curentului

Intensitatea curentului se alege în funcție de diametrul piesei, după cum urmează:

Diametrul piesei în mm	Intensitatea în A
10...20	20...40
20...40	40...80
40...80	80...120
80...120	120...200
120...150	200...275
150...200	275...350
200...250	350...400



Dacă tensiunea este constantă intensitatea curentului se reglează prin modificarea presiunii discului pe piesă. In cazul instalației experimentale, presiunea discului se reglează adăugându-se contragreutăți pe levierul balansierului care poartă discul.

### 5.3.3.-Discul de tăiere

Diametrele și grosimile recomandate pentru disc în funcție de diametrul piesei de tăiat sînt următoarele:

Diametrul piesei în (mm)	Diametrul discului în (mm)	Grosimea discului în (mm)
pînă la 50 - - - - -	pînă la 150 - - - - -	pînă la 0,5
50...100	150...400	0,8...1,0
100...200	400...600	1,0...1,5
200...300	peste 600	1,5...2,0

### 5.3.4.-Debitul pompei de electrolit

Debitul pompei de electrolit este în funcție de diametrul piesei de tăiat după cum urmează:

Diametrul piesei (mm)	Debitul pompei (l/min)
pînă la 100 - - - - -	20
peste 100 - - - - -	25...30

## 5.4.-Exploatarea instalației

### 5.4.1.-Deservirea instalației

Sursa de alimentare poate fi alimentată direct de la rețea sau prin regulatorul de inducție.

Cu ajutorul regulatorului de inducție se poate obține orice tensiune de alimentare în limitele 0...51 Volți.

Tensiunile care pot fi obținute de la sursă sînt deci în următoarele limite:

- cu regulatorul de inducție 0...51 V
- fără regulator de inducție 23...51 V

După conectarea la rețea a regulatorului de inducție și a sursei de alimentare se pornește pompa de electrolit și se controlează dacă injectorul de electrolit stropește corect zona de contact disc-piesă.

Se pornește motorul de antrenare al discului. La pornire discul se va afla la o distanță de cca 10...15 mm de piesă care urmează a fi tăiată.

Manipulând manivela balansierului, se va apropia încet discul de piesă. Dacă se observă bătăi radiale la disc se va schimba polaritatea de la sursa de alimentare (disc anod) și se apropie discul de piesă. După un scurt timp bătăile radiale vor dispărea prin eroziunea electrică electrochimică a discului. Se intrerupe operațiunea, comutatorul punându-se în poziția normală (disc catod) și se începe tăierea.

Procesul de tăiere se controlează de la ampermetru, manipulând manivela balansierului și căutând a păstra intensitatea curentului prescrisă pentru secțiunea respectivă.

Dacă piesa nu are secțiunea rotundă, se va echivala cu unul din diametre.

Mărirea intensității curentului se poate obține prin adăugarea unor contragreutăți pe levierul balansierului.

Când diametrul discului s-a micșorat pînă la cca 250 mm, acesta se înlocuiește cu alt disc.

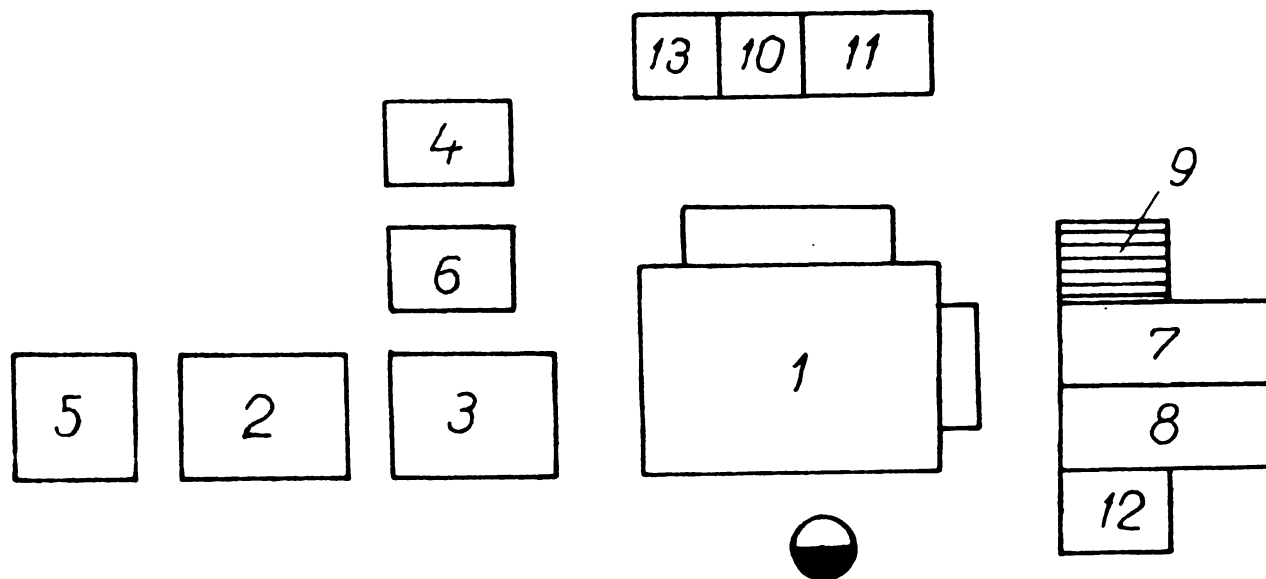


Fig.5.16.-organizarea locului de muncă; 1-mecanismul de tăiere; 2-sursa de curent; 3-pupitrul de comandă; 5-baterii; 6-rezistențe de balast; 7-rastel pentru depozitarea materialelor gata tăiate; 9-rastel pentru discuri de tăiere și dispozitiv de de-tensionare; 10-cuva pentru pregătirea electrolitului; 11-rezervor cu electrolit folosit; 12-boiler pentru apă caldă; 13-rezervor cu electrolit nou

Organizarea locului de muncă este indicată în figura 5.16.

#### 5.4.2.-Intreținerea instalației

Zilnic, se va curăța masa de fixare a pieselor și celelalte părți de electrolitul depus. După aceea se vor spăla cu apă caldă și se vor șterge uscat. Se va avea grijă ca apa cu care se spală să nu intre în bazinul de electrolit.

Săptămânal sau și mai des se va curăța filtrul și bazinul de electrolit de depuneri.

De 2-3 ori pe lună se va spăla pompa cu apă caldă, la fel conductele de circulație și celelalte piese din interior.

Lunar se vor controla toate contactele, periile și inelele colectoare.

La 2-6 luni, se vor controla rulmenții motoarelor și se va înlocui unsoarea lor.

În mod normal electrolitul se va controla săptămânal putându-se folosi electrolitul vechi după decantare, la prepararea noului electrolit.

Pentru pregătirea și manipularea electrolitului sînt necesare:

- un butoi de cca 200 l închis cu dop;
- o căldare;
- un rezou de 4-5 kW pentru pregătirea apei calde;
- un vas cu soluție (de exemplu sodă sau o emulsie) pentru spălarea eventuale a pieselor tăiate;
- o cutie de tablă pentru strîngerea și evacuarea murdăriei din electrolit.

#### 5.5.-Norme de tehnica securității muncii

a) Teste modulele instalației (sursa de curent, regulatorul de inducție, bateria de condensatoare, bobina de self, mecanismul de tăiere și tabloul de comandă) se vor conecta obligatoriu la pământ.

b) La instalație vor fi admisi a lucra numai persoanele care au fost instruite pentru manipularea instalației, care cunosc construcția și funcționarea instalației și care au o calificare corespunzătoare.

c) Decă se folosește electrolit care atacă pielea (de exemplu sticlă lichidă) se recomandă ca înainte de începerea lucrului,

mfinile să fie unse cu vaselină tehnică sau pastă specială, deoarece electrolitul în contact sistematic cu pielea poate provoca inflamația pielii.

Compoziția pastei speciale recomandate este:

-ceară naturală - 60%

-ulei de floarea soarelui - 40%

La pregătirea pastei uleiul se toarnă în ceara topită și totul se amestecă intens. Se pot folosi și mănuși de cauciuc.

d) Se va evita observarea cu ochiul liber a zonei de tăiere unde se pot forma scînteii asemănătoare celor de la sudarea electrică cu arc.

e) Se va evita provocarea scurtcircuitului între disc și piesă, atunci cînd curentul continuu de la redresor nu este întrerupt și redresorul este conectat la rețea direct sau prin regulatorul de inducție.

f) Se va avea grijă ca electrolitul să nu stropescă în exterior și să nu se scurgă pe podea. În acest scop se va controla periodic etanșarea pereților laterali.

g) La prepararea electrolitului, la manipularea bazinului pentru electrolit sau a vaselor care servesc la evacuarea periodică a murdăriei și prafului metalic din electrolit, se va avea grijă ca stropii să nu ajungă pe haine sau încălțăminte.

h) Se vor respecta întocmai instrucțiunile privind exploatarea, deservirea și întreținerea instalației.

i) Instalația se va păstra permanent într-o curățenie desăvîrgită.

j) Se interzice depozitarea bucășilor tăiate în mecanismul de tăiere, acestea vor fi obligator evacuate într-un loc organizat.

l) Montarea discului și de asemenea orice alte lucrări pregătitoare sau de revizie se vor realiza cu instalația deconectată de la rețea.-

**6.-CERCETARI EXPERIMENTALE DE TAIERE PRIN EROZIUNE**

**CONTINUTUL ELECTRIC-ELECTROCHIMIC AL OTELURILOR**

**ALIATE**

**6.1.-Oteluri experimentate la tăiere**

În cercetarea influenței factorilor R, L, C asupra timpului de tăiere și a productivității, asupra zonei influențate termic și asupra rugozității suprafețelor de tăiere s-au folosit oțelurile aliate și oțelurile aliate superioare prezentate în tabela 6.1, oțelurile rapide pentru scule prezentate în tabela 6.2, oțelul pentru scule și matrice C120, tabela 6.3 și oțelurile inoxidabile în tabela 6.4.

**TABELA 6.1**

Compoziție chimică în % a oțelurilor aliate și a oțelurilor aliate superioare pentru construcție de mașini folosite la experimentări

Nr. crt.	Marca	Gr. SFS	C	Mn	Pi	Cr	Ni	Mo
1	15Cr 33	791-80	0,12 0,13	0,40 0,70	0,17 0,37	0,70 1,00	-	-
2	40Cr 10	791-80	0,30 0,44	0,50 0,80	0,17 0,37	0,80 1,10	-	-
3	35Mn 16	791-80	0,32 0,40	1,40 1,80	0,17 0,37	-	-	-
4	40Cr 10	791-80	0,30 0,44	0,50 0,80	0,17 0,37	0,80 1,10	-	-
5	33MoCr 11	791-80	0,30 0,37	0,40 0,80	0,17 0,37	0,90 1,30	-	0,15 0,30
6	41MoCr 11	791-80	0,38 0,45	0,40 0,80	0,17 0,37	0,90 1,30	-	0,15 0,30
7	34MoCrNi 15	791-80	0,30 0,38	0,40 0,70	0,17 0,37	1,40 1,70	1,40 1,70	0,15 0,30
8	21MoMnCr 12	791-80	0,13 0,21	0,30 1,20	0,17 0,37	1,00 1,40	-	0,20 0,30

TABELA 6.2

Oțeluri rapide pentru șcule (STAS 7382-80) folosite la experimentări

Nr. crt.	Denumirea Mar-Simbol ca vechi	Compoziția chimică în %										
		C	Mn max	Si	Cr	Mo	W	V	Co	Ni max	P max	SS max
1	RP 1	0,90	0,45	0,20	3,80	max	9,0	2,0	5,0	0,4	0,025	0,02
		1,0										
2	RP 2 IK50	0,70	0,45	0,20	3,80	max	17,0	1,0	4,5	0,4	0,025	0,02
		0,80										
3	RP 3 IW180	0,70	0,45	0,20	3,60	max	17,0	1,0	-	0,4	0,025	0,02
		0,80										
4	RP 4 RW 90	0,85	0,40	0,20	3,60	max	8,5	2,0	-	0,4	0,025	0,02
		0,95										
5	RP 5 RMo50	0,75	0,40	0,20	3,80	480	6,0	1,70	-	0,4	0,025	0,02
		0,85										

Elementele de aliere prezentate în compoziția acestor oțeluri alături de un conținut ridicat de C, contribuie la mărirea calibilității, la formarea carburilor dure și rezistențe la uzură, la creșterea stabilității la revenire. Funcție de conținutul în elemente de aliere oțelurile de șcule se clasifică în oțeluri slab aliate și oțeluri bogat aliate (oțeluri rapide).

Oțelurile de șcule bogat aliate (oțelurile rapide) fac parte din clasa oțelurilor ledeburitice și se caracterizează prin prezența în compoziția lor chimică a unor elemente de aliere cu W, Cr, V, Mo, Co și a unui conținut de peste 0,7% C pentru formarea unor carburi complexe dure rezistente la uzură. Carburile lamelare sau de formă alungită sînt incluse în matricea austenitică.

Conform STAS 7382-80 aceste oțeluri sînt produse într-o gamă largă de sorturi, diferind între ele prin compoziția elementelor de aliere W 10...25%, Cr pînă la 5%, Mn pînă la 1% și V 1...2,5%.

Prezența simultană a W, Cr, Mo pot surrima transformarea  $\alpha \rightarrow \gamma$  și de aceea se adaugă în compoziție C, element gamagen.

Cobaltul prezent în oțelurile RP 1 și RP 2, provoacă durificarea austenitei reziduale; un procent mai ridicat stabilizează austenita, nepermițînd transformarea ei în martensită.

Elementele de aliere favorizează și o durificare secundară importantă, fapt care face ca aceste oțeluri să posede cele mai corespunzătoare proprietăți pentru așchieră cu viteze mari a materialelor metalice cu duritate ridicată.

Oțelurile rapide care trebuie debitate prin tăiere, sînt de obicei livrate în bare forjate sau laminate. În procesul de prelucrare a acestor oțeluri structura lor trece de la o rețea de ledeburită (pe un fond de perlită și ferită), care prin deformare plastică la cald (1100...900°C) se înfrînge și dispersează, structura fiind astfel constituită (cu recobocire) din corpuri globulare uniforme distribuite pe un fond perlito-feritic. O durificare maximă a sculelor din oțel rapid se obține printr-un tratament termic de călire și revenire (înălbire la 1200°C; răcire la 500...550°C).

Carburile primare nedizolvîndu-se la temperatura de austenizare, structura oțelului călit va fi formată din martensită, austenită reziduală și carburi nedizolvate. Pentru obținerea unei durități maxime, austenita reziduală se transformă în martensită prin reveniri multiple la 550...580°C sau prin căliri în medii refrigerante.

Structura finală a oțelurilor de scule este alcătuită din martensită și carburi uniforme distribuite.

La începerea întreprinderii ICM Caransebeș s-au făcut multiple experimentări de tăiere prin eroziune electrică-electrocimică a unui oțel înalt aliat, frecvent utilizat la confecționarea sculelor ce lucrează la rece (matrițe, stampe) oțelul C120 (tabel 6.3).

Tabel 6.3

Compoziția chimică în % a oțelului C120

Marce	Nr. STAS	C	Mn	Si	Cr	Ni
C 120	3611-80	1,8-2,2	0,15-0,45	0,15-0,35	11-13	max 0,35

Oțelul ledeburitic de tip C120 de fabricație indigenă este un oțel cu conținut ridicat de crom (11...13%) și carbon (1,8...2,2%). Este un oțel destinat sculelor care lucrează la rece,

fiind constituit din cristale de austenită primară și dintr-un eutectie compus din austenită și carburi de crom  $(CrFe)_7C_3$  repartizate neuniform în masa metalică. Livrarea oțelului se face în stare receptă sau revenită la temperaturi înalte. Durețatea oțelului în această stare este de 217...270 HB.

Oțelurile cu conținut ridicat de crom sînt sensibile la decarburare în timpul încălzirii.

Similar cu oțelul C120 sînt oțelurile sovietice H12, H12F1, H12F și H12M cu 12%Cr și 1,2...2,3%C, folosite mult în industria constructoare de mașini la confecționarea matrițelor.

Oțelul H12 are un conținut ridicat de C. 2,0...2,3% și de aceea are un conținut mai mare de carburi primare, repartizate neuniform în masa metalică principală. Neomogenitatea ridicată de carburi înlățește proprietățile mecanice și din această cauză oțelul H12 are o utilizare mai limitată (matrițe pentru sarcini mai mici fără margini subțiri).

Oțelurile H12M, H12F și H12F1 conțin mai puțin carbon (1,2...1,7%) și au proprietăți mecanice mai ridicate.

Avînd în vedere că oțelurile inoxidabile se comportă diferite la tăierea prin eroziunea electrică-electrochimică din cauza rezistenței lor sporite la coroziune, datorită procentului ridicat de Ni (9...13%) și Crom (17...19%) experimentările s-au extins și asupra oțelurilor 7NiCr180, 7TiNiCr180 și 7NbNiCr180 (tabelul 6.4).

TABELA 6.4

Compoziția chimică în % a oțelurilor inoxidabile 7NiCr180, 7TiNiCr180 și 7NbNiCr180

Marcă	STAS	C	Mn	Si	Cr	Ni	Ti	Alte elemente
7NiCr180	5583-64	max 0,08	1,0-2,0	max 0,8	17-19	9-11	-	
7TiNiCr180	-"-	max 0,08	1,0-2,0	max 0,8	17-19	9-11	max 0,60	
7NbNiCr180	-"-	max 0,08	1,0-2,0	max 0,8	17-19	11-12	-	Niobin max.1,2



La oțelurile aliate inoxidabile cu Cr-Ni, elementele de aliere gamagene (Ni, Mn) stabilizează structura austenitică la toate temperaturile și se durifică prin precipitarea unor carburi sau compuși intermetalici. Prin tratamente termice (călirea la  $1050^{\circ}\text{C}$ ... .. $1150^{\circ}\text{C}$  și răcire în apă) se obține o soluție suprasaturată de austenită metastabilă urmată de o durificare prin precipitare (revenire înaltă).

#### 6.2.-Experimentări privind influența factorilor R, L, C asupra timpului de tăiere și a productivității

Așa cum s-a arătat în subcapitolul 4.2, la prelucrarea prin eroziune complexă electrică-electrochimică există o dependență strinsă între sistemul energetic sursă-circuit-spațiul de lucru (SCSC) și fenomenele din proces.

Intensitatea procesului de eroziune depinde de parametrii impulsurilor (formă, durată, amplitudine, energie etc), iar acestea sînt determinate la rîndul lor de caracteristicile electrice ale sursei și ale circuitului (R,L,C).

Se reamintește deasemeni (subcapitolul 4.6) că printre factorii care determină stabilitatea procesului de tăiere prin eroziune electrică-electrochimică, sînt și caracteristicile circuitului electric (R,L,C). Prin programul de experimentări prezentat în acest subcapitol s-au făcut determinări ale tensiunii optime dintre electrozi la curenți variabili în limite restrînse, pentru mai multe oțeluri aliate și s-a cercetat variația timpului de tăiere în funcție de curentul de lucru, în condițiile R,L,C reglabile. De asemenea s-a cercetat influența inductanței și a capacității bateriei de condensatoare asupra timpului și al productivității.

##### 6.2.1.-Tensiunea optimă între electrozi

Tensiunea dintre electrozi se poate regla prin variația regimurilor de lucru a sursei și prin variația rezistenței R din circuit. Evident nu este economic reglajul tensiunii prin variația rezistenței R deoarece se produc pierderi de energie suplimentare.

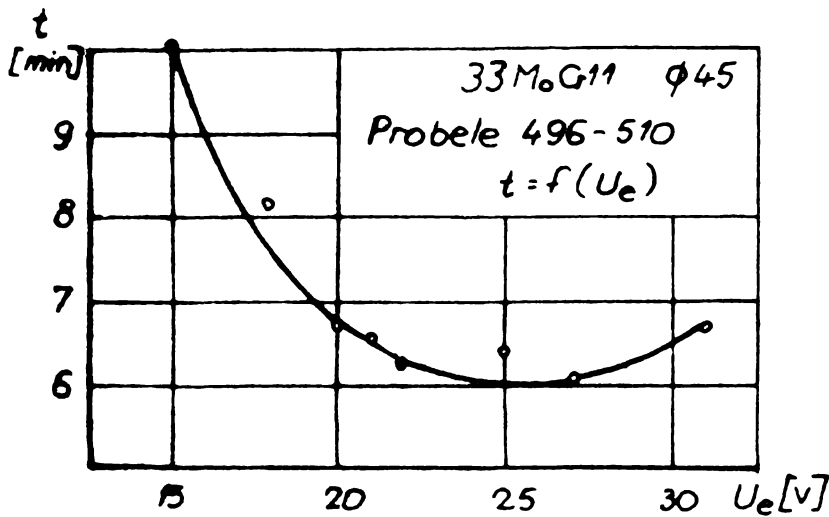


Fig.6.1.-Variația timpului de tăiere în funcție de tensiunea între electrozi  $t=f(U_e)$  pentru  $I_t=50A$ ;  $L=8,5$  mH

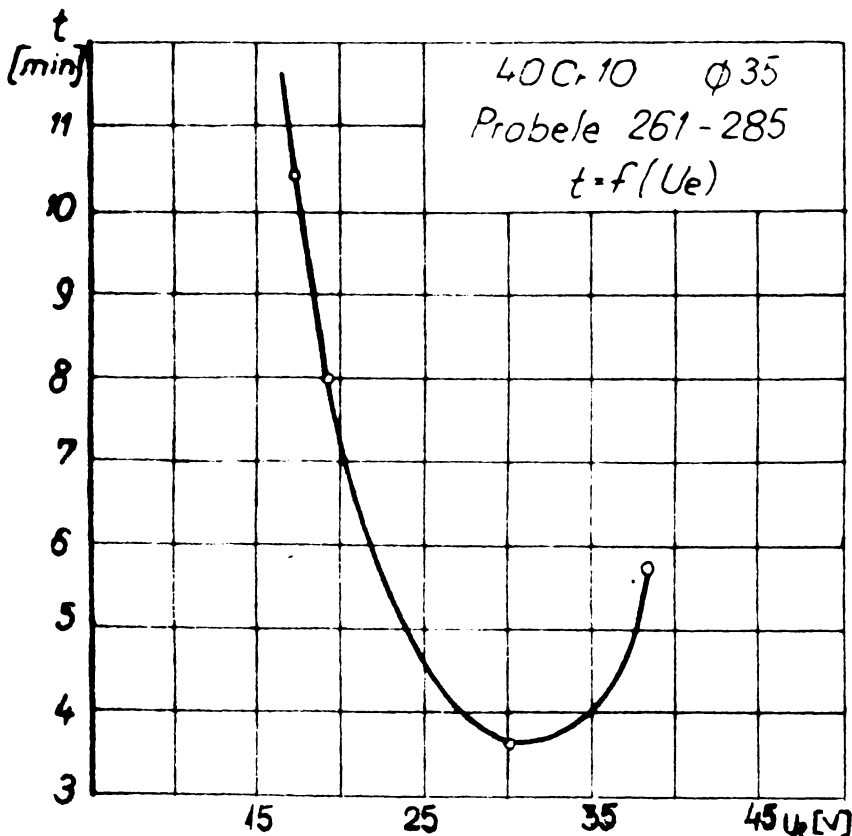


Fig.6.2.-  $t=f(U_e)$  pentru  $I_t=100$  A

22...35 V dacă se ia în considerare numai productivitatea.

O importanță deosebită în ce privește tensiunea optimă între electrozi o are calitatea lichidului de lucru. Astfel la un lichid de lucru corespunzător tensiunea optimă poate varia în limitele 22-28 V (figura 6.1) în timp ce în cazul unui lichid de lucru necorespunzător tensiunea optimă crește în limitele 27...35 V (figura 6.2). O stabilizare în limite mai inferioare a tensiunii s-a realizat prin introducerea unei inductanțe suplimentare  $L=8,5$  mH (figura 6.1). La tăierea oțelurilor rapide (figura 6.3) tensiunea optimă este în limite mai largi

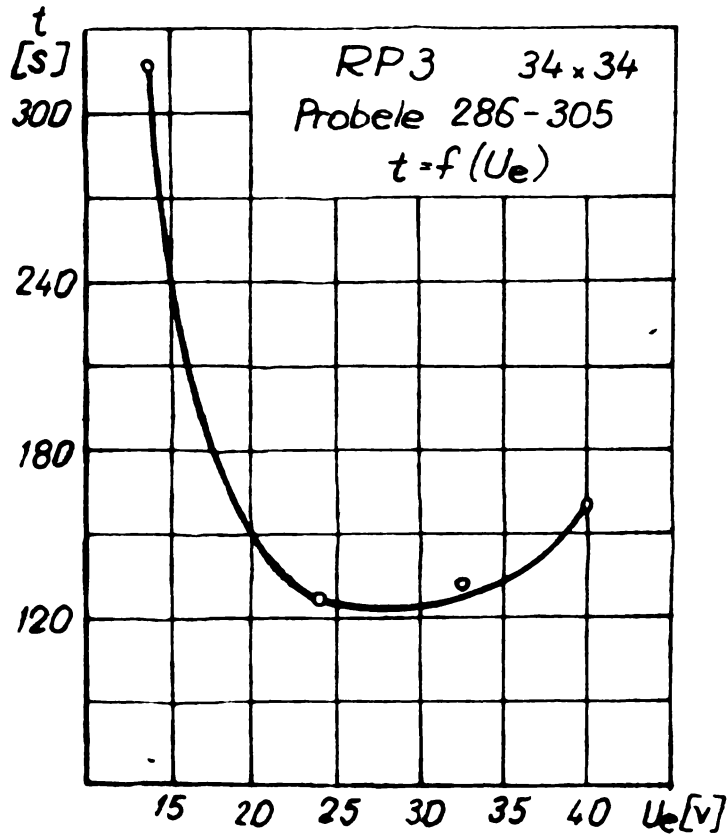


Fig. 6.3. -  $t=f(U_e)$  pentru regim sursă 2, 3, 4;  $R=0,094\dots 0,141$  ohmi

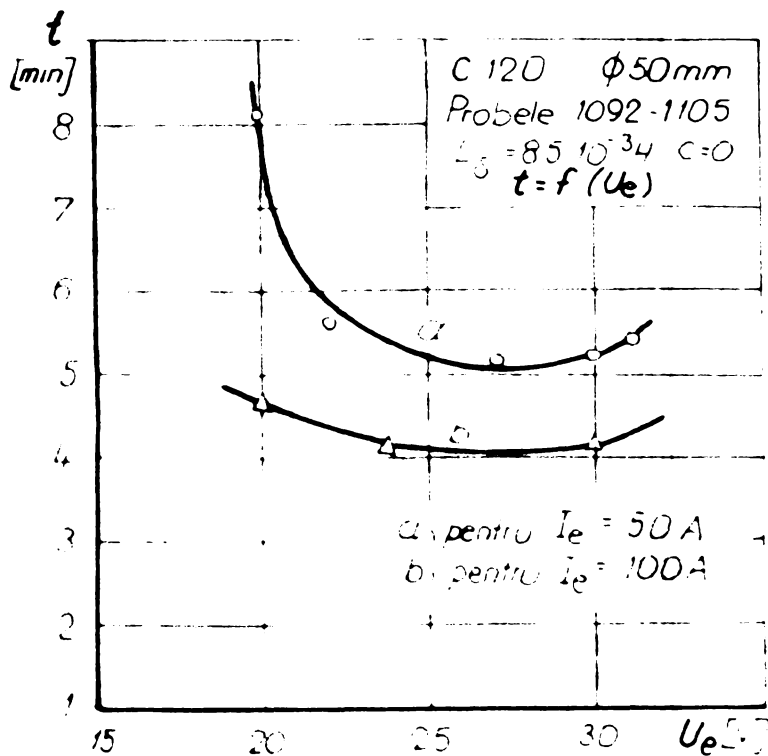


Fig. 6.4. -  $t=f(U_e)$  pentru: a)  $I_e = 50$  A; b)  $I_e = 100$  A;  $L = 8,5$  mH;  $C = 0$

Pentru a se elimina pericolul de fisurare, acest interval trebuie redus la 22...30 V respectiv

$U_{eop} = 26$  V.

În ce privește oțelurile de matrițe de tip C120, la care nu s-a observat pericolul de apariție a fisurilor în ZII, tensiunea optimă pe electrozi (figura 6.4) se menține în limitele 22...30V,

respectiv  $U_{eop} = 26$  V.

Oțelurile inoxidabile solicită la tăiere tensiuni mai mari, probabil din cauza modificării esențiale a fenomenului

electrochimic de dizolvare anodică, care modifică echilibrul dinamic între procesele de formare a peliculei pasivante și procesele de îndepărtare a acesteia pe anod.

Conform figurilor 6.5 și 6.7 tensiunea optimă pe electrozi se menține în limitele 25...30 V respectiv

$U_{eop} = 30$  V pentru curent de lucru sub 50 A și 22...30 V respectiv

$U_{eop} = 26$  V pentru curenți mai mari (cea 100 A).-

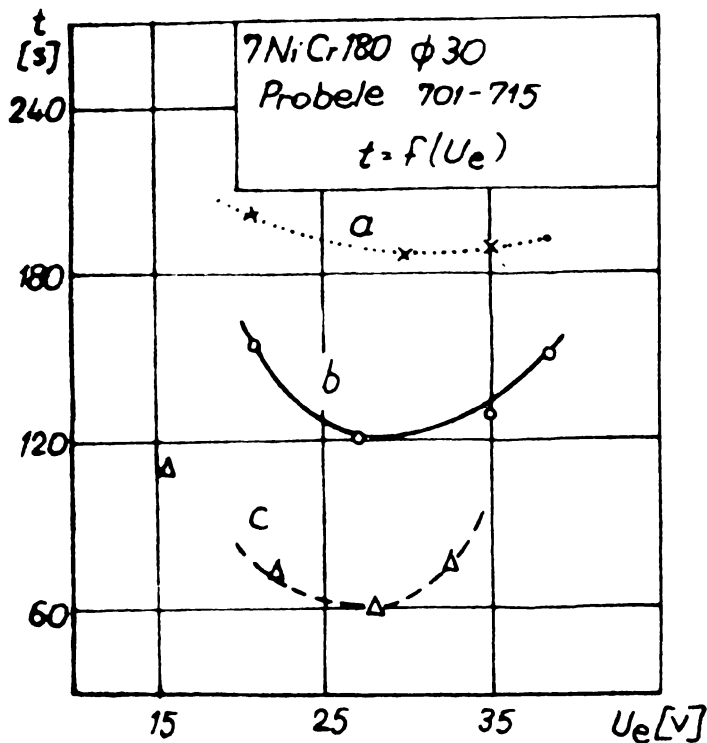


Fig.6.5.-  $t=f(U_e)$  la diferite valori ale curentului de lucru: a)  $I_2=30A$ ; b)  $I_2=50A$ ; c)  $I_2=100 A$ ;  $L=8,5mH$ ;  $C=0$

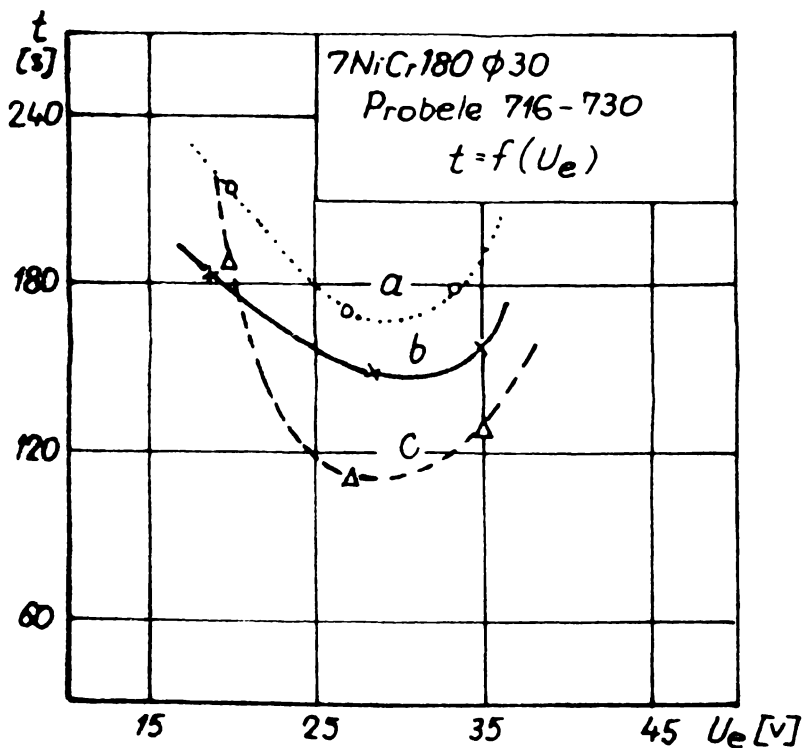


Fig.6.6.-  $t=f(U_e)$  la diferite capacități a)  $C=56400\mu F$ ; b)  $C=37600\mu F$ ; c)  $C=18800\mu F$ ;  $L=8,5 mH$

S-a cercetat influența conectării în circuit a unor baterii de condensatoare de capacitate pînă la  $56400\mu F$  constatîndu-se următoarele (figura 6.6 și 6.8): tensiunea optimă pe electrozi în limitele 22-23 V s-a obținut pentru  $C=37.600\mu F$  (figura 6.8 diagrama b) cînd timpul de tăiere a fost minim. O reducere a capacității bateriei de condensatoare (figura 6.8 diagrama d;  $C=0\mu F$ ) a mărit timpul de tăiere pentru aceeași tensiune pe electrozi cu eca 75%. Concluzii similare se pot deduce și din figura 6.6. Tensiunile optime între electrozi în condițiile  $R, L, C$  reglabile sînt prezentate în tabela 6.5.

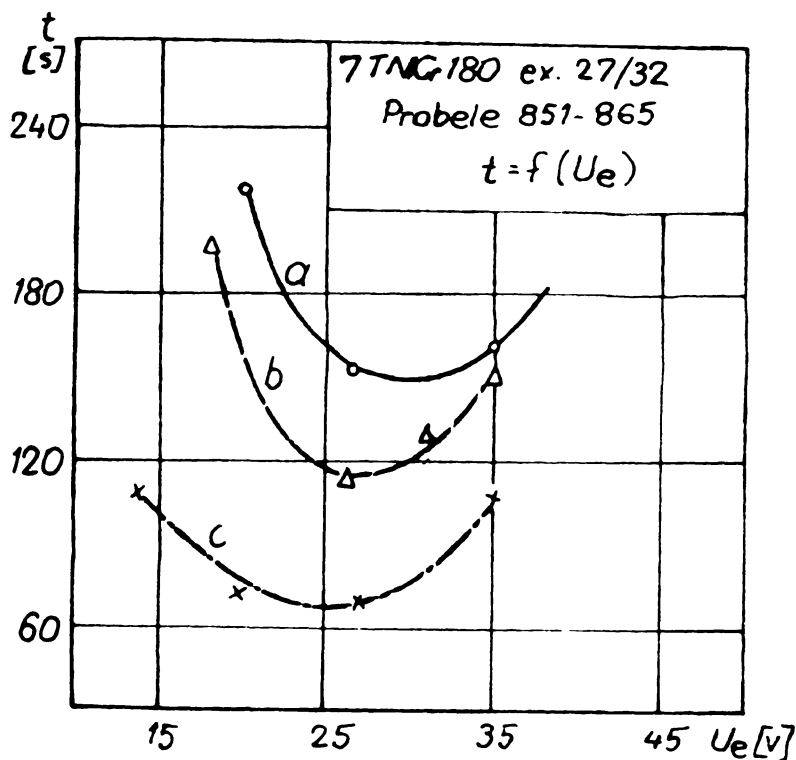


Fig. 6.7.-  $t=f(U_e)$  la diferite valori ale curentului de lucru a)  $I_l = 30$  A; b)  $I_l = 50$  A; c)  $I_l = 100$  A

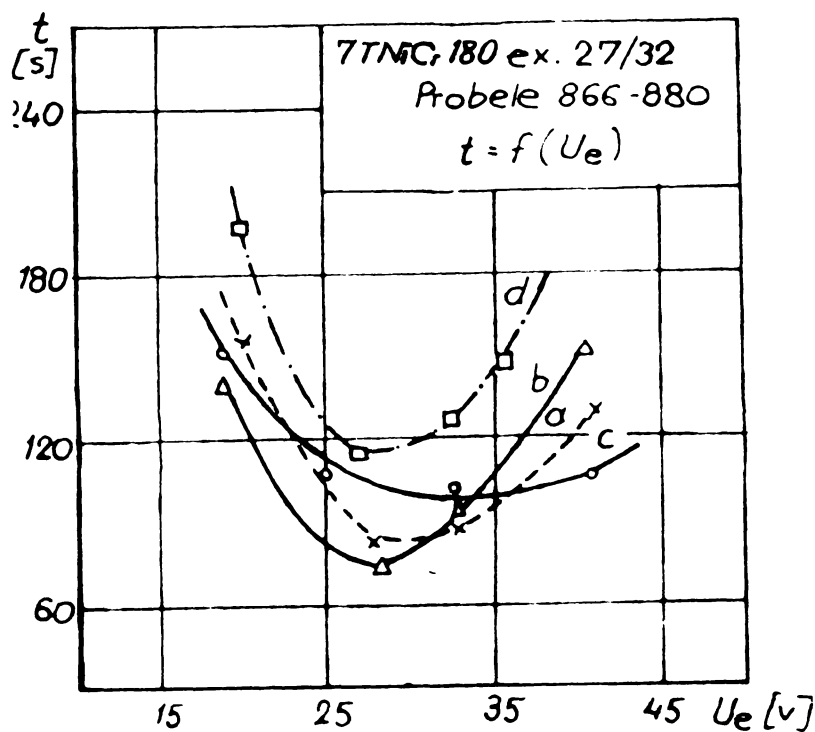


Fig. 6.8.-  $t=f(U_e)$  la diferite capacități: e)  $C = 5640 \mu F$ ; b)  $C = 3760 \mu F$ ; c)  $C = 1880 \mu F$ ; d)  $C = 0$ ;  $L = 8,5$  mH

**TABELA 6a**

Tensiunea optimă între electrozi în condițiile R,L,C reglabile la diferite oțeluri experimentate la tăiere

Material	Dimens.- mat.exp. in mm	R,L,C reglabile			U <sub>e</sub> acceptabi- lă V	U <sub>e</sub> optim	I <sub>e</sub> A
		R max ohmi	L mH	C μF			
35MoCr 11	ø45	0,188	8,5		22-28	25	
40Cr 10	ø35	0,188	8,5	-	22-28	25	
Rp3	34x34	0,188	8,5	-	22-30	26	
C 120	ø50	0,188	8,5	-	22-30	26	
7NiCr 180	ø30	0,188	8,5	-	25-35	30	30-50
7NiCr 180	ø30	0,188	8,5	37600	22-30 22-32	26 27	100
7TiCr 180	ex 27/32	0,188	8,5		25-35	30	30-50
7TiCr 180	ex 27/32	0,188	8,5	37600	22-30 22-32	26 27	100

6.2.2.-Variația timpului de tăiere și a productivității în funcție de curentul de lucru

Regimul electric (densitatea de curent, tensiunea) determină intensitatea de desfășurare a procesului respectiv productivitatea și calitatea suprafeței prelucrate.

Intensitatea curentului de lucru, respectiv densitatea de curent care este de obicei variabilă în procesul de tăiere la materiale de secțiune rotundă, este factorul determinant al procesului.

La densități mici ale curentului prelucrarea are un caracter pronunțat electrochimic dacă și tensiunea pe spațiul de lucru este mică, la densități mari de curent, predomină descărcări electrice prin impulsuri generate la nivelul micro-asperităților.

Experimentul s-a stabilit că valorile limită a densității de curent se obțin la o tensiune de cca 30-32 V la majoritatea oțelurilor aliate și bogat aliate, cu excepția oțelurilor inoxidabile unde aceste valori limită a densității de curent se obțin la o tensiune ceva mai ridicată de cca 30...35 V (figurile 6.5, 6.6, 6.7, 6.8).

Variația timpului de tăiere și a productivității în funcție de curentul de lucru pentru rezistența  $R$  reglabilă în limitele  $0,047...0,094$  ohmi și  $L=C=0$ , sînt prezentate în figurile 6.9, 6.10, 6.11, 6.12. Experimentările s-au făcut cu oțelurile 33MoCr 11 -  $\phi 45$  mm; 34MoCrNi 15 -  $\phi 20$  mm; 21MoMnCr 12 -  $\phi 26$  mm și 35Mn 16 -  $\phi 26$  mm.

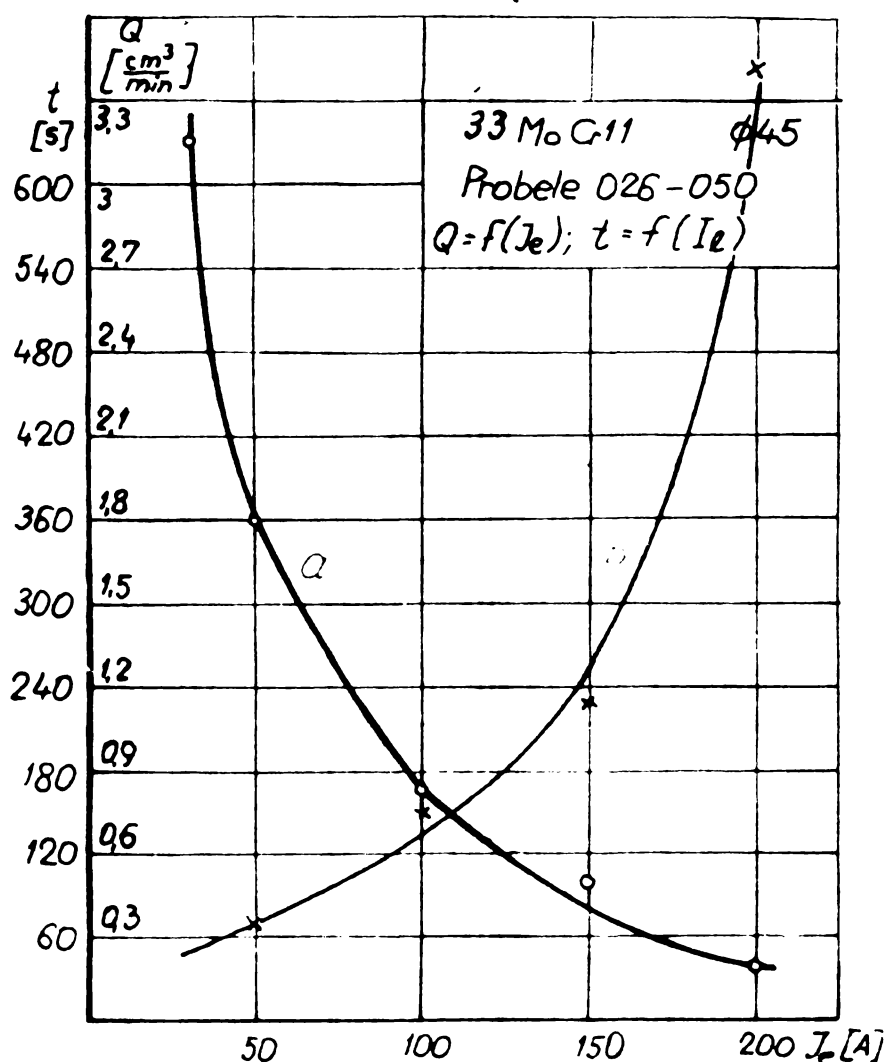


Fig.6.9.-Variația timpului de tăiere și a productivității și eroziunii în funcție de curentul de lucru:  $t=f(I_e)$  și  $Q=f(I_e)$  pentru 30...50 A; regim 2; 100...200 A; regim 3;  $L=C=0$

Se observă că pentru o variație a curentului de la 50 la 200 A timpul de tăiere scade, respectiv productivitatea crește de cea 3...5 ori. La oțeluri aliate diferite de aceeași secțiune (figura 6.12) timpii de tăiere pentru diverși curenți

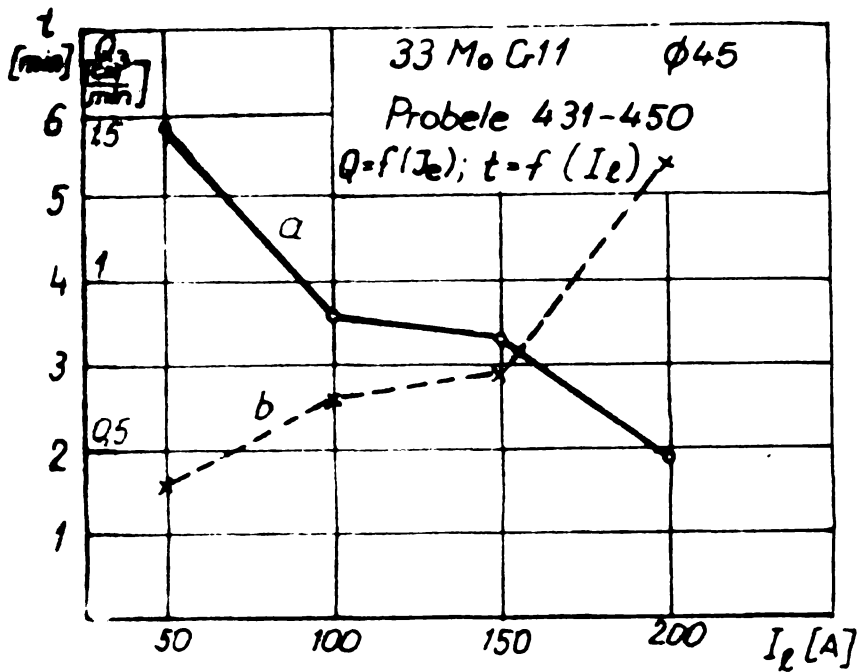


Fig. 6.10.-  $t=f(I_2)$  și  $Q=f(I_2)$  pentru  $R=0,047...0,094$  ohmi;  $L=C=0$

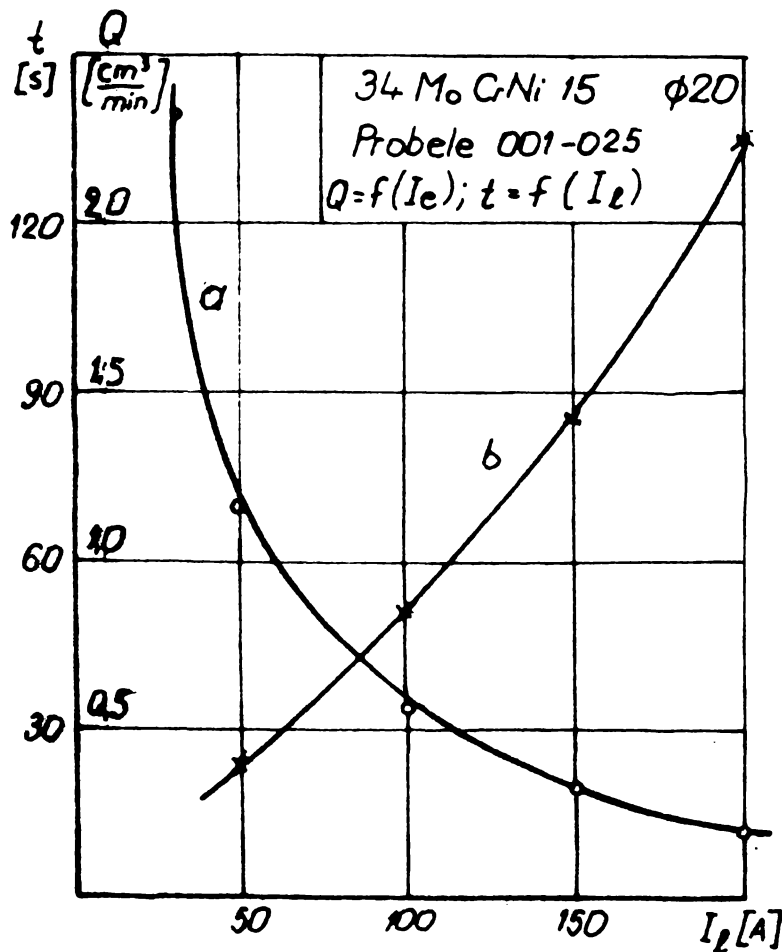


Fig. 6.11.-  $t=f(I_2)$  și  $Q=f(I_2)$  30...50A; regim 2; 100...200 A, regim 3;  $L=C=0$

de lucru sînt foarte apropiati. Aproape identic se comportă și oțelul rapid Rp3 (figura 6.13), variația timpului pentru curenți de tăiere de 50...200 A fiind cam aceeași (de cea 4 ori)

O comportare diferită s-a constatat la oțelul pentru metrițe (figura 6.14) la care s-a obținut o mai bună stabilitate a procesului de tăiere (manifestată prin menținerea mai ușoară a curenților de lucru), reglarea inductanței la valoarea de  $L=8,5$  mH ( $C=0$ ;  $U_2=25...32$  V).



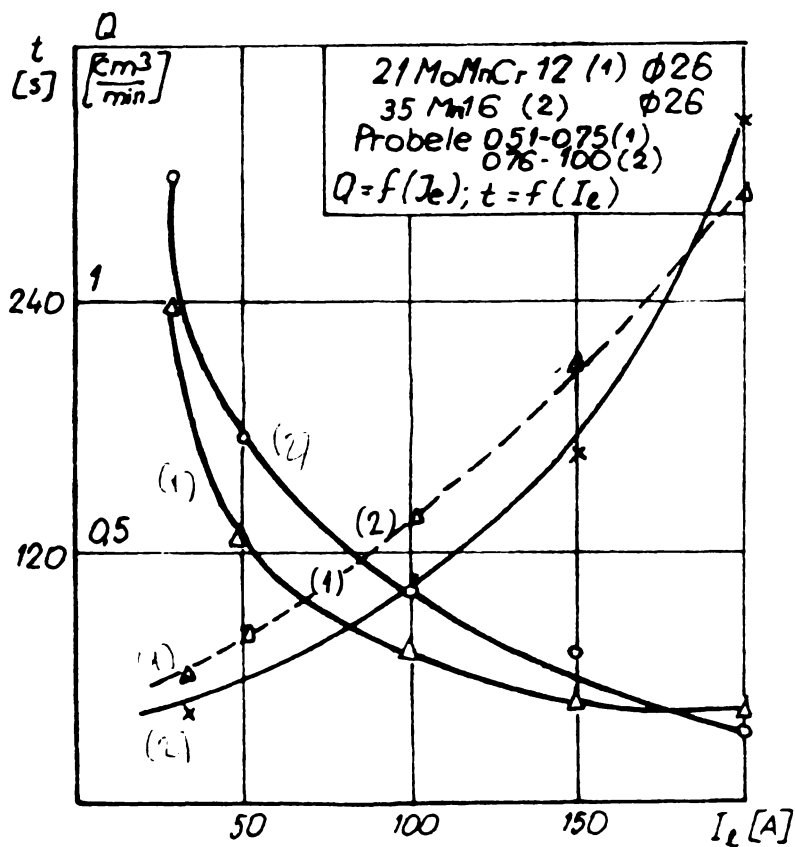


Fig.6.12.-  $t=f(I_e)$   
 și  $Q=f(I_e)$  pentru  
 1) material  
 21MoMnCr 12- $\phi 26$  mm  
 2) material  
 35Mn16 -  $\phi 26$  mm

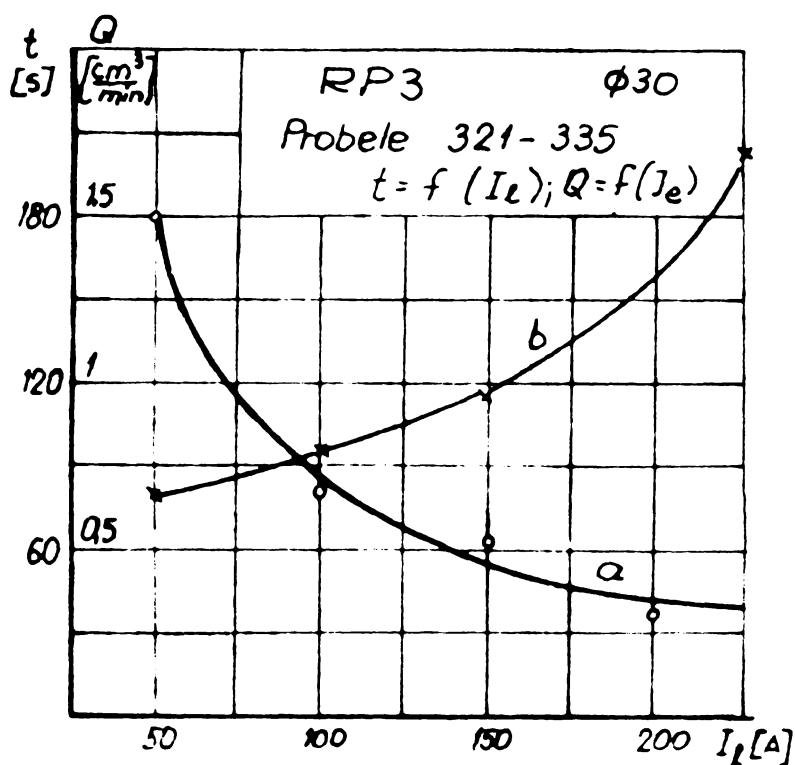


Fig.6.13.-  $t=f(I_e)$   
 și  $Q=f(I_e)$  pentru  
 $U_e=22\dots 26$  V; regim 3  
 $k=0,094$  ohmi;  
 $L=0,5$  mH;  $C=$

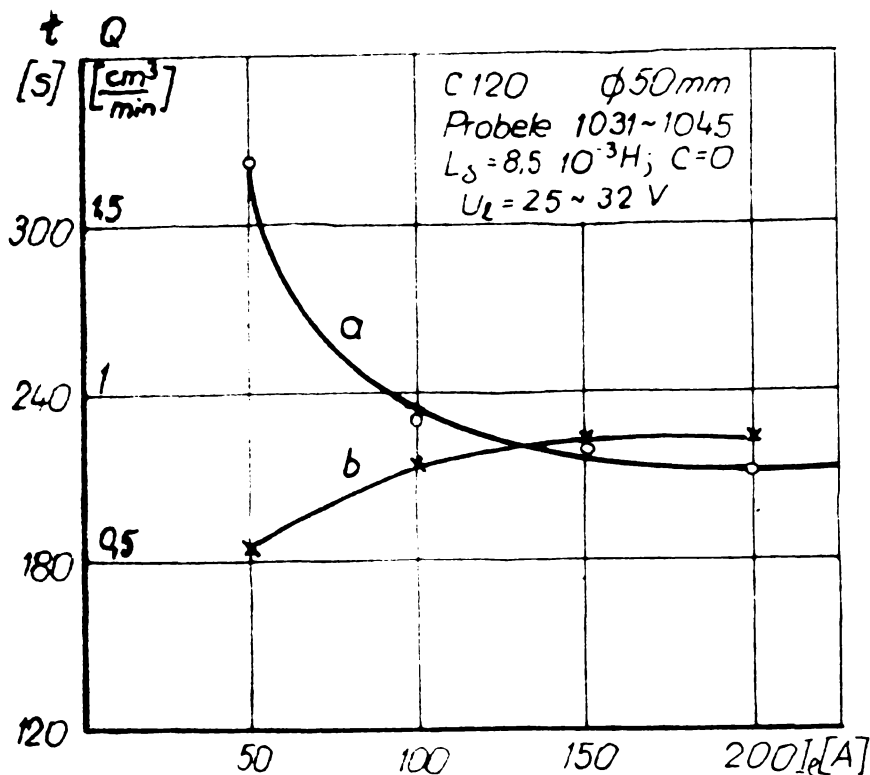


Fig.6.14.-  $t=f(I_e)$  și  $Q=f(I_e)$  pentru  $L=8,5 \text{ mH}$ ;  $C=0$

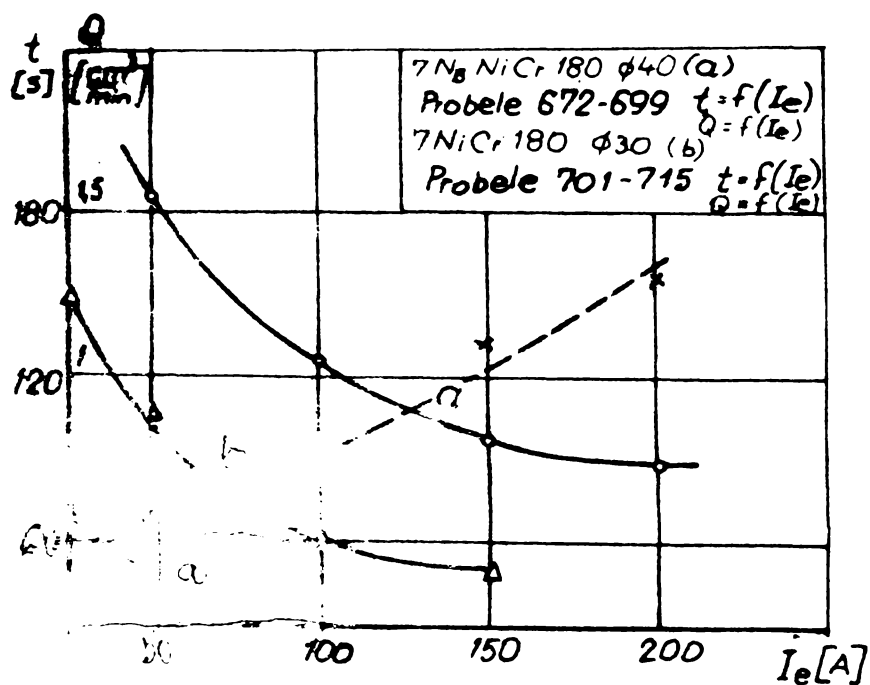


Fig.6.15.-  $t=f(I_e)$  și  $Q=f(I_e)$  pentru:  
 a) 7NbNiCr 180 -  $\phi 40 \text{ mm}$ ;  
 b) 7NiCr 180 -  $\phi 30 \text{ mm}$

Variația timpului de tăiere respectiv productivitatea în funcție de curentul de lucru are o alură cu totul diferită față de celelalte oțeluri bogat aliate (figura 6.15, 6.16, 6.17, 6.18). Tensiunea dintre electrozi are o influență mare asupra timpului de tăiere (figura 6.18).

Se observă că alegerea unei tensiuni optime poate majora productivitatea procesului de tăiere cu cea locă la curenți mari și cu cea 50% la

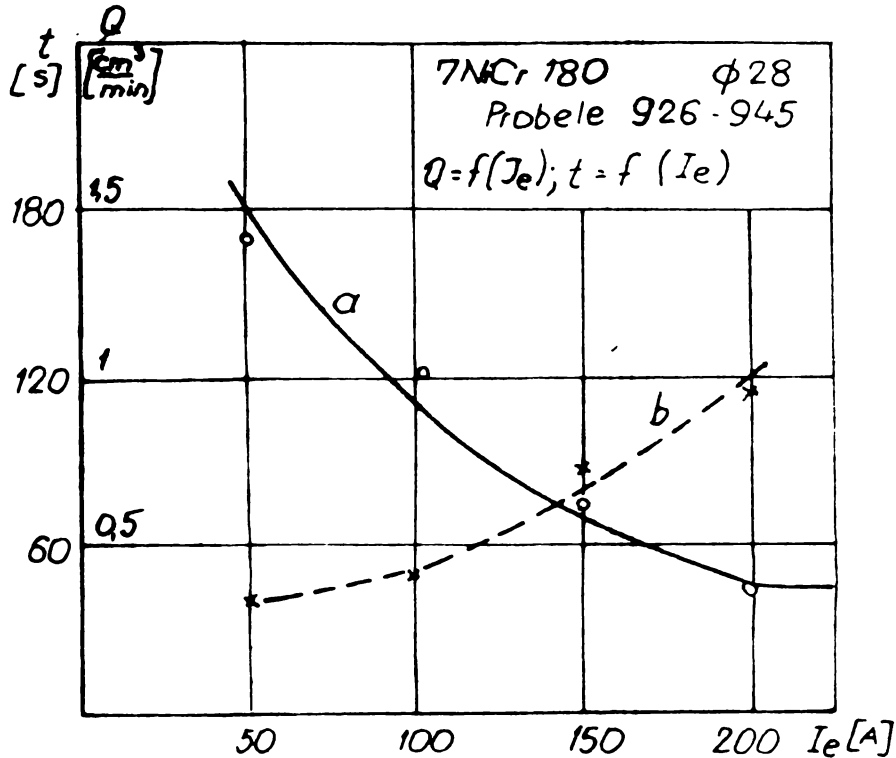


Fig.6.16.-  $t=f(I_e)$  și  $Q=f(I_e)$  pentru  $U_e = 20...27$  V

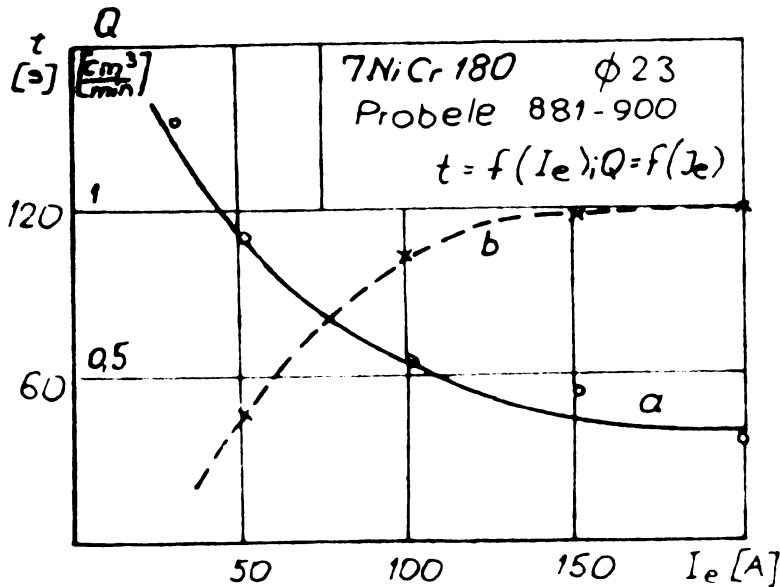


Fig.6.17.-  $t=f(I_e)$  și  $Q=f(I_e)$   
 $U_e = 25...28$  V;  $L=8,5$  mH;  $C=0$

curenți mici. Timpii minimi de tăiere s-au obținut pentru tensiunea  $U_e$  pe electrozi de 30...31 V, care poate fi socotită tensiunea optimă. Timpul de tăiere nu poate fi micșorat prin majorarea presiunii electrodului disc pe electrodul obiect (figura 6.19)

Astfel la o variație a presiunii discului în limitele 2...11 daN, timpii de tăiere au rămas practic aceiași însă uzura discului a crescut foarte mult la presiuni mai mari.

În figura 6.20 este prezentat modul de variație a presiunii discului prin adăugarea de greutate suplimentare pe consolă.

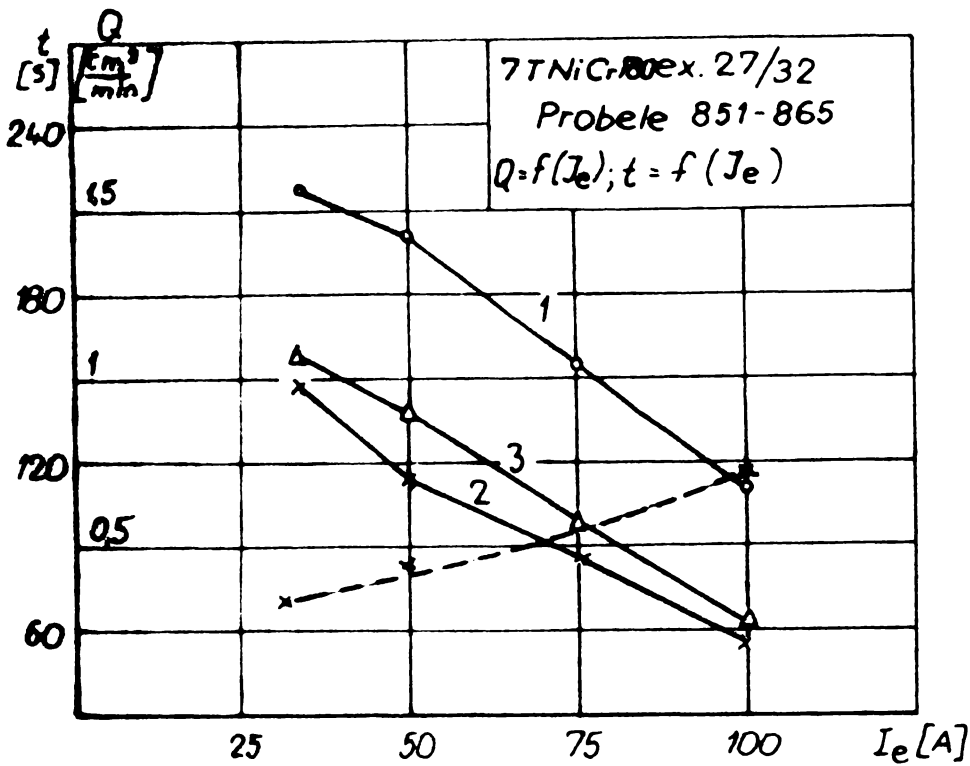


Fig. 6.18.-  
 $t=f(I_e)$  și  
 $Q=f(I_e)$  - pentru  
1)  $U_e=24...28V$ ;  
2)  $U_e=30...31V$   
3)  $U_e=35...37V$

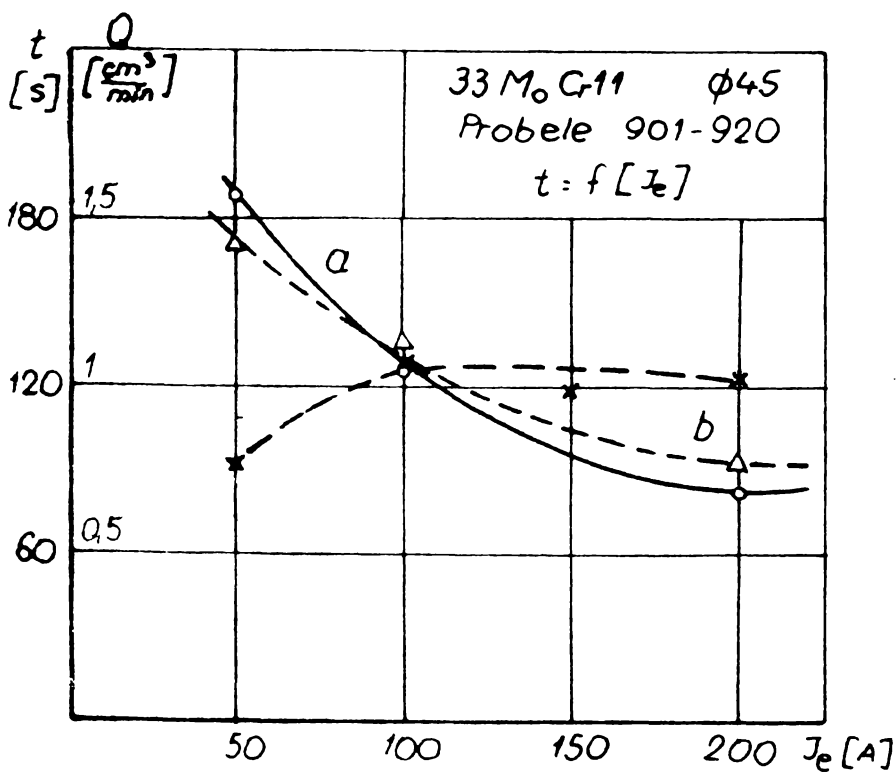


Fig. 6.19.-  $t=f(I_e)$   
și  $Q=f(I_e)$  pentru  
diverse presiuni  
ale discului  
 $U_e=24...28V$ ;  
 $L=8,5\text{ mm}$ ;  $C=0$ ;  
a)  $p=11\text{ daN}$ ;  
b)  $p=2\text{ daN}$

Lățimea tăieturilor realizate la diferite valori ale curentului de lucru este prezentată în figura 6.21 și variază în limite mici ( $\Delta b_2=0,3...0,5\text{ mm}$ ) la variații mari ale curentului de lucru (50...200 A).



Fig.6.20.-Centragreutățile suplimentare pentru variația presiunii disc-obiect



Fig.6.22.-Tăierea materialelor de formă circulară



Fig.6.21.-Forma tăieturilor realizate cu diferite regimuri de tăiere

Tăierea materialelor de formă circulară respectiv așezarea barei, a diuzei de strepire și a discului în procesul de tăiere se pot observa în figura 6.22.

### 6.2.5.-Influența inductanței L

Pentru a se cerceta influența inductanței L asupra variației în timp a tensiunii  $U_0$  și a curentului de lucru  $I_l$ , s-a procedat la înregistrările tensiunilor și curenților, la tăierea unor bare din oțel inoxidabil de  $\phi 40$  mm cu și fără inductivitate. Înregistrările s-au făcut cu două instrumente înregistratoare VAREB fabricație METRA KOVO Praga.

Caracteristicile tehnice ale instrumentelor sînt: clasă de precizie pe voltmetru 1,5; clasă de precizie pe milivoltmetru cu compensator 2,5; vitezele benzii 20, 60, 120  $\mu$ m; 600, 1800, 3600 mm/h (s-a lucrat cu viteza maximă 3600 mm/h = 1 mm/s); domenii de tensiuni la c.c.: 600, 300, 150, 30, 15, 6; domenii de tensiuni la c.a.: 600, 300, 150, 30, 15; tensiuni cu compensator: 6, 15, 60, 300, 1500 mV; ampermetru direct, fără compensator 6; 1,5; 0,5; 0,06; 0,015 A, c.c. și c.a.; cu compensator 30, 60, 300, 1500, 6000  $\mu$ A.

S-au făcut în total 12 probe de înregistrări cu diferite valori ale inductanței, din care s-au selectat cinci probe prezentate în figurile 6.23; 6.24; 6.25; 6.26 și 6.27. Înregistrările prezentate în figurile 6.23 și 6.24 s-au realizat la tăierea unor bare din oțel 7NBNiCr 180 de  $\phi 40$  mm cu  $L=C=0$  și curenți de 60 și 90 A.

Înregistrările prezentate în figurile 6.25, 6.26, 6.27 s-au realizat la tăierea unor bare identice cu  $L=8,5$  mH,  $C=0$  și curenți de 50 A, 100 A și 145 A.

S-au constatat următoarele:

- Procesul de tăiere a fost mai stabil la probele realizate cu  $L = 8,5$  mH.
- Tăierea barelor la un regim de peste 90 A, nu s-a putut desfășura normal la  $L=0$  din cauze instabilității procesului de tăiere, deranjat de dese scurtcircuite și chiar deformări și blocări ale discului de tăiere în bara de  $\phi 40$  mm.
- Din analize înregistrărilor tensiunii  $U_0$  și a curentului de lucru  $I_l$ ... se observă că variațiile curentului la  $L=0$ , sînt de cea 70...100 A; iar cu  $L=8,5$  mH sînt de numai 30...60 A, același efect de stabilizare se observă și la tensiunea pe electrozi.

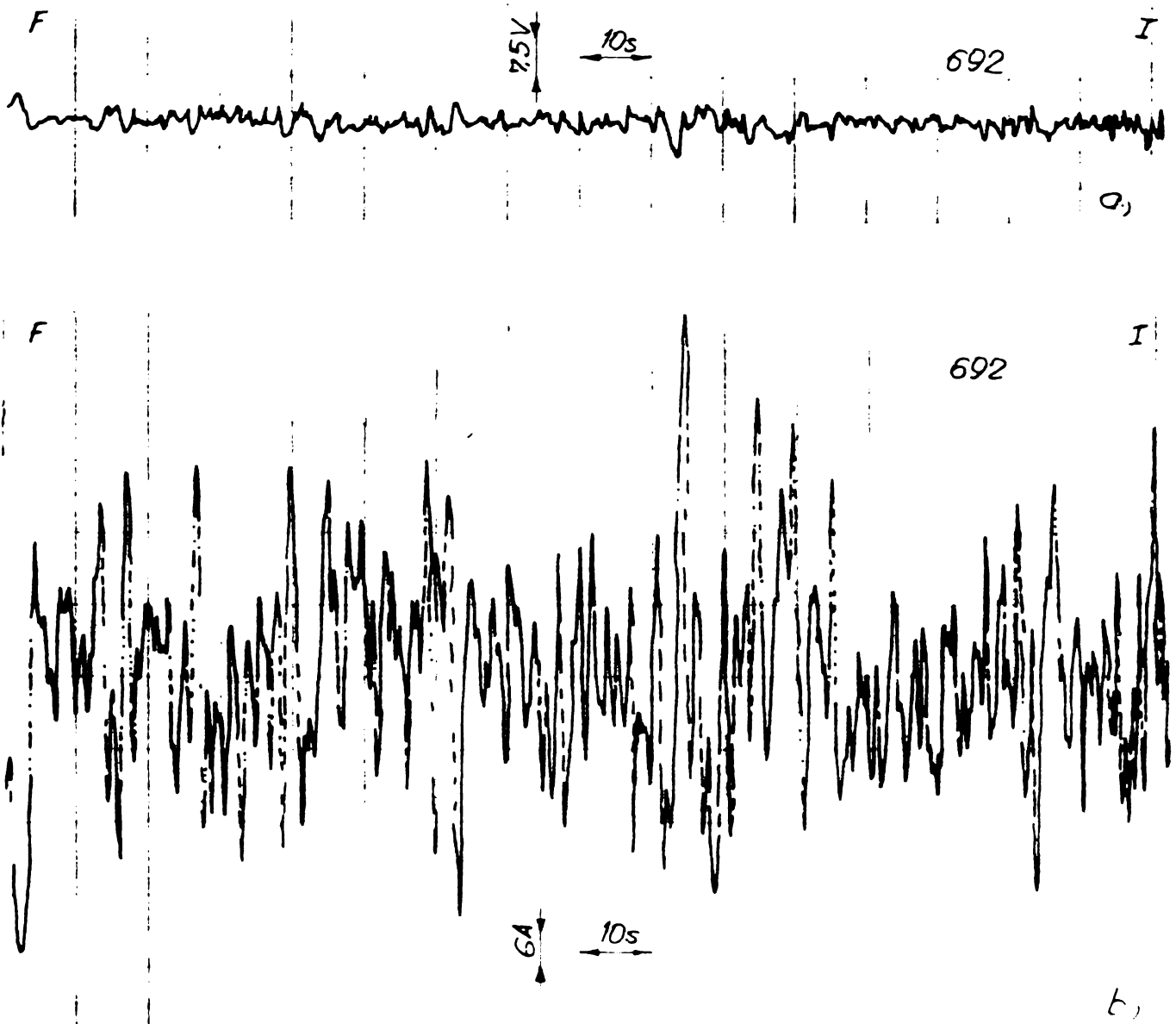


Fig.6.23.-Variațiile  $U_e$  și  $I_e$  înregistrate la tăierea prin ero-  
sivă complexă, material 7WbNiCr 180 - 640 mm; a)  $U_e=f(t)$ ;  
b)  $I_e=f(t)$ ; regim  $R=0,04\Omega$ ;  $L=0$ ;  $C=0$ ;  $I_{eM}=60A$

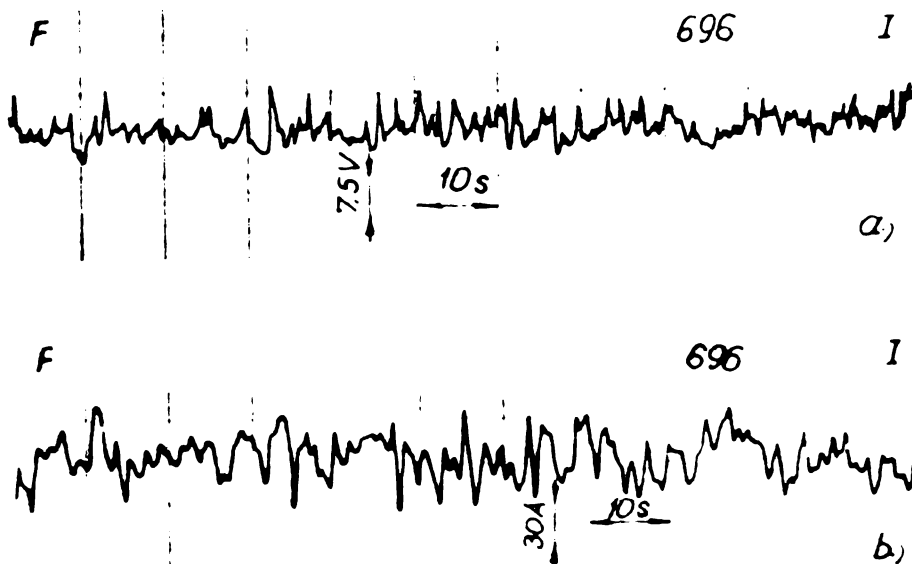
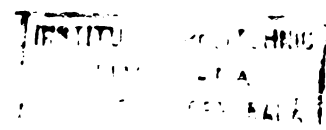


Fig.6.24.-Idem ca la  
figura 6.23 dar regim  
 $R=0,04\Omega$ ;  $L=0$ ;  $C=0$   
 $I_{eM}=9,1 A$



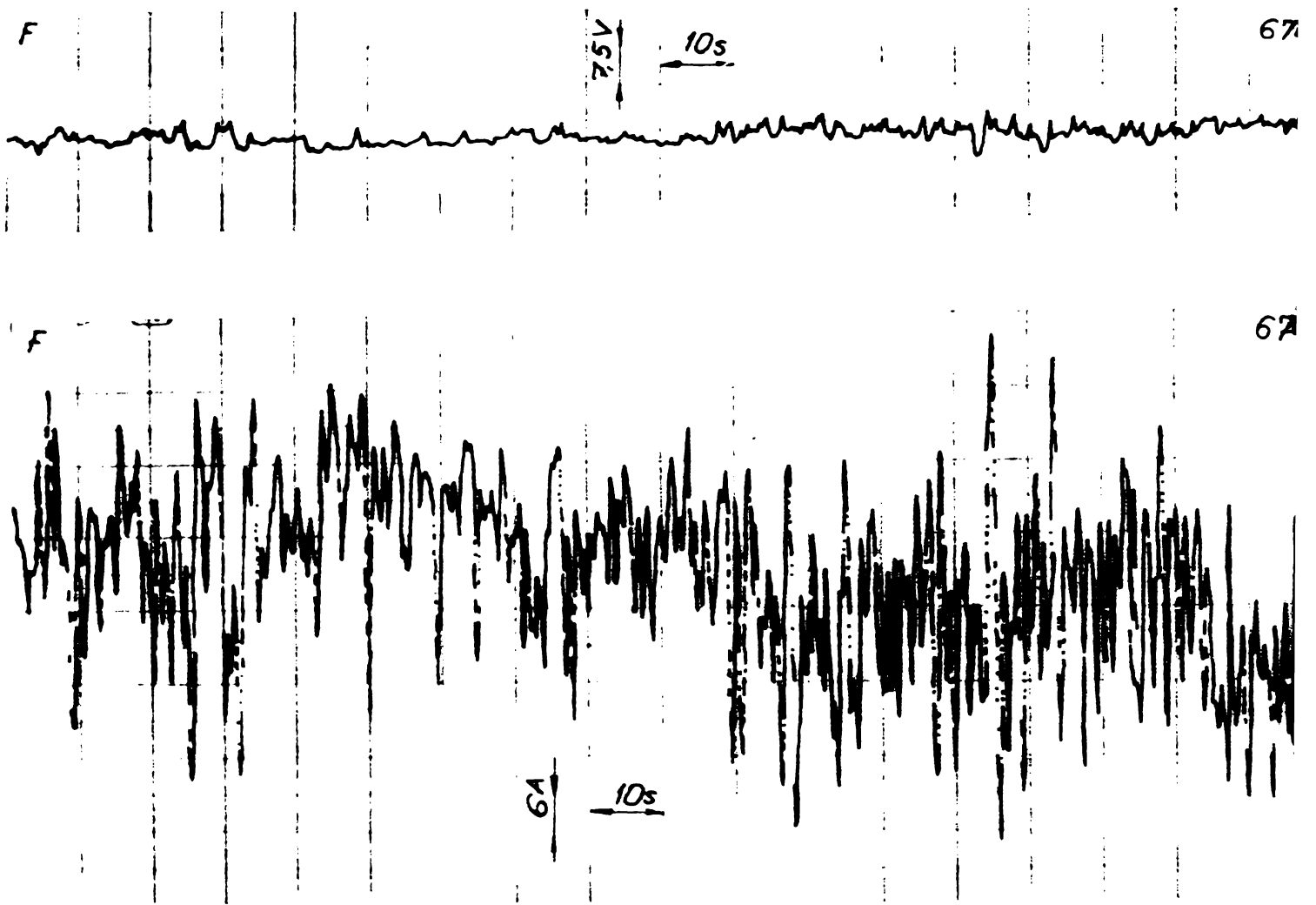


Fig.6.25.-Idem ca la figura 6.23 dar regim  $R=0,994\text{ohmi}$ ;  
 $L=0,5\text{ mH}$ ;  $C=0$ ;  $I_{\ell n}=50\text{ A}$

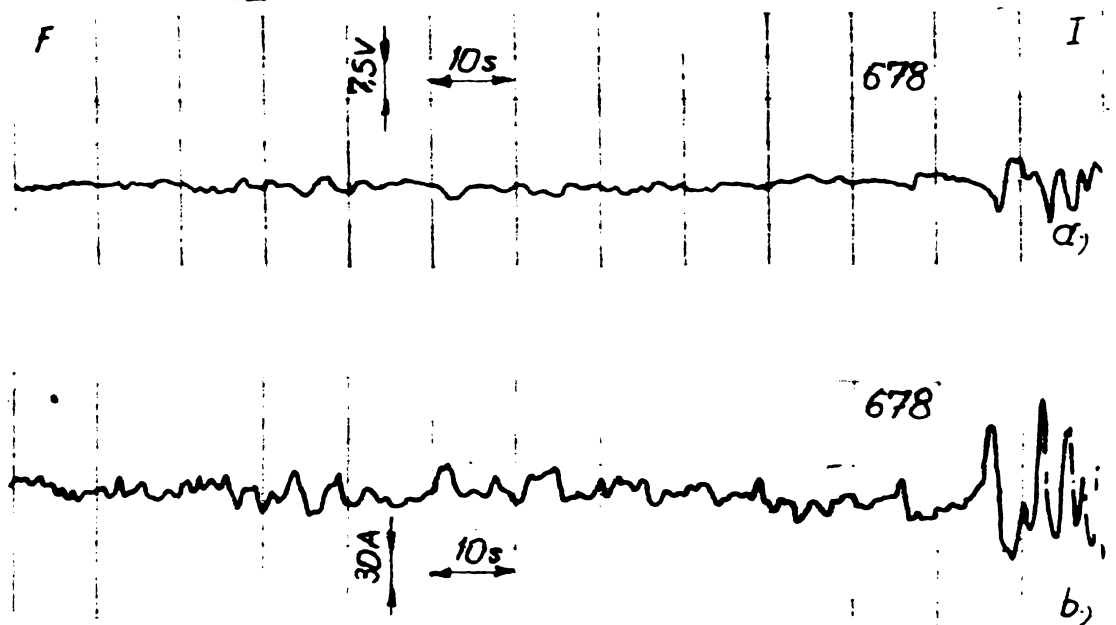
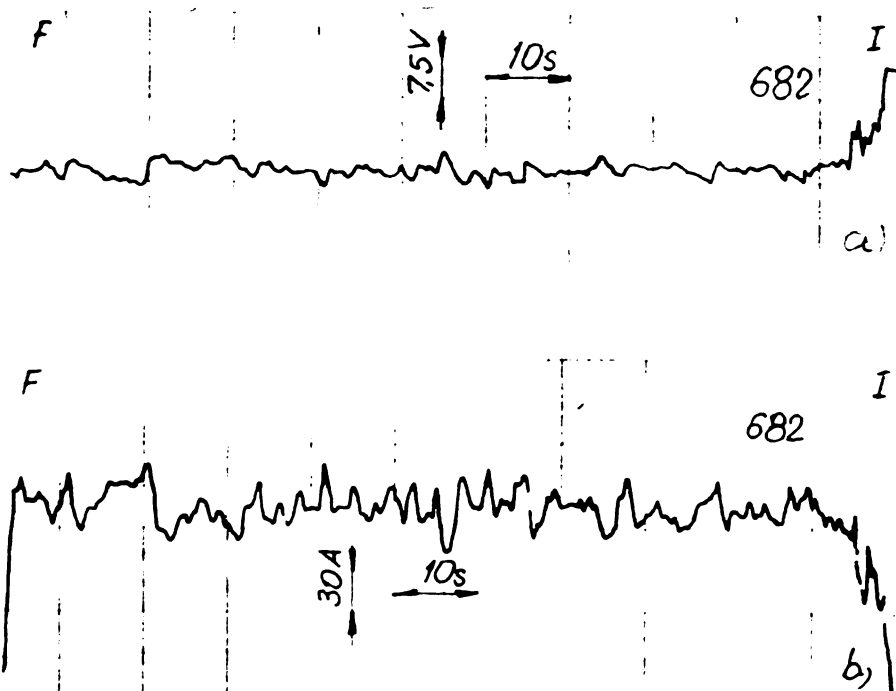


Fig.6.26.-Idem ca la figura 6.23 dar regim  $R=0,994\text{ohmi}$ ;  
 $L=0,5\text{ mH}$ ;  $C=0$ ;  $I_{\ell n}=100\text{ A}$





Datorită acestui efect de stabilizare, continuitatea tăierii este în general mai ușor de realizat la  $L > 0$  cu respectarea mărimii  $L_{min}$  din relația 4.56.

-Prin introducerea în circuit a unei inductanțe cu  $L=8,5$  mH, timpul de tăiere crește cu cca 20%, față de aceeași tăiere cu  $L=0$ . Aceasta

Fig.6.27.-Idem ca la figura 6.23 dar regim  $R=0,24$  ohmi;  $L=8,5$  mH;  $C=0$ ;  $I_{em}=145$  A

se explică prin faptul că prin introducerea inductivității în circuitul de lucru, creșterea curentului pe o descărcare este frinată și în acest mod energia medie a impulsului este mai mică, respectiv procesul de eroziune mai redus.

-Cele afirmate în subcapitolul 4.6, se verifică experimental și anume: pornind de la relația echilibrului dinamic al sistemului SCSL, pentru ca sistemul să fie stabil este necesar ca  $L > 0$  (relația 4.41)

$$L_{min} = \frac{0,59 \cdot U_a}{f \cdot I_a} \left(1 - \frac{U_a}{U_a}\right) \quad \text{relația (4.56).}$$

- Uzura discului de tăiere este mult mai mică pentru  $L=8,5$  mH;
- Nu s-au observat deformări ale discului de tăiere pentru  $L=8,5$  mH.

#### 6.2.4.-Influența capacității C

Capacitatea C conectată în paralel cu spațiul de lucru, creează condițiile unor descărcări suplimentare și ca urmare suprafața de tăiere se modifică.

Experimentările s-au făcut la două oțeluri aliate pentru construcții de mașini, figurile 6.28, 6.29, la oțeluri rapide, figurile 6.30, 6.31, 6.32, 6.33, pentru oțelul de matrițe C 120 figurile 6.34, 6.35 și pentru oțeluri inoxidabile figurile 6.36 și 6.37.

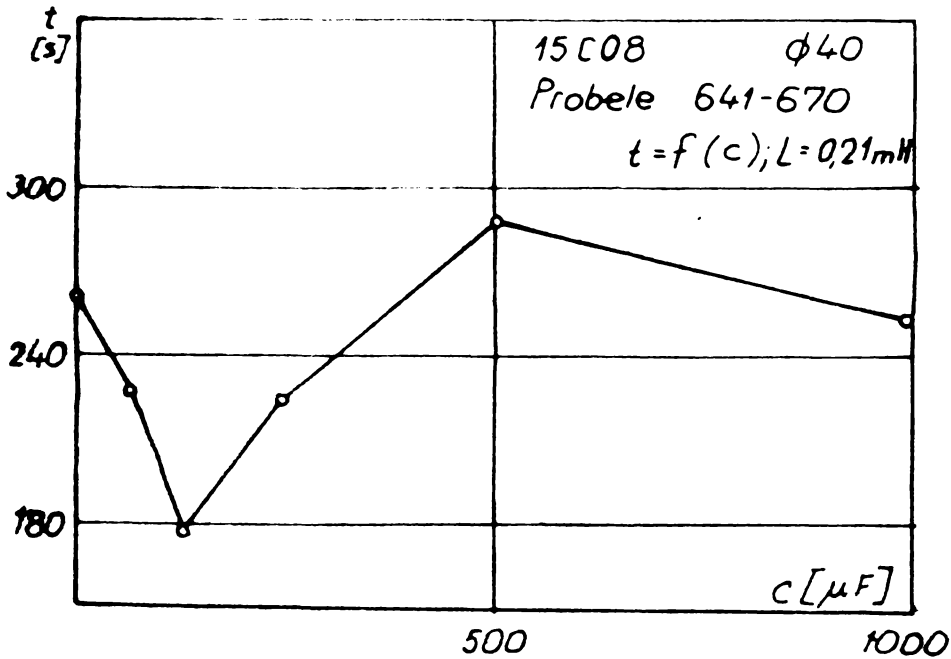


Fig.6.28.- Variația timpului de tăiere în funcție de capacitatea EC  $L=0,21 \text{ mH}$

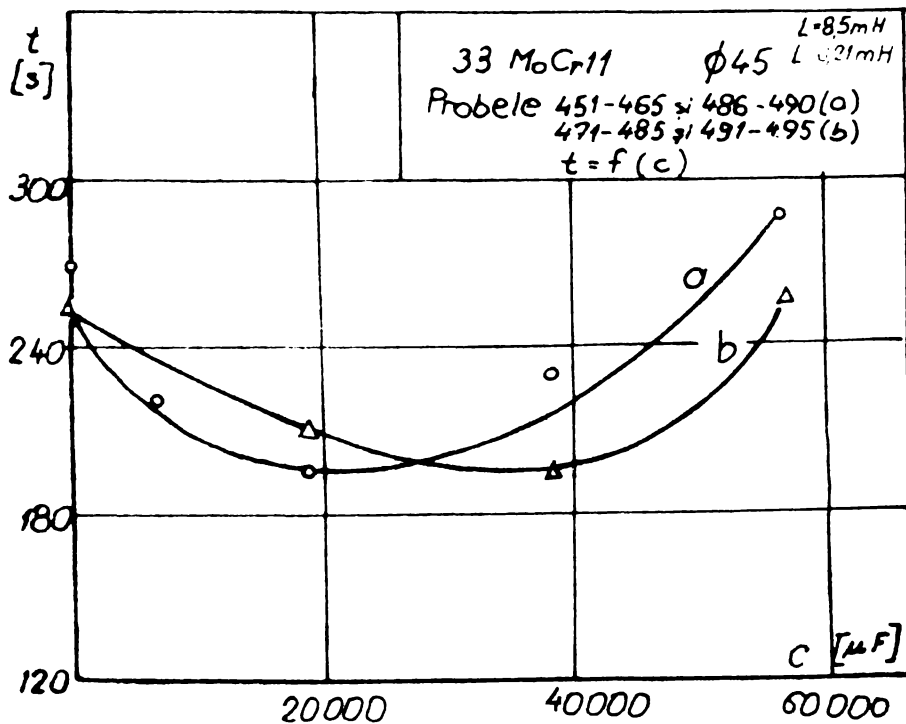


Fig.6.29.-  $t=f(C)$  pentru:  
 a)  $L=8,5 \text{ mH}$ ;  
 b)  $L=0,21 \text{ mH}$

Din analiza diagramelor 6.28 și 6.29 care reprezintă  $t=f(C)$  pentru oțeluri aliate 15Cr08 de  $\phi 40 \text{ mm}$  cu  $L=0,21 \text{ mH}$  și 33MoCr 11 de  $\phi 45 \text{ mm}$  cu  $L$  în două variante 8,5 mH și 0,21 mH se observă că timpul minim de

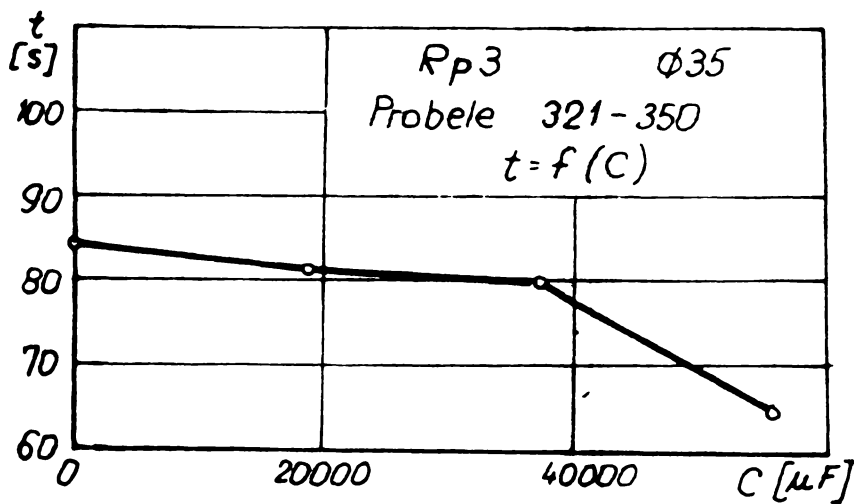


Fig. 6.30.-  $t=f(C)$  pentru:  $I_l=100$  A;  $R=0,094$  ohmi;  $L=8,5$  mH

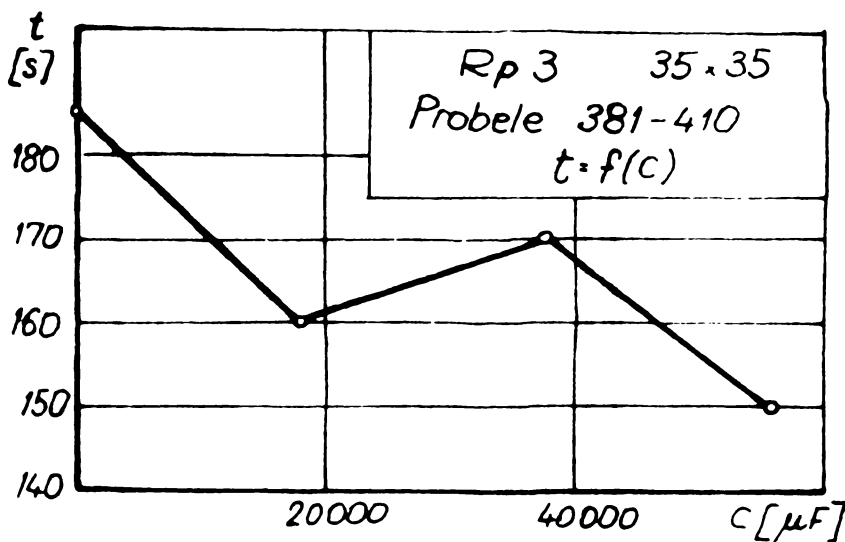


Fig. 6.31.-  $t=f(C)$  pentru  $I_l=100$  A;  $R=0,094$  ohmi;  $L=8,5$  mH

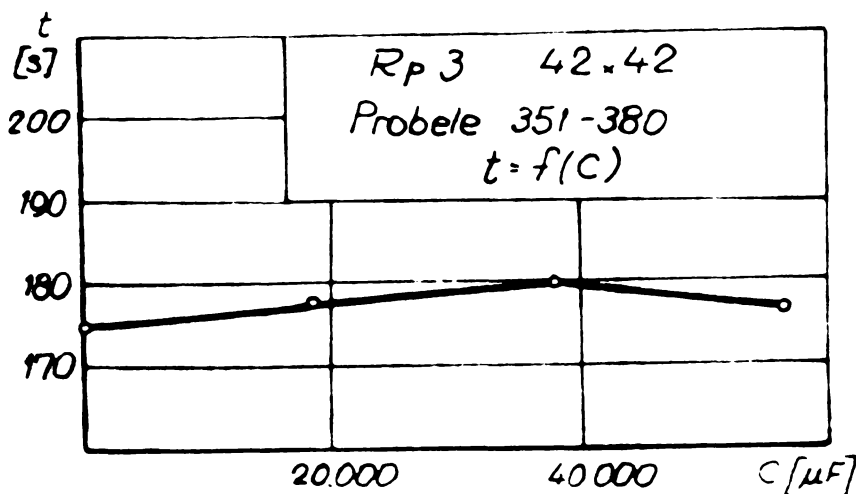


Fig. 6.32.-  $t=f(C)$  pentru  $I_l=100$  A;  $R=0,094$  ohmi;  $L=8,5$  mH

tăiere se reali-  
zează la oțelul  
15Cr08 de  $\phi$  40 mm  
cu capacități mici  
conectate în para-  
lel cu spațiul de  
lucru ( $C=100...150 \mu F$ )  
iar la oțelul  
33MoCr 11 de  $\phi$  45 mm  
cu capacități mai  
mari ( $C=20.000...  
40.000 \mu F$ ). Din fi-  
gura 6.29 se mai  
observă că stabili-  
tatea procesului de  
tăiere se poate men-  
ține bună și pentru  
valori diferite ale  
inductanței  
( $L=0,21...8,5$  mH)  
decît capacitatea  
conectată în paralel  
cu spațiul de lucru  
este de ordinul  
20.000...40.000  $\mu F$ .  
Pentru inductanțe de  
ordinul 6...8,5 mH  
influența capacită-  
ții asupra varia-  
ției timpului de  
tăiere scade  
(figurile 6.32,  
6.34, 6.35).

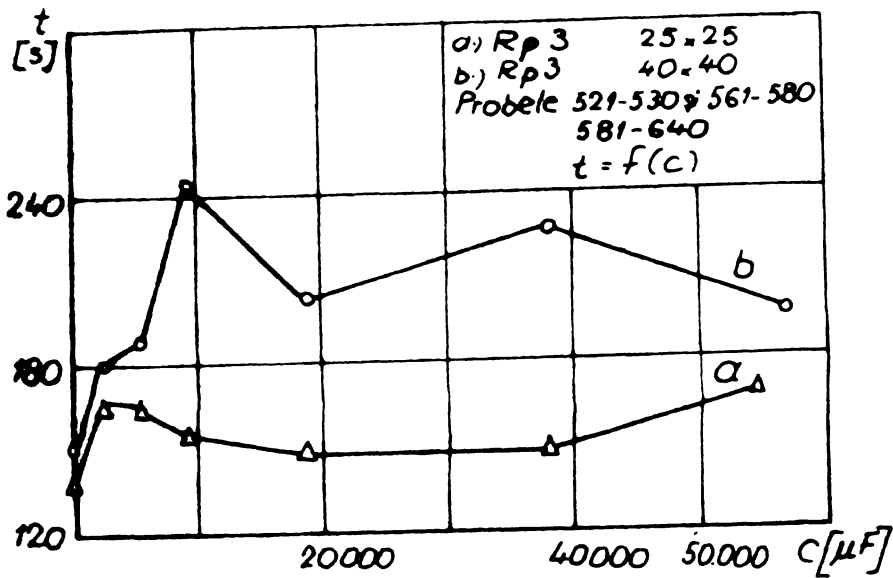


Fig.6.33.-  $t = f(C)$

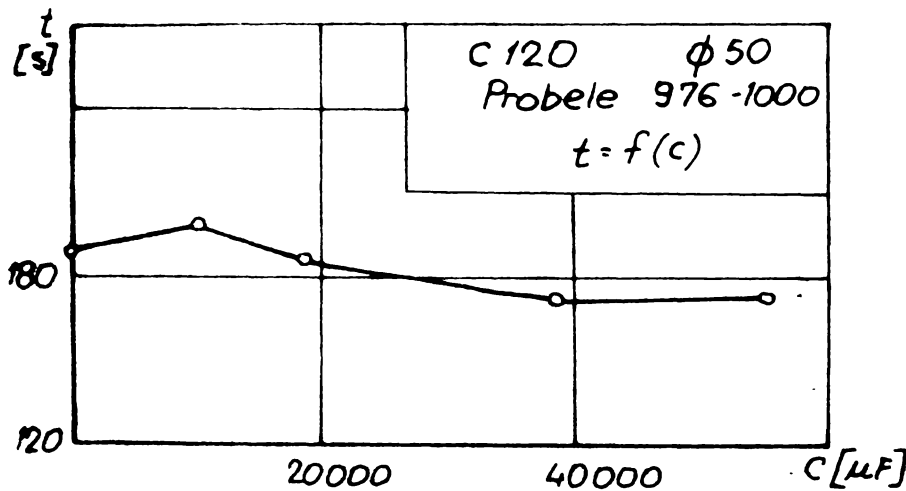
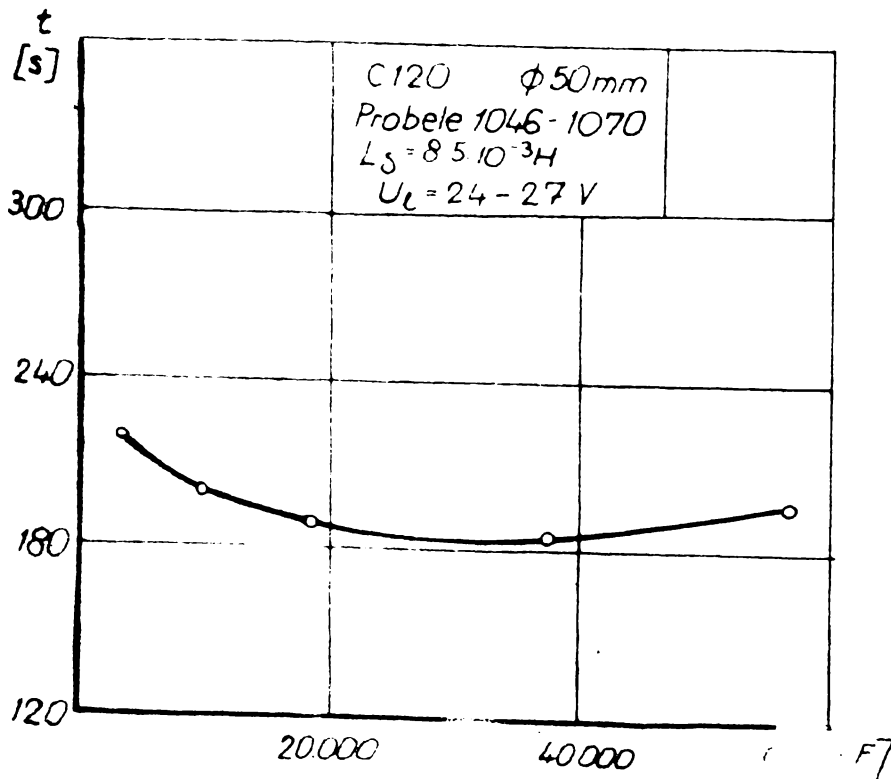


Fig.6.34.-  $t=f(C)$  pentru  $L=6...8,5$  mH



La tăierea oțelurilor rapide (figurile 6.30, 6.31, 6.32) timpul de tăiere scade pentru capacități  $C > 40.000 \mu F$  cu excepția probelor de tăiere realizate cu Rp3 de 25 x 25 mm unde variația timpului de tăiere la diferite capacități este nesemnificativă. La probele de tăiere făcute pentru oțelurile inoxidabile 7MnCr180 și 7MnCr 180 (figurile 6.36 și 6.37) timpii minimi de tăiere s-au obținut pentru capacități în limitele 20.000...40.000  $\mu$

In figura 6.36 se prezintă

Fig.6.35.-  $t=f(C)$  pentru  $U_e=24...27$  V  $L= 8,5$  mH

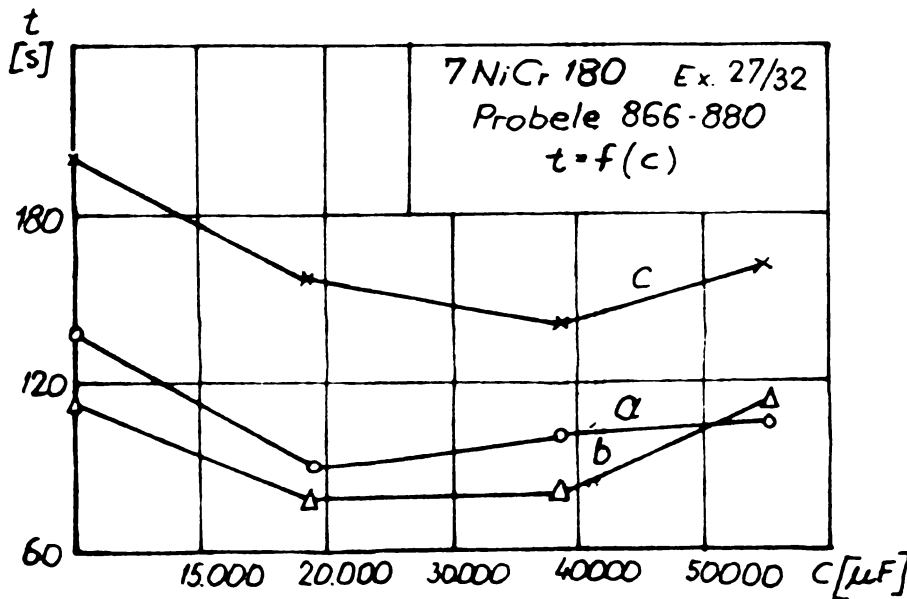


Fig. 6.36. -- t=f(C) pentru a)  $U_e=33...35V$ ; b)  $U_e=25...28V$ ; c)  $U_e=19...20V$

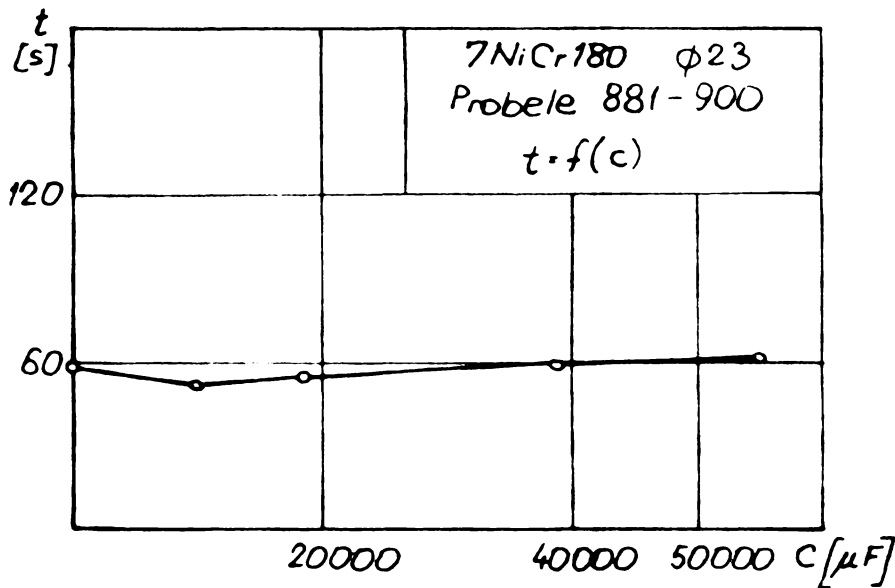


Fig. 6.37. -- t=f(C) pentru:  $U_e=25V$ ;  $L=8,5mH$

Făcute rezultă că o anumită mărime a capacității condensatorilor, variabilă după material are o influență asupra continuității procesului de tăiere, mai ales atunci când nu se poate asigura riguros relația  $v_f = v_{e0}$  (egalitatea celor două viteze: de erodare a metalului de pe electrozi cu viteza de avans a sculei electrod). Dealtfel s-a demonstrat că funcția  $v_e=f(S)$

probele  $t=f(C)$  făcute în trei variante de limite de tensiuni pe spațiul de lucru:

- a)  $U_e=33...35V$
- b)  $U_e=25...28V$
- c)  $U_e=19...20V$

Timpii minimi de tăiere s-au obținut pentru limitele de tensiune

25...28 V, care poate fi considerată tensiunea optimă pe electrozii la tăierea oțelurilor inoxidabile. În felul acesta limita stabilită în subcapitolul 6.2.1 de 22...32V (tabela 6.5) se restrânge la 25...28 V.

Din experimentările

na este stabilă, ea se schimbă continuu în procesul de prelucrare [28]. Caracterul de variație a funcției  $v_g=f(S)$  este indicat în figura 4.9. Această variație are loc pe măsura pătrunderii electrodului sculă la schimbarea suprafeței secțiunii de lucru a acestuia (tăierea materialelor de secțiune rotundă) respectiv modificarea densității curentului în procesul de tăiere. La creșterea suprafeței de prelucrate, valoarea lui  $v_g$  normal scade. Funcția  $v_g=f(S)$  își modifică caracterul în raport cu o serie de factori secundari, unul din aceștia fiind și sărirea capacității condensatoarelor conectate în paralel pe spațiul de lucru. Maximul funcției  $v_g=f(S)$  este deci influențat de capacitatea C, așa cum au demonstrat experimentările prezentate în figurile 6.29, 6.30, 6.36, 6.37.

### 6.3.-Influența factorilor R, L, C asupra zonei influențate termic (ZIT).

#### 6.3.1.-Structura ZIT a materialelor metalice dure și extredure tăiate prin eroziune complexă electrică-electrochimică

La tăierea prin eroziune complexă electrică-electrochimică a materialelor metalice și nemetalice dure și extredure apar modificările structurale în straturile superficiale. Transformările care se produc se datoresc pe de o parte efectului termic al descărcării, iar pe de altă parte efectului de răcire rapidă datorită contactului cu lichidul dielectric <sup>electrolitic</sup>. Apar deci fenomene de încălzire și răcire rapidă (călire) urmate eventual de încălziri locale datorită descărcărilor răslețe (revenire). Durata durată încălzirii este foarte mică, temperatura peste creșterea locală foarte mult producându-se transformarea austenitei, fără creșterea granulației. Austenita fermată este puternic subrăcită de lichidul dielectric, sub punctul de transformare martensitică.

În figura 6.38 se prezintă schematic distribuția cîmpului termic la suprafața tăieturii prin eroziune complexă electrică-electrochimică și structurile la finele etapelor de încălzire (A) și de răcire (B).

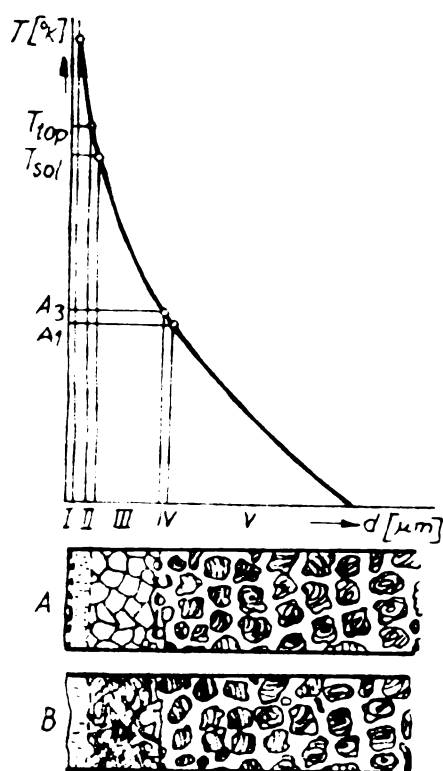


Fig.6.38.-Cîmpul termic și structura stratului afectat de tăierea prin eroziune complexă; A-la finele etapei de încălzire; B-la finele etapei de răcire



Fig.6.39.-Structura din imediata vecinătate a suprafeței tăiate. Austenita se transformă în structură de tip martensitic (strat alb) Ațee nital 5% x500

În imediata vecinătate a suprafeței tăiate (zona a II-a) materialul topit cristalizează brusc în austenită, care datorită vitezei mari de răcire se transformă în structură de tip martensitic. Acest strat nu se atacă cu reactivi metalografici obișnuiți din care cauză a fost denumit "strat alb" (figura 6.39) și este de obicei continuu și compact [116].

La regimuri dure de tăiere, stratul de material topit depus pe suprafața tăieturii fiind de grosime mai mare poate conține incluziuni gazoase și chiar fisuri. În zona următoare sub "stratul alb" structura este de obicei de austenită. Aceasta la răcire rapidă, condiționată de circulația lichidului de lucru, se transformă în martensită și austenită reziduală.

Aici martensita este mai grosolană și cu o duritate mai redusă și dispersată (figura 6.40)



Fig.6.40.-Structura in zona următoare sub "stratul alb" austenita  
Ațee nital 5%; x400

In zona următoare unde se ating temperaturi mai mici (între  $A_1$  și  $A_3$ ) structura este formată la sfârșitul perioadei de încălzire din austenită și constituentul proeutectoid (ferită sau carburi secundare). Austenita la răcire trece în constituente de călire. Duritatea este neomogenă la oțelurile hipereutectoide și relativ omogenă la cele hipereutectoide.

Dacă piesele se taie prin eroziune electrică electrochimică în stare călită - cu martensită și austenită reziduală în structură, fenomenele din straturile de sub stratul de fuziune diferă de cele ce apar la prelucrarea oțelurilor cu structuri de echilibru.

Transformările în stratul de fuziune sînt aceleași, obținându-se în final un "Strat alb" de martensită fină și dură. In straturile următoare (stratul al treilea) se produce o nouă călire, iar structura finală obținută va fi de aceeași natură cu cea inițială - martensita, dar mai fină.

Calitatea stratului alb, intensitatea transformărilor structurale și adîncimea substratului afectat, depind de parametrii regimului de lucru pentru acelaș material de prelevat.

Trebuie remarcat că dacă se respectă regimurile de lucru adecuate, fisurile și porozitățile pot fi evitate.

Cercetarea structurii ZIT a oțelurilor aliate și bogat aliate tăiate prin eroziune complexă electrică-electrochimică



s-au făcut pe oțelurile 35Mn16, 33MoCr11, 21MoMnCr12, Rp3, Rp4, C120, 7NiCr 180 și 7NbNiCr 180.

Adâncimea stratului modificat pentru diverse regimuri electrice și diferite valori pentru RLC la începutul și sfârșitul tăierii este indicată în tabela 6.6.

Adâncimea stratului cu structură modificată crește cu mărimea curentului de lucru fiind mai mare către finele tăieturii.

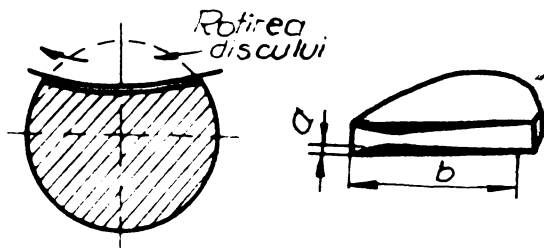


Fig.6.41.-Distribuție neuniformă a grosimii stratului cu structură modificată

TABELA 6.6

Variația adâncimii stratului cu structură modificată în funcție de regimul electric la începutul și sfârșitul tăierii

Nr.pro- be	Material	Regim e- lectric		Timp de tăiere t min.	Adâncime strat	
		$U_e$ V	$I_c$ A		la in- ceput mm	la sfir- șit mm
128	35 Mn 16	27	30	4'50"	0,060	0,100
084	- " -	28	50	2'50"	0,060	0,120
088	- " -	28	100	1'40"	0,060	0,160
091	- " -	25	150	1'30"	0,080	0,180
090	- " -	24	200	0'37"	0,100	0,200
027	33MoCr11	28	30	10'40"	0,015	0,030
032	- " -	27	50	5'55"	0,040	0,052
038	- " -	26	100	2'50"	0,040	0,070
041	- " -	26	150	2'00"	0,050	0,144
046	- " -	25	200	0'35"	0,060	0,146
057	21MoMnCr 12	27	30	3'32"	-	0,020
058	- " -	26	50	2'20"	0,030	0,060
061	- " -	26	100	1'26"	0,036	0,115
067	- " -	26	150	1'00"	0,048	0,512
073	- " -	25	200	0'38"	0,060	0,212

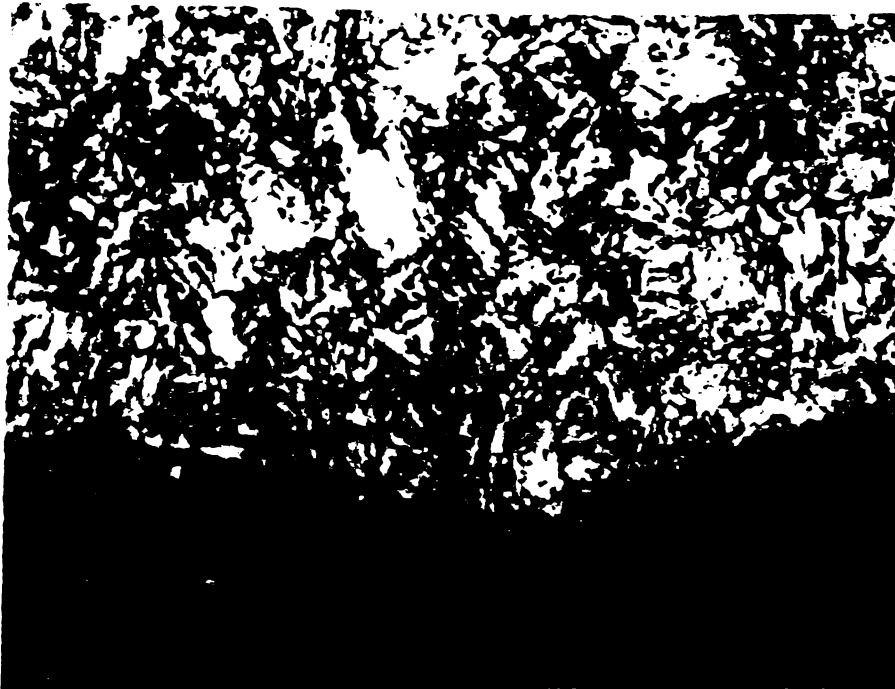


Fig.6.42.-Structura ZIT pe laturile tăiate la oțel 35Mn 18.

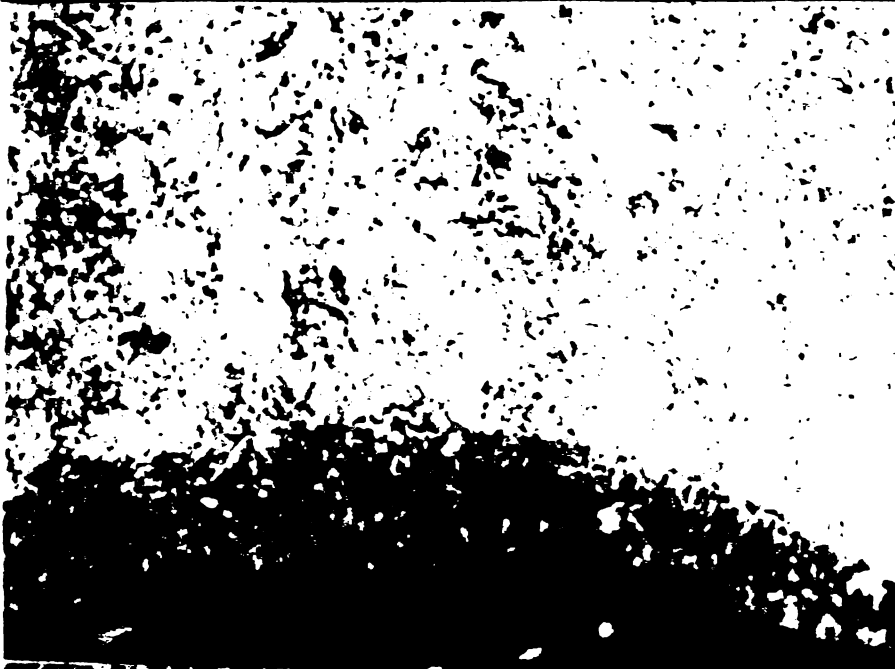


Fig.6.43.-Structura ZIT pe laturile tăiate la oțel 33MoCr 11.



Fig.6.44.-Structura ZIT pe laturile tăiate la oțel 21MoMoCr 12.

Micrografia cu structura modificată a unei bare de oțel 35Mn 16 tăiate prin eroziune (figura 6.42) prezintă în miez o ferită aciculară respectiv carburi corespunzătoare tratamentului termic de îmbunătățire. Grosimea stratului de suprafață afectat termic de procesul eroziv are un grad de uniformitate relativ bun, prezentînd o structură martensitică foarte fină. Micrografia cu structura modificată a unei bare de oțel 35MnCr 11 tăiate prin eroziune (figura 6.43) prezintă în miez sorbită de revenire caracteristică tratamentului termic de îmbunătățire. În stratul de suprafață omogen ca grosime apare o structură martensitică de călire cu ace foarte fin orientate pe direcția evacurii căldurii; nu se remarcă prezența unor defecte structurale în strat. Micrografia cu structura modificată a unei bare de oțel 21MnCr 12 (figura 6.44) prezintă în miez o structură ferito-perlito-bainitică cu perlite dispuse în giruri. Stratul marginal călit este mai puțin uniform ca grosime comparativ cu cazurile precedente, fenomen explicabil prin distribuția neomogenă a constituenților existenți în materialul de bază. Nu se remarcă defecte de tipul porozităților, microfisurilor, etc.

Cercetarea microstructurii urmează în figura următoare care prezintă diagramele de variație a durității zonei influențate termic (ZIT).

În capitolul 7 se prezintă cu ajutorul microscopiei electronice cercetarea structurii zonei influențate termic (ZIT) și micrografia elementelor de aliere în această zonă.

### 6.3.2.-Variația durității zonei influențate termic (ZIT)

Variația durității de-a lungul ZIT a fost cercetată pe 8 oțeluri aliate cu regimuri electrice și R,L,C diferite, determinîndu-se în final duritatea minimă și maximă în ZIT și grosimea stratului modificat. S-au ridicat 28 diagrame căror rezultate sînt prezentate în tabela 6.7.

În lucrare sînt prezentate microfotografiile cu diagrame reprezentative corespunzătoare pentru variația durității de-a lungul ZIT la următoarele oțeluri:

TABELA 6.7

Variația durității în ZIT și grosimea stratului modificat

Fig. în tabel	Nr. piesă	Material	Dimens. (mm)	Regim electric			RLC reglabile		Timp tăiere t. min	Duri tate		gros. strat mod. mm
				U <sub>ve</sub> V	I <sub>l</sub> (A)	R ohm	L mH	C μF.		mat. HV 0050	max. HV 0,050	
Fig. 45	128	35Mn 16	∅26	27	30	0,314	-	-	4'50"	131	322	0,140
	084	"	"	28	50	0,188	-	-	2'50"	160	427	0,144
	088	"	"	28	100	0,141	-	-	1'40"	134	322	0,160
	091	"	"	25	150	0,094	-	-	1'30"	190	377	0,090
	096	"	"	24	200	0,047	-	-	0'37"	165	334	0,340
Fig. 46	027	35MoCr 11	∅45	28	30	0,314	-	-	10'40"	145	489	0,120
	032	"	"	27	50	0,188	-	-	5'55"	165	783	0,052
	038	"	"	26	100	0,141	-	-	2'50"	156	251	0,136
	041	"	"	26	150	0,094	-	-	2'00"	125	377	0,144
	046	"	"	25	200	0,047	-	-	0'55"	141	334	0,146
Fig. 47	051	21MoMnCr 12	∅24	27	30	0,314	-	-	3'32"	145	278	0,140
	058	"	"	26	50	0,188	-	-	2'20"	138	334	0,105
	061	"	"	26	100	0,141	-	-	1'26"	165	362	0,115
	067	"	"	26	150	0,094	-	-	1'00"	152	310	0,512
	073	"	"	25	200	0,047	-	-	0'38"	165	260	0,960
Fig. 48	371	Rp3	42x42	26	100	0,094	8,5	37600	3'00"	165	377	0,060
	324	RP2	∅30	26	100	0,094	8,5	-	1'25"	190	299	0,060
Fig. 49	342	"	"	26	100	0,094	8,5	37600	1'18"	221	467	0,050
	336	"	"	26	100	0,094	8,5	56400	1'05"	201	392	0,074
Fig. 50	976	C 120	∅50	28	150	0,047	8,5	56400	2'54"	190	447	0,100
	981	"	"	27	150	0,047	8,5	37600	2'57"	134	447	0,112
	971	"	"	27	200	0,047	8,5	-	2'38"	195	409	0,114
Fig. 51	883	7NiCr 180	∅28	28	50	0,094	8,5	-	1'41"	143	174	0,132
	889	"	"	25	100	0,047	8,5	-	1'05"	134	104	0,096
	896	"	"	21	150	0,047	8,5	-	0'56"	201	228	0,099
Fig. 52	674	7NbNiCr 180	∅40	27	50	0,094	8,5	-	3'10"	152	152	0,084
	676	"	"	21	100	0,094	8,5	-	2'55"	190	195	0,071
	681	"	"	20	150	0,094	8,5	-	1'39"	152	174	0,084

35Mn 16 -  $\phi$  26 mm (figura 6.45); 33MoCr 11 -  $\phi$  45 mm (figura 6.46); 21MoMnCr 12 -  $\phi$  24 mm (figura 6.47); Rp 3 - 42 x 42 mm (figura 6.48); Rp 4 -  $\phi$  30 mm (figura 6.49); C 120 -  $\phi$  50 mm (figura 6.50); 7NiCr 180 -  $\phi$  28 mm (figura 6.51); 7NiCr 180  $\phi$  40 mm (figura 6.52).

Se observă că la oțelurile inoxidabile (figurile 6. și 6. ), modificările de duritate în ZIT sînt neînsemnate datorită conținutului redus de C.

În figura 6.45 (proba nr.075 din 35Mn 16) microstructura miezului este formată din ferită, perlită și troostită tipică tratamentului termic de recălescere.

În stratul marginal apar două zone distincte: în prima zonă foarte subțire ca grosime, structura este martensitică de călire; a doua zonă este de grosime mai mare și e formată din buinită granulară.

În figura 6.46 (proba nr.032 din 33MoCr 11) microstructura miezului este alcătuită din perlitică sorbitică cu carburi globulare propriu tratamentului termic de recălescere. Stratul de suprafață deschis la culoare probabil e de natură martensitică.

În figura 6.47 (proba nr.061 din 21 MoMnCr 12) microstructura miezului e formată din perlită și troostită, corespunzătoare tratamentului termic.

În figurile 6.48 și 6.49 (probele nr.342 și 371 din Rp 3 și Rp 4) microstructura miezului este alcătuită din carburi primare și secundare pe un fond de martensită de revenire. În stratul alb uniform ca grosime, de natură martensitică se remarcă existența unei microfisuri orientată perpendicular pe suprafața prelucrată. În structura miezului se observă carburi pe fond sorbitic propriu tratamentului termic de recălescere prin înmuiere.

În stratul alb de suprafață microstructura este probabil alcătuită din martensită de călire și o cantitate de martensită reziduală.

Explicarea valorilor relativ mici ale durității stratului marginal este următoarea: sub acțiunea cîmpului termic în stratul de suprafață se realizează o sustenitizare completă, respectiv o punere în soluție a tuturor carburilor prezente în oțel.

# OȚEL 35 M16

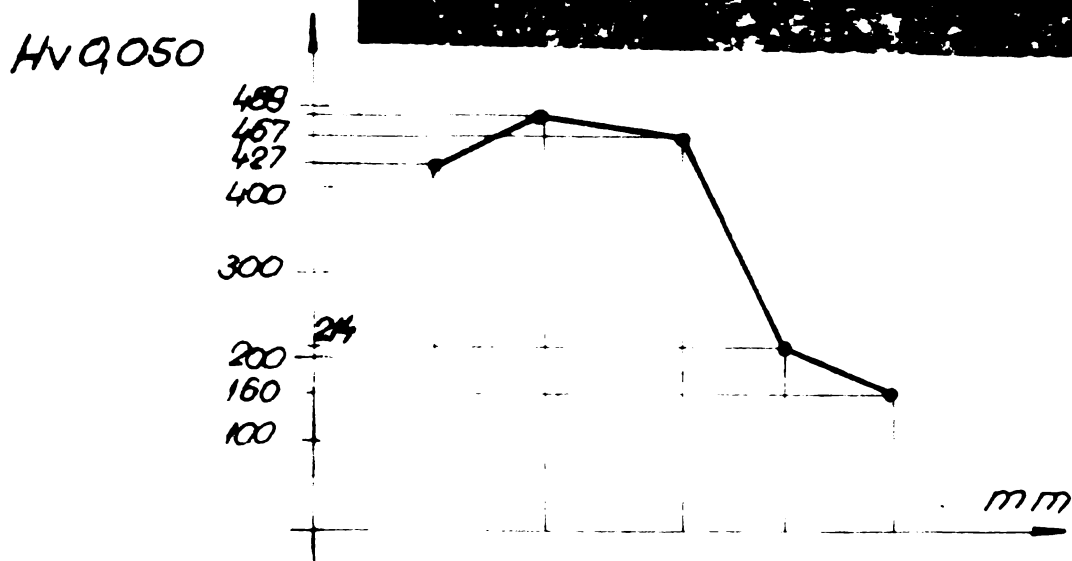
50A; 33V; 2'50";  $\phi 24$

Proba 084

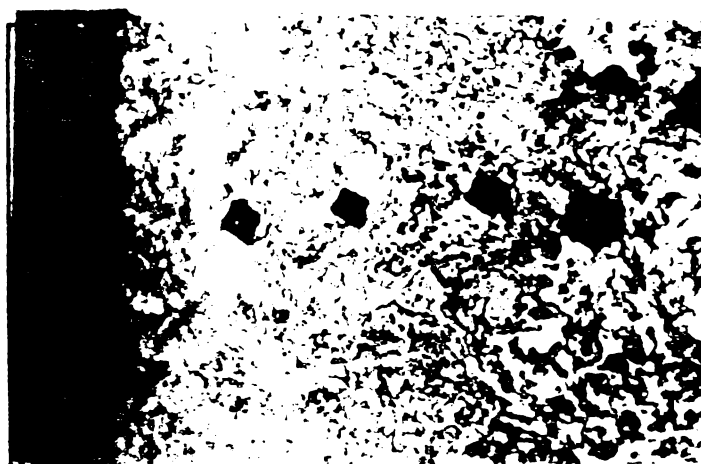
fig. 6.45

Structura și variația durității în ZIT

a)  
x 250  
atac nital 5%

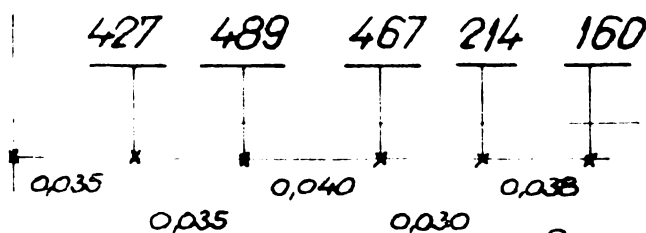


b)  
x 500  
atac nital 2%



Duritate  
Hv 0,050

Distanța  
[mm]



Grasime strat: max. 0,144 mm

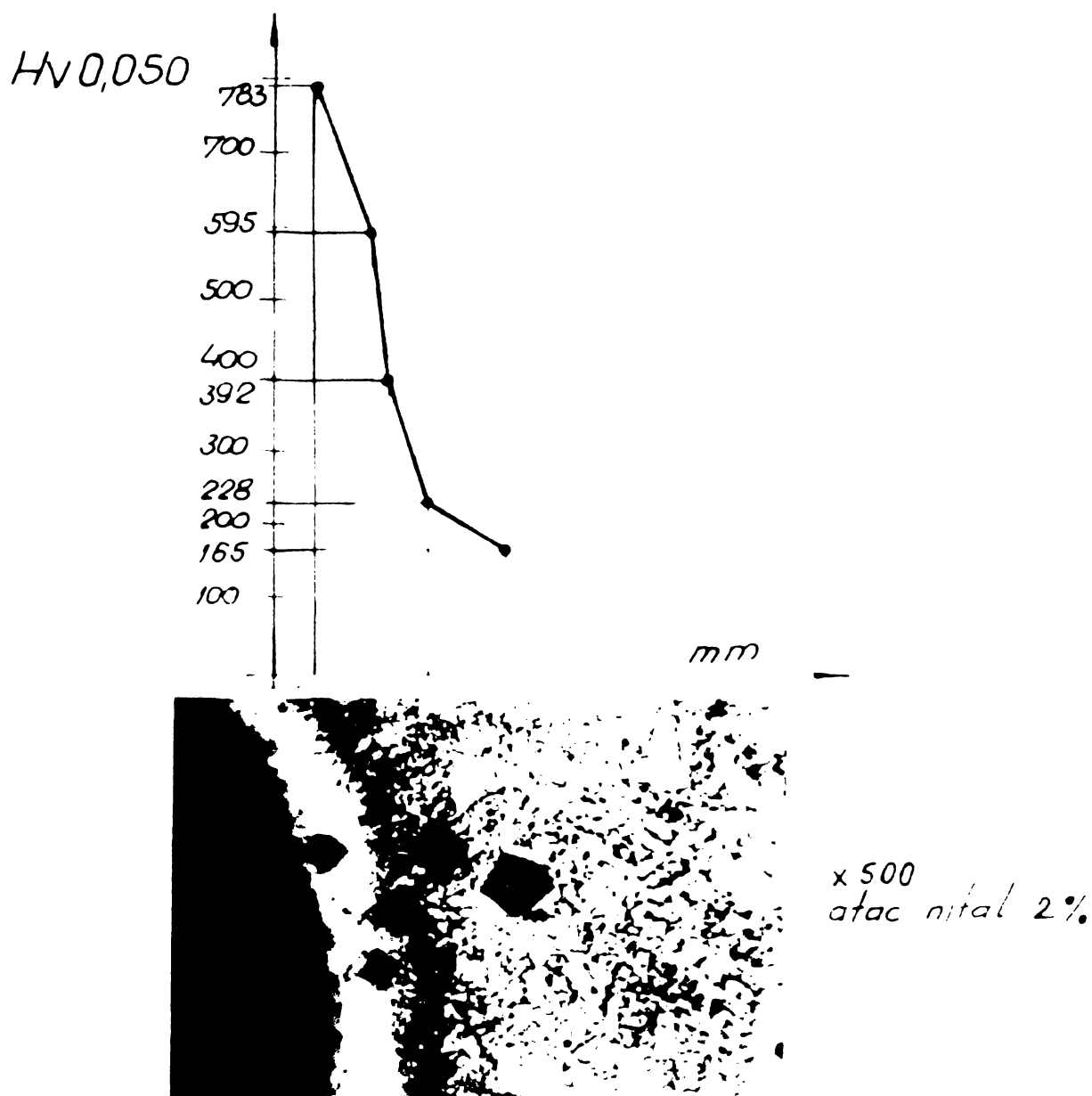
# OȚEL 33MoCr11

50A; 32V; 5'55";  $\phi 45$

Proba 032

Fig. 6.46

Structura și variația durității în ZIT



Duritate  
Hv 0,050

783 595 392 228 165

Distanța  
[mm]

0.002 0.005 0.025  
0.012 0.017

Grosime strat max. 0,052 mm

# OȚEL 21 MoMnCr12

100 A ; 30 V ; 1'26" ;  $\phi 24$

Proba 061

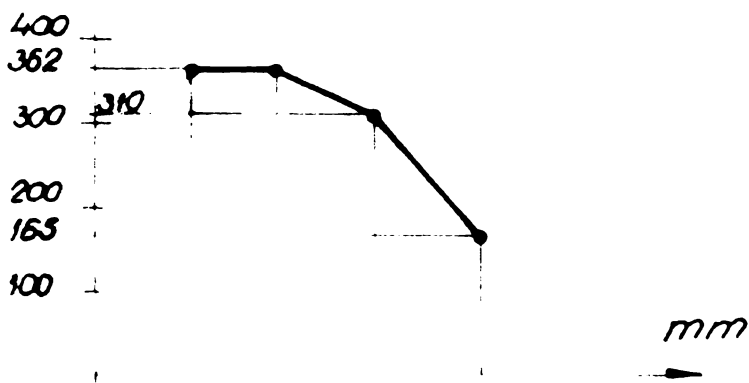
Fig. 6.47.

Structura și variația durității în ZIT

a)  
x 250  
atac nital 5%



Hv 0,050



b)  
x 500  
atac nital 2%

Duritate  
Hv 0,050

362    362    310    165

Distanța  
[mm]

0,037    0,025    0,028    0,036

Grosime strat:  
max. 0,115 mm



# OȚEL Rp 3

∅ 42 x 42 mm; 100 A; 3'00"

Proba 371

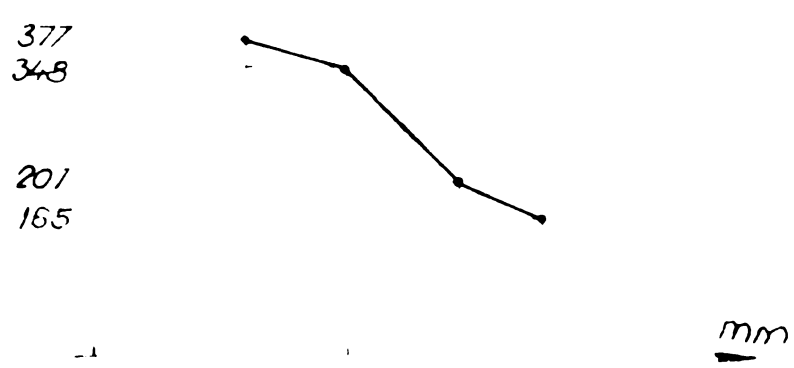
Fig 6.48

Structura și variația durității în ZIT

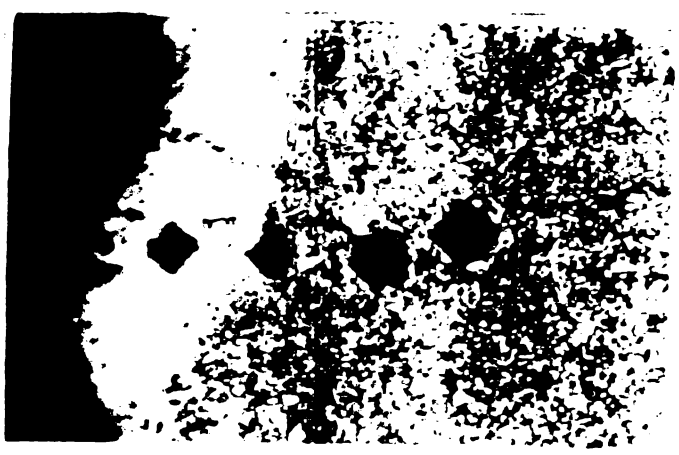
a)  
x 250  
atac nital 5%



Hv 0,050 ↓



b)  
x 500  
atac nital 2%



Duritate	<u>377</u>	<u>348</u>	<u>207</u>	<u>165</u>
Hv 0.050	*	*	*	*
Distanța [mm]	<u>0.033</u>	<u>0.033</u>	<u>0.033</u>	<u>0.030</u>

grosime strat 0.060 mm

# OȚEL Rp2

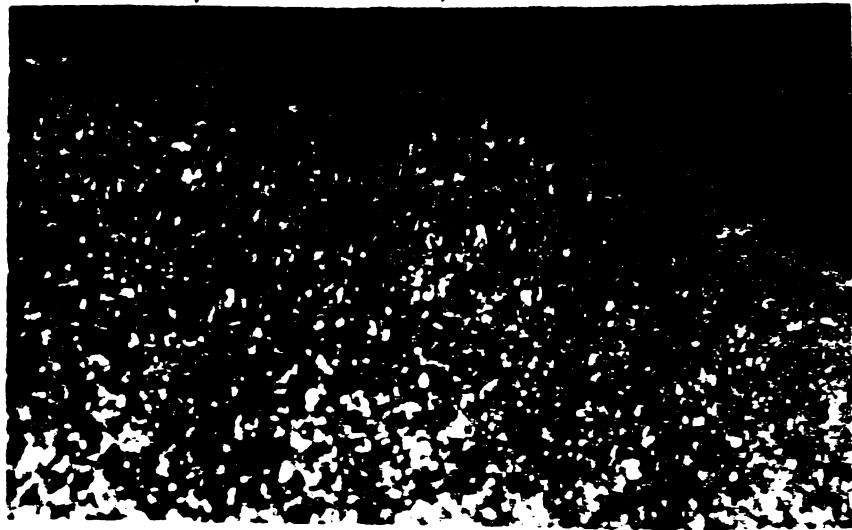
$\phi 30\text{ mm}$ , 100A, 1'18"

Proba 342

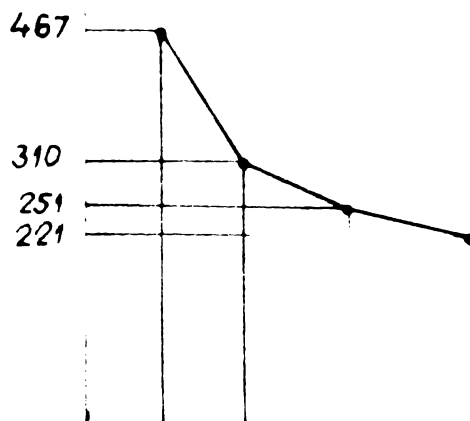
Fig. 6.49.

Structura și variația durității în ZIT

a)  
x 250  
atoc nital 5%

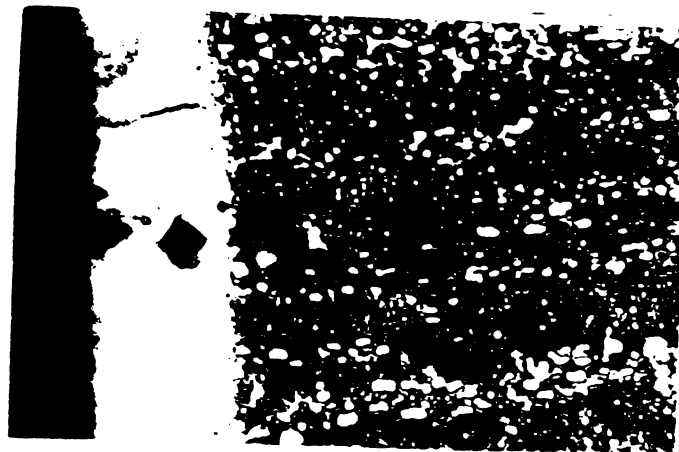


Hv 0,050



mm

b)  
x 500  
atoc nital 2%



Duritate  
Hv 0,050

467 310 251 221

Distanța  
[mm]

0,010 0,020 0,033 0,040

grosime strat 0,050 mm

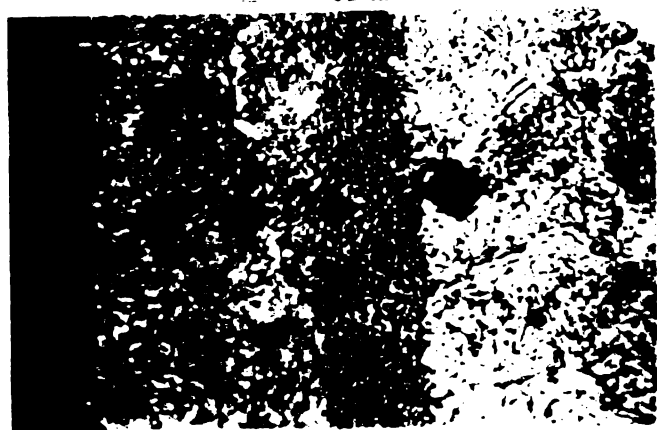
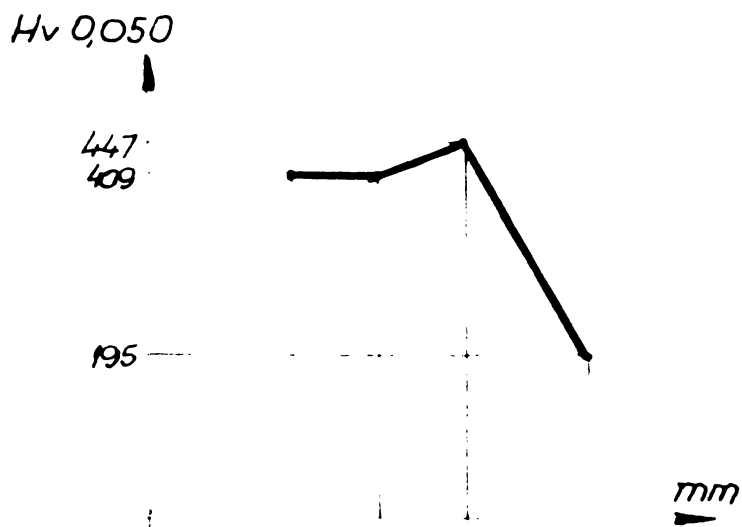
# OȚEL C 120

$\phi$  50 mm ; 200 A ; 2'38"

Proba 971

Fig. 6.50

Structura și variația durității în ZIT



x 500  
atac nital 2%

Duritate Hv 0,050	<u>409</u>	<u>409</u>	<u>447</u>	<u>195</u>
Distanta [mm]	<u>0,025</u>	<u>0,029</u>	<u>0,030</u>	<u>0,042</u>

grosime strat 0,114 mm

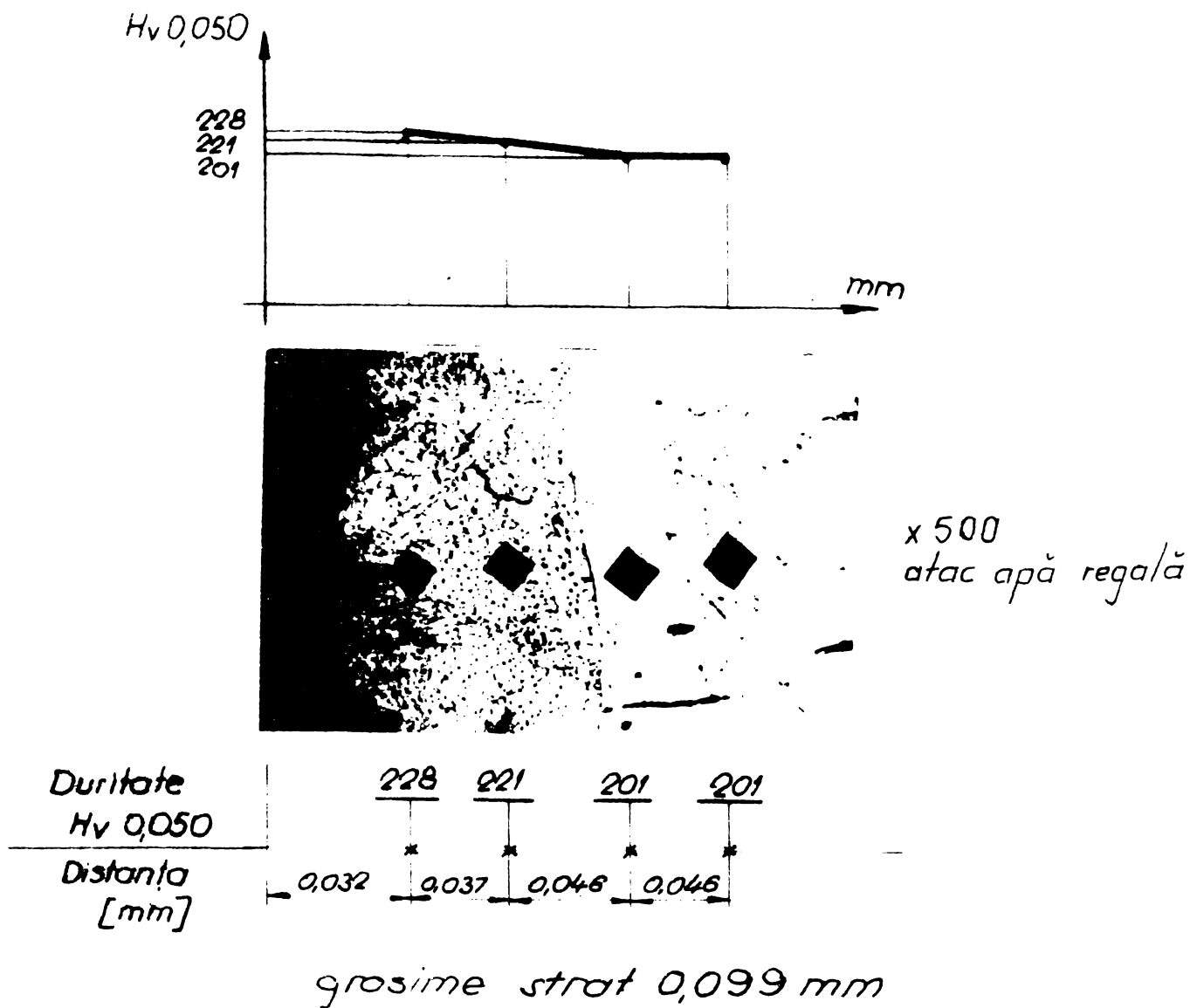
# OȚEL 7NiC-180

$\phi 28 \text{ mm}$ ; 150 A; 0'56"

Proba 896

Fig. 6.51

Structura și variația duriității în ZIT



# OTEEL 7NbNiCr180

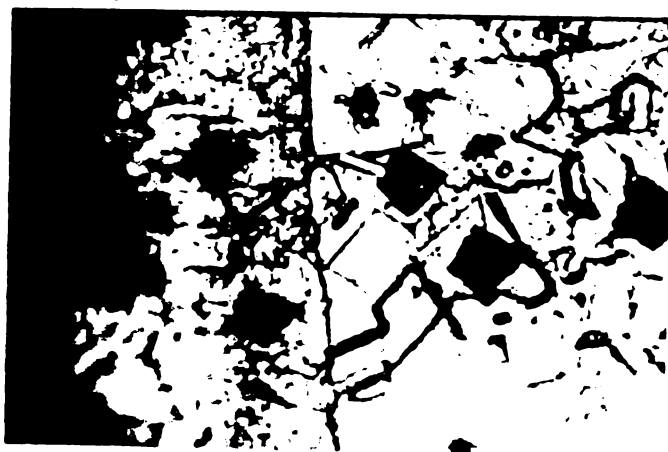
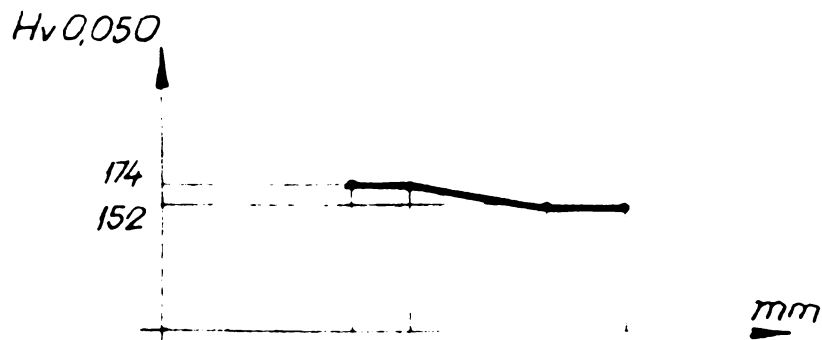
149

$\phi$  40 mm ; 150 A ; 1'39"

Proba 681

Fig. 6.52

Structura și variația duriității în ZIT



x 500  
atac apă regină

Duritate		174	174	152	152
Hv 0,050		*	*	*	*
Distanța [mm]	— 0,048	— 0,020	— 0,052	— 0,026	

grosime strat 0,084 mm

Structura austenitică formată la încălzire avînd un grad mare de neomogenitate chimică (temperatura de încălzire fiind ridicată) va avea o mare stabilitate la descompunere și-n consecință va speri o cantitate mare de austenită reziduală după călire.

Pentru elucidarea completă a acestor fenomene în cercetările ulterioare (vezi capitolul 7) se vor face investigații la sonda electronică.

În figura 6.50 (proba nr.971 din C 120) în miezul probei apare o structură perlitică fină cu carburi caracteristice tratamentului termic de recocercere. În stratul de suprafață se evidențiază o structură mertensitică de călire fără pori sau microfisuri.

În figurile 6.51 și 6.52 (probele 896 din 7NiCr 180 și 681 din 7NbNiCr 180) microstructura miezului este formată din austenită cu macle de recocercere și carburi.

În stratul afectat termic apar aceeași constituenți structurali cu particularitatea că precipitățile de carburi sînt ceva mai numeroase. În consecință diferențele de duritate între cele două zone sînt nesemnificative

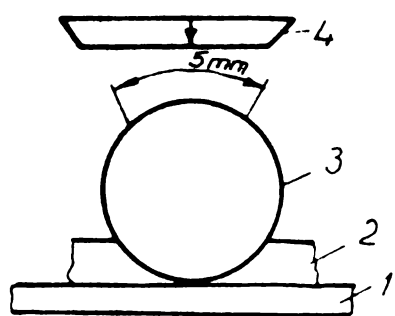
#### 6.4.-Influența factorilor R, L, C asupra rugozității suprafețelor de tăiere

Măsurătorile de rugozitate s-au făcut cu ajutorul microscopului de atelier MWD de fabricație R.P.Polonă și cu aparatul surtronic licență Rask Danemarca de tip cu palpator.

Batiul microscopului are trei săni: longitudinală, transversală și rotitoare. Săniile se deplasează cu ajutorul unor șuruburi micrometrice avînd domeniul de măsură 0...25 mm. Valoarea diviziunii la scările gradate ale șuruburilor micrometrice este de 0,01 mm. Citirile la deplasările săniilor longitudinală și transversală s-au făcut cu șuruburile micrometrice ale fiecărei sănii, iar la rotirea mesei s-au făcut cu un vernier cu diviziunea de 3'. Imaginea obținută din sistemul obiectiv - ocular se poate proiecta pe un ecran pentru vizualizare sau poate fi preluată de aparatul de fotografiat propriu montat pe un cadru.

Grosimmentul, puterea de mărire a sistemului optic la care s-au făcut observațiile și fotografiile a fost  $\times 10$ .

Rugozitatea s-a măsurat pe o lungime de 5 mm din circumferința probei, ea fiind așezată pe masa microscopului, fixată în plastilină (figura 6.53). Au fost măsurate denivelările pe lungimea de 5 mm pe două direcții: adâncimea și lungimea cu ajutorul șuruburilor micrometrice ale mesei longitudinale și transversale.



S-au fotografiat probele în zonele de măsură la mărime  $\times 10$ , executându-se de asemenea și analize microscopice ale suprafețelor măsurate la microscopul optic MIM 3. Rezultatele măsurătorilor de rugozitate făcute la probele din oțel C 120 sînt prezentate în tabela 6.8.

Fig.6.53.-Așezarea probei pentru măsurători de rugozitate

TABELA 6.8

Măsurători de rugozitate la probe din oțel C 120  $\phi 40$  mm

Nr. probă	MIC reglabile			Nr. denivel. 5mm	Adâncimea		Lungimea		medie
	R cmi	L mm	C $\mu F$		max. mm	min. mm	max. mm	min. mm	
1036	0,094	3,5		12	0,04	0,03	0,16	0,10	0,13
1066	0,094	8,5	4700	10	0,06	0,04	0,34	0,20	0,24
1061	0,094	8,5	2400	3	0,05	0,03	0,44	0,15	0,34
1056	0,094	8,5	10300	12	0,06	0,04	0,30	0,12	0,20
1033	0,094	3,5	37600	7	0,08	0,06	0,89	0,10	0,50
1048	0,094	8,5	56400	3	0,12	0,06	0,88	0,11	0,56

103.-Toate tăieturile s-au făcut cu același regim electric  $U_e = 24-26V$

$I_e = 1,2A$

Denivelările sînt în general fără continuitate și nu formează gropi concave evidente. La proba nr.1048 s-au măsurat cele mai mari denivelări, puternic conturate în "concev" cu continuitate și lungime mare (figurile 6.54 și 6.55). Aceasta se datorează descărcărilor puternice ale bateriei de compensație în procesul formării

arcelor electrice elementare la stacarea de către electrodul disc a microasperităților.

Din fotografie (figura 6.54) se observă că efectul de ardere se extinde sub tăietură, penetrând materialul sub forma unor fisuri. O parte din material rămâne izolat sub formă de "pojghiță" similar exfolierii



Fig.6.54.-Probe 1048  
x 10

Fig.6.55.-Probe 1048, atac Mital  
x 250

Rezultatele măsurătorilor de rugozitate făcute la probele de oțel inoxidabil 7NiCr 180 și 7TNiCr 180 sînt prezentate în tabela 6.9.

T A B E L A 6,9

Măsurători de rugozitate la probe din oțel inoxidabil

Nr. probă	Material	Di- mans. mm	R, L, C, Reglabile			Nr. de- niv. 5 <sup>pe</sup>	Rugozitate				
			R ohmi	L mH	C μF		adîncime	Lungime			
						max	min	max	min	med.	
						mm	mm	mm	mm	mm.	
927	7NiCr180	28	0,094	8,5	0	11	0,16	0,04	0,18	0,11	0,14
931	"	28	0,094	8,5	0	11	0,25	0,15	0,56	0,19	0,30
890	"	28	0,047	8,5	0	10	0,18	0,09	0,34	0,22	0,29
895	"	28	0,047	8,5	4700	10	0,17	0,05	0,56	0,13	0,36
893	"	28	0,047	8,5	18800	7	0,27	0,20	0,65	0,30	0,45
894	"	28	0,047	8,5	18800	6	0,28	0,12	1,00	0,21	0,52
892	"	28	0,047	8,5	37600	10	0,22	0,16	0,95	0,19	0,53
891	"	28	0,047	8,5	56400	6	0,38	0,12	1,05	0,26	0,58
852	7TNiCr 180 <sup>ex27</sup>	32	0,094	8,5	0	7	0,20	0,10	0,45	0,30	0,37
876	"	"	0,094	8,5	18800	9	0,25	0,09	0,57	0,16	0,45
872	"	"	0,094	8,5	37600	8	0,36	0,13	0,57	0,22	0,47
867	"	"	0,094	8,5	56400	10	0,41	0,17	0,60	0,18	0,47

Obs. Probele 931, 890, 895, 893, 894, 892, 891 s-au făcut cu regimul electric:  $U_e = 24-26V$ ;  $I_2 = 100 A$ ; proba 927 cu  $U_e = 25 V$ ;  $I_2 = 50A$   
probele 852, 876, 872, 867 s-au făcut cu regim electric:  
 $U_e = 25-35V$ ;  $I_2 = 50A$



Rugozitatea la proba 927 este minimă, fără continuitate dar uneori cu adâncimi mai mari (figura 6.56).

La proba 931 denivelările sînt mai mari atît ca adâncime cît și ca lungime (figura 6.57). La marginea materialului lîngă tăietură, se observă linii intense de deformare, tipice fibrajului la piesele deformate plastic și orientate paralel sau perpendicular față de suprafață, după cum se remarcă în figurile 6.58 și 6.59.

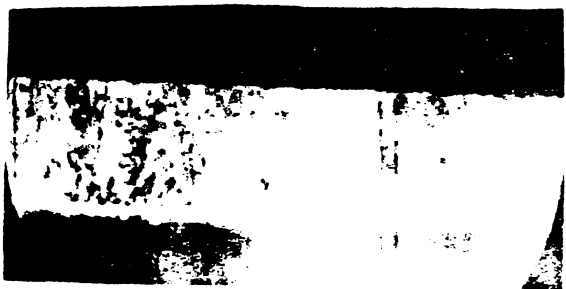


Fig.6.56.-Proba 927 x 10

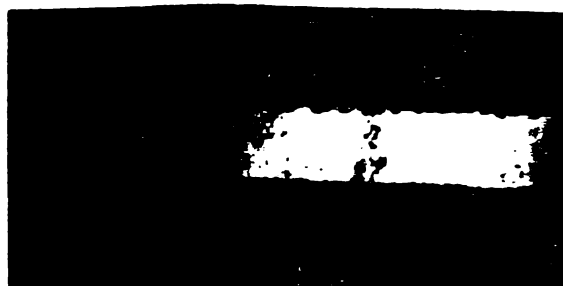


Fig.6.57.-Proba 931 x 10

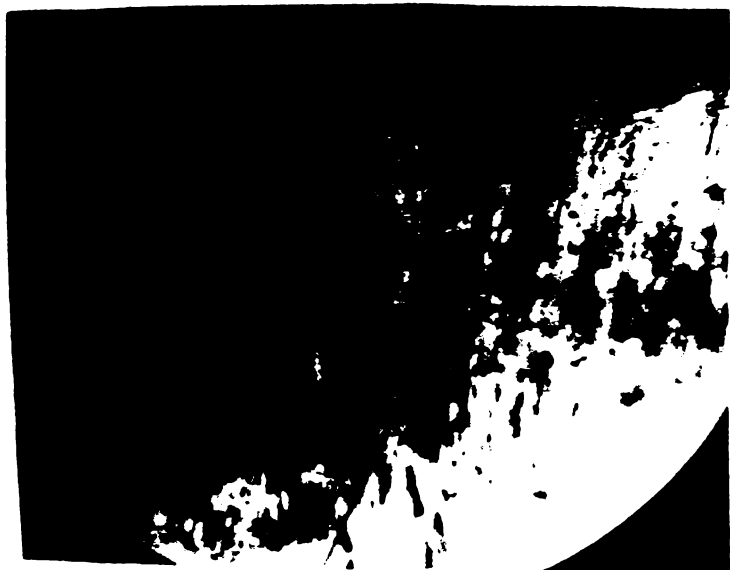


Fig.6.58.-Proba 931 atac apă regală x 250



Fig.6.59.-Proba 931 (materialul de bază), atac apă regală x 250

Proba 891 prezintă denivelări cu concavitate evidentă, fără continuitate (figura 6.60). Datorită desfășurării neregulate a procesului de tăiere se observă microfisuri perpendiculare din cauza regimului electric necorespunzător (figura 6.61). Nu se remarcă zona influențată termic.

Pe măsura creșterii capacității a condensatoarelor (probele 901, 904, 902, 931) denivelările cresc (figurile 6.62, 6.63, 6.64),

apar semne de arderea materialului, spargeri și pojghițe asemănătoare exfolierilor.

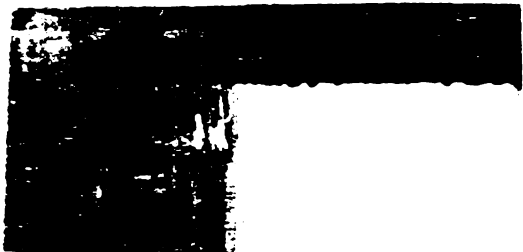


Fig.6.60.-Proba 890 x10

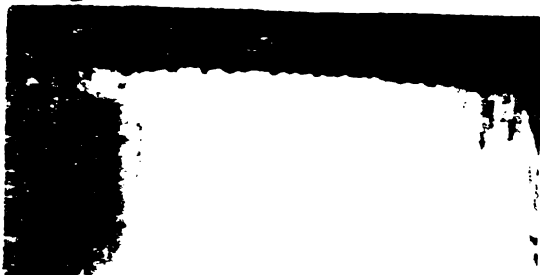


Fig.6.62.-Proba 893 x10

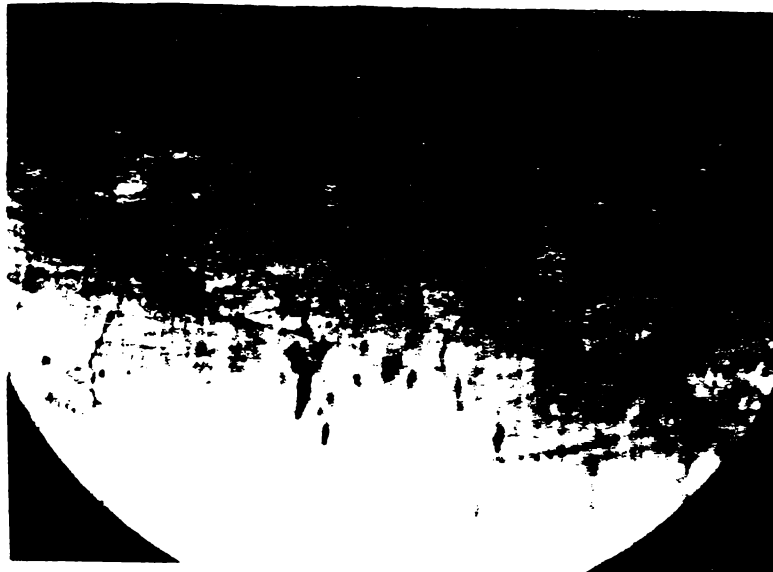


Fig.6.61.-Proba 890 atac apă regală  
x 250



Fig.6.63.-Proba 891 x10

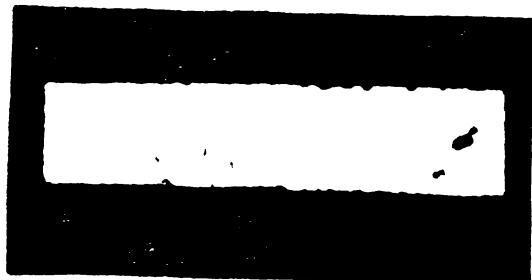


Fig.6.65.-Proba 852 x10



Fig.6.64.-Proba 891 atac apă regală  
x 250

După cum se observă în figura 6.64 de la nucleul de atac termic se ramifică fisuri cu contur neregulat, iar structura de bază sustanitică se deteriorează.

Denivelările din proba 852 se evidențiază în figura 6.65 și figura 6.66. Ele sînt concave, fără continuitate. Atacul termic al materialului s-a făcut cu ardere superficială de intensitate redusă, ceea ce s-a datorat reducerii parametrilor reglajului electric de tăiere ( $I_t = 50 \text{ A}$ ).



Fig. 0.66.-Proba 852, atsc apă regală x 250



Fig. 0.67.-Proba 857 x10

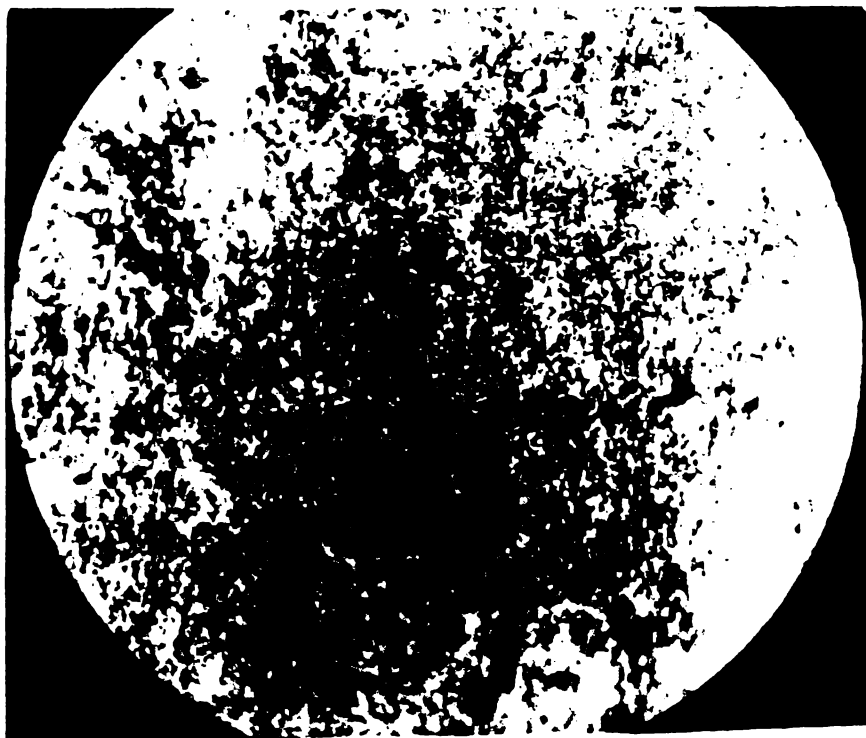


Fig. 0.68.-Proba 857, atsc apă regală x 250

La proba 870  
( $C=18.800\mu F$ ), deni-  
velările sînt mai  
accentuate, iar la  
marginile materialului  
apar structe de topire  
de culoare albă; de  
unde se detașează  
topirea rapidă cu  
caracter exploziv  
(figura 0.67 și 0.68)  
datorită descărcărilor  
suplimentare întreți-  
nute de bateria de  
condensatoare.

0.5.-Constanta de material si de masina

In literatura de specialitate [73] pentru calculul timpului de debitare se da relatie:

$$t_d = \frac{S_t \cdot b_t}{K \cdot I} \text{ min. respectiv } K = \frac{S_t \cdot b_t}{t_d \cdot I}$$

in care:  $S_t$  - suprafata de taiere in ( $\text{mm}^2$ );

$b_t$  - latimea taieturii (mm)

$K$  - constanta de material si de masina;

$I$  - curentul de lucru in procesul de debitare in (A).

Latimea taieturii se determina cu relatie:

$$b_t = b + 2b_0 \text{ (mm)}$$

unde:  $b$  - grosimea sculei electrod;

$b_0$  - jocul datorita scapărilor de curent pe suprafetele laterale ale sculei electrod;

$2b_0 = 0,1 \dots 0,3$  mm, pentru curenti de 20...70 A

$2b_0 = 0,4 \dots 0,6$  mm, pentru curenti de 80...250 A

Deci se tine cont de factorii geometrici ai sculei si piesei, relatie de mai sus se modifica dupa cum urmeaza:

$$I = S_{ai} \cdot j ; S_{ai} = \frac{\pi^2 \cdot D \cdot \varphi}{720} b_t ; \varphi = \text{arc. tg } \frac{d}{D}$$

unde:  $S_{ai}$  - suprafata activa de interactiune;

$\varphi$  - unghiul la centru corespunzator lungimii arcului de contact electrod, piesa;  $\varphi$  - variaza in procesul prelucrării in limitele  $0 - \varphi_{\text{max}} - 0$ , la taierea unui obiect cu diametrul  $d$ , respectiv  $\varphi$  este constant in timpul prelucrării daca obiectul este de sectiune patrata sau dreptunghiulara;

$D$  - diametrul discului electrod;

si atunci:

$$t_d = \frac{S_t \cdot b_t}{K \cdot S_{ai} \cdot j} = \frac{36 S_t \cdot b_t}{K \cdot j \cdot D \cdot \text{arc. tg } \frac{d_m}{D} \cdot b} \text{ (min)}$$

$d_m$  - diametrul mediu pentru piesele circulare (mm);

T A B L A 6.10

Calculul constantei de material și de utilaj (K)

Nr. probă	Denumire metal	Dimens. (mm)	Secțiune S <sub>0</sub> (mm <sup>2</sup> )	Regim de lucru				C / μ F	Regim sursă	t min	bt mm	K
				l <sub>c</sub> A	U <sub>e</sub> V	R ohmi	U <sub>0</sub> mV					
291-295	Rp	∅34x34	1156	100	26	0,094	-	-	2,095	1,5	8,276	
296-300	Rp	∅34x34	1156	100	31	0,094	-	-	2,4175	1,5	7,172	
301-305	Rp	∅34x34	1156	100	31	0,094	-	-	2,32	1,5	7,474	
306-310	Rp	∅19x21	399	100	26	0,094	-	-	0,785	1,5	7,624	
311-315	Rp	∅19x21	399	100	26	0,094	-	-	0,765	1,5	7,823	
316-320	Rp	∅19x21	399	100	26	0,094	-	-	0,763	1,5	7,840	
321-325	Rp	∅30	706,85	100	26	0,094	-	-	1,398	1,5	6,825	
326-330	Rp	∅30	706,85	150	24,5	0,094	-	-	1,083	1,5	5,874	
331-335	Rp	∅30	706,85	200	26	0,094	-	-	0,62	1,5	5,695	
336-340	Rp	∅30	706,85	100	26	0,094	-	56400	1,11	1,5	7,596	
341-345	Rp	∅30	706,85	100	26	0,094	-	37600	1,5165	1,5	8,248	
346-350	Rp	∅30	706,85	100	26	0,094	-	18800	1,356	1,5	6,985	
351-355	Rp	∅12x4	964	100	26,5	0,094	-	-	1,916	1,5	6,168	
357-368	Rp	∅12x4	1764	100	26	0,094	-	50400	1,975	1,5	6,283	
371-375	Rp	∅42x42	1764	100	26	0,094	-	37600	1,943	1,5	8,091	
376-380	Rp	∅42x42	1764	100	25	0,094	-	18800	2,975	1,5	8,004	
381-385	Rp	∅35x35	1225	50	20	0,251	-	-	3,9096	1,5	6,248	
387-390	Rp	∅35x35	1225	100	26	0,094	-	-	2,312	1,5	7,947	
396-400	Rp	∅35x35	1225	100	25	0,094	-	56400	2,50	1,5	7,350	
521-525	Rp	∅5x25	625	50	35	0,094	0,21	56400	3,273	1,5	5,919	
526-530	Rp	∅5x25	625	50	31	0,094	0,21	37600	3,783	1,5	5,121	
561-565	Rp	∅5x25	625	50	34	0,094	0,21	18800	3,416	1,5	5,671	



TABELA 6.10(continuare)

Nr. probă	Denumire material	Diam. sursă (mm)	Secțiune St mm <sup>2</sup>	Fieșă de lucru					C μF sursă	Mes.	t min	b <sub>t</sub> mm	K
				U <sub>e</sub> V	F obmi	L mH	L	U <sub>v</sub>					
1046-1050	C 110	φ50	1963,49	100	26	0,094	8,5	56400	3	3,22773	1,50	9,124	
1051-1053	C 120	φ50	1963,49	100	25	0,094	8,5	37600	3	3,2555	1,50	9,046	
1056-1058	C 120	φ50	1963,49	100	25	0,094	8,5	18800	3	3,17	1,50	9,290	
1061-1063	C 120	φ50	1963,49	100	25	0,094	8,5	9400	3	3,4106	1,50	8,635	
1066-1068	C 120	φ50	1963,49	100	27	0,094	8,5	4700	3	3,655	1,50	8,058	
1081-1082	C 120	φ50	1963,49	100	24	0,094	8,5	-	3	3,925	1,50	7,503	
674-675	7NBNO 180	φ40	1256,63	50	27	0,094	8,5	-	2	3,116	1,55	12,501	
677-680	7NBNO 180	φ40	1256,63	100	26	0,094	8,5	-	3	2,083	1,55	9,350	
682-685	7NBNO 180	φ40	1256,63	150	20	0,094	8,5	-	3	1,698	1,55	7,647	
686-690	7NBNO 180	φ40	1256,63	200	17	0,094	8,5	-	3	1,466	1,55	6,643	
716-720	7NBNO 180	φ40	1256,63	50	23	0,094	8,5	56400	2	3,2122	1,50	11,867	
723-725	7NBNO 180	φ40	1256,63	50	20	0,094	8,5	37600	1	3,1065	1,50	11,905	
728-730	7NBNO 180	φ40	1256,63	50	19	0,094	8,5	18800	1	3,106	1,50	11,907	
891	7NO 180	φ28	615,75	100	25	0,047	8,5	56400	2	1,05	1,50	8,796	
892	7NO 180	φ28	615,75	100	25	0,047	8,5	37600	2	1,00	1,50	9,236	
893	7NO 180	φ28	615,75	100	25	0,047	8,5	18800	2	0,95	1,50	9,722	
894	7NO 180	φ28	615,75	100	25	0,047	8,5	9400	2	0,933	1,50	9,899	
895	7NO 180	φ28	615,75	100	25	0,047	8,5	4700	2	0,933	1,50	9,393	

$d_m = a$  pentru piese pătrate sau dreptunghiulare ( $a$  - fiind latura de contact).

Constanta de material și de mașină pentru oțelurile rapide Rp 3; Rp 4, oțelul de matrițe de tip C 120 și oțelurile inoxidabile 7NiCr 180 și 7NbNiCr 180, este consemnată în tabela 6.10. Determinările s-au făcut pentru diverse regimuri de lucru în limitele 50...250 A; 17...34 V și diverse variante de circuite de lucru.

- Din analiza rezultatelor obținute se observă următoarele:
- constanta  $K$  de material și de mașină variază în limitele 4,4...12,5 în funcție de material, regim de lucru și dimensiunile materialului;
  - la probele făcute cu diverse valori ale inductanței  $L$  nu se observă o anumită dependență între valorile lui  $K$  și  $L$ ;
  - capacitatea bateriei de condensatoare conectată în paralel pe electrozi influențează valoarea lui  $K$  la unele probe în proporție de cea 25...50% (probele 336-350; 581-635), iar la alte probe influența este nesemnificativă (probele 1046-1063);
  - se observă o mărire a constantei  $K$  la tăierea oțelurilor inoxidabile (9-12) la regimuri de lucru cu  $I_f \leq 100$  A.

Observație: așa numita constantă de proporționalitate dată în unele agende de specialitate [180] este de fapt  $1/K$  calculată în tabela 6.10. Astfel pentru diametrul pieselor de 30...180 mm din oțel inoxidabil este indicată în [180] o constantă de proporționalitate de 0,1, ceea ce corespunde cu  $\frac{1}{9...12}$  determinată mai sus.-

#### 6.6.-Nomograme pentru determinarea parametrilor procesului tehnologic de tăiere

În determinarea parametrilor procesului tehnologic de tăiere se va proceda după cum urmează;

- tensiunea pe electrozi va fi în limitele indicate în tabela 6.5;
- presiunea discului pe piesă va fi în limitele: 0,5...2 kgf/cm<sup>2</sup> pentru oțelurile aliate pentru construcții de mașini, oțeluri rapide și oțeluri de matrițe de tip C 120 sau H 12; 0,5...1 kgf/cm<sup>2</sup> pentru oțeluri inoxidabile.



Pentru determinarea timpului de tăiere corespunzător unui anumit diametru al materialului și curentului de lucru, s-au elaborat două nomograme: prima pentru tăierea prin eroziune complexă electrică-electrochimică a oțelurilor rapide pentru scule, valabilă și pentru oțelurile aliate de matrițe tip C 120 sau H 12 (figura 6.69) și a doua diagramă pentru tăierea oțelurilor inoxidabile de tip 7NiCr 180, 7TiCr 180 și 7NbNiCr 180 (figura 6.70). Pe figurile respective sînt date trei exemple de determinări corespunzătoare unui curent de lucru de 100 A și 150A și trei diametre 23, 40, 90 mm (figura 6.69) respectiv trei diametre 25, 30, 40 mm (figura 6.70).

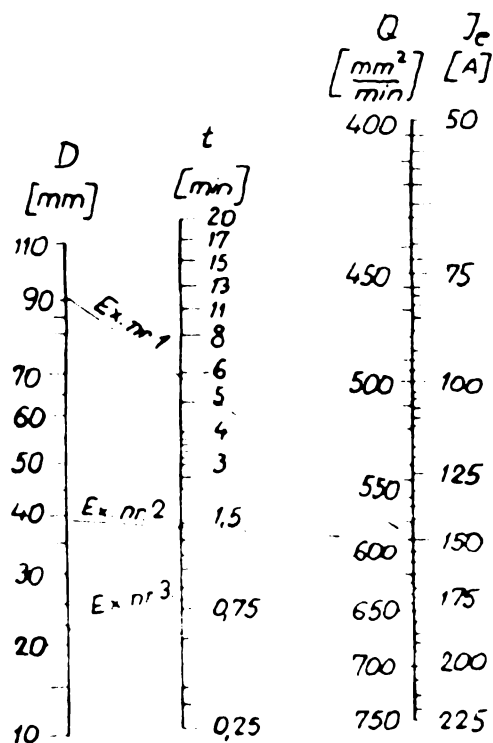


Fig.6.69.-Nomogramă pentru determinarea timpului de tăiere a oțelurilor rapide și de scule

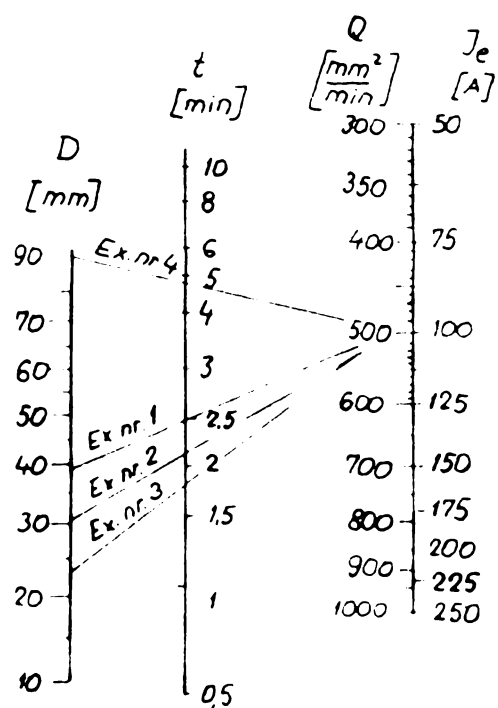


Fig.6.70.-Nomogramă pentru determinarea timpului de tăiere a oțelurilor inoxidabile

Timpurile de tăiere determinate cu nomogramele din figurile 6.69 și 6.70 sînt valabile pentru o viteză periferică a discului de  $2000$  m/s și grosimea discului 1 mm.

### 6.7. Materialul și uzura discului de tăiere

La experimentări s-au folosit discuri cu grosimea 0,8.. 1 mm și  $\phi 340$  mm din tablă de oțel (figura 6.71 a) și tablă de cupru (figura 6.71 b).



Fig. 6.71. - Discuri de tăiere: a) tablă de oțel; b) tablă de cupru

La confecționarea discurilor s-a folosit tablă de espată dreptă din oțel meale. Îndreptarea sigură și corectă, s-a realizat prin revenire înaltă. În acest scop discurile au fost strinse în pachet între două table de

20 mm grosime și încălzite până la 600...700°C.

Uzura discului de oțel determinată prin pierderea în greutate este de cea 15..30% din greutatea materialului ereditat și crește de o dată cu majorarea presiunii discului asupra obiectului de tăiat fără însă a mări productivitatea care este optimă pentru o presiune de cea 0,5...2 daN/cm<sup>2</sup>.

La experimentări nu s-au folosit discuri cu margini profilate.

Practica a demonstrat că un disc tratat termic în pachet este neted, suficient de rigid și are o bătaie axială de ordinul 0,3...0,4 mm, lărgoște suficient tăietura pentru asigurarea jocului necesar pătrunderii în adâncime. Bătăile radiale ale discului nu sînt admisibile. Dacă sînt de ordinul 0,2...0,3 mm pot fi eliminate prin prelucrarea discului după montaj inversînd sensul curentului de la comutator; operațiunea de rectificare durează cea 3-5 minute.

Viteza periferică a discului este 11 m/s la  $\phi 340$  mm și 9 m/s la  $\phi 280$  mm, dimensiunile limită folosite la experimentări.

Pentru o asemenea variație a vitezei periferice, timpul de tăiere respectiv productivitatea variază cu maximum 10%.

Conform experimentărilor făcute pînă acum [51, 106, 180], viteza periferică nu poate depăși 20 m/s, deoarece la viteze periferice prea mari, procesul de tăiere se complică din cauza pulverizării lichidului de lucru, creșterea vibrației discului și a influenței bătailor axiale ale discului etc.

O importanță deosebită la uzura discului o are distribuția lichidului de lucru în zona de tăiere, respectiv varianta constructivă a diuzei de stropire a lichidului. În cadrul experimentărilor s-au încercat mai multe diuze (figura 6.72) rezultatele cele mai bune obținindu-se la varianta b.

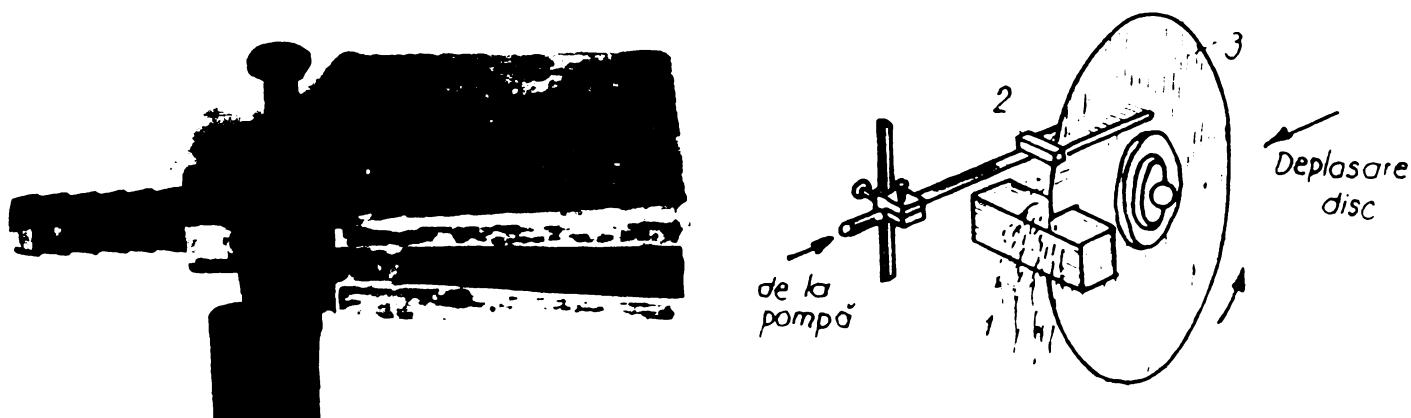


Fig. 6.72.- Diuze pentru stropirea lichidului de lucru

Cercetîndu-se influența materialului discului asupra variației timpului de tăiere în funcție de curentul de lucru (figura 6.73 și 6.74) s-au constatat următoarele:

- la tăierea oțelului C 120,  $\varnothing 50$  mm, cu sursă redresor trifazat, timpul de tăiere scade continuu cu creșterea curentului de lucru (figura 6.73 b) în cazul folosirii unui disc din oțel în timp ce pentru discul de cupru de aceeași grosime timpul minim de tăiere este la 150 A (figura 6.73 a);
- la tăierea oțelului C 120,  $\varnothing 50$  mm, cu sursă redresor monofazat (figura 6.74) alura diagramei din figura 6.73 a, nu se mai repetă timpul de tăiere scăzînd cu creșterea curentului pentru ambele

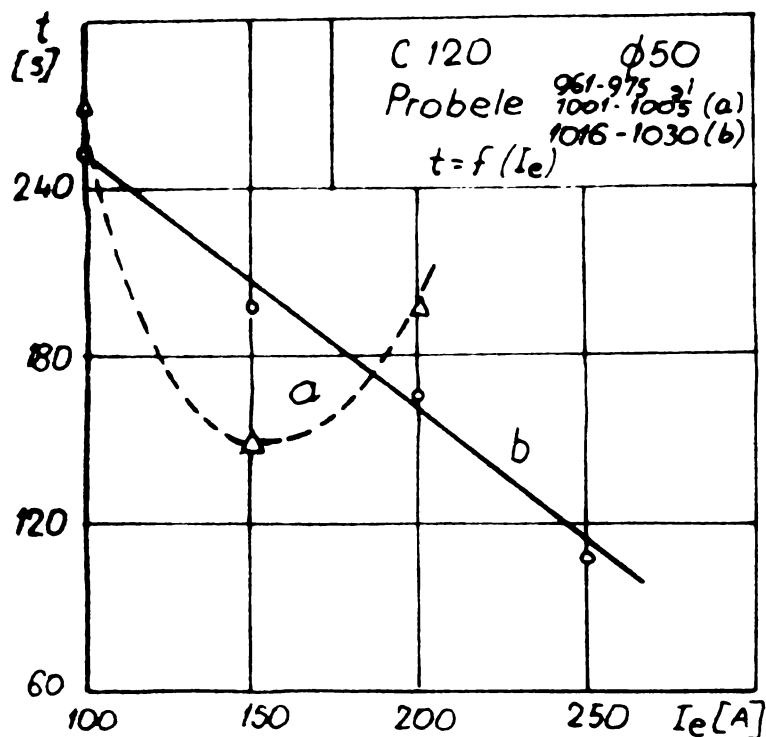


Fig.6.73.-  $t=f(I)$  pentru discuri de cupru **a** și oțel **b**;  $L=8,5$  mH;  $C=0$  Sursă; redresor trifazat

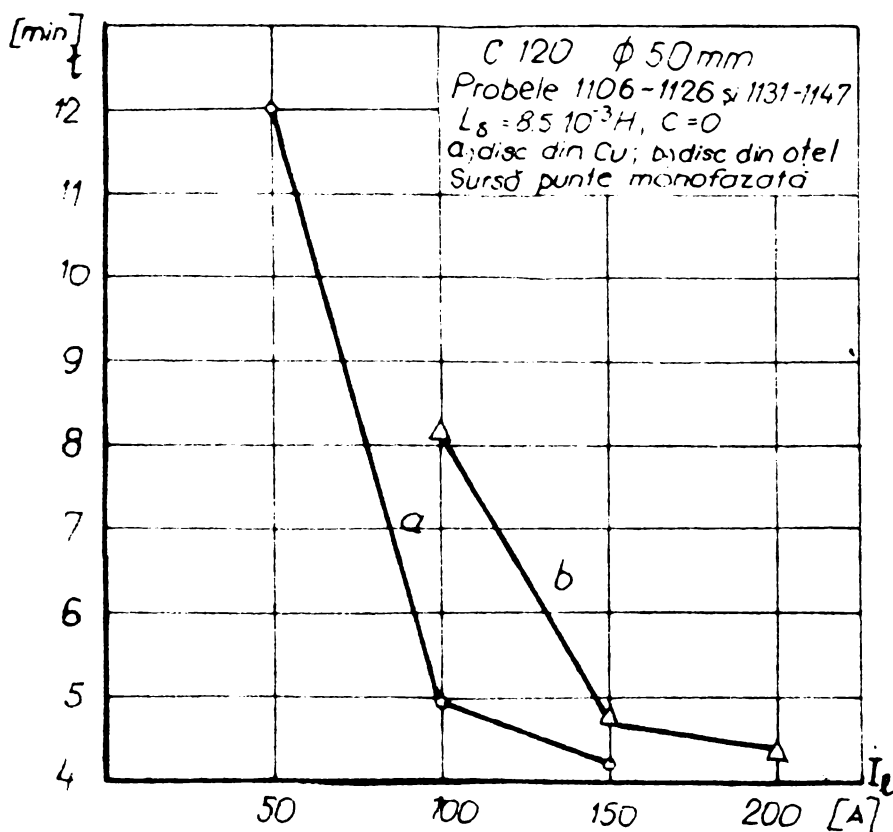


Fig.6.74.-  $t=f(I)$  pentru discuri de cupru **a** și oțel **b**;  $L=8,5$  mH;  $C=0$  Sursă; redresor monofazat

variante de material, cu observația că la regimul electric de  $I_e=100$  A, timpul de tăiere cu discul de cupru este cu cea 60% mai scurt decât cel realizat la tăierea cu disc de oțel; -timpul de tăiere cu sursă redresor trifazat pentru aceleași regimuri electrice sînt mai mici cu cea 15% față de cei obținuți la tăierea cu sursă redresor monofazat. La experimentările de tăiere cu redresor monofazat nu s-a putut depăși la discul de cupru regimul electric cu  $I_e = 150$  A. In tabela 6.11 sînt prezentate cantitățile  $mm^3$  de material prelevat, pe un  $mm^3$  uzură material disc, pentru oțel de matrițe C 120 oțeluri rapide, oțel aliat 35MnCr 11 și oțel inoxidabil. Din analiza tabelii 6.11 se pot trage următoarele concluzii:

T A B E L A 6.11  
 Uzura discului. Cantitatea de mm<sup>2</sup> de material prelevat pe mm<sup>2</sup> uzură material disc

Nr. crt.	Electrod		Material		Material		Material		Material		Material		Material		Regim ol.	mm <sup>2</sup> mat prelevat / mm <sup>2</sup> uzură mat.
	Material	Ø	Material	Ø	Material	Ø	Material	Ø	Material	Ø	Material	Ø	Material	Ø		
1.-	C 120	Ø50	1963,4953	1,5	12	35342,9	Cu	340	335	1,0	2650,72	28-25	50-150	13,33		
2.-	C 120	Ø50	1963,4953	1,5	12	35342,9	Cu	335	329	1,0	3129,02	28	100	11,29		
3.-	C 120	Ø50	1963,4953	1,5	8	23561,9	Cu	308	303	1,0	2399,39	28	100	9,81		
4.-	C 120	Ø50	1963,4953	1,5	13	38288,1	01	340	320	1,0	10367,25	28-24	100-200	3,69		
5.-	C 120	Ø50	1963,4953	1,5	9	26507,18	01	340	325	1,0	7834,34	28-24	100-150	3,38		
6.-	Rp 3	Ø30	706,8583	1,4	13	12405,36	01	316	314	0,9	690,64	28-24	100-200	13,92		
7.-	Rp 3	Ø42x42	1764	1,4	11	26195	01	314	306,5	0,9	3289,54	27	100	7,96		
8.-	Rp 3	Ø40x40	1600	1,55	14	34720	01	320	310	1,05	5195,40	27	100	6,68		
9.-	Rp 3	Ø25x25 Ø40x40	625 1600	1,55	2 4	12826,55	01	325	320	1,05	2659,55	28-27	50-100	4,82		
10.-	Rp 3	Ø35x35 Ø40x42	1225 1764	1,5	12 2	55512,33	01	340	310	1,0	15315,26	28-23	50-200	4,27		
11.-	3MocF11	Ø45	1590,4311	1,5	19	45327,27	01	310	295	1,0	7127,48	27	100	6,35		
12.-	3MocF11	Ø45	1590,4311	1,55	33	81350,55	01	340	300	1,05	29111,5	28-24	50-200	3,85		
13.-	7M1CF 18C	Ø30	706,9583	1,5	28	29688	01	340	335	1,0	2650,71	28-26	30-100	11,19		
14.-	7M1CF 18C	Ø20	615,7521	1,5	11	26332	Cu	310	305	1,0	2415,09	24	150	10,09		

- uzura discului este mai mică la discuri de cupru 9,81...13,3 mm<sup>3</sup> material prelevat pe un mm<sup>3</sup> uzură disc;
- pe măsură creșterii curentului de lucru uzura discului crește;
- uzura discului este mai mică la tăierea oțelurilor inoxidabile pentru un regim electric similar.

#### 6.8.-Influența compoziției lichidului de lucru asupra procesului de tăiere

Proprietățile fizico-chimice ale electrolitului au o influență hotărâtoare asupra procesului de eroziune electrică-electrochimică. Cercetările [5, 68, 70, 72, 77, 82, 119, 138], au arătat că cele mai bune lichide de lucru pentru tăiere, care asigură o bună prelevare a materialului din electrodul-obiect (anod) și cel mai mic consum de material din electrodul sculă (catod) sînt soluțiile coloidale cu adăsurii de săruri de Na. Mediile lichide folosite actualmente (soluții cu sticlă lichidă, soluții cu suspensii de caolin cu borax și acid boric) au o serie de neajunsuri importante în exploatare fiind necesare (la soluțiile cu sticlă lichidă) spălări dese ale utilajului, desfundări de conducte de alimentare, desfundări de diuze, protecție așfinilor operatorului etc.

Experiența demonstrează că electrolitii care conțin oxizi de siliciu, asigură o productivitate mare și o calitate ridicată a suprafeței prelucrate. Mediile lichide preparate pe baza anesteceurilor cu silicat de natriu asigură formarea pe anod a unei pelicule cu rezistență electrică ridicată, ceea ce asigură posibilitatea eroziunii locale intensive a metalului fără distrugerea peliculei anodice. Capacitatea de generare și întreținere a peliculei anodice este în funcție de vîscozitatea și densitatea lichidului și depinde de conținutul de particule coloidale moleculare în suspensie, care migrează spre anod, contribuind astfel la regenerarea continuă a acestor pelicule.

Datorită deficiențelor cauzate în exploatare de soluțiile cu sticlă lichidă, la mașinile de tăiere prin eroziune electrică electrochimică pentru secțiuni mari (peste 200 mm) se recomandă

folosirea unei emulsii de compoziție specială și apă. Se folosește soluția de caolină în apă cu caolină în suspensie (cca 400-450 gr caolin/l cu 50 gr, borax/l și 50 gr. acid boric/l. Cu această emulsie se poate obține o productivitate maximă a procesului folosind regimuri forțate de tăiere cu intensitatea curentului până la 1500 A. Consumul de electrod sculă nu depășește 50% din cantitatea de metal prelevat de la electrodul obiect.

După cum se știe caolina în apă formează o suspensie coloidală dispersată, particulele căreia sînt încărcate negativ și în prezența unui cîmp electric trec către anod formînd pe acesta o peliculă insolubilă cu conductibilitate electrică redusă.

La asemenea mediu de lucru este necesar un dispozitiv pentru amestecarea caolinului și agitarea amestecului înainte de începerea tăierii.

La experimentări s-a folosit sticla lichidă cu modulul  $SiO_2$  în limitele 2,25...2,75 și greutatea specifică 1,43-1,55. Modulul în limitele indicate asigură limitarea vitezei de uscare.

În literatura de specialitate [104] se menționează că soluțiile cu sticlă lichidă nu pot fi folosite la curenți de lucru care depășesc 500 A deoarece în exploatare crește rapid vîscozitatea lichidului ceea ce limitează desfășurarea normală a procesului de tăiere.

În figura 6.75 este indicat graficul greutății specifice a electrolitului preparat din sticlă lichidă cu greutatea specifică 1,45 și apă. Caracteristica de bază a electrolitului

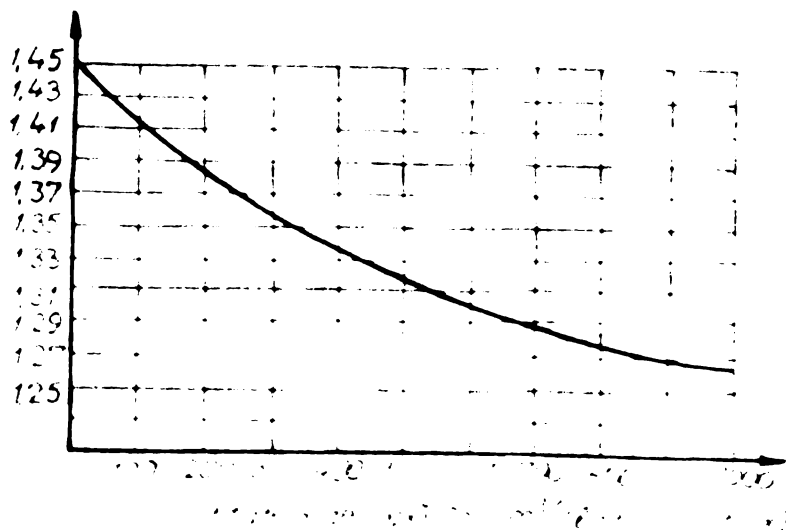


Fig. 6.75. - Graficul greutății specifice a electrolitului preparat din sticlă lichidă cu greutatea specifică 1,45 și apă

este greutatea specifică în limitele 1,28...1,32 g/cm<sup>3</sup>, care trebuie controlată zilnic. Pe măsură ce apa s-a evaporat, amestecul s-a corectat adăugându-se apă curată pînă la refacerea greutății specifice. În timpul exploatării rezervorul de electrolit s-a curățat periodic. Scăderea productivității respectiv majorarea timpului de tăiere cu peste 20-25%, necesită înlocuirea completă a electrolitului.

Sticla lichidă în soluții creează anumite deficiențe în legătură cu proprietatea ei de lipire. Pentru eliminarea acestor neajunsuri în cursul experimentărilor s-au luat următoarele măsuri:

- S-a evitat stropirea părților exterioare ale mecanismului de tăiere prin etangarea circuitului lichidului respectiv a spațiului unde stropește electrodul-dise;
- S-au uns toate părțile mecanismului de tăiere cu nitrolac și s-au protejat suprafețele cu un strat subțire de lac special (10% polistirel cu 90% dicloretan) sau ulei mineral. În acest caz peșghița sticlei lichide nu se lipește și poate fi ușor îndepărtată;
- S-a introdus în electrolit cea 5% ulei mineral pentru înăbușirea uscării soluției de sticlă lichidă;
- Pentru protecția mâinilor operatorului s-a folosit o cremă pe bază de glicerină, ceară și după posibilități mănuși de cauciuc.

Pentru exemplificarea influenței compoziției lichidului asupra procesului de tăiere în figura 6.76 se prezintă timpul de tăiere în funcție de curentul de lucru pentru trei variante de soluții pentru lichide de lucru:

- a) soluție de sticlă lichidă cu apă, greutatea specifică 1,28;
- b) idem, cu greutatea specifică 1,35
- c) idem, soluție necorespunzătoare cu greutatea specifică peste 1,35 și impurități de la tăiere.

Se observă că timpul de tăiere pentru o anumită mărime a curentului de lucru variază cu peste 400% fiind minim pentru soluție de sticlă lichidă cu apă cu greutatea specifică 1,28.



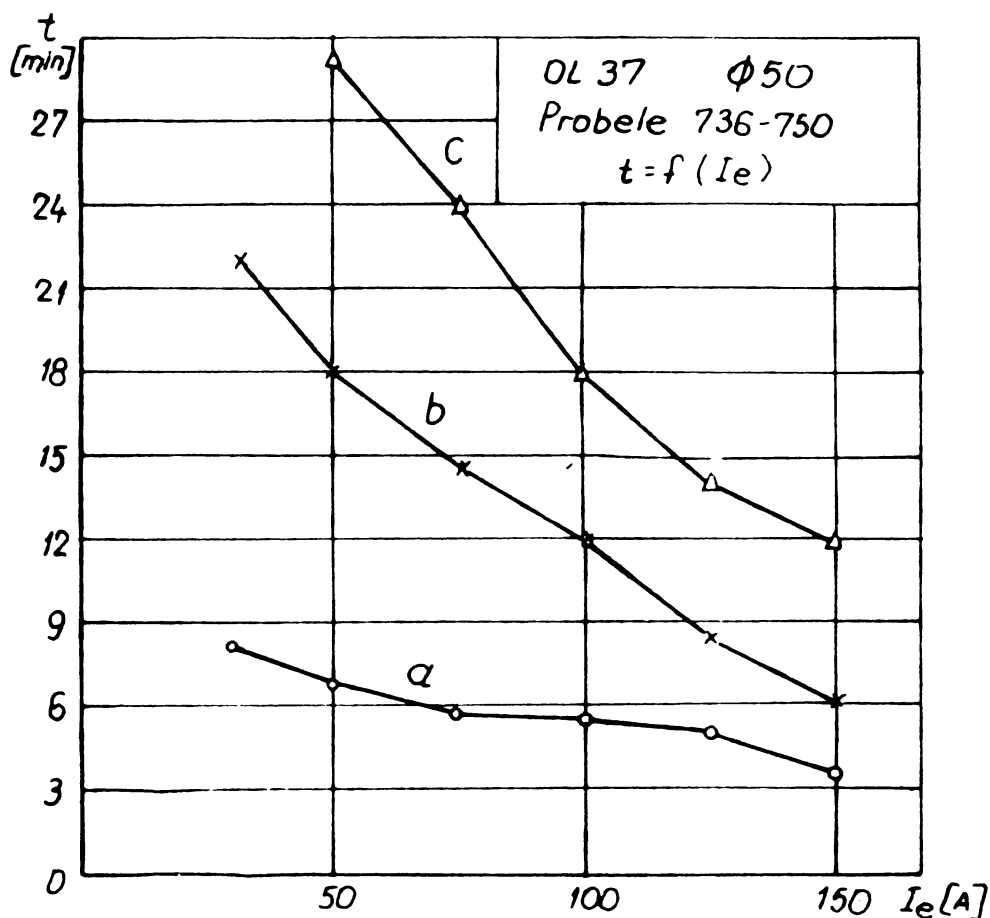


Fig. 6.76 - Timpul de tăiere în funcție de curentul de lucru

O importanță deosebită în buna desfășurare a procesului de tăiere prezintă modul de distribuire a lichidului în zona tăierii. În cursul experimentărilor au fost folosite diferite variante de diuze așezate la distanțe diferite și s-au constatat următoarele:

- Modelul ales pentru diuza de stropire trebuie să asigure o bună distribuire a lichidului de lucru pînă la finele operației de tăiere considerînd electrodul obiect staționar ( $d < 100$  mm).
- Pentru diametre mai mari ( $d > 100$  mm), utilajul ar trebui să asigure rotirea electrodul obiect în procesul de tăiere.
- La tăierea țevilor nu sînt suficiente diuze obișnuite corespunzătoare pentru material plin, ar trebui studiată posibilitatea alimentării zonei de tăiere din interiorul țevii.

### 6.9.-Influența vibrațiilor asupra procesului de tăiere

#### 6.9.1.-Cauzele principale de apariție a vibrațiilor

la mașinile de tăiere prin eroziune complexă electrică-electrochimică sînt:

- desechilibrul mezelor rotative ale mașinii și în special a discului de tăiere;
- bătăile discului față de axa de rotație în direcția avansului.

Vibrațiile produc oscilații ale valorii parametrilor de bază ai procesului, adică a presiunii discului asupra produsului, a tensiunii și intensității curentului.

Pentru a se preveni vibrațiile, la instalația experimentală construită s-au luat următoarele măsuri: s-a echilibrat pendulul, s-a amplasat corect motorul, s-a folosit o transmisie cu curele trapezoidale și s-au introdus garnituri elastice sub mașină. De asemenea la construcția carcasei mecanismului de tăiere s-a ales o variantă rigidă care a fost modificată la primele încercări prin consolidări suplimentare a cornierelor care formează scheletul carcasei.

Pentru cercetarea influenței vibrațiilor asupra procesului de tăiere s-au făcut următoarele experimentări:

- a) s-a determinat variația intensității curentului la funcționarea normală a utilajului, roterul motorului nefiind supus unei echilibrări suplimentare având un dezechilibru admisibil pentru motoarele electrice;
- b) s-a determinat variația intensității curentului la funcționarea utilajului după crearea artificială a dezechilibrului discului.

În cazul a s-a constatat că oscilațiile tensiunii și curentului sînt periodice, iar frecvența acestor oscilații corespunde cu turația motorului.

În cazul b periodicitatea oscilațiilor intensității curentului coincide cu turația discului. Intensitatea curentului variază de la valoarea optimă la de 3 - 4 ori valoarea optimă. Presiunea discului asupra produsului variază de asemenea de la zero pînă la o valoare care depășește de cîteva ori valoarea admisibilă.

Un fenomen analog s-a observat și în cazul bătăii diametrului exterior al discului echilibrat față de axa de rotație a acestuia.

Majoritatea discurilor cu care s-a lucrat aveau diametrul 340  $\phi$  mm, grosimea 0,5...1,5 mm, bătăia diametrului exterior cea 1,0 mm. Frecvența oscilațiilor intensității curentului și valorii presiunii coincide în acest caz cu numărul de rotații

a discului.

În concluzie se poate afirma că vibrațiile produc oscilații inadmisibile ale valorii parametrilor de bază ai procesului, adică a presiunii, a tensiunii și intensității curentului și datorită acestui fapt se produce o scădere considerabilă asupra intensității procesului de tăiere și asupra rugozității suprafețelor tăieturii și chiar a structurii zonei influențate termic.

### 6.9.2.-Izolatori de vibrații

Având în vedere că în general mașinile de tăiere prin eroziune complexă electrică electrochimică nu necesită fundație, pentru reducerea coeficientului de transmisibilitate  $\eta$ , s-a experimentat introducerea sub mașină a unor suporturi de sprijin, izolatori antivibratori din cauciuc sub formă de plăci. Cauciucul are proprietăți de amortizare foarte pronunțate, disiparea energiei ajungând până la 30...35% din energia inițială. Având modulul de elasticitate mic,  $E = 0,01...0,1 \text{ N/m}^2$ , constanta elastică este foarte mică. Astfel este posibilă realizarea pentru mașinile așezate pe izolatori de cauciuc a unor pulsații proprii foarte mici. Proprietățile elastice ale izolatoarelor și în special ale cauciucului se pot pierde sub acțiunea scurgerilor de electrolit cu care ajunge în contact. Din acest motiv există construcții de izolatori protejați prin părți metalice. Pe astfel de izolatori mașina se

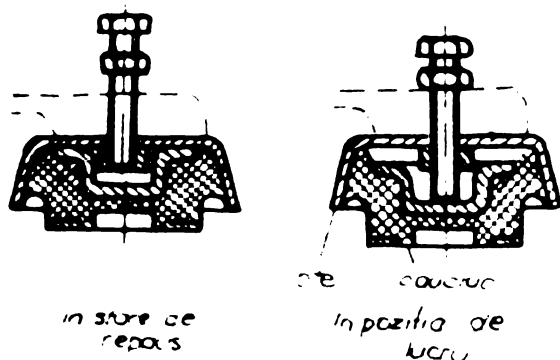


Fig.6.77.-Izolatori de vibrații protejați prin părți metalice

asează în dreptul găurilor de fixare. După ce se înșurubează piulițele, se lasă mașina jos și se fixează orizontal prin strângerea corepunzătoare a șuruburilor. Cele două poziții (figura 6.77) ale izolatorului corespund momentelor inițial și final al punerii în funcțiune. Deoarece

compresiunea și întinderea cauciucului se face pe seama deformațiilor laterale, nu pot fi folosite ca izolatori plăci compacte de cauciuc. La experimentări rezultate bune s-au obținut cu plăci cu nervuri (figura 6.78)

seu cu găuri. In figura 6.79 se arată construcția corectă (a) și greșită (b) a unui izolator de cauciuc fixat pe elemente metalice.

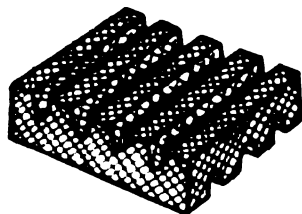


Fig. 6.78.-Izolatori de vibrații din plăci cu nervuri

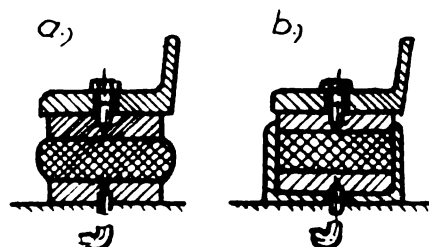


Fig. 6.79.-Izolatori de cauciuc fixat pe elemente metalice  
a) construcție corectă; b) construcție greșită

Recomandări orientative pentru construcția izolatoarelor [3] prevăd folosirea elementelor elastice de plută pentru deformații statice sub 2 mm și a elementelor elastice de cauciuc pentru deformații statice între 2 mm și 20 mm.

In general normele prevăd ca la mașini de tăiere coeficientul de transmisibilitate  $\eta$  să fie sub valoarea 0,3.

## 7.-MICROSCOPIA ELECTRONICA A ZONEI SECTIUNII DE TAIERE

### 7.1.-Microanaliza prin sonda electronică

Microanalizorul cu sondă electronică sau microsonda permite practic analizarea cantitativă a tuturor elementelor cu număr atomic superior lui 4, conținute într-un volum de 1 sau câțiva microni diametru cu ajutorul spectrului de raze X caracteristice, emise prin aceste volume sub efectul bombardamentului printr-un fascicol electronic foarte fin.

Comparând intensitatea unei raze caracteristice unui element A emis de un eșantion S curat (martor) și de aliajul studiat se obține concentrația masică a elementului A.

Un mare număr de aparate bazate pe acest principiu sînt actualmente utilizate. Un astfel de aparat are la bază prima microsondă Casting care se compune în esență din:

- o optică electronică (tun electronic și două lentile electromagnetice) pentru a forma un fascicul foarte fin de electroni sau sondă electronică de 1 micron diametru sau mai puțin;
- două spectrometre de cristal curbat destinate a măsura lungimile de undă și intensitatea razelor spectrului emis. Unul din aceste spectrometre echipat cu un cristal de cuarț și un contor sau un scintilator permite analiza razelor medii sau dure ( $0,7 \text{ \AA} < \lambda < 4 \text{ \AA}$ ) Altul echipat cu un cristal de mură și un contor proporțional de flux, permite a se analiza razele mai moi ( $4 \text{ \AA} < \lambda < 12 \text{ \AA}$ ). Este posibil astfel de a analiza toate elementele din tabloul periodic al elementelor al cărui număr atomic este superior celui corespunzător sodiului;
- un microscop optic dotat cu un obiectiv cu oglindă dispus în axa celei de a doua lentilă. El permite de a observa eșantionul în timpul analizei și identificarea și reperarea punctelor analizate.

Sensibilitatea microsondei electronice Casting depinde evident de sistemele considerate. Se indică de exemplu cele care reprezintă 0,5% din greutate pentru analiza zirconului în uraniu și 0,010% pentru fier în beriliu. Precizia obținută asupra valorii concentrației depinde evident de aceasta. Ea poate atinge 1%.

Analiza prin sondă electronică s-a efectuat cu ajutorul microanalizatorului tip JEOL JXA 50 A de construcție japoneză.

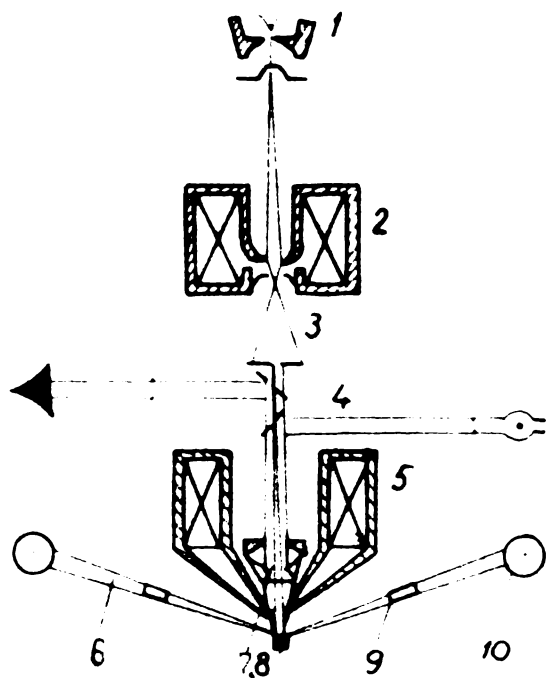


Fig.7.1.-Schema de principiu a unui microanalizator sondă electronică: 1-tub electronic; 2-condensator magnetic; 3-fasciculul de electroni; 4-lumina; 5-obiectiv magnetic; 6-fasciculul de raze X; 7-obiectiv cu oglindă; 8-eșantion; 9-cristal; 10-conter proporțional

precum și elementele componente analizate prin sonda electronică sunt indicate în tabelul 7.1.

În figurile 7.2...7.52 se prezintă imaginile reprezentative de analiză prin sondă electronică a șapte oțeluri aliate debitate prin eroziune complexă electrică, electrochimică la regimuri electrice în limitele 30...200 A; 20...28 V.

#### 7.2.-Oțel 35Mn 16 (figurile 7.2...7.9)

La valorile inferioare ale intensității de curent se constată în stratul marginal concentrații de Mn, Cr, puțin superioare valorilor medii corespunzătoare materialului de bază.

Concentrația în C și Si este aproximativ aceeași în ambele zone caracteristice de material.

Schema principială a microscopului este dată în figura 7.1.

Epruvetele debitate din oțelurile cercetate la regimuri electrice concrete au fost supuse examinărilor calitative la microscopia electronică în vederea aprecierii compoziției chimice a straturilor superficiale afectate de procesul de prelucrare. Pentru analiză comparativă s-au făcut examinări atât asupra stratului marginal cit și asupra metalului de bază, neafectat termic de procesul eroziv.

Oțelurile aliate cercetate, regimurile electrice și caracteristicile circuitelor folosite la pregătirea probelor

Regimurile electrice și caracteristicile circuitelor folosite la pregătirea probelor și elementele componente analizate prin sonda electronică

Nr. Proba	Material	Dim. mm	Măsură e-		R, L, C reglate la	Nr. fig. cu variația elementelor componente		Ma	Q	L μF	C	Mn	S1	Qr	Mo	W	N1
			A	V		R ohmi	L mH										
128	35Mn 16	∅26	30	22	0,188	-	-	2,2	0,386	-	-	2,2	2,4	2,5	-	-	-
096	"	"	200	26	0,047	-	-	2,6	0,394	-	-	2,7	2,8	2,9	-	-	-
027	33MoCr 11	∅45	30	28	0,141	-	-	2,18	0,368	-	-	2,11	2,12	2,13	2,14	-	-
046	"	"	200	26	0,047	-	-	2,15	0,378	-	-	2,16	2,17	2,18	2,19	-	-
051	21MoMnCr 12	∅26	30	26	0,141	-	-	2,29	0,397	-	-	2,21	2,22	2,23	2,24	-	-
073	"	"	200	26	0,047	-	-	2,25	0,406	-	-	2,26	2,27	2,28	2,29	-	-
336	Ep 3	∅30	100	26	0,094	8,5	56400	2,39	0,731	-	-	-	-	2,31	-	2,32	-
971	"	"	200	27	0,047	8,5	-	2,33	0,738	-	-	2,34	-	2,35	-	-	-
981	0 120	∅50	150	27	0,047	8,5	38600	2,36	0,749	-	-	-	-	2,37	-	-	-
883	7NiCr 180	∅28	50	28	0,094	8,5	-	2,38	0,734	-	-	2,39	-	2,40	-	-	2,41
896	"	"	150	21	0,047	8,5	-	2,42	0,742	-	-	2,43	-	2,44	-	-	0,737
674	7NbNiCr 180	∅40	50	27	0,094	8,5	-	2,45	0,715	-	-	2,46	-	2,47	-	-	0,712
681	"	"	150	20	0,094	8,5	5400	2,49	0,727	-	-	2,50	-	2,51	-	-	0,728

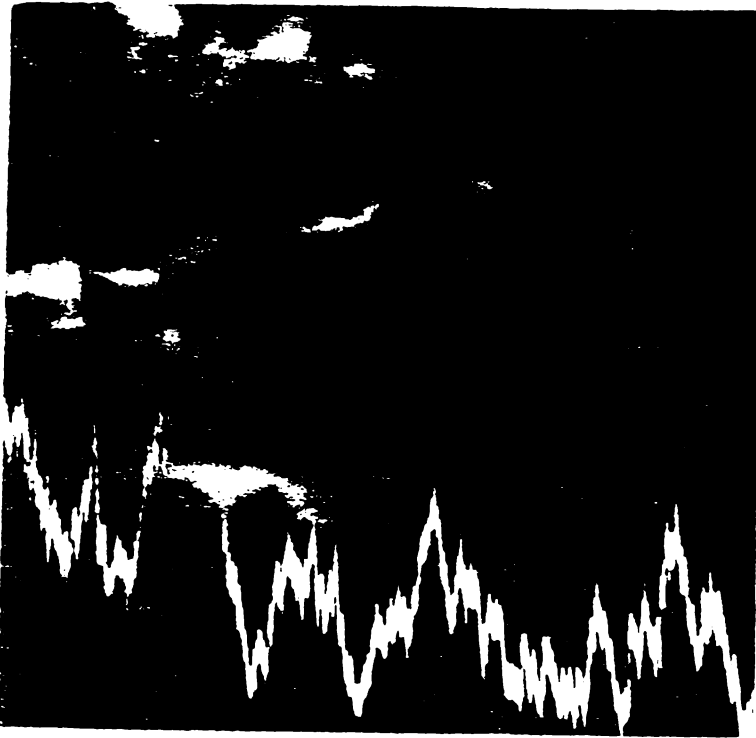


Fig.7.2.-Proba 128; oțel 35Mn16  
ø26 mm;  $I_p = 30A$ ; x 1000; variația  
elementului C

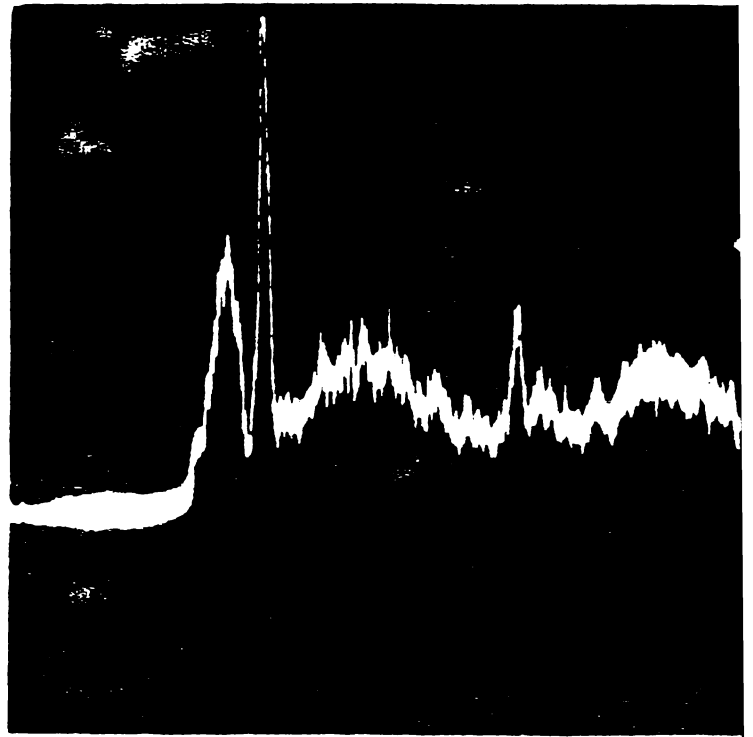


Fig.7.3.-idem ca în figura 7.2  
x 1000; variația elementului Mn

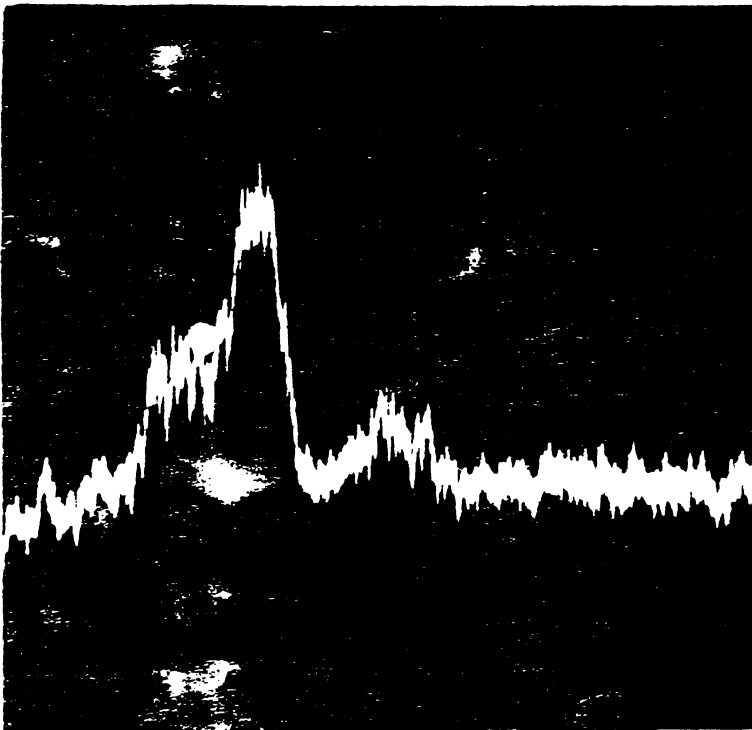


Fig.7.4.-Idem ca în figura  
7.2; x 1000; variația elemen-  
tului Si

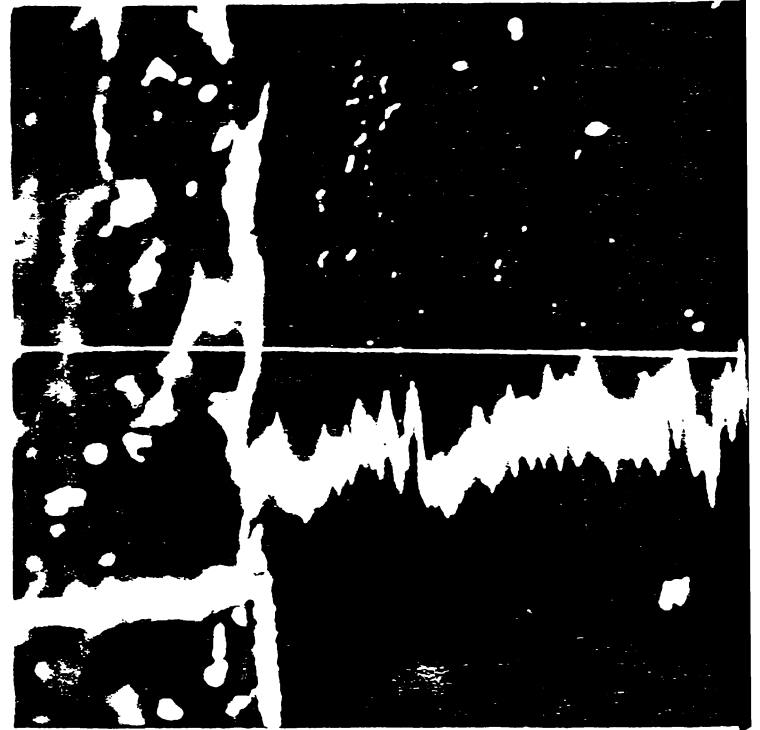


Fig.7.5.-idem ca în figura 7.2  
x 1000; variația elementului Cr



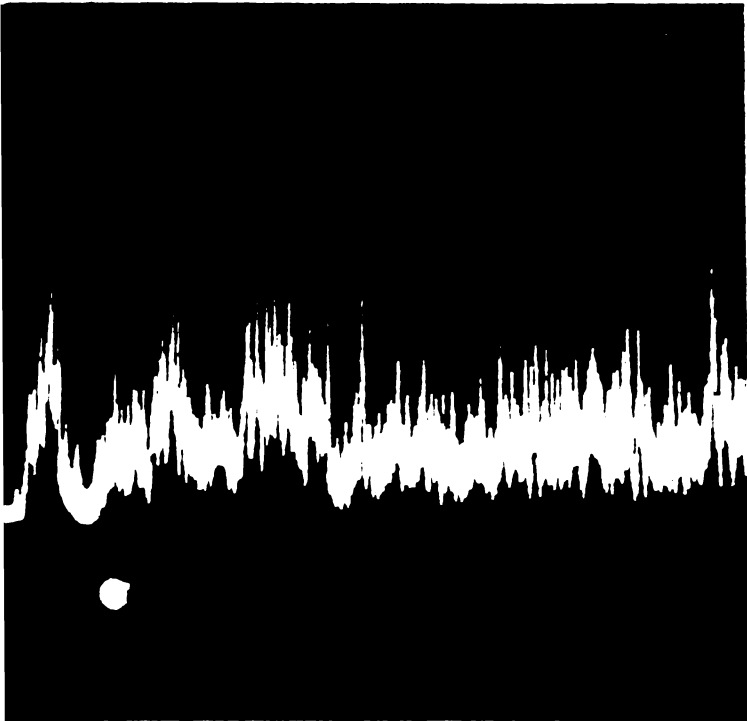


Fig.7.6.-Proba 096; oțel 35Mn16  
Ø26 mm;  $I_p = 200$  A;  
x1000; variația elementului C

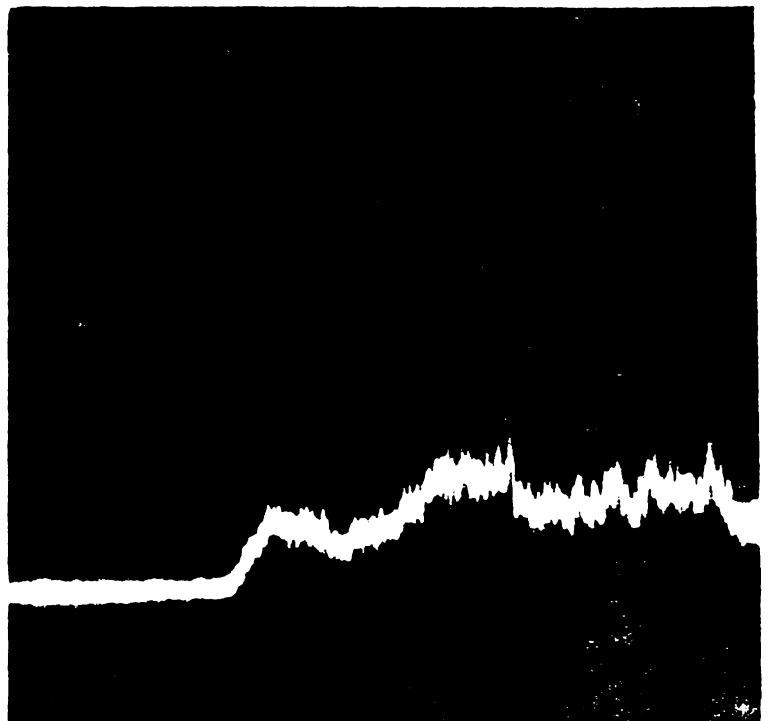


Fig.7.7.-idem ca în fig.7.  
x 1000; variația elementului Mn

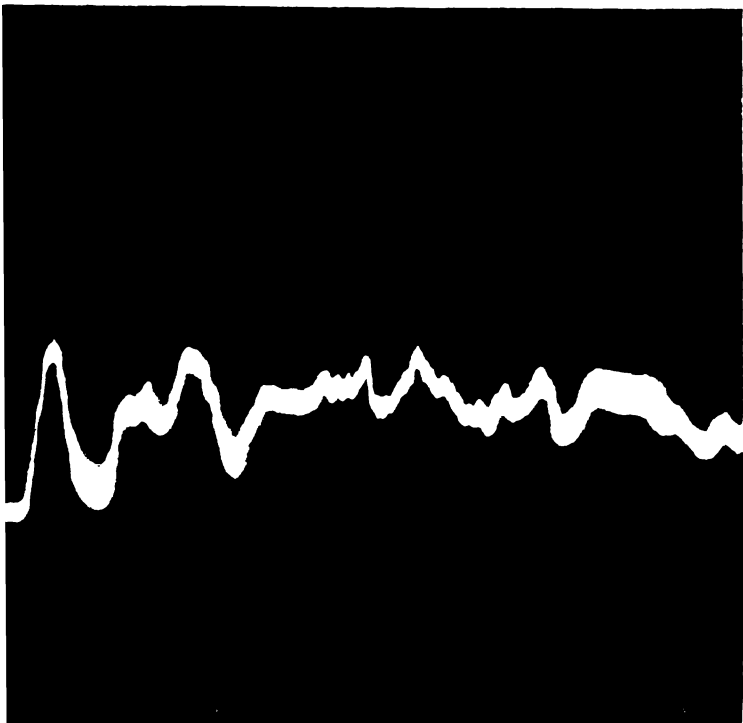


Fig.7.8.-idem c în fig.7.6  
x1000; variația elementului Si

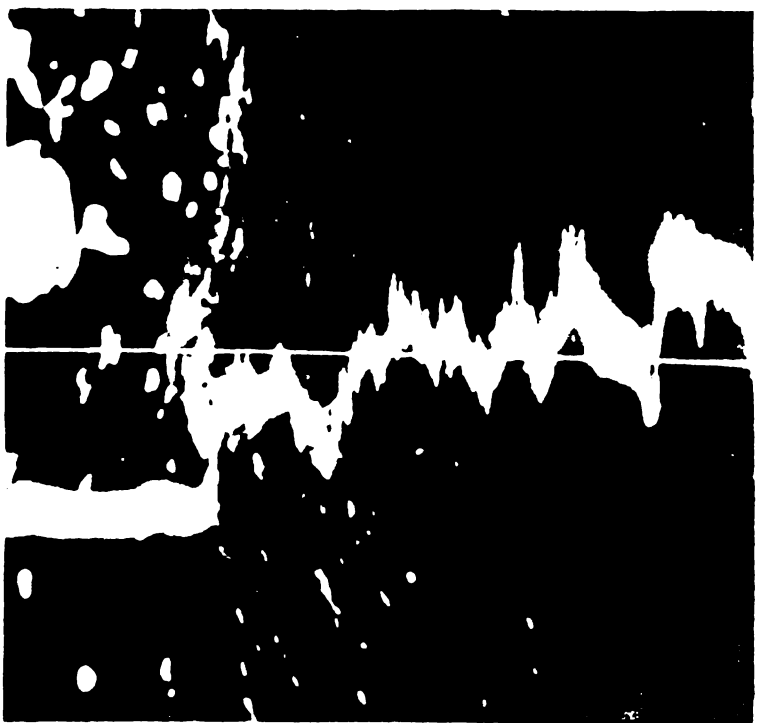


Fig.7.9.-idem c în fig.7.6  
x 1000; variația elementului P

La intensități de curent maxime apare o omogenizare chimică mai bună a stratului marginal nemaexistind diferențe semnificative între suprafață și miez.

7.3.-Oțel 33MoCr 11 (figura 7.10...7.19)

În substratul marginal la toate intensitățile de curent folosite se constată o ușoară creștere a concentrației de C, probabil ca urmare a existenței unor faze intermediare de tipul carburilor de Cr. La intensitatea de 200 A variația conținutului în fiecare element analizat este situată în limite foarte restrinse, fapt care atestă o bună omogenitate chimică a sustenitei obținută la încălzire.

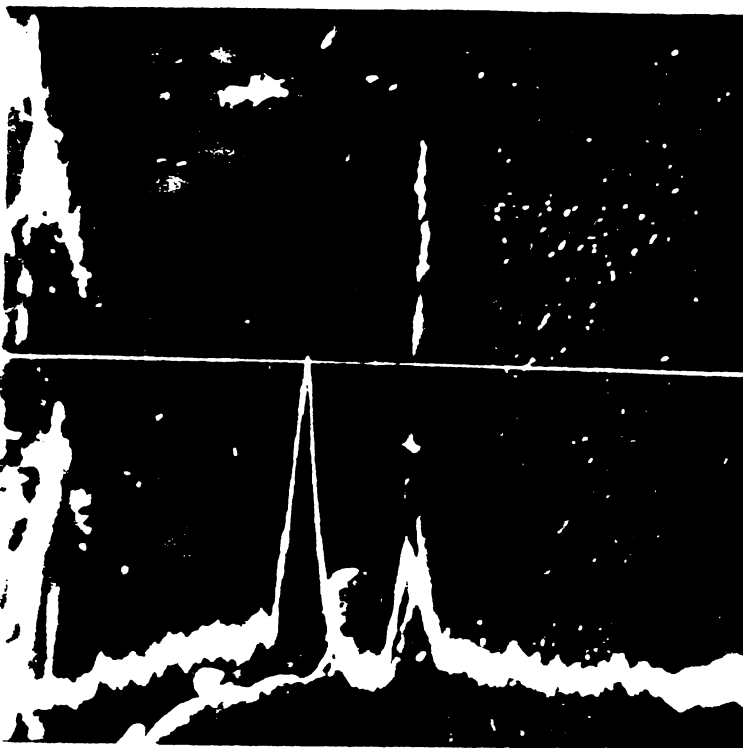


Fig.7.10.-Proba 027; oțel 33MoCr 11;  $\phi$ 45 mm;  $I_c = 30A$  x1000; variația elementului C

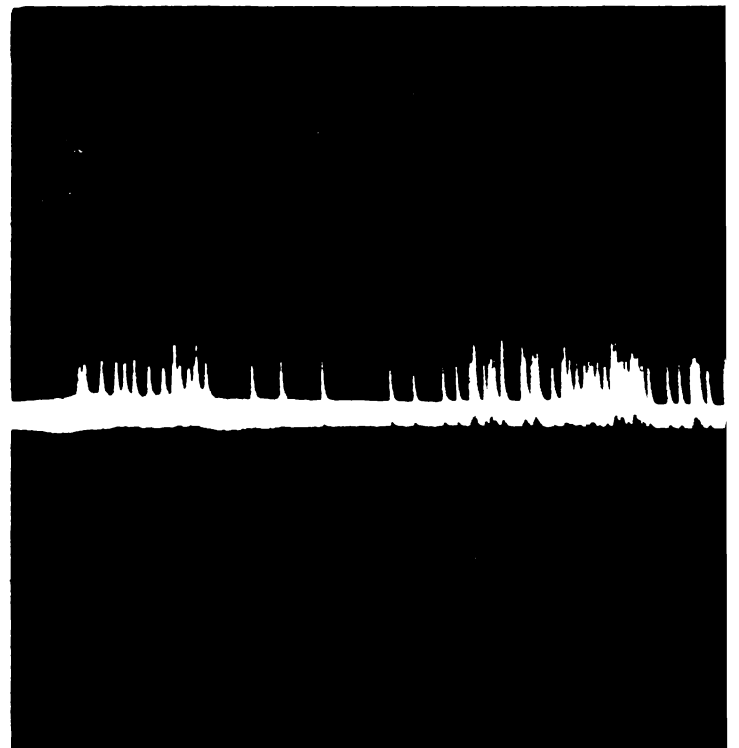


Fig.7.11.-idem ca în fig.7.10 x1000; variația elementului Mn

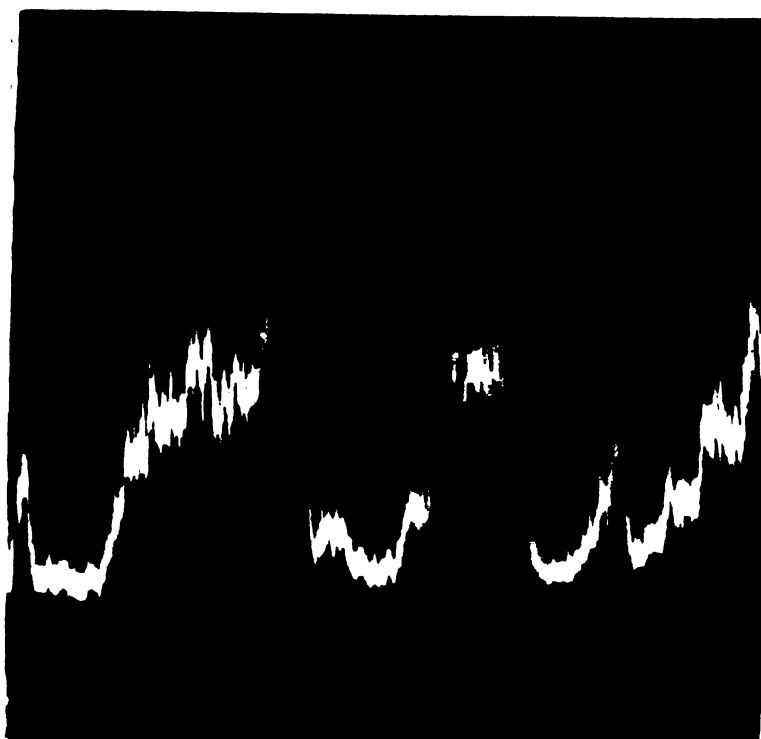


Fig.7.12.-idem ca în fig.7.10  
x 1000; variația elementului si

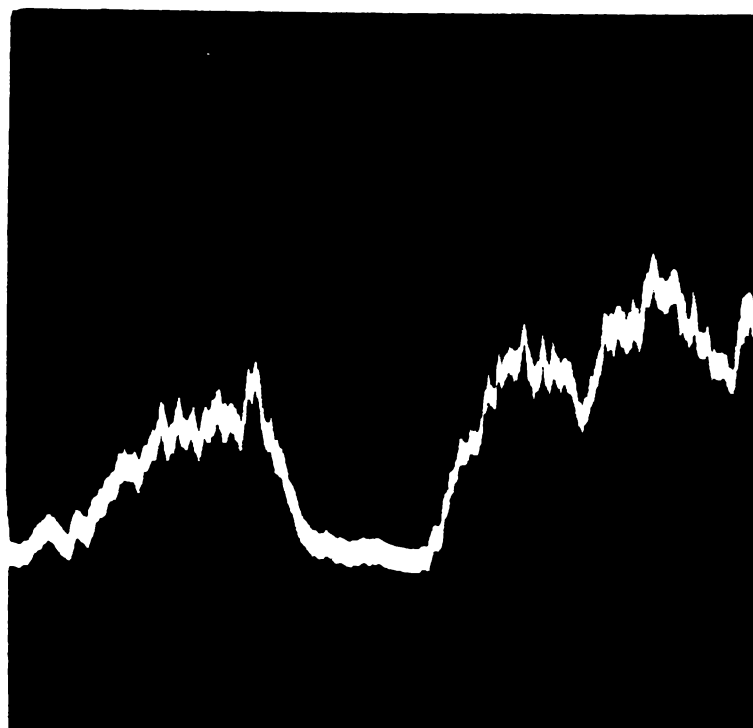


Fig.7.13.-idem ca în fig.7.10  
x 1000; variația elementului ur

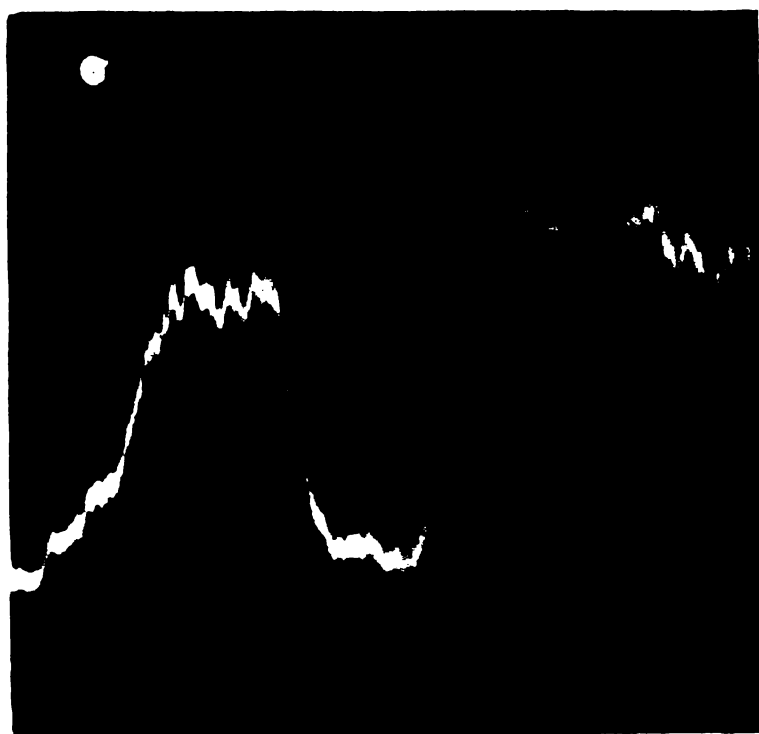


Fig.7.14.-idem ca în fig.7.10  
x1000; variația elementului ur

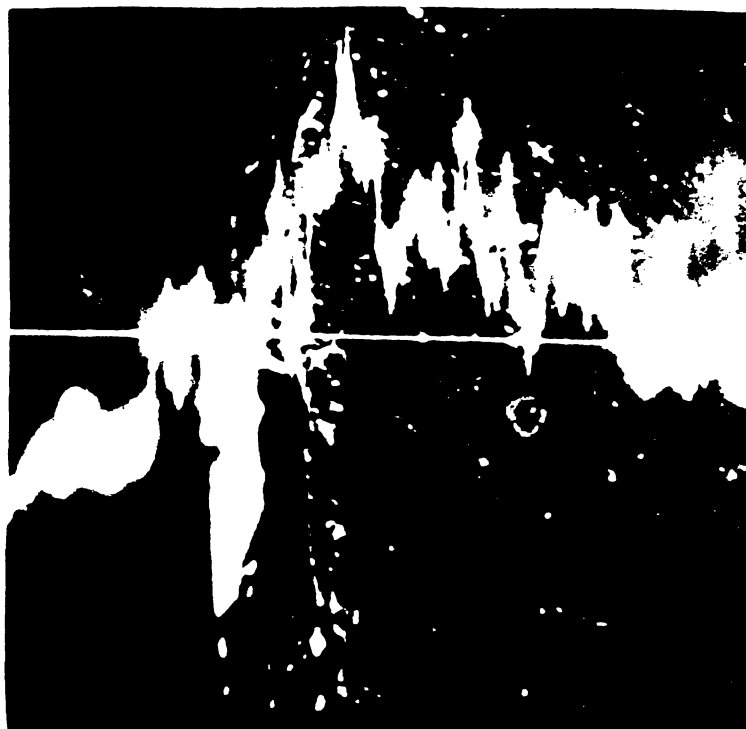


Fig.7.15.-Proba 0 ; o 132 oCr 11  
040 ; I<sub>0</sub> = 200 ;  
x1000 ; variația elementului ur

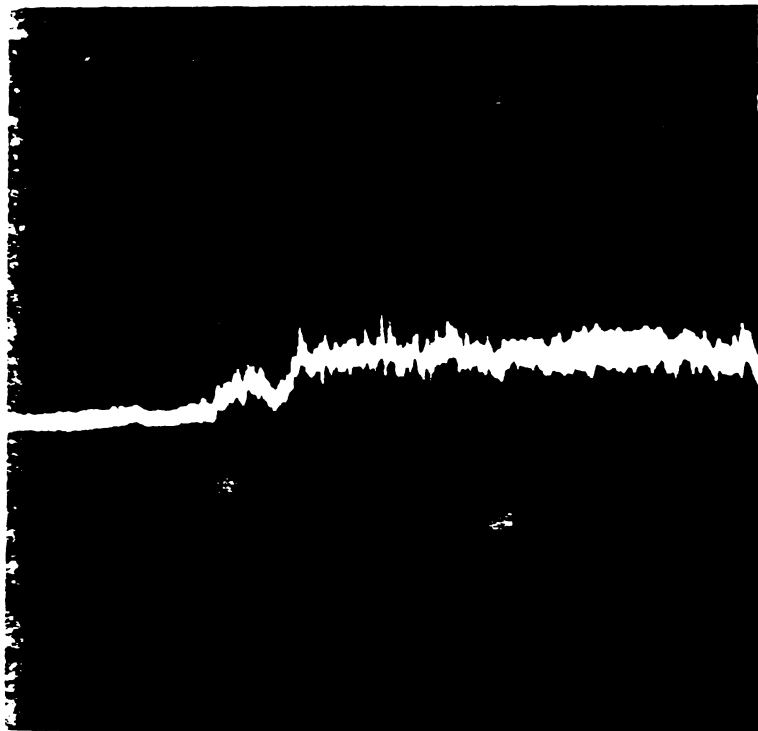


Fig.7.16.-idem ca in fig.7.15  
x1000; variația elementului Zn

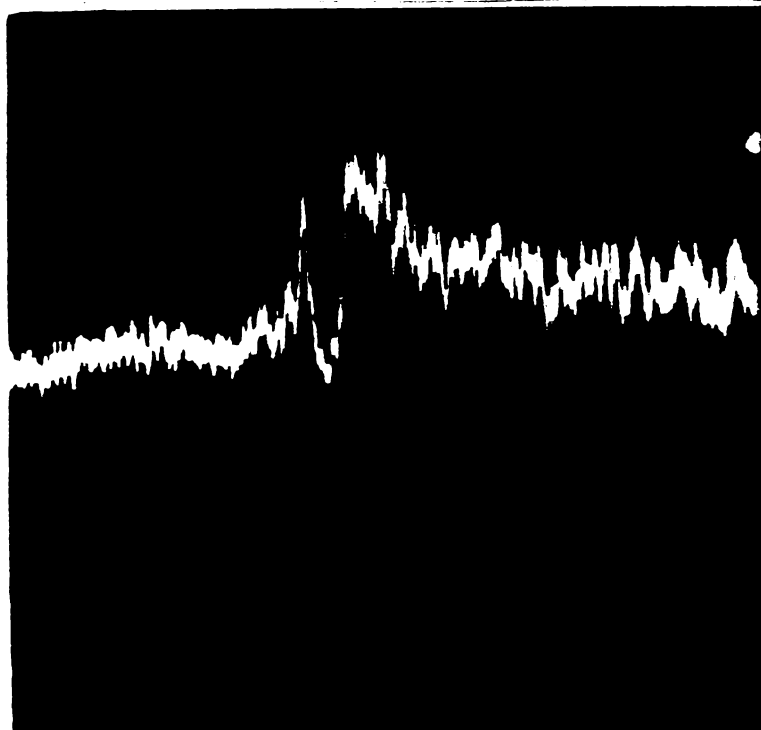


Fig.7.17.-idem ca in fig.7.15  
x1000; variația elementului Si

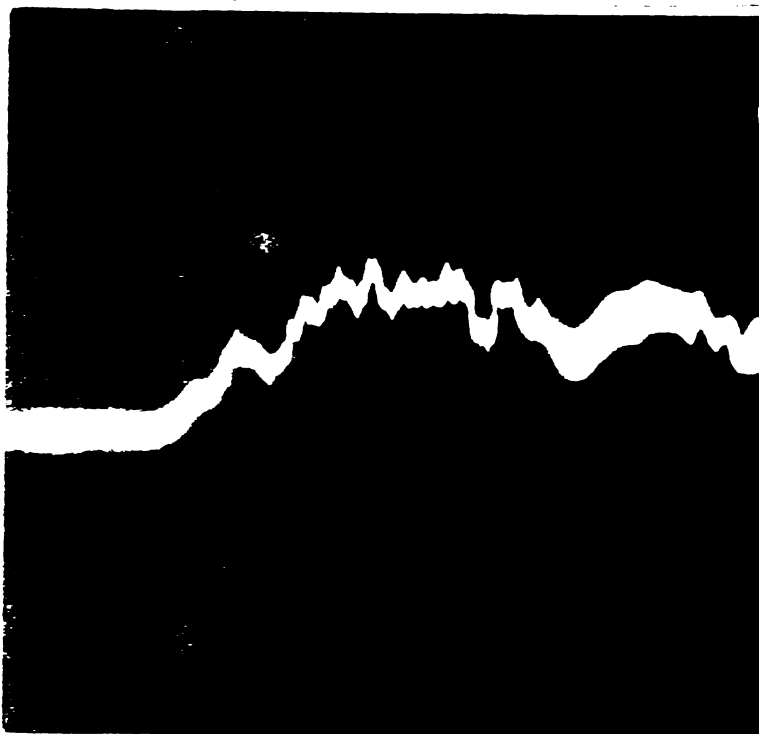


Fig.7.18.-idem ca in fig.7.15  
x1000; variația elementului Cr

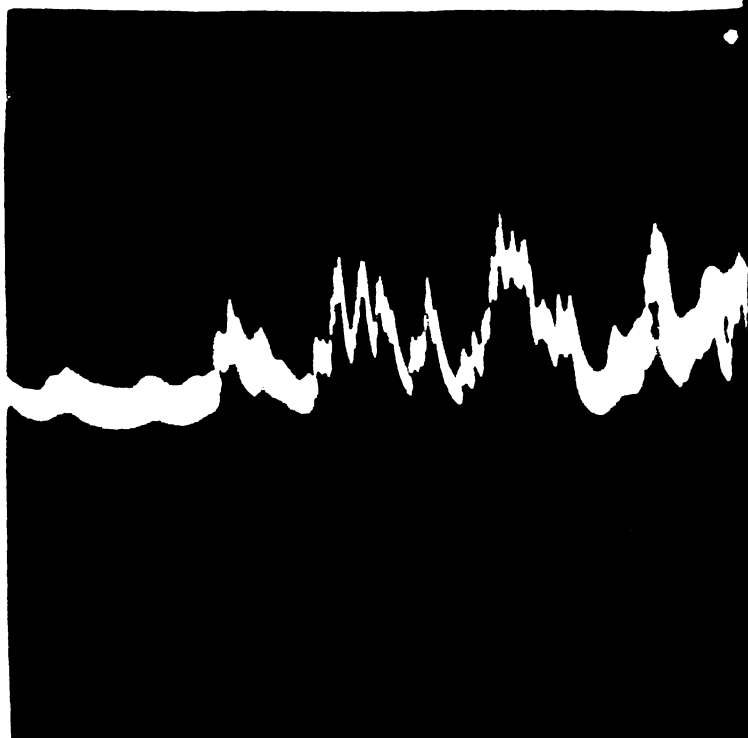


Fig.7.19.-idem ca in fig.7.15  
x1000; variația elementului Mo

7.4.-Oțel 21MoMnCr 12 (figura 7.20...7.29)

La intensitatea de 30 A se constată o bună trecere în soluție a C, Si, Mo respectiv concentrații mai mari de Mn, Cr în strat comparativ cu miezul probei. La intensități de 200 A oxidația chimică a stratului marginal este foarte bună practic la toate elementele analizate.

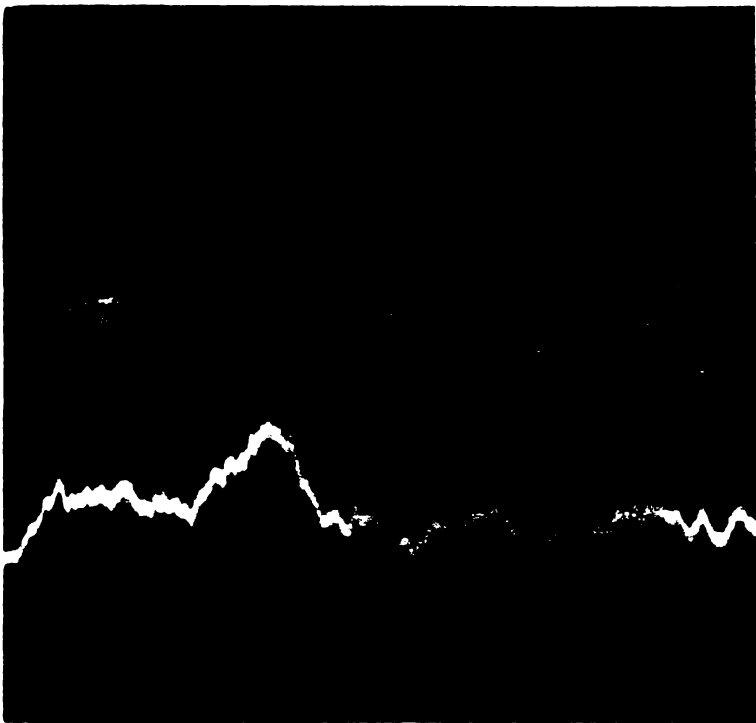


Fig.7.20.-Proba o51; oțel 21MoMnCr 12;  $\phi 26$  mm;  $I_t = 30A$ ;  $\times 1000$ ; variația elementului C

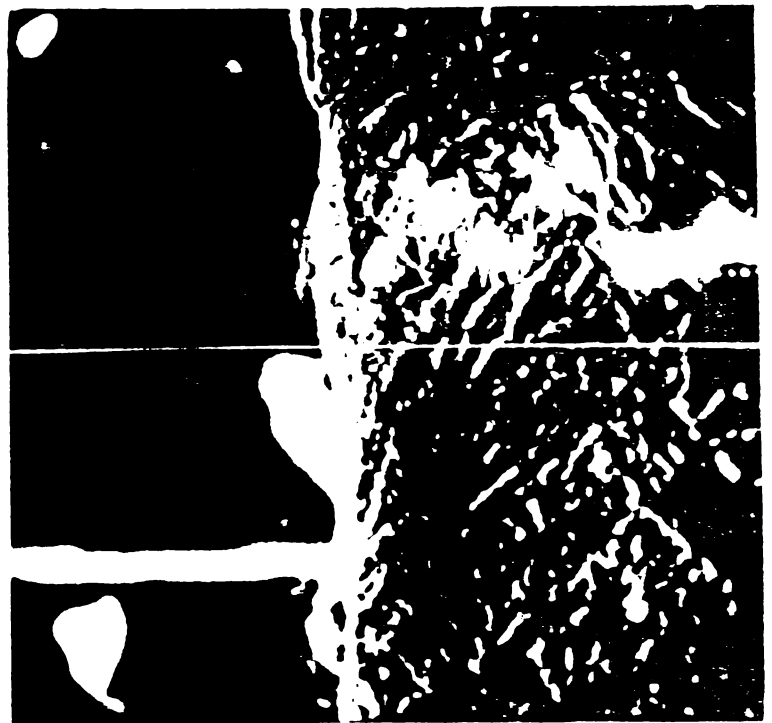


Fig.7.21.-idem ca în Fig.7.20  $\times 1000$ ; variația elementului Mn

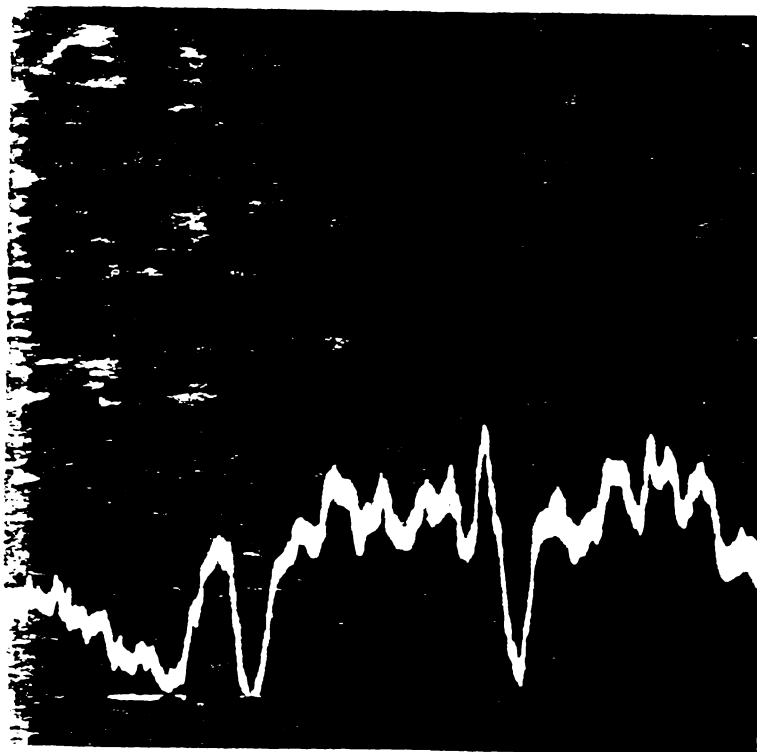


Fig.7.22.-idem ca în fig.7.20  
x1000; variația elementului Si

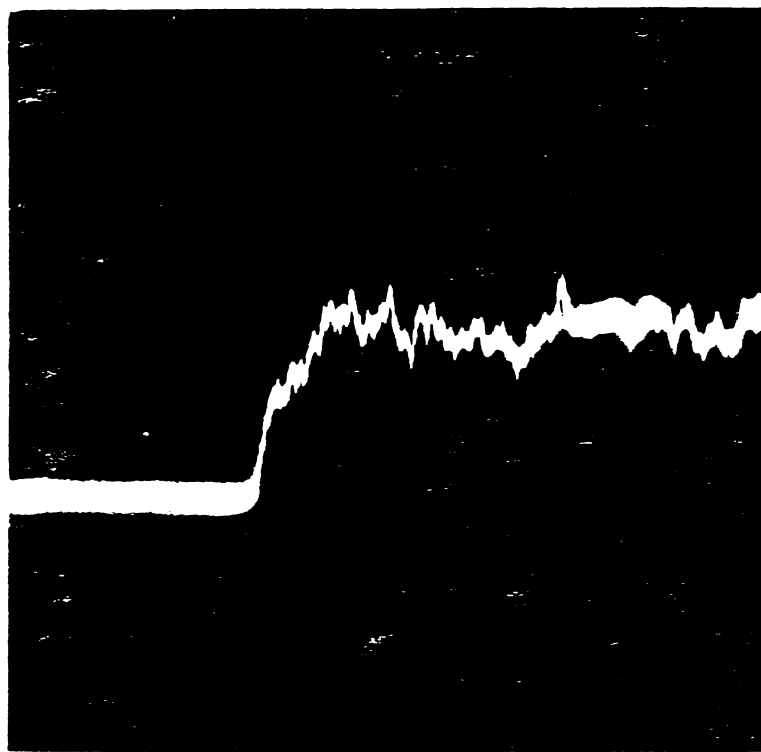


Fig.7.23.-idem ca în fig.7.20  
x2000; variația elementului Cr

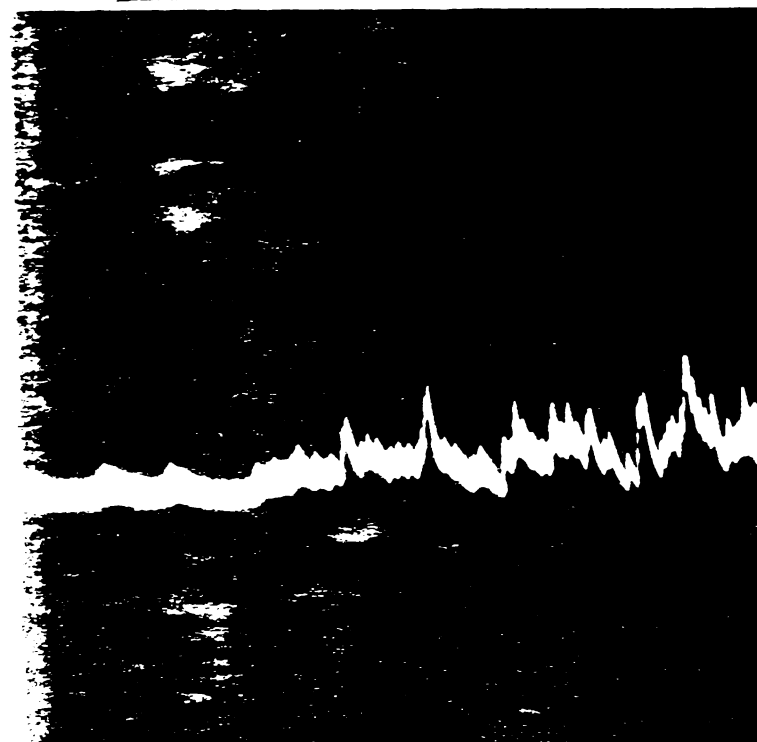


Fig.7.24.-idem ca în fig.7.20  
x1000; variația elementului Mo

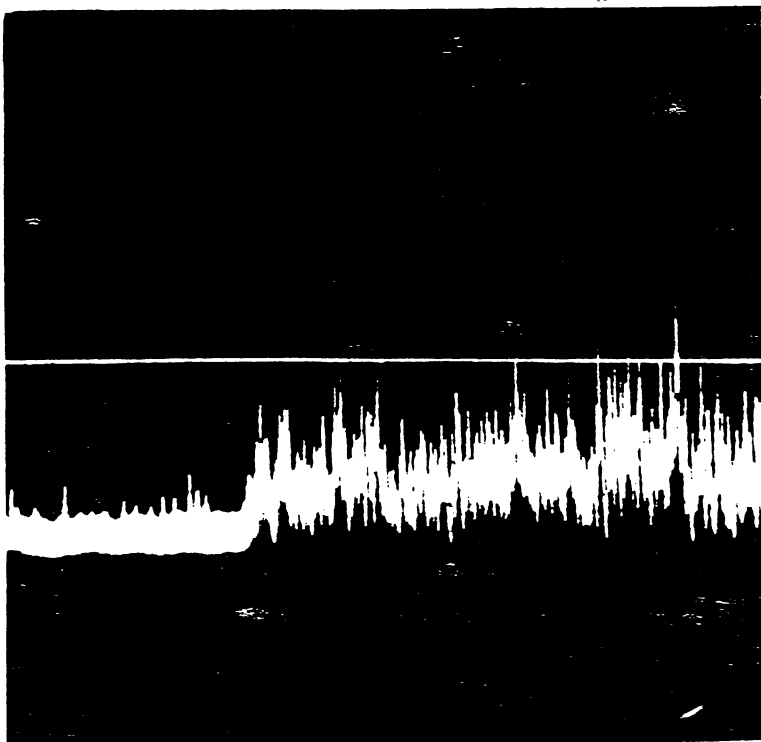


Fig.7.25.-Probe 073; oțel 21MoMnCr 12  
ø26 mm;  $I_x=200A$ ;  
x1000; variația elementului C

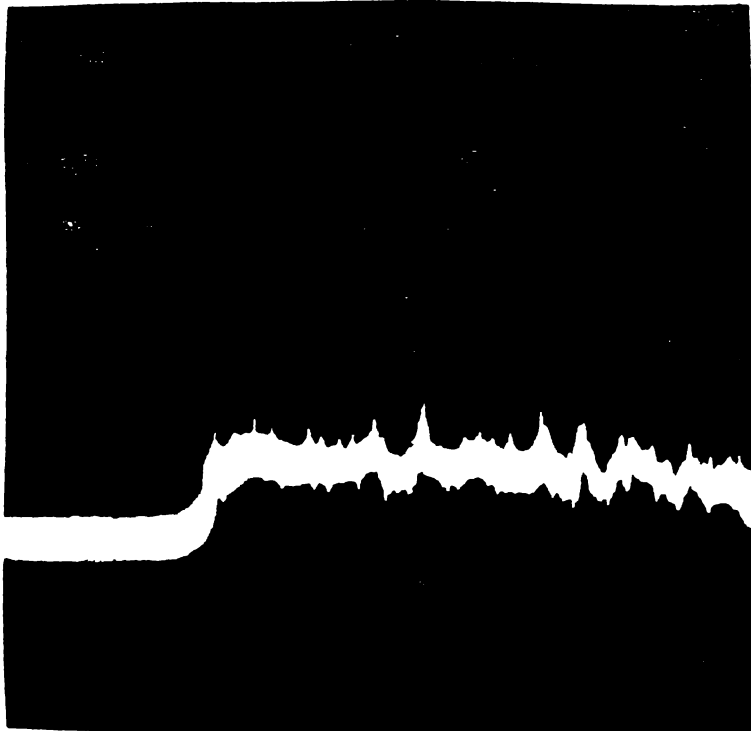


Fig.7.26.-idem ca in fig.7.25  
x1000; variatia elementului Mn

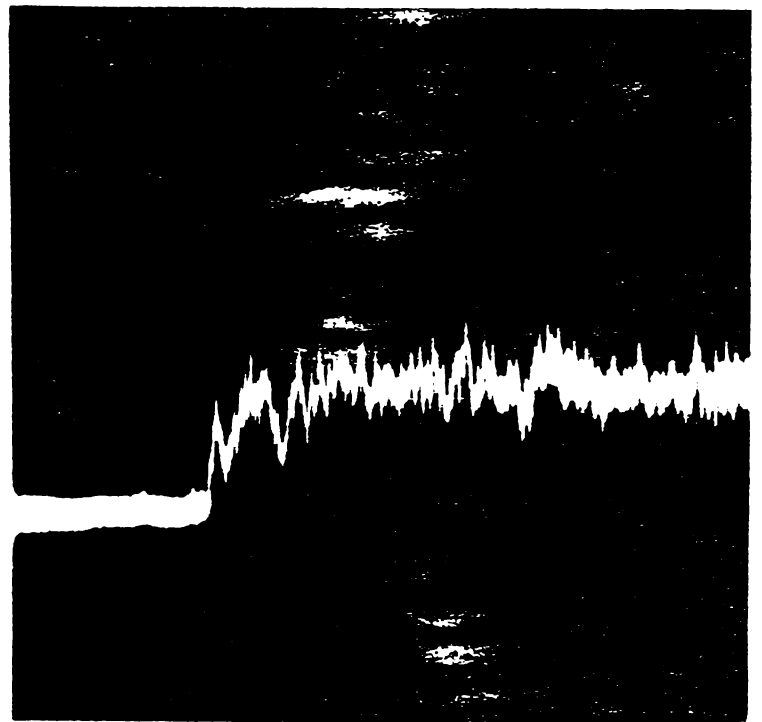


Fig.7.27.-idem ca in fig.7.25  
x 1000; variatia elementului Si

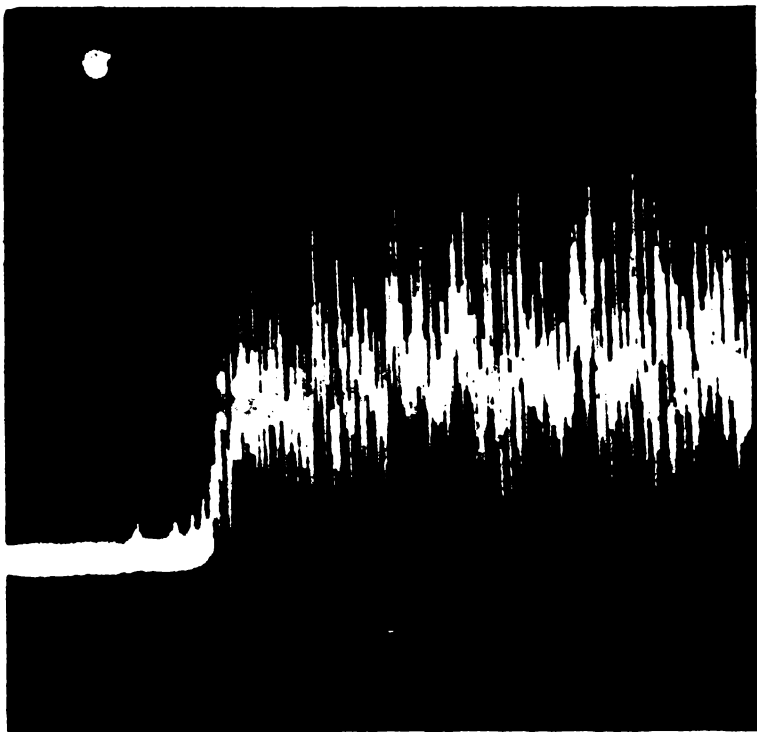


Fig.7.28.-idem ca in fig.7.25  
x1000; variatia elementului Cr

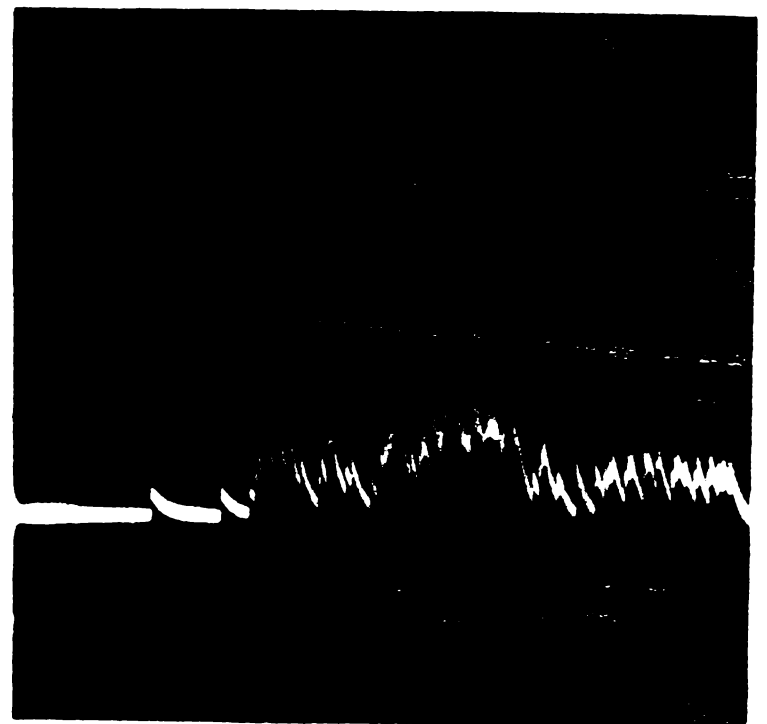


Fig.7.29.-idem ca in fig.7.25  
x 1000; variatia elementului Ni

### 7.5.-Oțel RP 3 (figura 7.30...7.32)

Comparativ cu metalul de bază stratul marginal este foarte omogen sub aspectul compoziției chimice, fenomen explicabil prin trecerea în soluție și a carburilor primare, lucru neîntâlnit la tratamentul termic clasic de călire.

Prin asigurarea unei sustenite omogene la încălzire stabilitatea acesteia la transformare crește puternic și cantitatea de sustenită reziduală obținută prin răcire va fi mai mare decât la tratamentul termic convențional. Prin aceasta se justifică duritatea redusă a stratului marginal la oțelurile înalt aliate de scule, comparativ cu oțelurile destinate construcției de mașini.

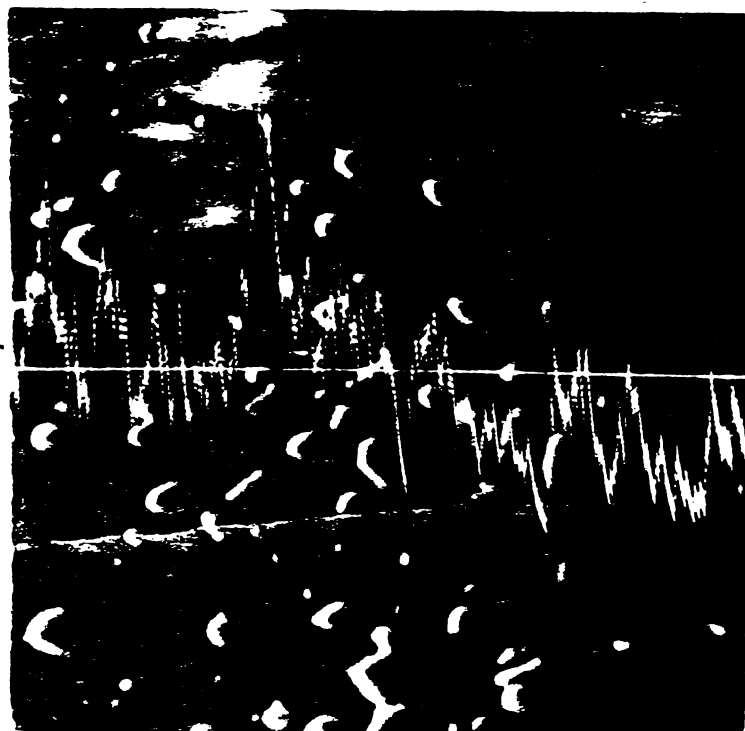


Fig.7.30.-Probe 336; oțel RP 3  
Ø30 mm;  $I_e = 100$  A;  
x1500; variația elementului C

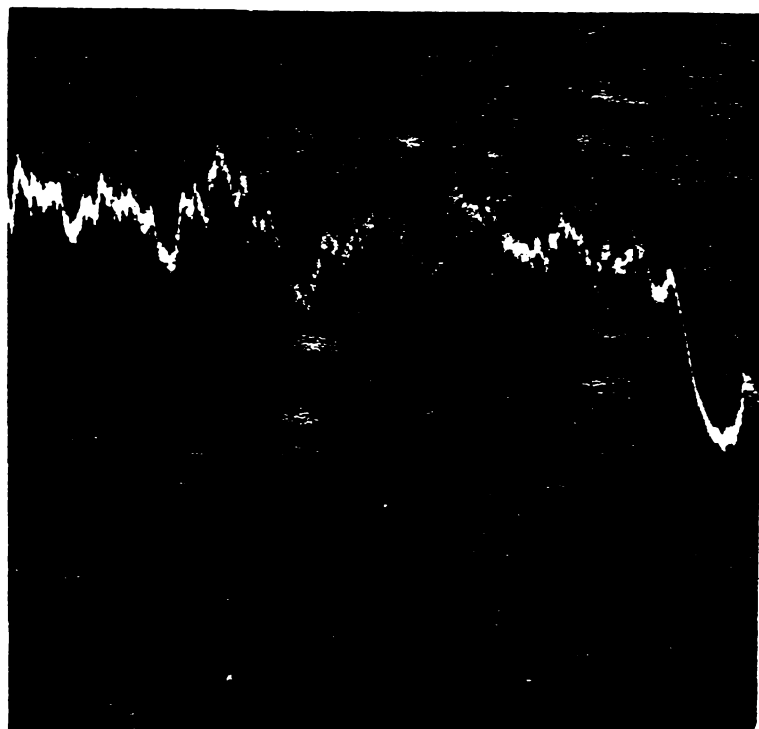


Fig.7.31.-idem ca în fig.7.30  
x1500; variația elementului Cr



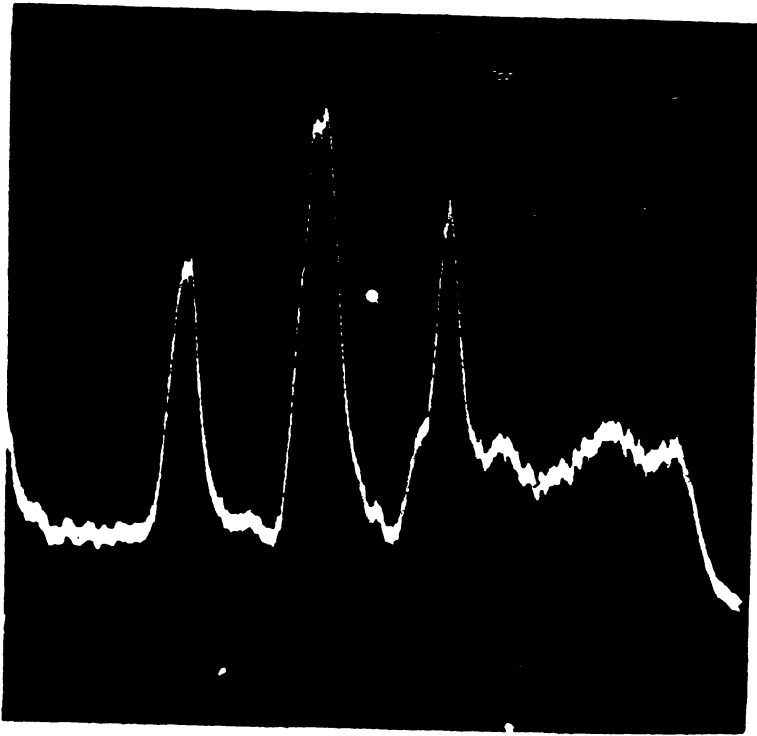


Fig.7.30.-  $\sigma_{\text{c}}$  în  
fig.7.30  
x1500; variabil elementu-  
lui A.

7.32.- oțel C 12 (figura  
7.33...7.37)

Observațiile desprinse  
sunt similare din punct de  
vedere calitatii cu cele  
de la oțelul r p1 Rp 3.

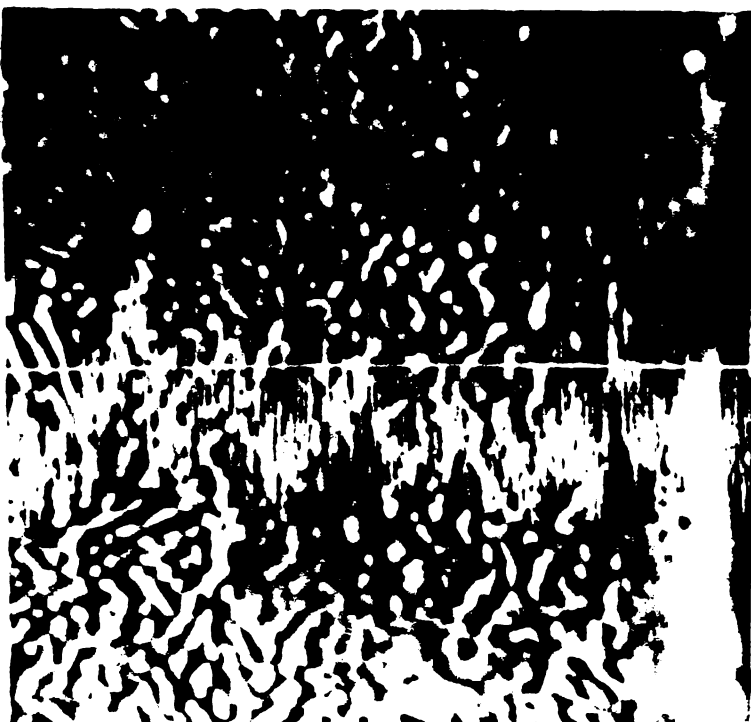


Fig.7.33.-  $\sigma_{\text{c}}$  în  
oțel C 12;  $\sigma_{\text{c}}$  ;  $I_{\text{c}}=200 \text{ A}$   
x1500; variabil elementu-  
lui C

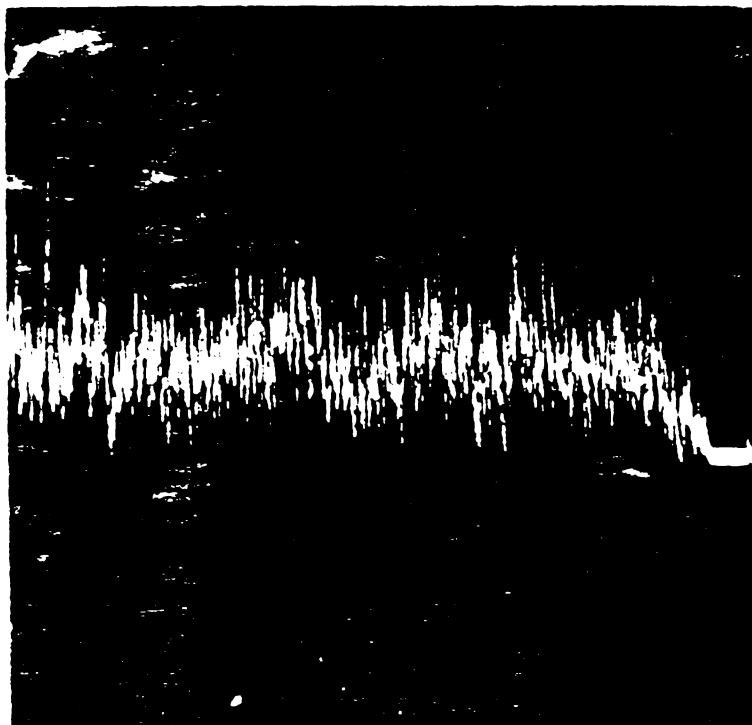


Fig.7.34.-idem ca în fig.7.33  
x1500; variația elementului Mn

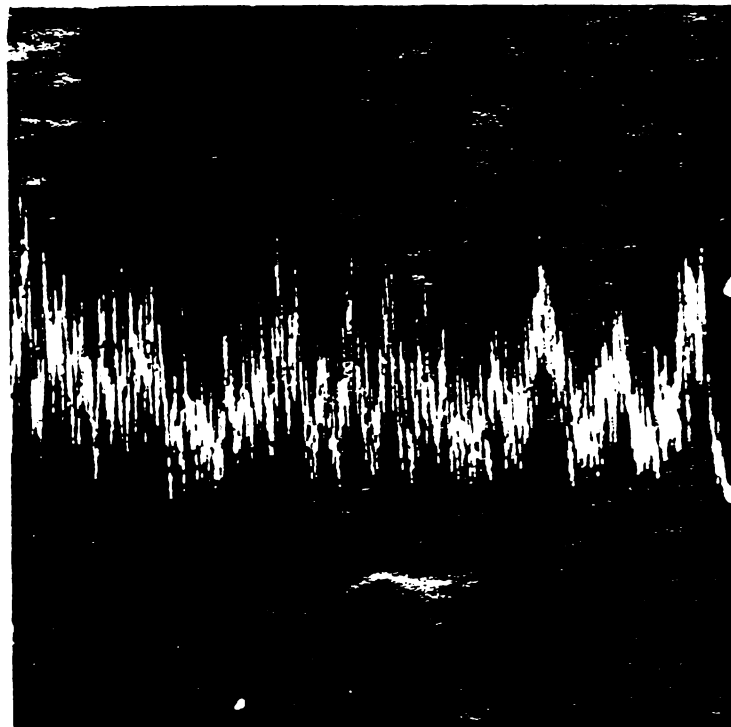


Fig.7.35.-idem ca în fig.7.33  
x1500; variația elementului Cr

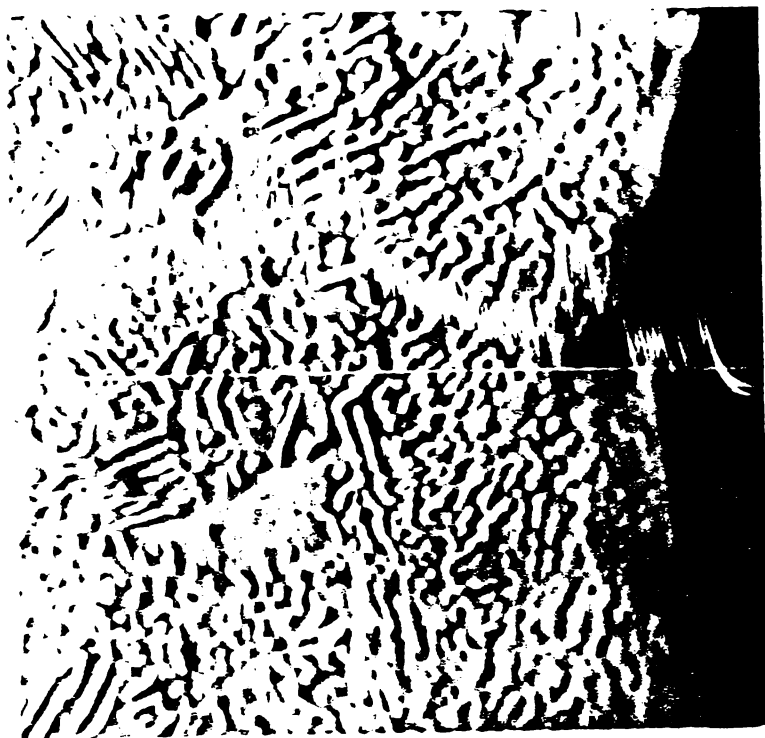


Fig.7.36.-Proba 941; c = 1. Cl20  
Ø50 mm;  $I_c = 150$  A;  
x1500; variația elementului C

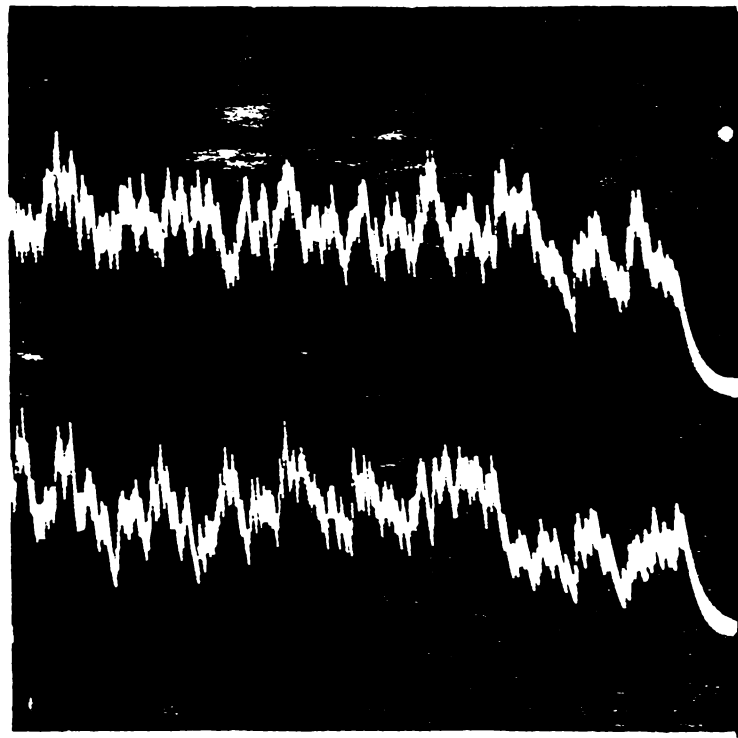


Fig.7.37.-idem ca în fig.7.33  
x1500; variația elementului Mn  
și Cr

7.7.-Oțelurile 7NiCr-180 și 7NbNiCr-180 (figura 7.38...7.52)

În substratul marginal se remarcă o ușoară creștere a concentrației în C, probabil ca urmare a precipitării unor particule de compuși intermetalici. Compoziția chimică a stratului este omogenă și nu diferă semnificativ de metalul de bază; excepție de la aceasta o face Ni, Cr la care se constată valori de concentrații mai mici decât în metalul de bază.

Aceste aspecte demonstrează că la aceste oțeluri nu se produc transformări structurale importante și numai precipitări de compuși fini pe limite de separație strat alb-miez.



Fig.7.38.-Proba 63; oțel 7NiCr-180;  $\phi$ 28 mm;  $I_2=50A$  x1500; variația elementului C

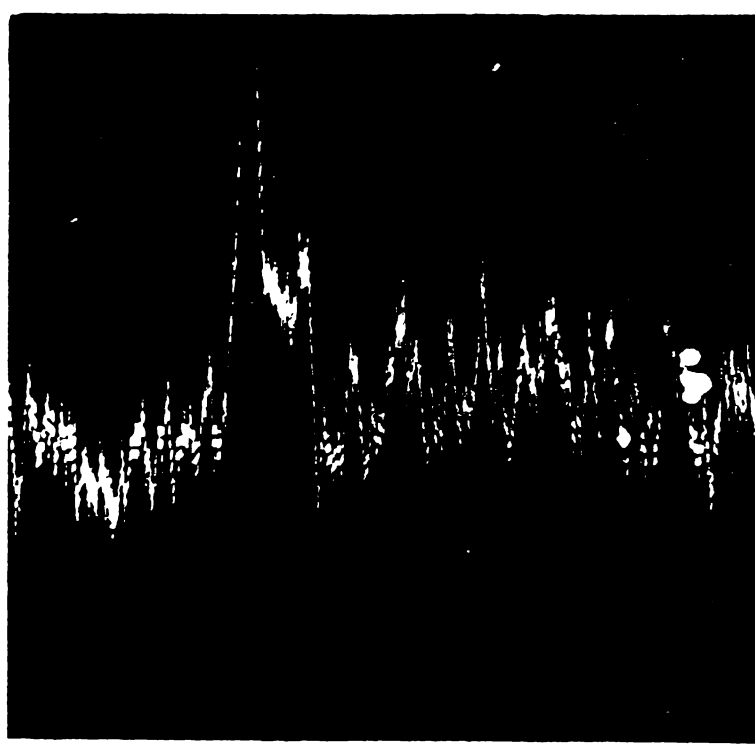


Fig.7.39.-idem ca în fig.7.38 x1500; variația elementului C

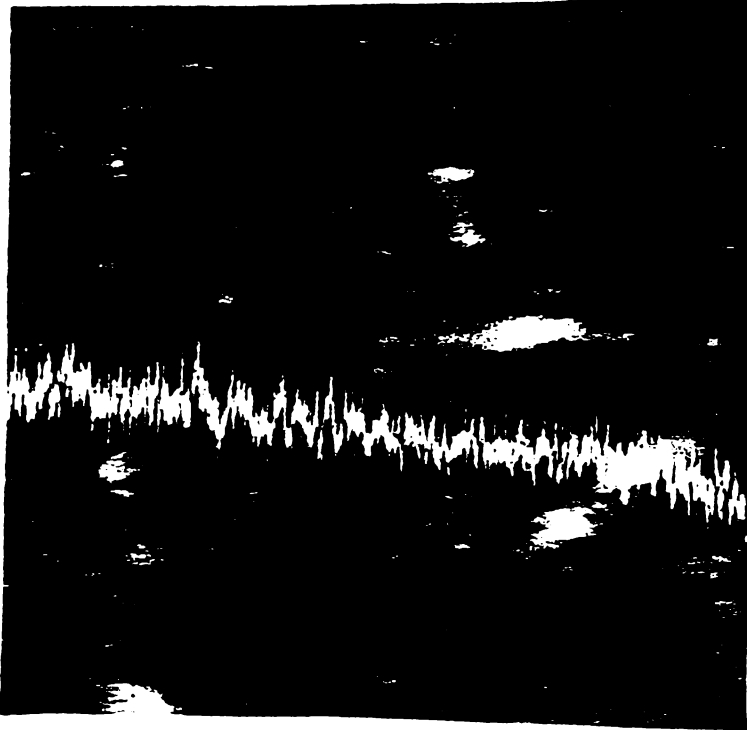


Fig.7.40.-idem ca în fig.7.38  
x 1500; variația elementului Cr

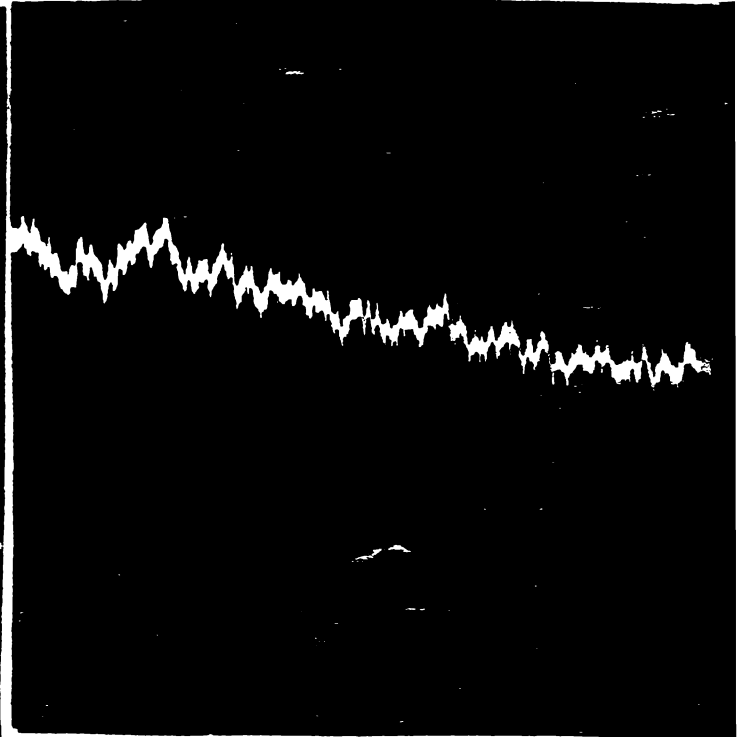


Fig.7.41.-idem ca în fig.7.38  
x 1500; variația elementului Ni



Fig.7.42.-proba 1 ; o,1  
7NiC -180;  $\phi$ 25 mm;  $I_p=150$  A  
x1500; variația elementului C

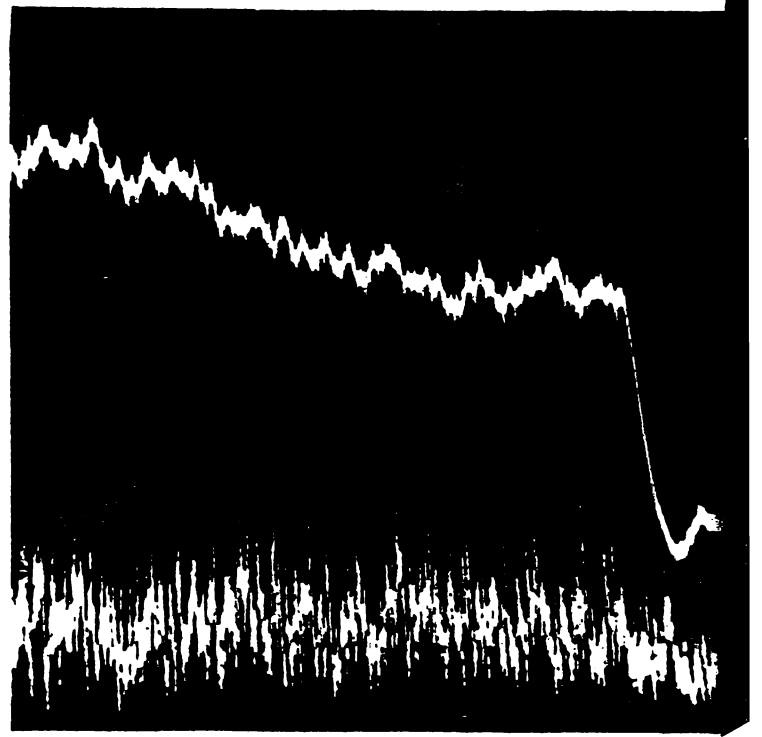


Fig.7.43.-idem ca în fig.7.42  
x1500; variația elementelor Ni,  
Mn.

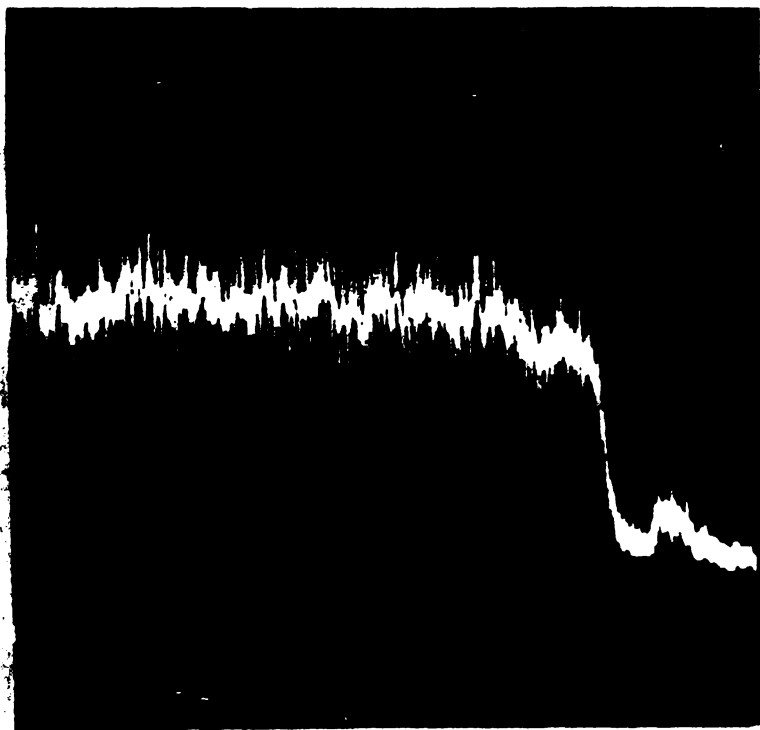


Fig.7.44.-idem ca în fig.7.43  
xl500; variația elementului Cr

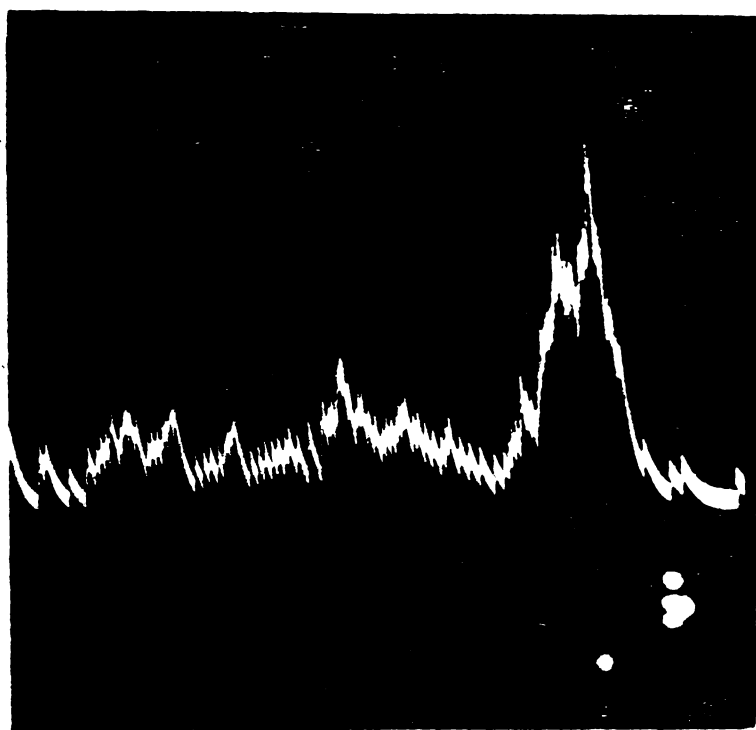


Fig.7.45.-Proba 674; oțel  
7.5%Cr-1.00;  $\phi$ 40 mm; I<sub>1</sub>=200.  
xl500; variația elementului C

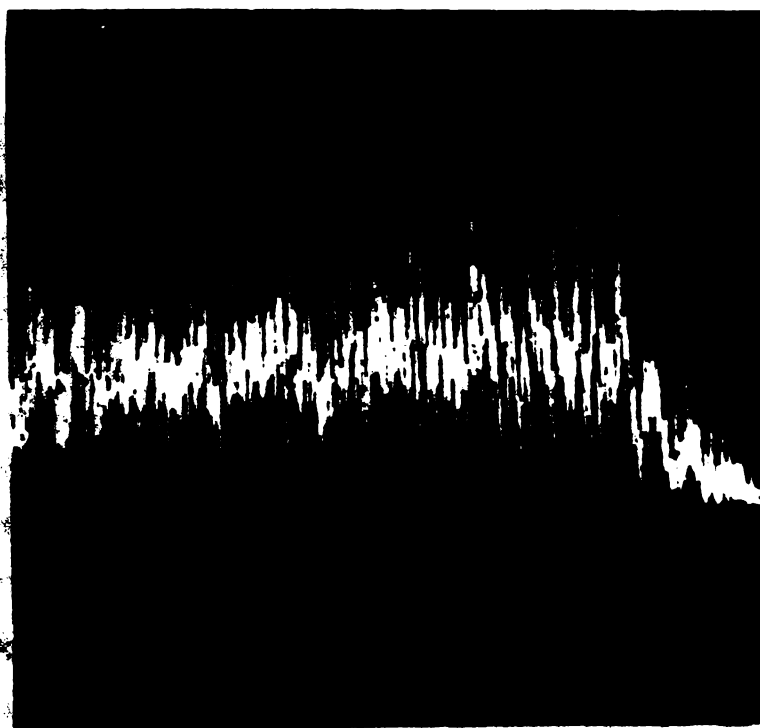


Fig.7.46.-idem ca în fig.7.43  
xl500; variația elementului Mn

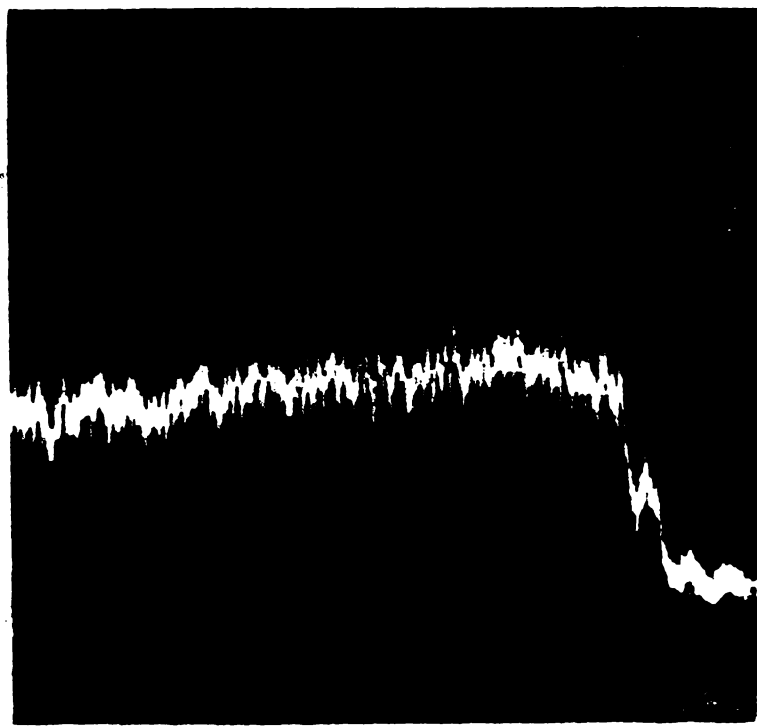


Fig.7.47.-idem ca în fig.7.43  
xl500; variația elementului Cr

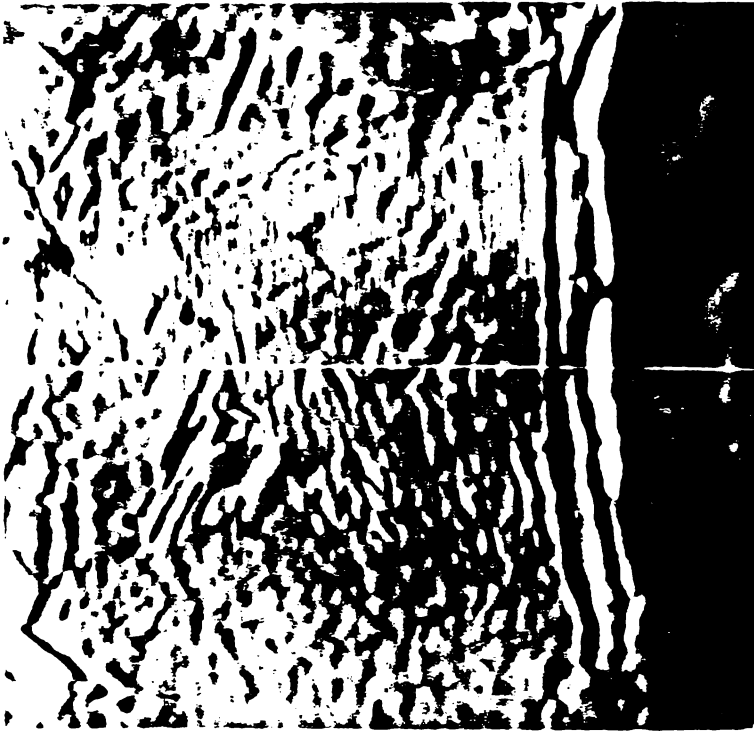


Fig.7.48.-idem ca în fig.7.45  
x1500; variația elementului Ni

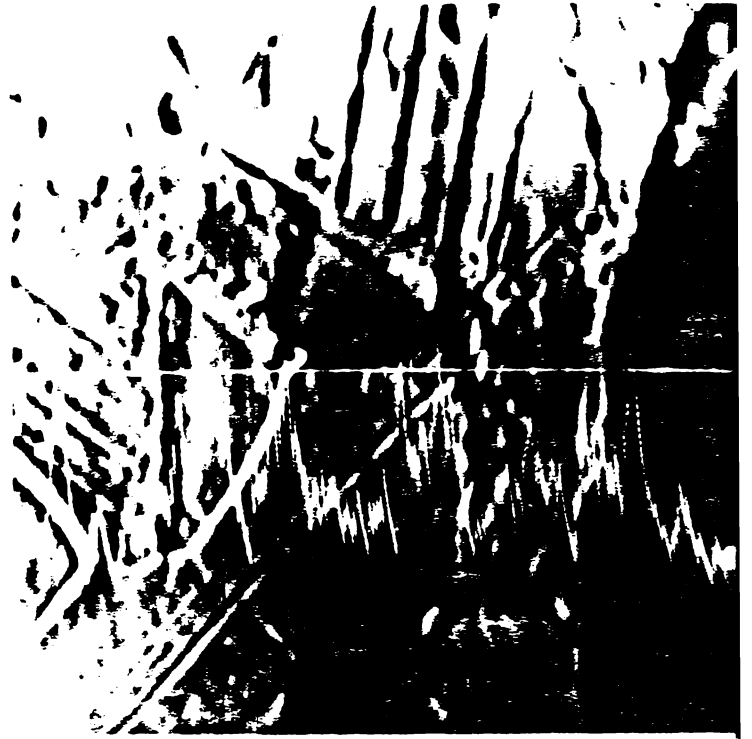


Fig.7.49.-Proba 681; oțel  
7NbNiCr-180;  $\phi$ 40 mm;  $I_e=150A$   
x1500; variația elementului C

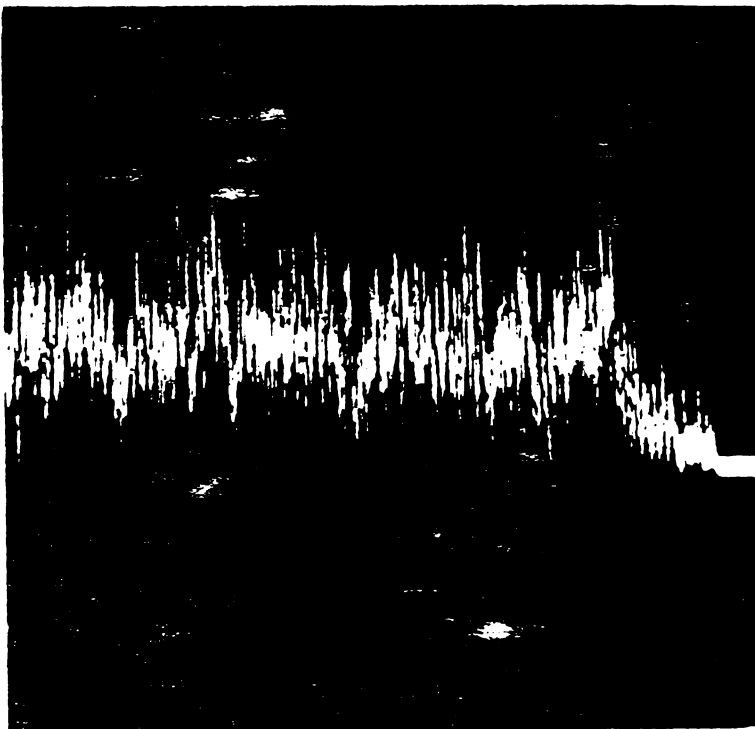


Fig.7.50.-idem ca în fig.7.49  
x1500; variația elementului Mn

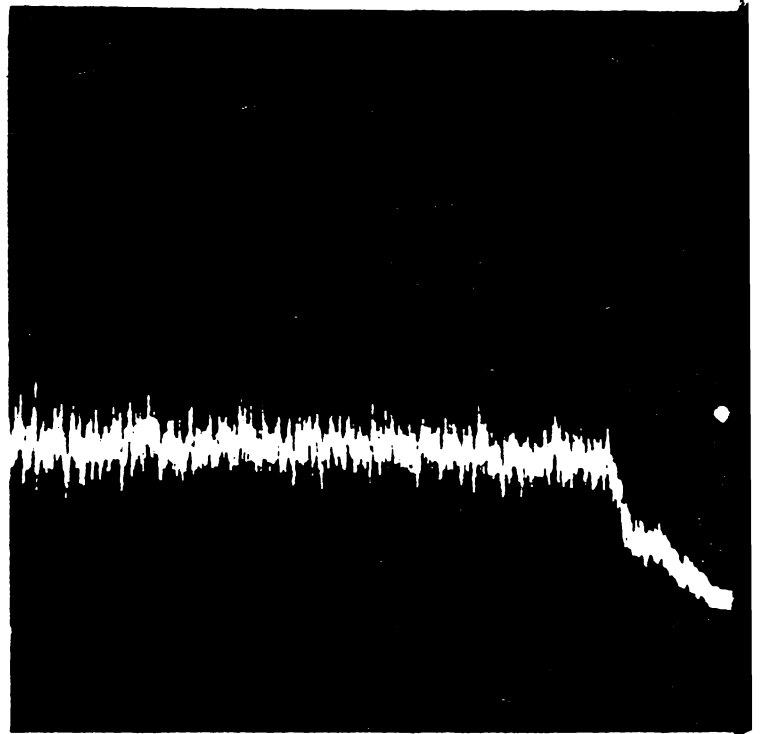


Fig.7.51.-idem ca în fig.7.49  
x1500; variația elementului Cr

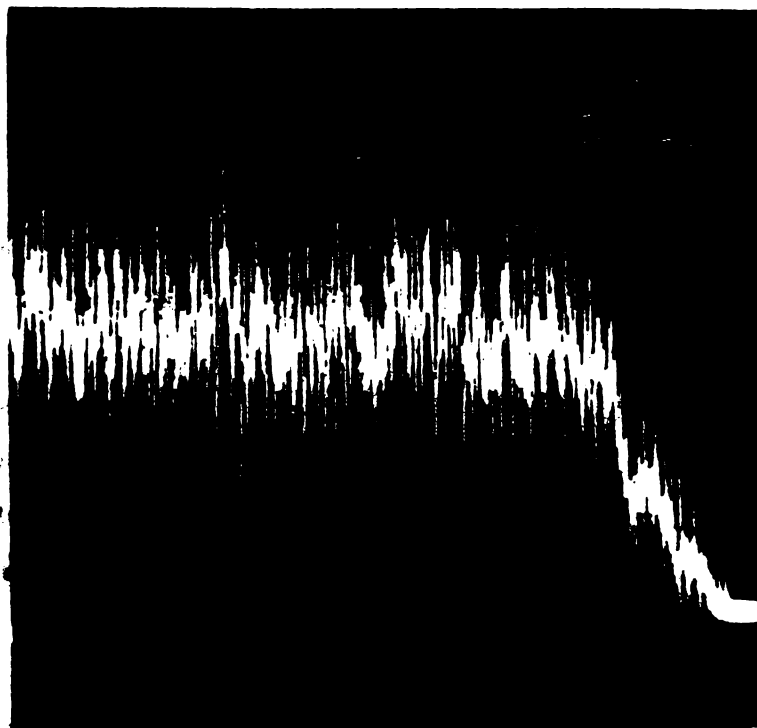


Fig.7.52.-idem cu în fig.  
7.49  
x1500; variația elementului  
Ni

### 7.8.-C o n c l u z i i

7.8.1.-Cu privire la tăierea oțelurilor aliate: 35Mn-16,  
33MoCr-11, 21MoMnCr-12.

-La orice regim electric de tăiere se constată o ușoară  
concentrație de carbon probabil datorită unor faze intermediare  
de tipul carburilor de crom, cu o bună omogenitate chimică a  
austenitei ( $I_c = 150...200 \text{ A}$ ).

-La valorile inferioare ale intensității curentului apar  
concentrații de Mn și Cr în stratul marginal; la intensități  
mai mari stratul marginal este mai omogen, asemănător cu mate-  
riaiul de bază.

7.8.2.-Cu privire la tăierea oțelurilor de scule Rp2-Rp4  
-120.

-Stratul marginal este omogen din punct de vedere al compo-  
ziției chimice prin trecerea în soluție și a carburilor primare.

-În zona de tăiere cantitatea de austenită reziduală este  
mai mare decât la TT convențional ceea ce justifică faptul că  
reducă a stratului marginal comparativ cu oțelurile aliate  
destinate construcției de mașini.

**7.8.3.-Cu privire la tăierea oțelurilor inoxidabile**

**-Compoziția chimică a stratului marginal este omogenă și nu diferă de cea a metalului de bază, cu excepția Ni și Cr.**

**-Conținutul de Ni și Cr este mai redus în stratul marginal prin precipitarea unor compuși fini pe limita de separație miez-strat alb.**

**Ca observații generale la toate oțelurile aliate, experimentate la tăiere se poate afirma: compoziția chimică a microvolumelor de material din stratul marginal este cu atât mai omogenă cu cât energia specifică folosită este mai mare (curenți de tăiere mari).**

**Rezultatele obținute la microscopia electronică sînt în concordanță și întregesc concluziile obținute prin cercetările metalografice optice și examinările sclerometrice.**



**8. - CERCETĂRILE EXPERIMENTALE DE TALERE PÂNĂ ÎN PROZIUNE  
COMPLEXĂ ELECTRICA - ELECTROCHIMICA A PLACUTELOR  
DIN CARBURI METALICE (ALIAJE SINTERIZATE)**

Carburile metalice se caracterizează prin proprietăți mecanice ridicate la temperaturi înalte și sînt obținute prin sinterizarea la temperaturi de 1500-1600°C a unor pulberi de carburi de W și Ti, Ta etc, cu o pulbere de Co cu rol de liant.

Pot fi trei tipuri de carburi: ionice, interstițiale, covalente.

Pentru realizarea sculelor se folosesc mai mult carburile interstițiale bazate pe solubilitatea carburilor de W și Ti în liant de Co.

Carburile în general se caracterizează printr-o duritate ridicată 70...82 HRC și stabilitate termică foarte mare, însă cu o reziliență mică  $K=0,1 \text{ daN/m/cm}^2$ , ceea ce conduce la o rezistență mică la sarcini variabile și șocuri termice.

Prezența în cantitate mare a liantului de Co (3...30%) duce la scăderea durității și creșterea tenacității, fapt care ușurează prelucrarea carburilor metalice prin eroziune.

Pe lângă carburile de W și Ti în liant de Co, carburile metalice mai pot conține formațiuni complexe, ca de exemplu:  $(W+Ti)C+Co$ ;  $(W+Ti+Ta)C$  etc, formațiuni care conferă proprietăți superioare acestor carburi.

Carburile metalice sînt neprelucrabile prin metode clasice și ușor prelucrabile prin procedee de eroziune, respectiv prin eroziune complexă electrică-electrochimică.

După recomandările ISO (STAS 6374-61) se deosebesc trei grupe principale de utilizare a plăcuțelor din carburi metalice și anume:

- grupa P destinată prelucrării oțelurilor;
- grupa M destinată prelucrării oțelurilor și materialelor neferoase;
- grupa K destinată prelucrării materialelor neferoase și nemetalice.

Fiecare grupă se subdivide în mai multe subgrupe conform figurii 8.1.

P01.....P50	M10.....M40	K01.....K40	G05.....G60
<u>Tenacitatea</u> Duritatea și rezistența la uzură	<u>Tenacitatea</u> Duritatea și rezistența la uzură	<u>Tenacitatea</u> Duritatea și rezistența la uzură	<u>Tenacitatea</u> Duritatea și rezistența la uzură

Fig.8.1.-Clasificarea după ISO a aliajelor dure

Se observă că în cadrul fiecărei subgrupe a aliajelor dure rezistența la uzură scade, iar tenacitatea crește în ordinea crescătoare a indicilor literelor respective (figura 8.1).

Plăcuțele cu indici mari sînt recomandate pentru operații de eboğare, iar cele cu indici mici pentru operații de finisare.

În tabela 8.1 sînt prezentate sorturi de plăcuțe din carburi metalice după clasificarea ISO și echivalențele lor standardizate în cîteva țări (URSS, RSC, RDG, RPP, RPU și RFI)

La prelucrarea oțelurilor se utilizează mai mult sorturile din subgrupa P, iar la fontă și materiale nemetalice care solicită tăigul mai mult la uzura prin frecare, se folosesc sorturile din subgrupa K.

Din punct de vedere al compoziției chimice, aliajele dure din grupa K sînt de tip WC-Co (carbură de W), cele din grupa M și P sînt de tipul WC-TiC-Co și WC-TrC-TaC-Co (Nb).

Schemele cu RLC reglabile permit imprimarea unui caracter inductiv circuitului de alimentare și în acest caz creșterea curentului pe o descărcare este frînată. În acest mod energia medie a impulsului este mai mică datorită amplitudinilor și duratelor mai mici. Numărul descărcărilor este însă mai mare deoarece efectul lor integrat are ca rezultat un curent practic

constant și în consecință efectul eroziv al unei descărcări este mai mic. [182]

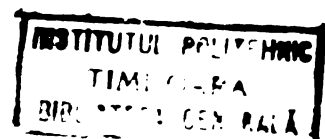
Un număr mare de impulsuri cu energie mică poate să nu ducă la scăderea productivității, dar în orice caz va avea ca efect o îmbunătățire a calității suprafețelor și a preciziei.

**T A B E L A 8.1**

**Sorturi uzuale de plăcuțe dure STAS (ISO) și echivalente [182]**

Grupa de utilizare STAS (ISO) în RSR și alte țări europene	Echivalente					
	Calități standardizate					
	URSS	RSC	RDG	RPP	RPU	RFI
P <sub>01</sub>	T <sub>30</sub> K <sub>4</sub>	F <sub>2</sub> /F <sub>1</sub>	HS <sub>01</sub> /HS <sub>02</sub>	S <sub>03</sub>	-	F <sub>1</sub>
P <sub>10</sub>	T <sub>15</sub> K <sub>6</sub>	S <sub>1</sub>	HS <sub>10</sub>	S <sub>10</sub>	A	S <sub>1</sub>
P <sub>20</sub>	T <sub>14</sub> K <sub>8</sub>	S <sub>2</sub>	HS <sub>20</sub>	S <sub>20</sub>	B	S <sub>2</sub>
P <sub>30</sub>	T <sub>5</sub> K <sub>10</sub>	S <sub>3</sub>	HS <sub>30</sub>	S <sub>303</sub>	C	S <sub>3</sub>
P <sub>40</sub>	T <sub>7</sub> K <sub>12</sub>	S <sub>4</sub>	HS <sub>40</sub>	-	C	-
P <sub>50</sub>	-	S <sub>5</sub>	HS <sub>50</sub>	-	-	-
M <sub>10</sub>	-	U <sub>1</sub>	HU <sub>10</sub>	-	-	-
M <sub>20</sub>	-	-	HU <sub>20</sub>	-	-	-
M <sub>30</sub>	-	U <sub>2</sub>	HU <sub>30</sub>	-	-	-
M <sub>40</sub>	-	-	HU <sub>40</sub>	H <sub>05</sub>	-	-
K <sub>01</sub>	VK <sub>2</sub> /VK <sub>3</sub> M	H <sub>2</sub>	HG <sub>01</sub>	H <sub>05</sub>	-	-
K <sub>10</sub>	VK <sub>1</sub> M	H <sub>1</sub>	HG <sub>10</sub>	H <sub>10</sub>	K	-
K <sub>15</sub>	-	G <sub>1</sub>	HG <sub>15</sub>	-	-	-
K <sub>20</sub>	VK <sub>0</sub> M	G <sub>2</sub>	HG <sub>20</sub>	H <sub>20</sub>	J	-
K <sub>30</sub>	VK <sub>4</sub> , VK <sub>0</sub>	-	HG <sub>30</sub>	-	-	-
K <sub>40</sub>	VK <sub>3</sub>	-	HG <sub>40</sub>	H <sub>40</sub>	-	-

Valoarea curentului în circuitele inductive este dată de relația:



$$i = I\left(\frac{am}{\omega}\right) \left[ \frac{U_s}{L} \cdot \frac{1}{a} I\left(\frac{am}{\omega}\right) \right] = I^2\left(\frac{am}{\omega}\right)^2 \frac{U_s}{aL}$$

unde:  $\frac{am}{\omega}$  sînt argumentele funcției Bessel de ordinul zero;

$I, U_s$  - curentul și tensiunea sursei;

$a = \frac{R}{L}$ ;  $R$  și  $L$  fiind rezistența și inductivitatea circuitului.

Din relația de mai sus rezultă că este posibilă alegerea schemei de lucru ( $R$  și  $L$ ) pentru a obține un impuls de o anumită formă.

În cazul folosirii unei surse redresor, pulsațiile de tensiune din proces se adaugă la pulsațiile tensiunii redresate și atunci energia unei descărcări va crește în anumite momente, apărînd pericolul ca sursele de amorsare a microfisurilor să fie mult mai numeroase. Acest neajuns se poate ușor evita mărind rezistența de limitare a curentului din circuit sau introducînd de avans cu o limitare precisă a curentului în circuit.

Rezistențele trebuie astfel alese că să nu permită creșterea curentului peste anumite valori chiar la scurtcircuitarea discului cu obiectele de tăiat.

Pe de altă parte rezistențele adiționale ( $R$ ) trebuie astfel alese încît consumul de energie să fie limitat.

### 8.1...-Cercetarea influenței factorilor R,L,C, asupra timpului de tăiere, respectiv productivitatea

#### 8.1.1.-Cazul circuitului rezistiv

Introducînd rezistențe în circuitul de lucru  $R$  se modifică intensitatea curentului respectiv valoarea energiei introduse în spațiul de lucru.

O dată cu creșterea energiei introduse în spațiul de lucru timpul de tăiere scade, respectiv productivitatea crește de 6...10 ori pentru curenți de 5 respectiv 35 A (figurile 8.2, 8.3).

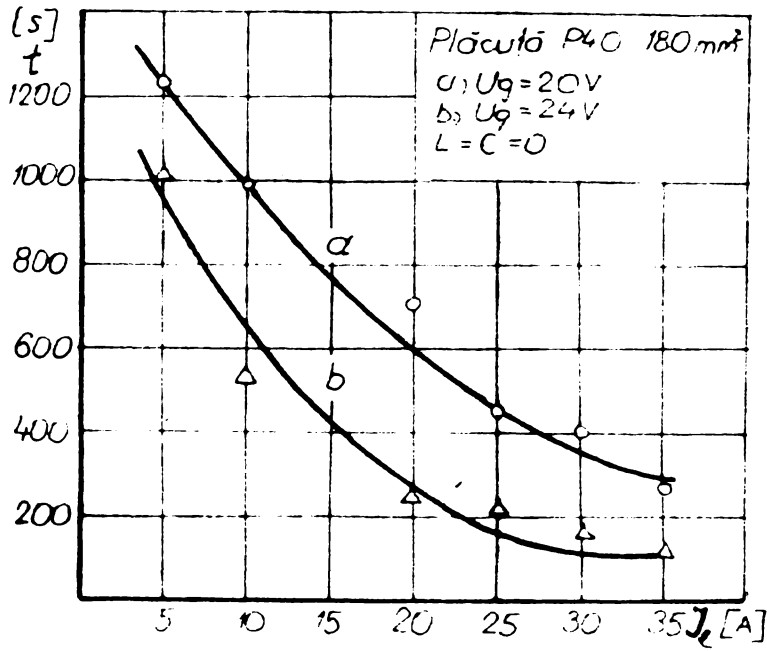


Fig. 8.2.-  
 Variația  
 $t = f(I_q)$

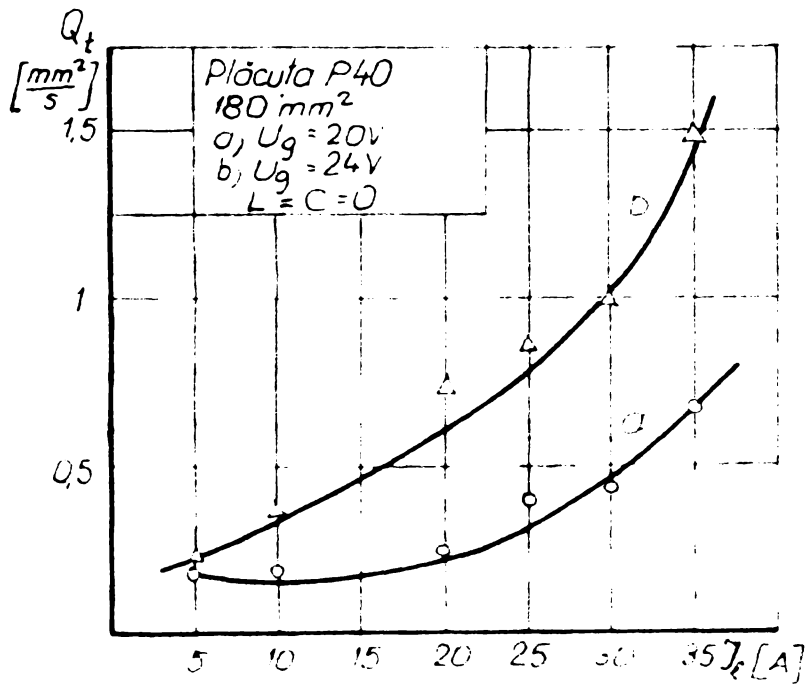


Fig. 3.3.-  
 Variația  
 $Q_t = f(I_q)$

### 8.1.2.-Cazul circuitului inductiv

Introducând inductivitatea  $L$  în circuitul de lucru, creșterea curentului pe o descărcare este frînstată și în acest mod energia medie a impulsului este mai mică datorită amplitudinilor și duratelor mai mici. Stabilitatea procesului de tăiere se îmbunătățește foarte mult și mecanismul de

avans al discului de tăiere sau al piesei funcționează în condiții mai bune, continuitatea tăierii fiind în general mai ușor de realizat.

Se menționează că pierderile de energie datorită introducerii în circuit a inductivității  $L$  sînt foarte mici, de ordinul 2,5...20 W pentru curenți de lucru de 5...50 A, avînd în vedere că rezistența electrică a acestor bobine este mică, înfășurările bobinelor fiind realizate din cupru.

Timpu de tăiere, determinat pentru trei tensiuni de alimentare practic nu este influențat de mărimea inductivității  $L$  (figura 8.4).

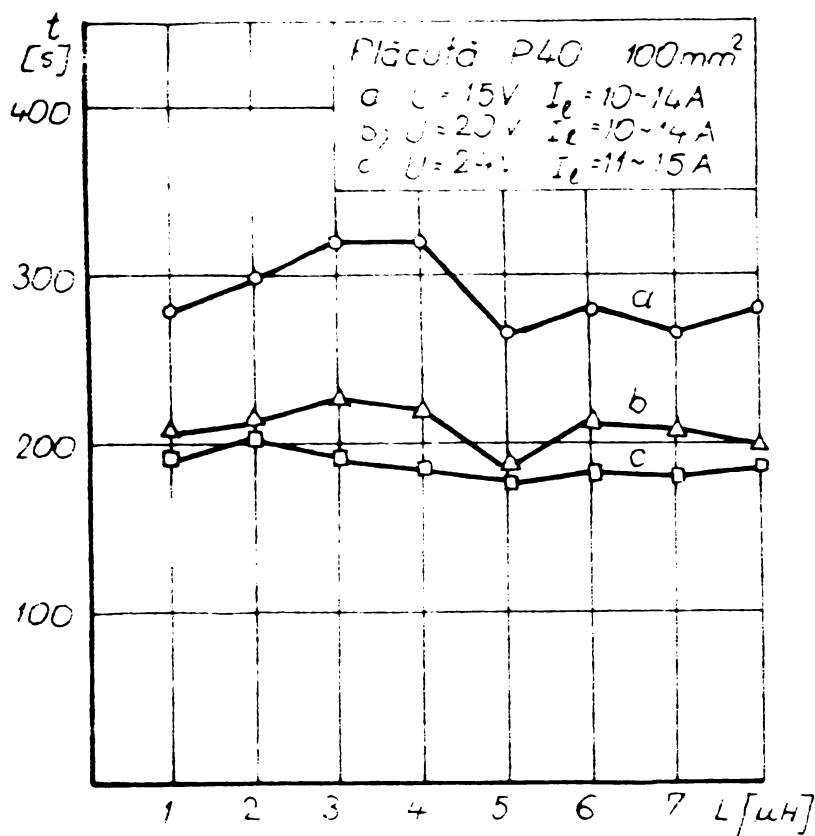


Fig.8.4.- Variația  $t=f(L)$

parametrilor schemei constante, modifică și curenții de lucru cu ordinul de mărime de cca 0...5 A la parametrii experimentați.

Pentru valori de  $L > 4 \text{ mH}$  se observă o mică scădere a timpului de tăiere dar numai pentru tensiuni de 15...20V, timpul de tăiere menținându-se aproape constant pentru tensiunea de 24 V. Aceste variații sînt probabil cauzate de variația componentei de dizolvare anodică care devine preponderantă la  $L$  mari. Se observă că modificările inductivității  $L$ , lăsînd restul

### 8.1.3.-Cazul circuitului capacitiv

Existența capacităților conectate în paralel cu spațiul de lucru, creiază condițiile unor descărcări suplimentare în spațiul de lucru elementar ( $SL_e$ ). Ca urmare a descărcărilor suplimentare aspectul suprafeței de tăiere se modifică foarte mult. [182]

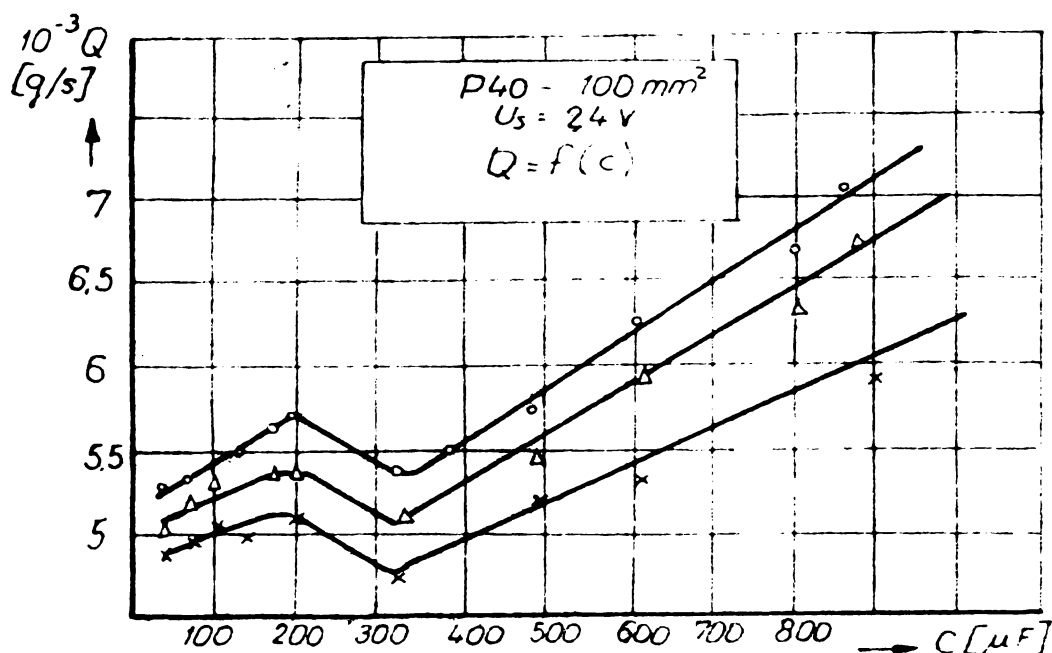


Fig.8.5.-Variația  $Q=f(C)$

(figura 8.5). Se observă că  $Q$  crește pentru  $C > 300 \mu F$ , experiențele limitându-se pentru  $C=32...296 \mu F$ .

Pentru  $C < 500 \mu F$  se observă o nestabilitate a lui  $Q$  probabil din cauza unor fenomene complexe de rezonanță considerând circuitul oscilant format din capacitățile  $C$  în paralel și inductanța parazită a firelor de legătură, caracteristică mașinii și montajului făcut la experimentări.

În ce privește influența capacităților conectate în paralel cu spațiul de lucru se observă că rezultatele obținute la tăierea prin eroziune complexă electrică electro-chimică a plăcuțelor din carburi metalice parțial diferă de cele prezentate în subcapitolul 6.2.4. Aceasta se datorează regimurilor electrice diferite de lucru cu care s-au tăiat probele din oțelurile aliate pentru scule și matrițe (30...250A) față de regimurile electrice folo-

Experimen-  
tările s-au  
făcut pentru  
trei tensiuni  
de alimentare  
a spațiului  
de lucru 15,  
20 și 24  
volți și  
curenți de  
ordinul  
18...22 A  
cu plăcuțe  
P40 de  
100 mm<sup>2</sup>  
secțiune

site la tăierea plăcuțelor din carburi metalice (10...35 A). Se constată că pentru regimuri electrice caracterizate prin curenți de lucru sub 50 A, eficiența conectării în paralel a unei capacități cu  $C > 500 \mu F$  este mai evidentă, aceasta datorându-se scăderii vitezei de uzură totală a electrozilor, respectiv modificării substanțiale a diagramei  $V_e = f(S)$  (figura 4.9) prin care se determină indirect și productivitatea maximă a procesului. Această dependență funcțională s-a obținut experimental (figura 8.5).

8.1.4.-Cazul circuitului complex R, L, C

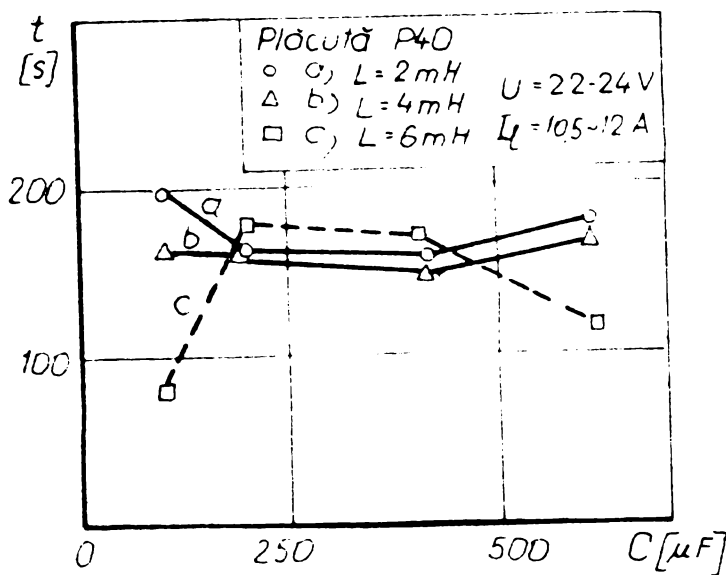


Fig.8.6.-Variația  $t=f(C)$

Experimentările s-au făcut pentru  $L=2,4$  și  $6$  mH și  $90...608 \mu F$ , variația rezistenței înlocuindu-se cu variația tensiunii de alimentare a spațiului de lucru. Rezultatele obținute sînt prezentate în figura 8.6. Capacitatea optimă care ar merita să fie conectată în paralel cu spațiul de lucru este de cca  $200...400 \mu F$ . Peste această valoare nu se observă variații sensibile a timpului de tăiere, respectiv a productivității pentru cele trei inductivități experimentate. În continuare s-a determinat cantitatea de material prelevat în unitatea de timp  $Q$  funcție de inductivitatea  $L$  pentru patru capacități de condensatoare:  $92, 192, 416$  și  $608 \mu F$ . Rezultatele sînt prezentate în figura 8.7.

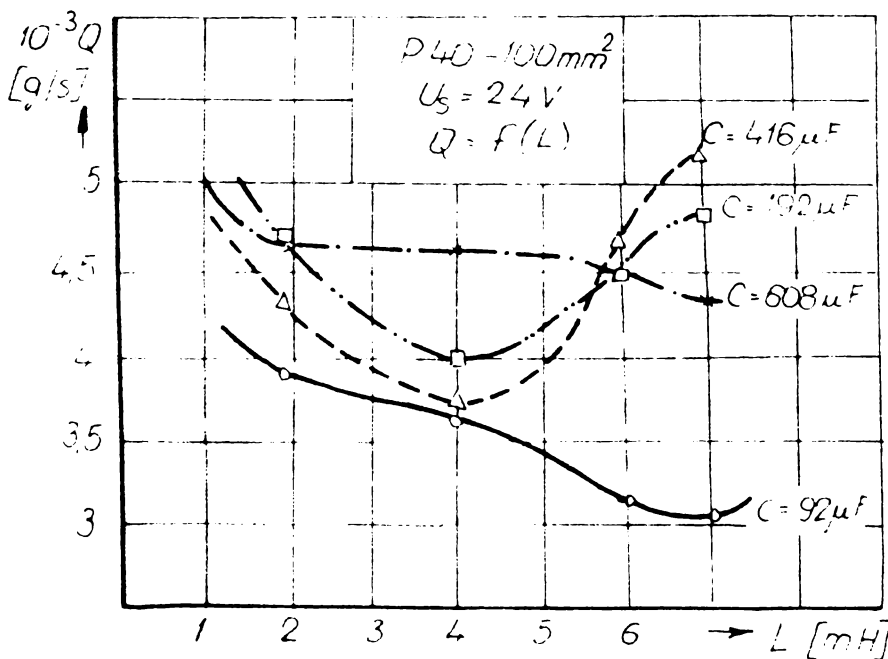


Fig.8.7.-Variația  $Q=f(L)$

Productivitatea este constantă pentru bateria de condensatoare de  $608 \mu F$ , obținându-se variații de cca 25% pentru celelalte oscilații. Caracterul de circuit oscilant își pune amprenta după o legitate greu de stabilit.



### 8.2.-Cercetarea influenței factorilor R, L, C asupra zonei influențate termic

In toate cazurile cercetate se observă o finisare a microstructurii stratului de suprafață cauzată de dizolvarea parțială

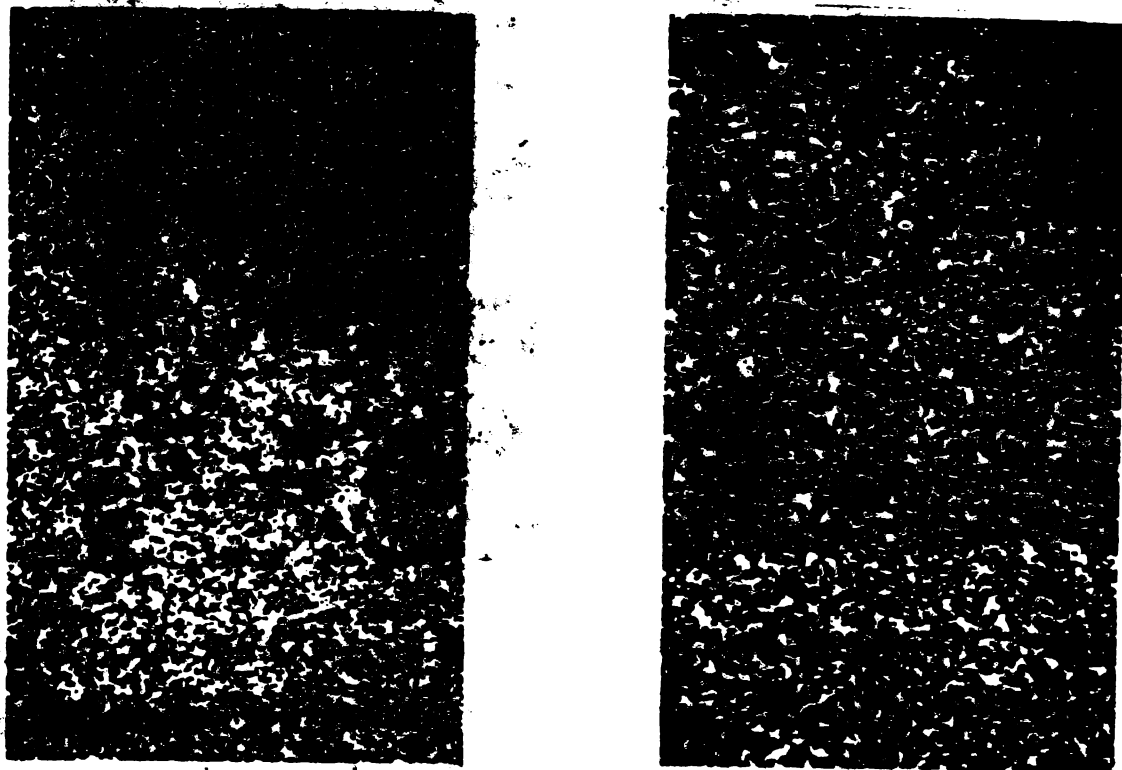


Fig.8.8. a) x 500

b) x 1000

sau chiar completă a carburilor sub acțiunea temperaturii foarte înalte, respectiv reprecipitarea acestora sub forma unor particule extrem de fine, cu o ușoară a gradelor de subrăcire ridicată.[483]

O diferențiere a carburilor pe microfotografii este destul de dificilă. Carburile WC au o formație mai grosieră, iar carburile TiC+TaC se caracterizează printr-o finețe mai mare și apar de culoare deschisă. Co apare de culoare închisă (figure 8.8).

In cazul circuitelor inductive stratul influențat termic poate atinge o adâncime de 18  $\mu$ m pentru  $L=5$  mH.

In figura 8.9 este prezentată microfotografia unei plăcuțe P40 tăiate prin eroziune complexă electrică-electrochimică cu  $I = 12,5 \text{ A}$ ;  $U = 24 \text{ V}$ ;  $L = 5 \text{ mH}$ .

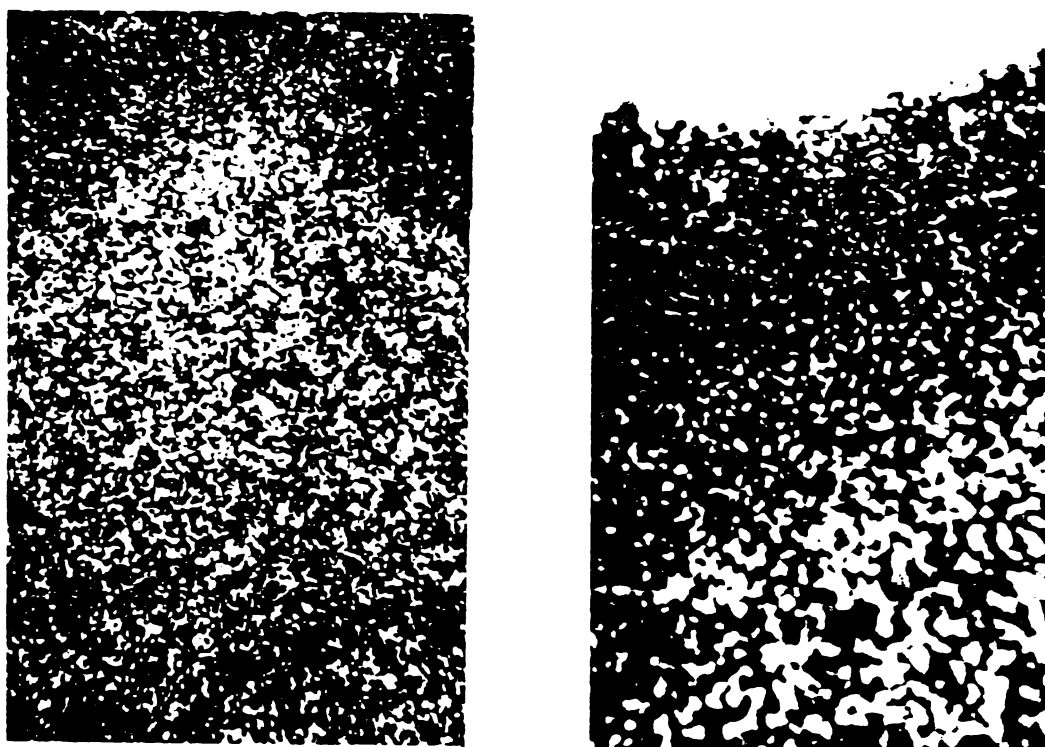


Fig.8.9.-Microfotografia unei plăcuțe P 40: a)  $\times 500$ ; b)  $\times 1000$

Experimentările au demonstrat că adâncimea stratului influențat termic se poate regla în limitele  $6...25 \mu\text{m}$  prin reglarea inductivității în limitele  $0...8 \text{ mH}$ , ceea ce a fost posibil cu bobina realizată pentru instalația experimentală. Probabil la circuitele inductive se pot genera valori mari ale energiei specifice în zona de interacțiune electrosculă - obiect de prelucrat.

La folosirea circuitelor capacitive, zona influențată termic este nestabilă ca urmare a descărcărilor pulsatorii ale condensatorilor peste spațiul de lucru. In figura 8.10 este prezentată o microfotografie a unei plăcuțe P 40 tăiate prin eroziune complexă electrică - electrochimică cu  $12,5 \text{ A}$ ;  $24 \text{ V}$ ;  $544 \mu\text{F}$ .

Grosimea medie a ZIT este între  $8...15 \mu\text{m}$  funcție de mărirea bateriei de condensatoare.

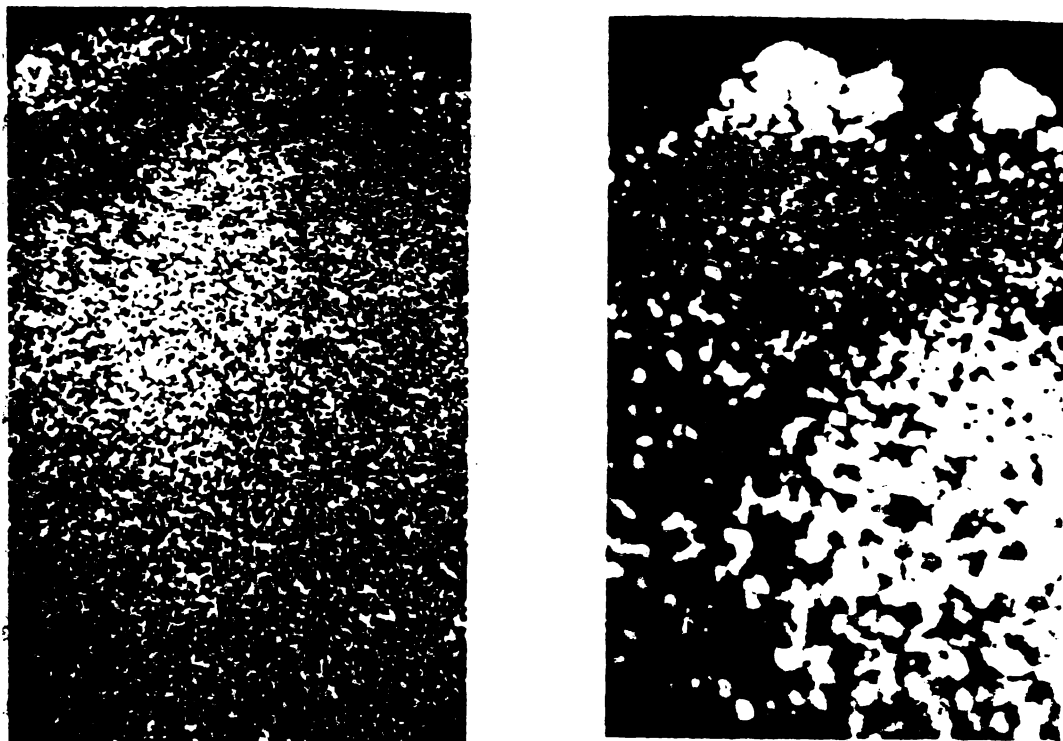


Fig. 8.10. - Microfotografia unei plăcuțe P 40: a) x500; b) x1000

### 8.3. - Cercetarea influenței factorilor $R$ , $L$ , $C$ asupra rugozității suprafețelor de tăiere

Rugozitatea suprafețelor de tăiere variază foarte mult în funcție de intensitatea curentului de lucru, inductivitatea conectată în circuitul SCSL și capacitatea bateriei de condensatoare în paralel cu spațiul de lucru.

Pentru o variație a curentului în limitele 20...24 V ( $L=C=0$ ) rugozitatea variază în limitele 4...9  $\mu$  (Fig. 8.11). Variațiile rugozității pentru un circuit inductiv și circuit capacitiv sînt prezentate în figurile 8.12, 8.13.

Pentru cazul circuitului inductiv se observă că rugozitatea scade o dată cu creșterea inductivității și anume pentru o variație de 1..8 mH, rugozitatea scade în limitele 7..3  $\mu$ , pentru curenți de lucru 10...15 A și 15...24 V.

Pentru cazul circuitului capacitiv rugozitatea crește o dată cu creșterea capacității bateriei de condensatoare și anume pentru o variație de 0...864 F, rugozitatea crește în limitele 3,5...10  $\mu$ , pentru un regim de lucru de 15...22 A și 15...24 V.

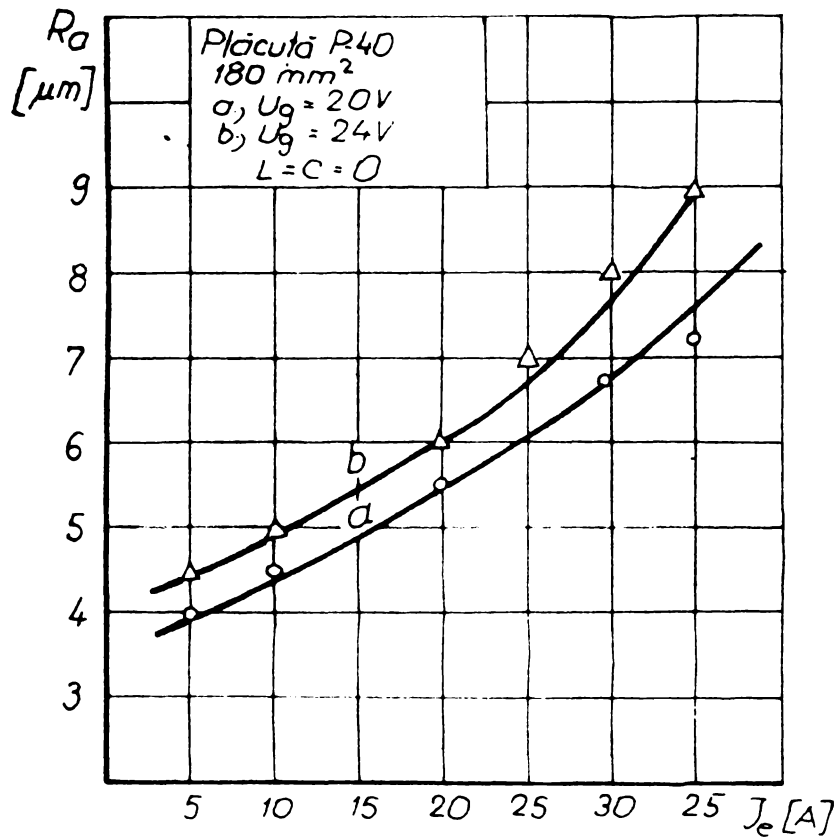


Fig. 8.11. - L=C=0; variația rugozității

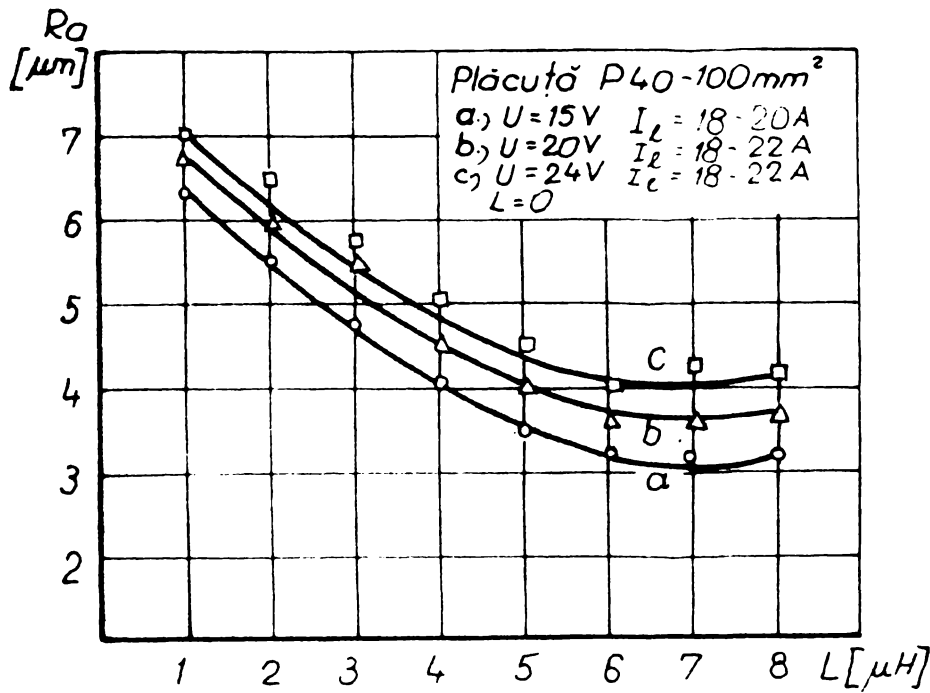


Fig. 8.12. - Variația rugozității pentru un circuit inductiv

192; 446 și 608 μF.

Pentru cazul circuitelor complexe, experimentările s-au făcut pentru L în limitele 2...6 mH și C în limitele 0...608 μF, variația rezistenței înlocuindu-se la unele probe cu variația tensiunii de alimentare a spațiului de lucru.

Rezultatele sînt prezentate în figura 8.14.

S-au tăiat plăcuțe P 40 de

100 mm<sup>2</sup> cu

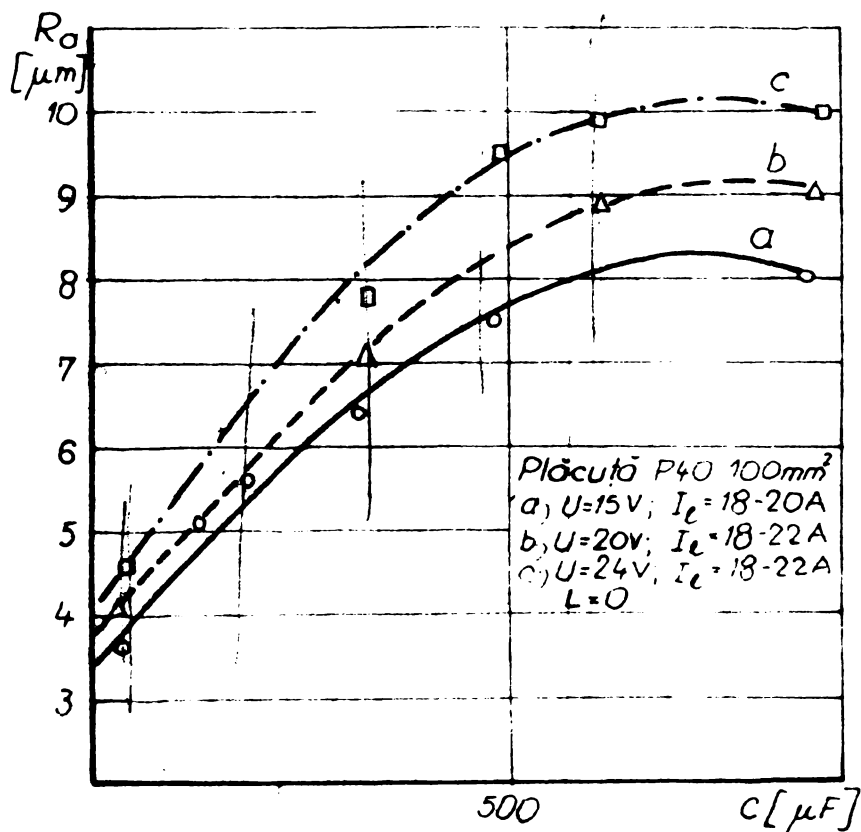
I<sub>L</sub> = 10...12 A;

U<sub>g</sub> = 22...24 V;

12 scheme L=2;

4 și 6 mH;

respectiv C=96



Din rezultatele obținute se observă că rugozitatea variază în limite stricte 5...7,5  $\mu\text{m}$ .

Fig.8.13.-Variația rugozității pentru un circuit capacitiv

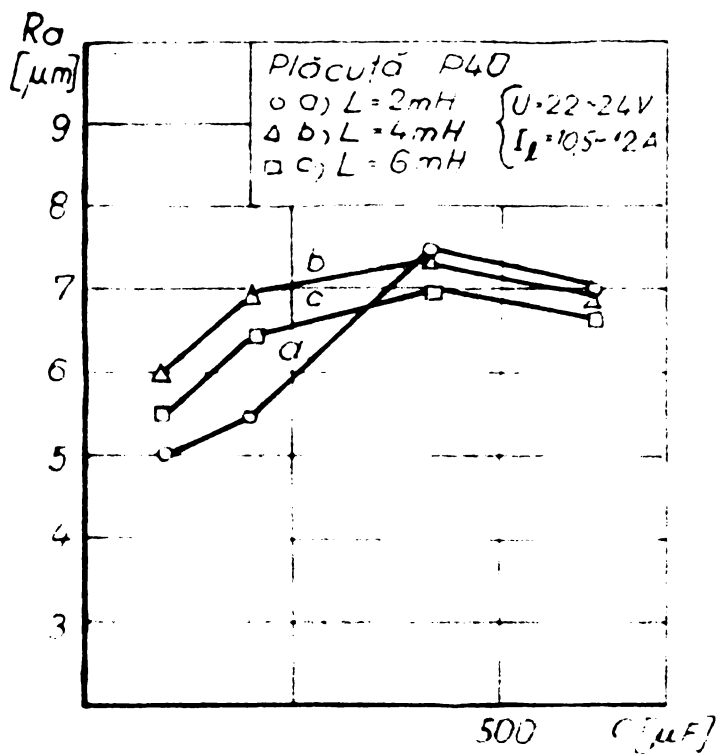


Fig.8.14.-Variația

$R_B = f(C)$

#### 8.4.- Cercetarea influenței factorilor R, L, C asupra formării fisurilor

Aliajele sinterizate prezintă o mare sensibilitate la fisurare datorită tensiunilor termice și mecanice, fapt care limitează parametrii regimului de prelucrare și determină productivități de tăiere mai reduse, comparativ cu performanțele și posibilitățile procedurii la oțeluri aliate. Experimentările au demonstrat că amorsele de fisuri pot fi evitate dacă se alege corect regimul de lucru: tensiunea, curentul și presiunea discului de tăiere asupra plăcuței de carburi metalice. Regimul optim de lucru este diferit după sortul de carbură, în special din cauza variației mari a conductivității termice a aliajelor dure 0,02...0,21 cal/cm<sup>2</sup>s. Cele mai mari valori pentru conductivitate termică o au aliajele pe bază de WC-Co (grupa K), valorile mici fiind aferente carburilor cu conținut mare de TiC (grupa P). Având în vedere caracterul prelucrării prin eroziune complexă electrică-electrochimică și anume existența impulsurilor datorate descărcărilor electrice, materialele dure în general și cele cu conductivitate termică <sup>mici</sup> în special, sînt cele mai susceptibile la fisurare. [183]

Amorsele de microfisuri care de altfel pot apare la orice regim electric utilizat (U, I) sînt mai probabile la regimuri mai dure și certe la regimuri dure (U<sub>max</sub>, I<sub>max</sub>). Valorile optime ale tensiunii și curentului se vor plasa în regimuri moi cu o productivitate mai mică, dar cu o precizie dimensională și o clasă de rugozitate a suprafețelor superioară cu evitarea apariției unor microfisuri periculoase. Așa cum s-a arătat în capitolul 6 valorile optime ale curentului vor fi asigurate de acele scheme (sursă circuit - spațiu de lucru) care vor conduce la variații mici de curent pe o descărcare. Se amintește (capitolul 6): creșterea curentului pe o descărcare este frînăată la scheme R, L, C reglabile cu caracter inductiv în circuitul de alimentare.

Regimurile de lucru dure (curenți de lucru mari, capacități mari conectate în paralel pe spațiul de lucru) favorizează apariția microfisurilor în stratul modificat termic care datorită

fragilizării ridicate a carburilor metalice se propagă perpendicular pe direcția de prelucrare (figura 8.15).



Fig.8.15.-Apariția microfisurilor în stratul modificat termic

Se menționează că plăcuțele cu figuri în general pot fi folosite la prelucrări mecanice deoarece majoritatea cuțitelor armate cu plăcuțe de carburi metalice ascuțite la polizoare clasice cu pietre de polizor au fisuri. Numai procedeele neconvenționale de ascuțire a cuțitelor cu plăcuțe de carburi metalice pot asigura tăguri fără microfisuri dacă bineînțeles se aleg corect parametrii regimului de lucru.

Este necesar a se acorda maximum de atenție circuitelor complexe la tăierea plăcuțelor din carburi metalice

deoarece acțiunea reciprocă a inductivității și condensatoarelor poate regla în limite strânse rugozitatea suprafeței tăiate și implicit ZIT respectiv tendința spre evitarea formării microfisurilor.

#### 8.5.-Uzura discurilor de tăiere

La tăierea plăcuțelor din carburi metalice s-au folosit discuri din oțel TD-STAS 1930-65 de diametru 200 mm și grosime 0,6 mm la turația  $n=2000$  rot/min.

Pentru a se determina uzura discului la fiecare tăiere s-a măsurat diametrul inițial  $D_1$ , diametrul final  $D_2$ , determinându-se prin scădere  $\Delta D$ . Tăierile s-au făcut cu diferiți parametrii de lucru în ce privește curentul și tensiunea, păstrându-se constantă presiunea discului pe colectul de tăiere.

Astfel s-au făcut tăieri la:

- curenți de lucru           5...35 A;
- tensiuni                   14...24 V

S-au obținut următoarele rezultate în ce privește uzura discului de tăiere  $\Delta D$ :

- a) La tăierea plăcuțelor P 40 de 180 mm<sup>2</sup> pentru curenți de 5...35 A, tensiunea 14...24 V;  $R=L=C=0$ , s-a obținut  $\Delta D = 0,1...0,4$  mm;
- b) La tăierea acelorși plăcuțe, cu aceleași parametri în ce privește curentul și tensiunea însă  $R=C=0$  și circuit inductiv cu  $L=1...8$  mH; s-a obținut:  $\Delta D=0,05...0,4$  mm;
- c) Idem pentru  $R=L=0$  și circuit capacitiv cu  $C=32...864 \mu F$ , s-a obținut  $\Delta D=0,35...0,7$  mm;
- d) Idem pentru circuite complexe cu  $L=2...6$  mH și  $C=96...608 \mu F$  s-a obținut  $\Delta D=0,2...0,5$  mm.

În concluzie la circuite inductive uzura discului de tăiere scade, iar la circuitele capacitive uzura discului crește.

Uzura sculei se datorește nu numai descărcărilor normale de lucru pe muchia de atac și a celor accidentale laterale, ci și datorită uzurii mecanice ca urmare a frecării discului cu obiectul de prelucrat. Uzura mecanică este determinată de sistemul de avans și de modul de fixare al obiectului de prelucrat.

Din datele de mai sus se observă că uzura sculei datorită descărcărilor electrice diferă pentru circuitul de lucru (a, b, c, d), variațiile maxime fiind de ordinul (75...100%).

În figurile 8.16, 8.17, 8.18 se prezintă diagramele de variație a uzurii sculei la tăierea plăcuțelor P 40 de 180 mm<sup>2</sup> din carburi metalice

- la circuit resistiv (figura 8.16) cu  $L=C=0$  pentru tensiuni de 20 și 24 V,  $I_t = 5...35$  A;
- la circuit inductiv (figura 8.17) cu  $C=0$ ,  $L=1...8$  mH pentru tensiuni de 16, 20 și 24 V;  $I_t = 10...15$  A;
- la circuit capacitiv (figura 8.18) cu  $L=0$ ;  $C=32...864 \mu F$  pentru tensiuni de 16, 20, 24 V;  $I_t = 17...23$  A;



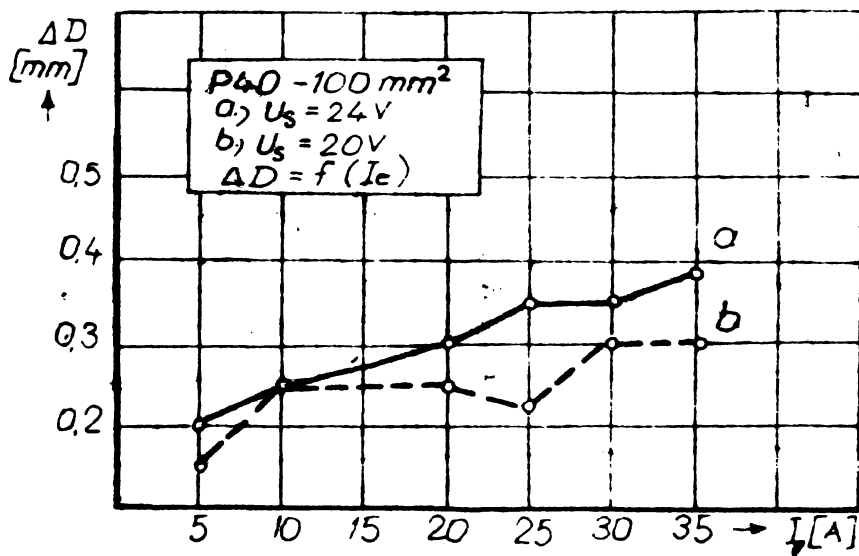


Fig.8.16.-Diagramă de variație a uzurii sculei la tăierea lui P 40 - circuit rezistiv

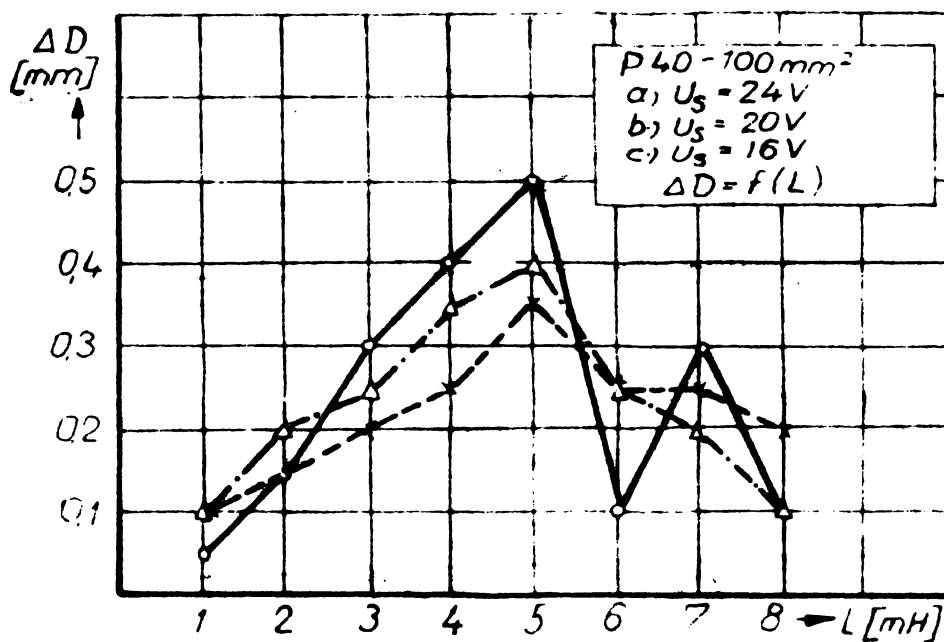


Fig.8.17.-Diagramă de variație a uzurii sculei la tăierea lui P 40 - circuit inductiv

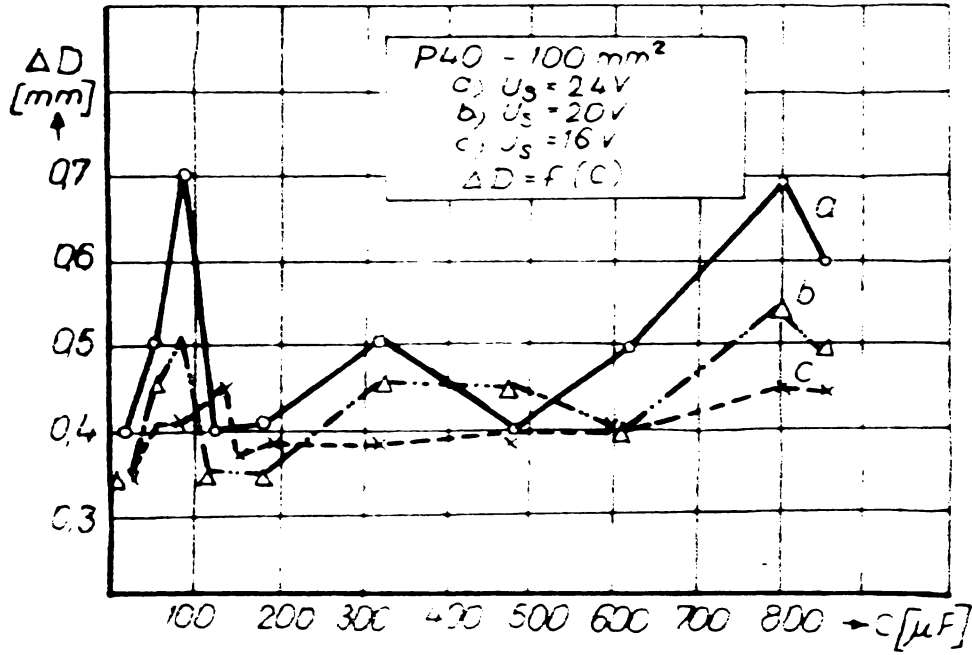


Fig. 8.18.-Diagramă de variație a uzurii sculei la tăierea lui P 40 la circuit capacitiv

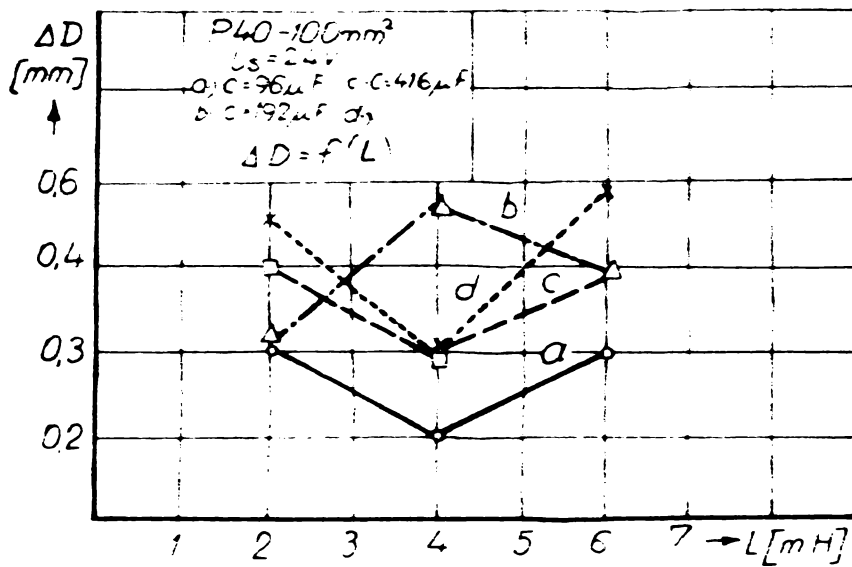


Fig. 8.19.-Diagramă de variație a uzurii sculei la tăierea lui P 40 la circuit complex

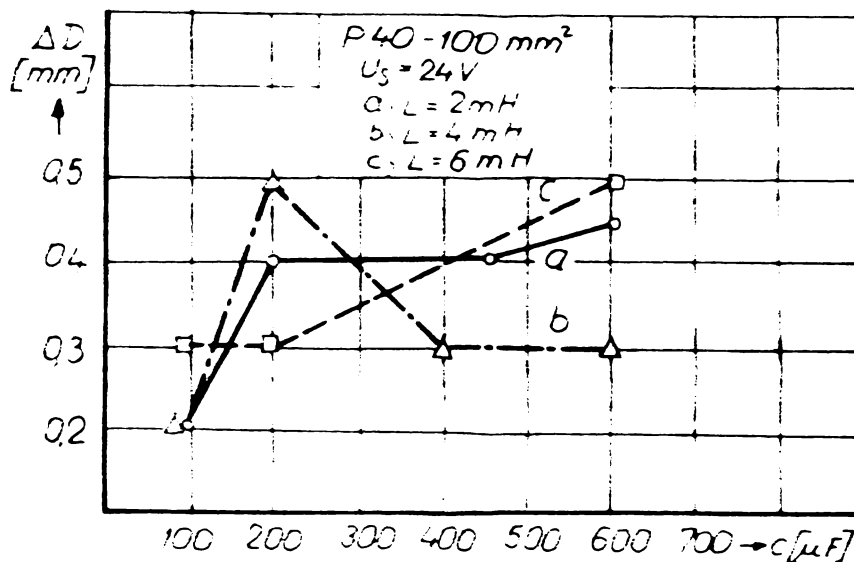


Fig. 8.20.-Diagramă de variație a uzurii sculei la tăierea lui P 40 la circuit complex

In figurile 8.19 și 8.20 se prezintă diagramele de variație a uzurii sculei la tăierea plăcuțelor P 40 de 180 mm<sup>2</sup> din carburi metalice:

- la circuit complex (figura 8.19) cu  $L=1...6$  mH și  $C=96\mu F$ ;  $192\mu F$ ;  $416\mu F$  și  $608\mu F$ ;
- la circuit complex (figura 8.20) cu  $C=96...608\mu F$ .

### 8.6.-C o n c l u z i i

-Intensificarea eroziunii este posibilă prin creșterea parametrilor electrici (U, I) și în special al curentului, dar acest lucru nu se recomandă în cazul aliajelor dure și extradure din cauza pericolului de fisurare. Obținerea unui spor de productivitate se poate realiza prin folosirea unor circuite inductive, fără pericol pentru integritatea sculei.

-Prelucrarea carburilor metalice prin eroziune complexă electrică-electrochimică, impune luarea unor măsuri cu caracter tehnologic diferite de cazul prelucrării unor oțeluri aliate sau nealiate.

Decă aceste măsuri sînt respectate se poate conta pe rezultate bune sub aspect tehnologic și economic.

-La tăierea prin eroziune electrică-electrochimică a plăcuțelor din carburi metalice, circuitele complexe cu L, C reglabile prezintă un interes deosebit, deoarece prin acțiunea reciprocă a inductivității și condensatoarelor se poate regla în limite strînse ZIT, respectiv tendința spre evitarea formării microfisurilor.

## 9.-EFICIENȚA ECONOMICĂ A TAIERII PRIN EROZIUNE

### COMPLEXA ELECTRICA-ELECTROCHIMICA

Tăierea oțelurilor pentru scule și matrițe se face de obicei cu discuri speciale din import (de la firmele TYROLIT, SAIPA, PRESI, etc). Sînt în curs de asimilare asemenea discuri și la CARBOCHIM Cluj.

Costul discurilor din import este:

Ø300 mm; grosime 2,5 - 3 mm - - -100 - 150 lei/buc  
≈ 33 - 49 lei valută vest

Cu un asemenea disc se pot executa în mediu următorul număr de tăieturi:

oțel C 120 - - - -Ø50 mm - - - - - max,5 tăieturi/disc  
oțel Rp 3 - - - -Ø30 mm - - - - - max.5...6 tăieturi/disc  
oțel INOX - - - - Ø25 mm - - - - - max.10...15 tăieturi/disc

Mediile de mai sus depind de îndemnarea muncitorului care debitează, calitatea discului și alte condiții reprezentînd date statistice care stau la baza emiterii comensilor de aprovizionare cu discuri.

Cele mai bune rezultate s-au obținut cu discuri TYROLIT.

#### 9.1.-Costul unei tăieturi cu disc special din import

-Costuri directe:

Se consideră puterea medie a motorului de antrenare 6 kW  
la cos  $\eta = 0,9$  (Metasecar RDG 5,3/6,5 kW)

Durața unei tăieturi la oțel reprezentativ C 120  
Ø50 mm ... 5 min

Energie consumată PKWh/tăietură  $6 \times 0,083 = 0,498$  kWh/tăietură;

Cost disc(luînd 3 tăieturi/disc) =  $\frac{100}{3} = 33$  lei/tăietură;

Apa de răcire necesară la instalație  $0,3 \text{ m}^3/\text{h} = 0,03$  lei/tăietură;

Manopera (muncitor cat.IV bază ≈ 10 lei/h) = 1 leu/tăietură

TOTAL - - - - - 34,53 lei/tăietură

Frecvența de spargere a discului:cos 5%. Spargerile se produc de obicei la trecerile de la treapta I de turație (1450rot/min)

la treapta II de turație (2910 rot/min).

În vederea prelucrării, materialul în prelabil se tratează termic. Costul tratamentului termic de recălescere a unei tone de material în cuptor electric de 50 kW timp de cca 6 ore:

$$50 \times 6 \times 1 \text{ lei/kWh} \approx 300 \text{ lei/tonă}$$

O mențiune specială pentru oțel rapid este respectarea strictă a avansului (avans lent) și răcirea corectă a materialului.

Dacă avansul este necorespunzător (mai rapid) se produc supraîncălziri locale, deci tensiuni în material ceea ce favorizează apariția fisurilor.

### 9.2.-Costul unei tăieturi prin eroziune complexă electrică-electrochimică

Costuri directe.

Se consideră puterea medie a motorului de antrenare 3,0 kW la  $\cos \varphi = 0,9$ .

Puterea medie a sursei de alimentare ..... 7 kW.

Durata unei tăieturi la oțel reprezentativ C 120 de  $\phi 50$  mm este 6 min.

Energia consumată kWh/tăietură: 0,7

Costul discului de tablă 4 lei

Cu un disc se pot tăia în medie 30 tăieturi (vezi capitolul 6) ceea ce revine la 0,13 lei/tăietură.

Costul lichidului de lucru 40 lei. Cu o șarjă de lichid se pot realiza minimum 100 tăieturi ceea ce revine la 0,40 lei/tăietură.

Manopera (muncitor cat. IV bază = 10 lei/h) - - 1 lei/tăietură.

Total - - - - - 1,53 lei/tăietură

### 9.3.-Economii realizabile la o întreprindere de construcții mașini de mărime medie (7-8000 muncitori)

În cursul anului 1980, de exemplu, la I.M. Timișoara, s-au consumat cca 45 tone oțeluri aliate pentru scule și unelte:

10 tone oțel rapid Rp 3 (100-150)

20 tone oțel C 120

9 tone oțel C 45, , , , , ,

Considerind dimensiunea medie  $\phi 50$  mm debitate la 10 cm, numarul anual de tăieturi va fi:

$$N_t = \frac{4.9 \cdot 10^3}{\pi \cdot d^2 \cdot 7,8 \cdot l_t} = \frac{4.45 \cdot 10^3}{\pi \cdot 0,5^2 \cdot 7,8 \cdot 1} \approx 30.000 \text{ tăieturi}$$

Considerind deci anual cca 30.000 tăieturi, se poate aprecia economia anuală pentru o întreprindere de mărime medie la cea 900.000 ... 1.200.000 lei sau cca 300.000 lei valută.

**9.4. Costul unei mașini de tăiere realizabilă prin autoutilare pentru bare pînă la 100  $\phi$  mm**

-Sursa de curent (redresor RSC-400 modificat.) lei-	38.900
-Bobina de reactanță de 8,5 mH pentru 300 A (tip UTS) lei - - - - -	3.000
-Rezistență de reglaj - lei - - - - -	1.000
-Bateria de condensatoare de 50.000 $\mu F$ , 80 V - -	5.000
-Utilajul de tăiere - lei - - - - -	25.000
-Pupitrul de comandă - lei - - - - -	6.000
TOTAL lei - - - - -	78.900

Se menționează că modulele și materialele necesare pentru realizarea unei mașini de tăiere prin autoutilare sînt de fabricație curentă și nu necesită import cu excepția sîrmei cecas pentru rezistența de reglaj, care de altfel s-ar putea realiza și din elemente de fontă cu 3,5...5% Si.

**9.5.-Pentru calcule economice, se recomandă folosirea dia-**

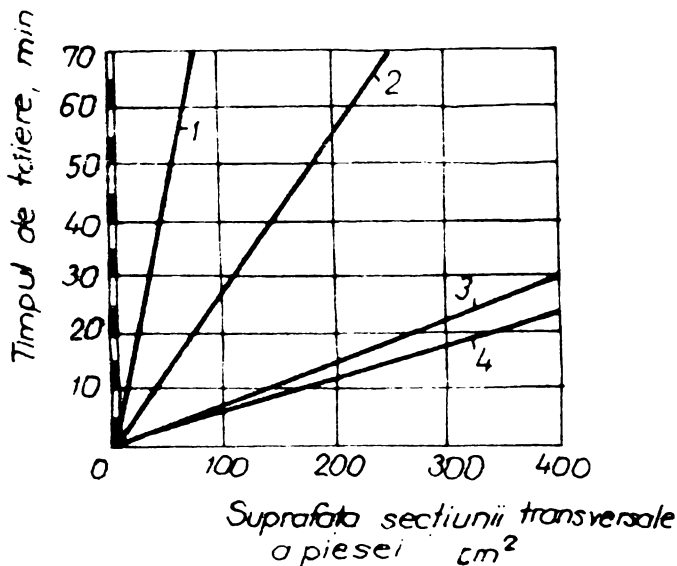


Fig.9.1

gramelor din figura 9.1 care dau timpul de tăiere în minute în funcție de suprafața secțiunii transversale a piesei în  $cm^2$  în patru variante:  
 1-cu fierăstrău mecanic (materiale cu  $\sigma=80kg/mm^2$ )  
 2-idem (materiale cu  $\sigma=45 kg/mm^2$ )  
 3-cu fierăstrău disc (materiale cu  $\sigma=80 kg/mm^2$ )  
 4-tăiere prin eroziune complexă electrică-electrochimică (materiale cu  $\sigma=45-80 kg/mm^2$  și mai dure)

## 10.-CONSIDERATII FINALE, CONTRIBUTII ORIGINALE SI PROBLEME DE VIITOR

Teza de doctorat cuprinde rezultatul studiilor și cercetărilor desfășurate pe o perioadă de cea 6 ani în domeniile cercetării fundamentale și aplicative privind tăierea prin eroziune complexă electrică-electrochimică.

În baza lucrării elaborate se pot preciza următoarele considerațiuni finale, concluzii în ce privesc contribuțiile originale și recomandări pentru viitor.

### 10.1.-Considerațiuni finale

10.1.1.-Se recomandă aplicarea procedurii de tăiere prin eroziune complexă electrică-electrochimică în toate cazurile în care productivitatea și economicitatea altor procedee nu este satisfăcătoare, ca de exemplu:

- debitarea barelor și profilelor din oțeluri de mare duritate, cum ar fi cele pentru scule și matrițe;
- tăierea plăcuțelor din carburi metalice (aliaje dure sinterizate);
- tăierea maselotelor la scule turnate din oțeluri rapide ca de exemplu: burghie, freze deget, freze micc, etc;
- tăierea maselotelor la piese turnate din oțeluri dure, fontă nodulară (după turnare fonta are o structură de cémentită de duritate foarte mare);
- tăierea pieselor turnate din oțeluri dure, în ciocchine;
- tăierea pieselor turnate din fontă de duritate mare sau care prezintă pe suprafață un strat foarte dur.

10.1.2.-Există posibilitatea de dirijare, optimizare a proceselor de tăiere prin eroziune complexă acționând asupra caracteristicilor electrice ale circuitului de lucru (R,L,C, reglabile). Optimizarea se referă în special la stabilitatea procesului de tăiere, productivitatea și consum energetic minim.

10.1.3.-Rolul inductanței în circuitul de lucru este dublu. În primul rînd aceasta trebuie să fie mai mare decît o anumită

valeare minimă  $L_{\text{optim}} \geq L_{\text{min}}$  pentru a se asigura o mai bună stabilitate a procesului de tăiere. Pe de altă parte inductanța influențează în sens negativ asupra procesului de reglare, frînându-l. În concluzie:

$$L_{\text{max}} > L_{\text{optim}} \geq L_{\text{min}}$$

10.1.4.-La oțeluri necălibile, prelucrarea ulterioară a semifabricatelor debitate prin eroziune complexă electrică - electrochimică nu prezintă dificultăți indiferent de regimul de tăiere. Oțelurile călibile trebuie debitate sau la regimuri electrice mai moi sau tratate termic înainte de prelucrări mecanice.

Tăierea semifabricatelor destinate forjării sau sudurii se pot face la orice regimuri electrice.

10.1.5.-În procesul de tăiere prin eroziune a oțelurilor aliate, pe suprafața de tăiere se formează un strat de metal topit, grosimea căruia nu depășește 0,5 mm pentru regimuri electrice dure (250 A; 22...32 V). Sub stratul de metal topit se desfășoară zona influențată termic (ZIT), în care majoritatea oțelurilor suferă transformări de fază și structurale, cauzate de încălziri și răcirii locale repetate.

La oțelurile călibile, la suprafață se formează un strat alb a cărui microstructură este probabil alcătuită din martensită de călire și o cantitate mare de austenită reziduală.

10.1.6.-În stratul superficial al tăieturii se observă pori și incluziuni nemetalice, iar la regimuri mai dure la anumite oțeluri aliate (Rp 3, Rp 4, C 120, H 12) microfisuri de obicei de adâncime mică, maximum 0,5 mm.

Microfisurile sînt orientate perpendicular pe suprafața prelucrată, iar lungimea lor depinde de regimul de lucru.

10.1.7.-Referitor la transformările de fază și structurale cauzate de încălziri și răcirii locale repetate se observă că:

- la oțelurile de clasă perlitice și martensitice, la tăiere apare o zonă de călire cu duritate foarte ridicată. După detensionare duritatea se micșorează mult;
- la oțelurile de clasă austenitică și în aliaje speciale care n-au transformări de faze la încălzire, se formează un strat



subțire superficial de topire, duritatea cărui nu se deosebește de duritatea metalului de bază deși structura este diferită.

In oțeluri și aliaje sustenitice cu carburi se formează o zonă nu prea adâncă de călire.

10.1.8.-Se apreciază că introducerea pe scară largă în producție a tăierii prin eroziune complexă electrică-electrochimică a oțelurilor aliate poate aduce importante economii valutare prin diminuarea importului discurilor speciale (de tip TYROLIT, SAIPA, PRISI, etc).

10.1.9.-Pentru prima fază a introducerii în producție a tăierii prin eroziune a oțelurilor de scule și matrițe cu electrod disc se propune concepția a două tipuri de magini de tăiere pentru diametrul maxim al piesei 75 mm (MTED1) și 150 mm (MTED2). Parametrii celor două tipuri de magini sînt date în tabela 10.1.

T A B E L A 10.1

Parametrii maginii	Tipul maginii	
	MTED 1	MTED 2
-Diametrul maxim al preseii de tăiat (mm)	75	150
-Diametrul discului (mm)	350	650
-Grosimea discului (mm)	0,8-1	0,8-1
-Viteza periferică a discului (m/s)	9 -12	9 - 21
-Puterea (KW)	5	7,5
-Intensitatea curentului (A)	190	300
-Tensiunea (V)	24-32	24-32
-Productivitatea (cm <sup>2</sup> /min)		
-Volumul rezervorului (l)	60	60
-Lățimea tăieturii (mm)	1,5-2	1,5-2
-Clasa de precizie a suprafeței	2-2,5	2-2,5
- R reglabil (mm)	0,02-0,15	0,02-0,15
- L reglabil (mm)	0,2-8,5	0,2-3,5
- C reglabil (μF)	0.000	0.000
-Lăbărit (mm)	1100x1200x x1000	1100x2000x x1900
-Greutate (kgf)	1100	1800
-Cost orientativ (lei)	60.000	90.000

## 10.2.-Contribuții originale

Deși cum s-a arătat în introducere, partea I-a (cap.1-3) a lucrării cuprinde material bibliografic sortat în special în scopul elucidării unor probleme fundamentale insuficient lămurite și elaborării unei instalații experimentale pentru programul de experimentări, iar în partea II-a (cap.4-9) sînt prezentate o serie de rezultate originale care constituie revendicări tehnico-stiințifice ale autoarei. Dintre acestea se evidențiază:

### 10.2.1.-In domeniul cercetării fundamentale:

a) Studiul sistemului energetic sursă-circuit-contact și a piesei pentru eszul particular al eroziunii complexe electrice-electrochimice modificate prin R,L,C reglabile și corelarea acestui sistem cu procesul tehnologic de tăiere din punct de vedere al stabilității procesului, productivitatea, transformările structurale în ZIT, rugozitatea suprafețelor tăiate, conștinul specific al electrodului sculă, conștinul de energie, etc.

b) Cercetarea condițiilor necesare pentru asigurarea stabilității procesului de tăiere prin eroziune complexă electrică-electrochimică în condițiile posibilităților de reglare a inductanței și capacității circuitului de lucru .

Stabilirea prin calcul a inductanței minime necesare pentru asigurarea stabilității procesului de tăiere.

c) Evidențierea fenomenului de dependență neliniară între parametrii indirecti și parametrul de bază - interstițiul "s" din punct de vedere al probabilității apariției descărcării electrice, prin prisma statice și dinamice reglării automate. Evidențierea criteriilor de apreciere a reglării automate.

d) Studiul influenței inductanței L asupra procesului de tăiere.

Experimentările au demonstrat că prin introducerea în circuitul de lucru al unei bobine de reactanță  $L \geq L_{min}$  procesul de tăiere devine mai stabil, regimul electric  $U_e$  și  $I_f$  putîndu-se menține în limite mai strînse.

Acest fenomen se observă mai bine la curenți de lucru  $I_{\ell} > 100$  A.

Experiența a demonstrat că influența inductanței circuitului asupra puterii medii folosite la tăiere în condițiile cercetate este minimă.

Timpul de tăiere la unele probe a crescut cu cca 10-20%, în schimb uzura discului de tăiere a fost mult mai mică.

De asemeni cu inductanță, deranjamentele de exploatare a utilajului (deformări și blocări ale discului) sînt mai rare.

#### 10.2.2.-In domeniul cercetării aplicative

a) Concepția, proiectarea și realizarea unei instalații experimentale pentru desfășurarea programului de experimentări de tăiere prin eroziune complexă electrică-electrochimică cu scule R,L,C reglabile. Se menționează că asemenea instalații pot fi realizate prin autoutilare de orice întreprindere și pot fi folosite în producția pînă la apariția unor utilaje de tăiere asemănătoare cu cele prezentate în tabela 2.3 (fabricație URSS).

b) Stabilirea parametrilor optimi electrici și mecanici pentru tăierea a 17 mărci de oțeluri aliate în condițiile R,L,C reglabile, respectiv elaborarea a două nomograme pentru determinarea parametrilor procesului tehnologic de tăiere pentru oțeluri aliate rapide și de matrițe și pentru oțeluri inoxidabile.

c) Stabilirea parametrilor electrici și mecanici pentru tăierea unor mărci reprezentative de plăcuțe din carburi metalice (aliaje dure sinterizate). Experimental s-a stabilit că folosind circuite complexe cu L și C reglabile se poate optimiza acțiunea reciprocă a inductivității și condensatoarelor, în scopul limitării ZIT pentru evitarea formării microfisurilor.

d) Cercetarea influenței factorilor R,L,C asupra timpului de tăiere respectiv productivitatea și asupra zonei influențate termic.

e) Studiul influenței capacității C asupra procesului de tăiere.

Experimentările au demonstrat că prezența unei capacități conectate în paralel cu spațiul de lucru, creează condițiile

unor descărcări suplimentare și ca urmare la anumite regimuri electrice timpul de tăiere scade (figurile 6.30; 6.31; 6.36) fiind corelat și de o anumită valoare optimă a inductanței  $L$ . La unele probe în special din oțeluri rapide și inoxidabile variația timpului de tăiere respectiv a productivității funcție de capacitatea  $C$ , este nesemnificativă (figurile 6.32, 6.37).

**f) Studiul influenței parametrilor circuitului de lucru asupra rugozității suprafețelor tăiate.**

S-a demonstrat că rugozitatea este afectată de toți parametrii circuitului de lucru. În general rugozitatea este mică la circuite inductive și mare la circuite capacitive și rezistive.

**g) Cercetarea influenței factorilor  $R$ ,  $L$ ,  $C$  asupra uzurii discului de tăiere.**

S-a constatat că la circuitele cu  $L \geq L_{\min}$ , uzura discului este mai mică în special la regimuri electrice mai dure  $I_c \geq 150$  A.

Prezența bateriei de condensatoare conectate în paralel pe spațiul de lucru ( $C \geq 5000 \mu F$ ) mărește uzura discului.

**h) Cercetarea transformărilor structurale a zonei secțiunii de tăiere cu ajutorul microscopiei optice și electronice.**

Microanalizele prin sonda electronică au permis studiul variației elementelor componente în secțiunea de tăiere și anume: C, Si, Mn, Mo, Cr, Ni, W, P și S.

La tăierea oțelurilor de scule RP 2 - Rp 4, C 120 s-a constatat că stratul marginal este omogen din punct de vedere al compoziției chimice însă cantitatea de austenită reziduală este mai mare decât la tratamentul termic convențional.

La tăierea oțelurilor inoxidabile conținutul de Ni și Cr este mai redus în stratul marginal prin precipitarea unor compuși fini pe limita de separație miez - strat alb, concentrația restului elementelor nu diferă de metalul de bază.

La tăierea oțelurilor aliate (35Mn16, 33MoCr11 și 21MoMnCr 12) s-a constatat o ușoară concentrație de carbon cu o bună omogenitate chimică a austenitei în stratul marginal. De asemenea s-au constatat concentrații de Mn și Cr la valori inferioare ale intensității de curent ( $I_c < 100$  A).

Ca observație generală la toate oțelurile aliate experimentate la tăiere compoziția chimică a microvolumelor de material din stratul marginal este cu atât mai omogenă cu cât energia specifică la tăiere este mai mare ( $I_c$  mari).

i) Cercetări privind influența regimului de lucru și a factorilor R, L, C asupra formării fisurilor în procesul de tăiere al unor oțeluri rapide, oțeluri pentru matrițe și plăcuțe din carburi metalice (aliaje dure sinterizate).

În încheiere se poate aprecia că dotarea unei mașini sau instalații de tăiere cu posibilitatea reglării caracteristicilor electrice ale circuitului de lucru (R, L, C reglabile) oferă posibilitatea de optimizare a procesului tehnologic de tăiere prin eroziune complexă.

### 10.3. - Probleme de viitor

10.3.1. - Sînt necesare cercetări pentru punerea la punct a unor noi lichide de lucru care să asigure condiții mai bune desfășurării procesului de lucru, întreținerii și conservării mai bune a elementelor mașinilor de tăiere și protecției muncii. Actualmente la curenți mai mici (pînă la 300 A) se folosește soluția sticlă lichidă cu apă, iar pentru curenți mari (pînă la 1000 A) suspensie de caolin în apă.

10.3.2. - O dată cu introducerea în producție a mașinilor de tăiere prin eroziune complexă cu disc este necesar a se asigura o fabricație centrală a discurilor de tăiere cu scule corespunzătoare, dispozitive pentru tratament termic, tablă decapată etc.

10.3.3. - Este oportună elaborarea unei norme sau proiect de standard referitor la "Calitatea tăieturilor realizate prin eroziune complexă electrică-electrochimică". Clasă de calitate. Critarii de apreciere" similar cu STAS 10564-75: "Tăierea metalelor cu oxigen și plasmă. Clase de calitate ale tăieturilor" respectiv STAS 10354-75 "Defectele suprafețelor tăiate termic. Clasificare și terminologie". Se observă că standardele de mai sus sînt în curs de revizuire din 1980.

10.3.4.-S-au obținut anumite rezultate interesante, folosind sursă de alimentare redresor monofazat cu o rezistență suplimentară în punte pentru obținerea unor impulsuri inegale. Cercetările ar trebui continuate folosind noi variante de surse de alimentare cu impulsuri dirijate programate.-

NOTATII FOLOSITE IN TEXT

- a - coeficient de difuzie termică
- coeficient care depinde de aceiași factori ca și  $a_n$
- latura materialului de tăiat pătrat sau dreptunghiular atacată de electrodul disc
- $a_n$  - coeficient care depinde de materialul electrodului, de regimul de prelucrare și de alți factori care influențează eroziunea materialului
- A - greutatea atomică a elementului supus dizolvării
- b - lățimea (suprafeței prelucrate a piesei)
- B - inducție magnetică
  
- B - susceptanță ( $B = - \frac{X}{Z^2}$ )
- c - căldura specifică
- C - capacitatea condensatorului
- C - cantitatea de electricitate ( $C = I \cdot t$ )
- d - diametrul materialului de tăiat
- D - diametru
- $D_d$  - diametrul exterior al discului de tăiere
- $D_i$  - diametrul interior al discului de tăiere
- e - încărcarea electronului ( $1,6 \cdot 10^{-19}$  coulombi)
- ED - electrod disc
- $E_c$  - energia acumulată în condensator
- $E_s$  - intensitatea câmpului electric între electrozi
- f - frecvența
- F - constanta lui Faraday ( $96.496$  coulombi)
- F - suprafața secțiunii electrodului sculă
- $F_c$  - suprafața calculată
- G - conductanță ( $G = \frac{1}{R}$ )
- h - adâncimea (de tăiere, de topire, de perforare etc)
- H - intensitatea câmpului magnetic
- $i_r$  - curentul din rotorul motorului

- I** - intensitatea curentului
- I<sub>in</sub>** - intensitatea curentului de încărcare
- I<sub>ef</sub>** - valoarea efectivă a curentului
- I<sub>d</sub>** - intensitatea curentului de descărcare
- I<sub>im</sub>** - intensitatea curentului de impuls
- I<sub>l</sub>** - intensitatea curentului de lucru
- I<sub>n</sub>** - intensitatea curentului nominal
- I<sub>m</sub>** - intensitatea medie a curentului
- I<sub>max</sub>** - intensitatea curentului maxim
- I<sub>min</sub>** - intensitatea curentului minim
- I<sub>opt</sub>** - intensitatea optimă a curentului
- I<sub>0</sub>** - intensitatea curentului la mers în gol
- I<sub>1</sub>** - curentul în înfășurarea primară a unui transformator
- I<sub>2</sub>** - curentul în înfășurarea secundară a unui transformator
- j** - densitatea de curent
- K<sub>1</sub>, K<sub>2</sub>, etc** - constante
- K** - coeficient electrochimic al substanței - cantitatea de metal dizolvată la anod la trecerea unui curent de 1 A timp de 1 s, adică 1 C
- K<sub>B</sub>** - constante lui Boltzmann
- K<sub>d</sub>** - coeficient de participare al componentei de dizolvare la erodarea materialului
- l** - lungimea arcului de contact electrod disc piesă
- L** - inductivitate proprie (sinonim: inductanță proprie)
- L<sub>cd</sub>** - inductivitatea circuitului de descărcare
- m** - masa particulei
- medulul soluției apoase de silicat de sodiu

$$m = K \frac{\text{SiO}_2}{\text{Na}_2\text{O}}$$



- $M_t$  - cantitatea de material adus în stare ionică ca urmare a acțiunii electrochimice a curentului
- $M$  - masa totală de material erodat din anod în unitate de timp
- $M_{be}$  - cantitatea de material erodată datorită bombardamentului electronic
- $M_{da}$  - cantitatea de material erodată datorită dizolvării anodice
- $M_j$  - cantitatea de material prelevată datorită efectului Joule Lenz
- $M_s$  - momentul static pe arborele motorului reglat
- $n$  - turația motorului
- $p$  - presiunea dintre electrozi
- $P$  - putere
- $P_c$  - puterea de ieșire
- $P_i$  - puterea de intrare
- $P_{max}$  - puterea maximală
- $P_n$  - puterea nominală
- $P_m$  - puterea electrică medie specifică introdusă în spațiul de lucru
- $P_{ef}$  - puterea efectivă
- $P_s$  - puterea electrică medie specifică introdusă în spațiul de lucru
- $O$  - obiectul de prelucrat
- $r_r$  - rezistența electrică a rotorului motorului
- $R$  - rezistența electrică
- $R_s = R(t)$  - rezistență variabilă aleatoare funcție de timp
- $R_{oe} = R_e(t)$  - rezistență echivalentă variabilă în timp
- $R_z$  - mărimea asperităților
- $h_s$  - rugozitatea suprafeței determinată static din lo măsurători
- $s$  - interstițiul dintre electrozi
- $s_e$  - interstițiul electric

- $s_g$  - interstițiul geometric
- $s_r$  - interstițiul rezultat
- $S$  - suprafața
- $S_a$  - suprafața anodului
- $S_{ai}$  - suprafața activă de interacțiune
- $S_c$  - suprafața catodului
- $S_p$  - secțiunea piesei
- $S_{pr}$  - suprafața prelucrabilă
- $S_{ti}$  - suprafața teoretică de interacțiune
- $S_t$  - secțiunea transversală a obiectului
- $S_{dm}$  - variația suprafeței debitate
- $t$  - timpul în s, min
- $t_o$  - perioada de întrerupere a procesului electric
- $t_i$  - durata unui impuls
- $t_d$  - perioada de descărcări electrice
- $t_{inc}$  - timpul de încărcare al bateriei de condensatoare
- $t_k$  - perioada de scurtcircuit
- $t_t$  - timpul de tăiere
- $T$  - temperatura absolută ( $^{\circ}K$ )
- $T_f$  - temperatura de fierbere
- $T_t$  - temperatura de topire
- $U$  - tensiunea
- $U_a$  - tensiunea în spațiul de lucru de tăiere
- $U_e$  - tensiunea dintre electrozi
- $U_m$  - tensiunea medie pe electrozi
- $U_o$  - tensiunea sursei la mers în gol
- $U_n$  - tensiunea nominală
- $U_r$  - tensiunea la rotor
- $U_{st}$  - tensiunea de străpungere
- $U_s$  - tensiunea sursei

- $U_{sem}$  - tensiunea semnalului
- $v_a$  - viteza liniară de prelevare a metalului pe anod  
- volumul asperității
- $v_{ae}$  - viteza de avans a sculei electrod
- $v_c$  - viteza liniară de prelevare a metalului de pe catod
- $v_e$  - viteza liniară totală de prelevare a metalului de pe electrozi
- $v_r$  - viteza relativă între electrod sculă și piesă supusă eroziunii (electrod-obiect)
- $v_t$  - viteza de tăiere
- $V$  - volumul de material prelevat
- $w$  - energia
- $w_a$  - energia arcului electric
- $w_i$  - energia impulsului
- $w_c$  - energia înmagazinată în condensatoare
- $w_M$  - energia electrică medie introdusă în spațiul de lucru în Joule
- $x$  - reactanță
- $z$  - impedanța
- $z_e$  - impedanța echivalentă
- $Q_s$  - cantitatea de material erodat ca urmare a acțiunii termice a descărcărilor electrice
- $Q_t$  - cantitatea totală de material erodat în unitate de timp
- $Q$  - productivitatea erodării
- $Q$  - intensitatea unei surse termice
- $Q_1$  - căldura dezvoltată ca urmare a rușurilor și microcontacte la nivelul asperităților
- $Q_2$  - căldura datorată unor descărcări parazitare
- $\alpha$  - coeficient de temperatură
- $\alpha_1, \alpha_2$  - constante

- $\gamma_a$  - mărimea eroziunii anodului  
 $\gamma_c$  - mărimea eroziunii catodului  
 $\gamma_s$  - densitatea lichidului de lucru  
 $\delta$  - grosimea stratului modificat  
 $\delta_m$  - grosimea materialului  
 $\epsilon$  - constantă dielectrică  
 $\epsilon_d$  - amplitudinea deformației  
 $\eta$  - randamentul  
 $\eta_{em}$  - randamentul electromecanic  
 $\lambda$  - lungimea de undă  
 $\lambda_{ct}$  - coeficient de conductibilitate termică  
 $\rho$  - rezistivitate  
 $T_m$  - temperatura de topire a materialului obiectului  
 $\omega$  - viteză unghiulară  
 $\Phi$  - fluxul magnetic  
 $\Delta s$  - variația interstițiului dintre electrozi  
 $\Delta s_c$  - variația interstițiului datorită eroziunii catodului  
 $\Delta s_a$  - variația interstițiului datorită eroziunii anodului  
 $\Delta U_{RR}$  - căderea de tensiune în bobina de self  
 $\Delta U_{RB}$  - căderea de tensiune în rezistența de balast  
 $\theta$  - momentul de inerție pe arborele motor

#### PRESCURTARI FOLOSITE IN TEXT

- SL - spațiul de lucru  
 $SL_e$  - spațiu de lucru elementar  
SAR - sisteme automate de reglare  
SCSL - sistemul energetic sursă-circuit-spațiu de lucru

B I B L I O G R A F I E

- Directivale Congresului al XII-lea al Partidului Comunist Român cu privire la dezvoltarea economică-socială a României în cincinul 1981-1985 și orientările de perspectivă până în 1990, București, Editura Politică, 1979
- Programul PCR de dezvoltare a societății socialiste multilateral dezvoltate și înaintare a României spre comunism, București, Editura Politică, 1975
- Programul directivă de cercetare științifică, dezvoltare tehnologică și de introducere a progresului tehnic în perioada 1981-1990 și direcțiile principale până în anul 2000, Editura Politică, 1979
- Ceaușescu Nicolae, Raport la cel de al XII-lea Congres al Partidului Comunist Român, București, Editura Politică, 1979
- Ceaușescu Nicolae, Expunere la Congresul Consiliilor oamenilor muncii din industrie, construcții și transporturi, București, Editura Politică, iunie 1977
- Ceaușescu Nicolae, Cuvântare la consfătuirea cu cadrele de conducere din industrie, construcții, transporturi și agricultură, București, Editura Politică, Martie, 1979
- Ceaușescu Nicolae, Cuvântare la Plenara Comuna a CC al PCR și Consiliului suprem al dezvoltării economice și sociale a României, București, Editura politică, iulie, 1979
- 1) Beschbacher, W., O nouă metodă de prelucrare a materialelor dure și fragile, Schweizer Maschinenmarkt, 70, 1970, nr.21, Elveția
- 2) Bonales Anthony, Electrical Discharge Machining for the Precision Spark Erosion of Metals, The Western Electric Engineer, Jan.1965, vol.IX, nr.1, New York

- 3) Brindeu, L., Vibrații. Mecanica analitică. Vibrații mecanice, IPT, Timișoara, 1979
- 4) Burg, H., Procedeele de prelucrare electrochimică în producție, Maschinenmarkt, RFG, vol.78, nr.31, 1972
- 5) Busseck, V., Elektrolytischen Schleifen von Hartmetallen unter Anwendung verschiedener Elektrolyte, Fertigungstechnik u.Betr., RDG, 17 nr.9, 1967
- 6) Casatini, E., Prelucrarea electrochimică, un procedeu de viitor, Schweizer Maschinenmarkt, Elveția, vol.72, nr.30, 1972
- 7) Constantinescu, Glumbovici, Militaru, Prelucrarea datelor experimentale cu calculatoare numerice, E.T., București, 1980
- 8) Cornely, H., ș.s., Prelucrarea prin eroziune electrochimică și delimitarea acestora de procedeele de așchiere. Probleme practice de electroeroziune, culegeri de material documentar, I.D.T., 1968, traducere din Industrie Anzeiger, nr.69, 1965
- 9) Crișan, I., Tehnologia ca sistem, Editura științifică și enciclopedică, București, 1980
- 10) Dagenhardt, H., Kurr, R., Praxis der funkenerosiven und elektrochemischen bearbeitung, Industrie Anzeiger 92 (1970), nr.79, R.F.G.
- 11) De marr, A.E., Oliver, D.A., Elektrohimicheska ia obrabotka, Moskva, Maginostroenie, 1973
- 12) Dumpe, V.E., Razsirenje tehnologhiceskih vezmojnosti elektroerozionih stancov, Maginostroitel, 4/1969
- 13) Egorov, K.V., Bazele teoriei reglării automate, Izd.knerghia, 1967
- 14) Egerov, A.M., Karcin, G.V., Zur Ermittlung der optimalen Betriebsdaten für die elektrochemische Bearbeitung, Maschinenbau, RDG, 16, nr.10, oct.1967

- 15) Falniță, E., Studiul prelucrării prin eroziune electrochimică cu depasivizare abrazivă a suprafețelor de revoluție din aliaje extradure, Teză de doctorat, 1980, IPTV Timișoara
- 16) Falniță, E., Teoria fenomenelor electrochimice la prelucrarea cu depasivizare abrazivă, 1973, Referat
- 17) Funk, W., Die funkenerosive Metallbearbeitung mit elektrischen Entladungen kleiner Energie und kurzer Dauer, Teză de doctorat, 1968, R.F.G.
- 18) Gafițanu, M., Meticaru, V., Focsa, V., Băboresch, L., Vibrații și zgomote. Editura Junimea, Iași, 1980
- 19) Gaisser, H., Versuche und Beobachtungen an Funkenrodiernmaschinen, Werkstattstechnik, RFG, 60, nr.10, 1970
- 20) Gales Dumitru, Prelucrarea prin electroeroziune a matrițelor și stanțelor. Experiința întreprinderii de unelte și scule, Brașov București, Institutul central de documentare tehnică, 1968
- 21) Gavrilag, I., Ciuculeanu, L., Prelucrarea electrochimică cu generatoare de sudură CS350 și CS500, Construcția de mașini, RSR, 26 (1974) nr.7/8
- 22) Gavrilag, I., g.s., Prelucrări electrice în construcția de mașini, Editura tehnică, București, 1968
- 23) Gavrilag, I., Marinescu M.I., Prelucrarea prin electroeroziune și electrochimie abrazivă, Editura Tehnică, 1980, București
- 24) George E. Dieter Jr., Metalurgie mecanică, Editura Tehnică, București, 1970, (traducere din limba engleză SUA)
- 25) Golovcev, V.A., Petrov, B.I., Filimonov, V.G., g.s., Elektrochimicheskaia razmernais obrobotka detalei slojnoi formi, Moskva Izd. Mashinostroenie, 1969
- 26) Gteziterand, L., Prelucrarea electrochimică, La Machine outil française, 37(1963) nr.240, p.121, 123, 125
- 27) Gusev, N.V., Anodno mehanicheskaia obrobotka met.lov, Maghiz, 1962

- 28) Gatchin, B.I., Avtomatizatsiia elektroirozicnih stancov, Izdatelstvo, Mashinostroenie, Leningrad, 1971
- 29) Gatchin, B.I., Avtomatizatsiia elektroiščrovih anodnomenhaniceskih stancov, M.L.Magghiz, 1952
- 30) Hargcovici P., Metale dure, Editura Tehnică, București, 1970
- 31) Hortopan, G., Aparate electrice, E.D.P., București, 1967
- 32) Ilie, I.A., Nerejin, V.K., Elektroščrovoi sposob obrabotchi metalov, Oboronghiz, 1952
- 33) Isakian, R.A., Influența diferiților factori asupra rugozității la prelucrarea prin scintei. Tehnologhia i organizația proizvodstva (1970) nr.1, URSS
- 34) Ivan Mîrcea, Rusen Gligor, Studiul principalilor parametri ai prelucrării electrolitice, Construcția de Mașini, RSR, 1971 nr.11
- 35) Ivanov G.P., Durificarea prin scintei electrice, ET, 1963
- 36) Ivanov, G.P., Tehnologhia elektroščrovogo uprocinešiiia instrumentov i detalei mașin, Magghiz, 1961
- 37) Kain, J., Prelucrarea prin procedee electrochimice, Machine outil fran.aise 35 (1970) nr.205, Franța
- 38) Kain J., Usinage electrochimique (problems actuels), La machine outil française 35 (1970) nr.205, Franța
- 39) Kaniencov, A.P., Anodnomenhaniceskie obrabotka kalendrovih valov Mashinostroitel 3/1969
- 40) Kamingham B., Vvedenie v teoriu nelineinîh sistem, Izd.Gosudarstvennoe energheticescoe, Moskva, 1962
- 41) Karasic, G.A., Kosolapov, I.I., Construirovanie anodno mehaniceskih stoznih i zatocinîh stancov, Magghiz, 1951
- 42) Karasic G.A., g.s., Construirovanie anodno mehaniceskih stancov, Magghiz, Moskva 1961



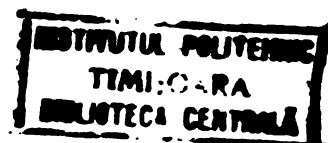
- 43) Kawafune, K., Efectul parametrilor tehnologiei de prelucrare electrochimică asupra interstițiului de lucru, Annals of the CIRP, vol.18 (1970) nr.2, Anglia
- 44) Kelso, T.D., Prelucrarea prin electroeroziune, In the tool de manuf.engineer, vol.63 (1969) nr.5, SUA
- 45) Klaupetkii, V.A., Eroțkaia, I.Iu., Elektrodi instrumenti dlea elektrohimičeskoj obrabotki tentrovih otverstu, Stanki i instrument, UTSS (1975) nr.7
- 46) Konev, Iu.I., Peluprovodnicovie triodi v avtomatice, M.Ed., Sovetscoe Radio, 1970
- 47) Konig, W., Pahl, D., Precizia și condițiile optime de lucru la prelucrarea electrochimică, Annals of the CIRP, vol.18 (1970) nr.2, Anglia
- 48) Kosmacev, I.G., Krifjanovschii, P.S., Klincecov P.D., Andno mehaniceskoe zatacivanie tverdosplavnogo instrumenta, Maghiz, 1952
- 49) Kosmacev, I.G., Obrabotka metalov anodnomehanicescem sposobom, Maghiz, 1961
- 50) Kosolepov, I.I., Kosmacev I.B., Vianitchi A.L., Rabota na anodno mehaniceskih zatacivnih staneah, Maghiz, 1952
- 51) Kruglov A.I., Kruglova S.K., Necotorie svedeniia o mehanizme razveada pri electroiscrovom razvezanii metalov, Problemi electričeskoj obrabotchi materialov, Izd.Acad.Nauc, SSSR, Moscova, 1962
- 52) Kubeth, H., Progrese in domeniul dincirii electrochimice, Werkstatt und Betrieb RFG, vol.104, nr.3, 1971
- 53) Kurcenco, V.I., Electroerozionia i electrochimicescaia obrabotka metalov, Maginostroenie, 1967
- 54) Kurr, A., Repartizarea energiei impulsurilor la prelucrarea prin electroeroziune, Industria Anzeiger, RFG, vol.93, nr.54, iun.1971
- 55) Lang, W., Introducere in prelucrarea prin electroeroziune, La machine moderne, vol.63 (1969) nr.728. Franța

- 56) Lang, W., Introducere în prelucrarea prin electroeroziune, partea a II-a, Machine moderne, vol.64 (1970)
- 57) Lerner, A., Ia., Vedenie i teoriiu avtomaticescogo regulirovaniia, Magghiz, 1958
- 58) Levinson, E.M., Vladimirov, E.N., Electroisrovoe ustanovchi, M.L.Magghiz, 1951
- 59) Levinson, E.M., Electrovigateli regulator dlea electroisrovei obrabotchi, Informatsionii tehniceshii listoc, nr.33/429, LONTP 1952
- 60) Levinson, E.M., Lev, V.S., Electroisrovoe oborudovanie, Mashinostroenie, 1965, Moscova
- 61) Livsiț, A.L., Fiziceshie osnovi avtomaticescogo regulirovaniia protese electriimpulsnoi obrabotchi. Fiziceshie protesi pri electroiroznoi obrabotche metalov, M.ENIMS, 1967
- 62) Livsiț, A.L., ș.a., Electroimpulsnaia obrabotka metalov, Moskva, Izd.Mashinostroenie, 1967
- 63) Livsiț, A.L., Mecanismul procesului de prelucrare prin eroziune electrică a metalelor, Traducere din Stanki i instrument, nr.9/1967
- 64) Mercuriev, A.M., ș.a., Necotorie obobenosti sovmeșceonoi electrohimicescoi i electroerozionoi obrabotchi materialov, Elektronnaia obrabotka materialov, nr.3/1969
- 65) Mocișlova, G.L., Vliianie mikrostructuri stali na obrabotivae-most electrohimiceskih metodov, Vestnik Mashinostroeniia, URSS, 50, (1970) nr.23
- 66) Muhanov, I., Filincaenko, V., Fiziko-mehanicescoc sostoianie pove: nostnogo sloia poale elektroiskrovoi obrabotki, Fizikohimices-kaia mehanika materialov (1970), nr.6, URSS
- 67) Nanu, A., Tehnologie materialelor, EDP, București, 1972
- 68) Nanu A., Palniț, P., Cercetări privind alegerea mediului de lu- cru la prelucrarea electrochimică abrazivă a aliajelor dure, pag.369-387, CNTN Timișoara, 1971
- 69) Nanu A., Popovici, V., Popovici, I., Posibilitatea de dirijare și optimizare a prelucrării prin eroziune complexă, pag.293-305, CNTN Timișoara, 1971

- 70) Nanu, A., Dreuceanu, A., Paulescu Gh., Utilizarea lichidelor activate cu sulf la prelucrarea prin eroziune electrică, pag. 117-128, CNTM Timișoara
- 71) Nanu, A., și colab., Manualul inginerului mecanic, Edit. tehnică, 1973, București
- 72) Nanu, A., Mărcușanu, A., Buzulică, D., Grădinaru, E., Studii și cercetări privind realizarea unui sistem de lichid dielectric pentru mașinile de prelucrat prin eroziune electrică, PROTOCOL, 1975, IPTV
- 73) Nanu, A., Popovici, V., Influența parametrilor dimensionali a electrozilor sculă și piesă asupra productivității la debitarea electroerozivă anodo-mecanică. Construcția de mașini, 6.7.1966
- 74) Nanu A., ș.a., Cercetări teoretice și experimentale asupra productivității la debitarea electroerozivă anodo-mecanică la mașina MAMB-1, Studii și cercetări științifice și tehnice, 1963
- 75) Nanu, A., Savii, Gh., Gheorghiu, St., Determinarea regimului optim pentru ascuțirea anodo-mecanică a sculelor agghiatoare din oțel rapid P-180 tratate termic la mașina 4352, Studii și cercetări, Baza Academiei, Timișoara X.2.1963
- 76) Nanu, A., ș.a., Mașina anodomecanică de tăiere cu bandă MAMB-1, Studii și cercetări științifice și tehnice, Acad. RSR, Baza din Timișoara, X/1963
- 77) Nanu, A., Falniță, L., Mirică, K., Influența ale electrolitului la pasivizarea anodică a carburilor de wolfram pentru prelucrare prin eroziune electrochimică, Construcția de mașini, 2-3, București, 1977
- 78) Nanu, A., Nichici, A., Definierea, clasificarea și caracteristicile generale ale metodelor de prelucrare dimensională prin eroziune, Standardizarea, vol.21, nr.2/1969
- 79) Nanu, A., Popovici, V., Nichici, A., Achimescu, K., Determinarea condițiilor de reglare automată a avansului la debitarea electroerozivă, Bul.IPT, tom 9/23/1964

- 80) Nanu, A., Popovici V., Cerțig, I., Studiul transformărilor structurale pe suprafețele prelucrate prin procedeul anodo-mecanic la oțelul austenitic manganos, Metalurgia, Acad.RSR, Baza Timișoara, Tom.I, 1970
- 81) Nanu, A., Popovici, V., Nichici, A., Cercetări teoretice și experimentale asupra debitării metalelor prin procedeul electroerosiv anodo-mecanic, Bul.I.P.Iași, serie nou, Tom XII (XVI) fasc.4-5/1966
- 82) Nanu Dan, Considerații asupra funcțiilor sistemului de lichid dielectric al mașinilor de prelucrare dimensională prin eroziune electrică, Construcția de mașini 2-3, București, 1977
- 83) Herejin, V.A., Electroerozia rezrezca metalov, Oboronghis, 1954
- 84) Nichici, A., Fenomene fundamentale la prelucrarea cu scintei electrice cu electrod oscilant, Teză de doctorat, 1970, IPTVT
- 85) Nosov, A.V., Bicov, P.V., Electroerozia obrabotka metalov, K013-1953
- 86) Opitz, H., s.a., Grundlagen und Anwendung der elektrochemischen Bearbeitungsverfahren, Ann of the CIRP, Anglia 15, nr.3, aug. 1967
- 87) Oppelt, V., Osnovni tehnicni avtomaticescogo regulirovania, Gesenergeizdat, 1960
- 88) Pekin, V.B., Fiziceskoi prirode proțesa anodno-mehanicesci obrabotki, Novie metodi electricesci obrabotki materialov, Maghiz, Moscova, 1955
- 89) Pfau, J., Procedee de prelucrare electrochimică, Schweizer Maschinenmarkt, Elvegia, vol.71, nr.10, apr.1971
- 90) Pistauer Robert, Indicații practice pentru prelucrarea electrochimică a metalelor, Metall Verarbeitung, vol.22 (1968) nr.5
- 91) Polurayev, V., N., Kamalov, V., S., Fizikohimiceskie metodi obrabotki, Moskva, Mașinostroenie, 1973
- 92) Pope H., Simion, F.P., Prelucrarea electrochimică a metalelor. Aspecte ale procesului tehnologic de prelucrare electrochimică, Construcția de mașini, 2-3, București, 1977

- 93) Popescu, N., Studiul aplicării procesului de honuire electrochimic la prelucrarea de netezire a suprafețelor cilindrice interioare, Teză de doctorat, 1976, IPVT, Timișoara
- 94) Popilov, L., Ia., Electrotehnologia, Sudpromghiz, 1952
- 95) Popilov, L., Ia., Elektriceskie, himiko-mehaničeskie i ultrazvukovije metod obrabotki materialov, Spravočnik Mašinstroitel'sta, tom 51, cap.V, Moscova, Mașghiz, 1963
- 96) Popilov, L., Ia., Elektrofiziceskaia i elektrochimiceskaia obrabotka materialov, Mašinstroenia, Moscova, 1969
- 97) Popov, E., P., Avtomatičeskoe regulirovanie, Edit. Tehteoritdat, 1956
- 98) Popovici, C., ș.a., Redresor adaptor pentru transformatoarele de sudare tip TASM 300 și TASM 320, Comunicările conferinței de sudură și încercări de metale, septembrie 1971, Timișoara
- 99) Popovici, C., ș.a., Considerațiuni privind sursele de sudare în mediu de gaz protector, Cursuri de perfecționare în domeniul sudării, IPT, 1971
- 100) Popovici, C., Cliță, Gh., Economia de energie electrică la surse pentru sudare, Sesiunea de comunicări tehnico-stiințifice Intreprinderea Oțelul Roșu, 1978
- 101) Popovici C., Îmbunătățirea factorului de putere, Referat, IMT, 1976
- 102) Popovici C., Reglarea automată a reginilor de prelucrare prin eroziune electrochimică, Referat în cadrul pregătirii de doctorand, 1975
- 103) Popovici C., Mașini pentru tăierea oțelurilor prin eroziune electrochimică, referat în cadrul pregătirii de doctorand, 1976
- 104) Popovici C., Instalație experimentală pentru tăierea oțelurilor înalt aliate prin eroziune complexă, Referat în cadrul pregătirii de doctorand, 1977
- 105) Popovici V., ș.a., Studiul modificărilor structurale în strătul superficial la oțelurile debitate prin electroeroziune, Bul.șt. și tehnic IPT, tom 12 (26), 1987



- 106) Popovici, V., Contribuții la studiul fenomenelor fundamentale la prelucrarea prin eroziune complexă, Teză de doctorat, 1970  
IPTV Timișoara
- 107) Popovici, V., Cercetări asupra fenomenului electrochimic la prelucrarea prin eroziune complexă, CNTN, Timișoara, 1971
- 108) Popovici, V., ș.a., Cercetări privind posibilitățile de aplicare a procedurii anodo-mecanic la confecționarea sculelor complexe din carburi metalice, Protocol I și II, beneficiar întreprinderea Ambalajul Metalic Timișoara, 1974-1975, catedra TM, facultatea de mecanică, IPTV Timișoara
- 109) Popovici Vl., Ivancenco Al., Utilajele sudării electrice, Ed. didactică și pedagogică, București, 1968
- 110) Protin, G.A., Electroscrovaia obrabotoe detalei mașin, Maghiz 1956
- 111) Roman, I., Tehnologiile neconvenționale în prezent și perspectiva dezvoltării lor în viitor, Construcția de mașini, 2-3, București, 1977
- 112) Rumiantev, A.V., ș.a., Tăierea prin procedul electrochimic a pieșelor cilindrice și găurirea lor. Testnik Mașinostroenie, URSS vol.52, nr.7, 1972
- 113) Rungischi, L.Z., Prelucrarea matematică a datelor experimentale, E.T., București, 1974
- 114) Savii Gh., Mașină de prelucrat prin electroeroziune, realizată la IPT, Construcția de mașini, RSR, nr.11, 1967
- 115) Savii Gh., Nica M., Urdea G., Contribuții la studiul posibilităților de efectuare a prelucrării de netezire a suprafețelor metalice prin metoda electrolytică, Bul.șt.și tehnic al IPT, seria II, 12 (1967)
- 116) Savii Gh., Studiu asupra prelucrabilității fontelor modulare prin procedee electroerozive, Teză de doctorat, 1970, IPTV
- 117) Savii Gh., Studiu asupra condițiilor de aplicare a procedurii de tăiere anodo-mecanică la fonta nodulară, pag.315-327, CNTN Timișoara, 1971

- 118) Schumacher B., Tăierea prin electroeroziune cu electrod sîrmă, Maschinemarkt 76 (1970) nr.36, RFG
- 119) Solodkov, A.V., Kovalev, A.M., Sisteme pînia electrolitice electrolitice stankov electrolitor, Vestnik Mashinostroenia, URSS, nr.9, 1975
- 120) Stockmann, R., Regenhardt H., Die elektrochemische Feinbearbeitung von Hartmetall mit einem bipolaren Impulsgenerator, Industrie Anzeiger, RFG, 92, 1970, nr.88
- 121) Stockmann R., Dispozitiv electric pentru prelucrarea electrochimică a metalelor. Industrie Anzeiger, RFG, vol.93, nr.30, apr.1971
- 122) Suter A., Electroerosion machines. Swiss technica, Elveția, nr.2 1971
- 123) Sîntea S., Mangre M., Studii asupra suprafețelor obținute prin prelucrări electroerozive, Construcția de Mașini, București, 1977
- 124) Tabără V., Cheghes I., Obaciu Gh., Boeriu G., Acționarea electrică a mașinilor unelte, Ed.didactică și pedagogică, București, 1980
- 125) Tiustin A.P., Electroimpulsarea obrabotca kovocinih stampov i presform, Mashinostroitel 12/1969, pag.37
- 126) Tachanter Ernst, Prelucrarea prin electroeroziune a pieselor celite și a aliajelor dure, Der Industriemaster, vol.18 (1969) nr.12, RFG
- 127) Gligorici P., I., Electriceschie metodi obrabotchi V proizvodstve i eksplotatcii instrumentov, Meghiz, 1951
- 128) Gligorici P., I., Zamiatu, V., S., Electroeroziivie metodi obrabotchi metalov, Trudrezervuzdat, 1952
- 129) Zaharov, B.P., Electriceschie metodi obrabotchi metalov, Meghiz, 1952
- 130) Zettel H.D., Praxis der Funkenerosiven und elektrochemischen Bearbeitung, Werkstattstechnik (1970) nr.11, RFG

- 131) VenkataKrishnaiah C., Some aspects of elektrochemical machining, Journal of the Institution of Engineers, India, 55, 1975
- 132) Vilkev. I., S., Mehanizm protessa elektrochimiceskogo formeobrazovania, Stanki i instrument, URSS, 38, nr.9, 1967
- 133) Voronev, A.A., Elementi teorii avtomaticheskogo regulirovaniia M.Voenizdat, 1954
- 134) Walsch Günter, Funkenerozive und elektrochemische Bearbeitung Maschinenmarkt 76 (1970) nr.101, RFG
- 135) Wassiljew, W.S., Stadiul de dezvoltare și tendințele de dezvoltare ale procedului de prelucrare prin electroeroziune, Schweizer Maschinenmarkt, Elveția, vol.71, nr.8, 1971
- 136) Weiss Helmut, Entwicklungrichtungen im Werkzeugmaschinenbau Elektrolytische Bearbeitungsmaschinen, VDI-Z, RFG, 109 nr.34, 1967
- 137) Wolosewicz R.M., Electroliți pentru prelucrarea electrochimică, American Machinist vol.114 (1970) nr.14, SUA
- 138) Wolosewicz R.M., Electroliți pentru prelucrarea electrochimică, American Machinist vol.114 (1970) nr.15, SUA
- 139) x x x Freze verticale transformate în mașini pentru prelucrarea prin electroeroziune, Machinery, SUA, V74, nr.11, 1968
- 140) x x x Metode noi de prelucrare electroerozive și electrochimice nr.2(14), 1970
- 141) x x x Languelin-Ryder, Spark erosion, Machine model SELEROMAT B1 NU 2A - prospect
- 142) x x x Komplete Funkenerosionsmaschine, Werkstatt und Betrieb RFG, 108 (1975) nr.10
- 143) x x x Extinderea procedeeilor de prelucrare electrică. Culegere de traduceri, București, F.E., 1971, Institutul central de documentare tehnică
- 144) x x x Prelucrarea chimică și electrochimică a metalelor București, I.D.T., 1970 (culegere de traduceri)



- 145) x x x Tehnologii neconvenționale în prelucrarea metalelor, CNTN, Timișoara, 1971
- 146) x x x Problemi electriceșcoi obrabotchi materialov, Editura Academiei de științe, URSS, Moscova, 1962
- 147) x x x Tehnologhia i oborudovanielles electroerozicnoi obrabotchi Maginostroital 4/1969
- 148) x x x Novie metodi raboti, KOLZ, 1949
- 149) x x x Iz opita novatorov i stehnovțev instrumentaligicov leningradskih zavodov, Maghiz, 1951
- 150) x x x Electrotermicoșcia obrabotca i electroșcovoie uprocine-mie detaiei, Maghiz, 1958
- 151) x.x x Industrie Anzeiger, nr.31, vol.14, 1972, RFG
- 152) x x x Probleme practice de electroeroziune. Culegere de mate-rial documentar, București, f.e. 1968, IDF
- 153) x x x Prelucrarea metalelor prin electroeroziune, culegere de traduceri, București, 1971, 1970
- 154) x x x Maschinen für die elektroerosive und die elektrochemische Bearbeitung, Industrie Anzeiger, 89 (1967)
- 155) x x x Mașini de prelucrat electroerozive, Elektrizitätsverwertung Elveția, vol.145, nr.11 nov.1970
- 156) x x x Hoch electrochemical machining, American Machine, SUA, 111, nr.22, 23 oct.1967
- 157) x x x ECM has become easier to apply with new machinability Iron Age Metallworking internat, Glance 7, nr.2, febr.1968
- 158) x x x Mașina de tip nou pentru prelucrarea electrochimică a me-talelor, Tooling and Production, vol.112 (1963) nr.4
- 159) x x x Mașina de tip nou pentru prelucrarea electrochimică a metalelor (ECM), Tooling and Production vol.112 (1963) nr.4
- 160) x x x Mașini pentru prelucrarea prin electroeroziune EM și electrochimică (ECM), Metalworking Production, vol.12 (1968) nr.5

- 161) x x x Servomecanisme electromecanice pentru prelucrat prin electroeroziune, Metalworking Production, vol.12 (1968), nr.305
- 162) x x x Prelucrarea electrochimică a metalelor, Industrie Anzeiger, RFG, vol.94, nr.18, 18, 1972
- 163) x x x Procedee de prelucrare electrochimice în tehnica producției, Werkstattstechnik, RFG, vol.62, nr.7, 1972
- 164) x x x Mașina de prelucrare prin electroeroziune produsă de firma Cincinatti, Canadian Machinery and Metalworking, vol.79 (1968) nr.7
- 165) x x x Mașini de prelucrat prin descărcări electrice mai eficiente și mai sigure. Canadian Metalworking Machine Production vol.31 (1968)
- 166) x x x Mașini de rectificat electrochimic (ECH), American Machinist, 112, 1968
- 167) Mașini unelte pentru prelucrarea prin electroeroziune (EOM) cu caracteristici îmbunătățite, American Machinist, 112, 1968
- 168) x x x Prelucrarea chimică, Design and Components in Engineering vol.9, 1968, nr.17
- 169) x x x Prelucrarea electrochimică, Canadian Metalworking, Machine Production, vol.39, 1968, nr.8
- 170) x x x Probleme practice de electroeroziune, Culegere a material documentar, București, IDT, 1968
- 171) x x x Electrobandsawing of space age metals, Machinery SUA, 74, nr.5, ian.1968 (Fierăstrău cu bandă care taie prin electroeroziune)
- 172) x x x Tăierea metalelor dure cu un fierăstrău cu bandă prin electroeroziune, Machinery 74, 1968, nr.5 (tradus în caiet selectiv Mașini unelte și prelucrarea metalelor, 1968/12)
- 173) x x x Prelucrarea electrochimică a metalelor, Steel, vol.163 (1968 nr.12)

- 174) x x x Prelucrarea chimică și electrochimică a metalelor  
București, I.P.T., 1970 (culegeri și traduceri)
- 175) x x x Elektrochemical machining. A basic definition and a  
consideration of the problems involved. Brit.Machine Tool  
Eng., Anglia, 49, nr.2, 1967
- 176) Prospecte: Charmilles Elveția (D15, ECMI-1200, ECMI-3000)  
Mașina NIA-31 URSS  
Hahn Kolb Stuttgart RFG (Model E 1500 și E 150)  
Strojexport CSR (VJK-3 și VJK-2)  
Technoimpex Ungarn-Budapest (EROSIMAT-C)  
Technik Stokvis France (VIBR'ARC)
- 177) Ivancenco Al., Studii și cercetări asupra încălzirii piese-  
lor cu vibrație și aplicații industriale ale procedurii,  
Teza de doctorat, 1974
- 178) Zolotih V.T., Gufan R.M., Dimgherov N.G., Ișcenco Iu.L.,  
Vliianie induktivnosti vtepi dughi postoiianogo loca na  
protes sverchi v srede uglechisllogo gaza, Revista Svarocinee  
proizvodstvo nr.4/1960, pag.15-18
- 179) Ișcenco Iu.L., Dimgherov N.G., O mehanizme periodiceshiih  
zamicanii dugovogo promejutca i stabilnosti pri sverche  
acrotcoi dugov, Revista varocinee proizvodstvo, nr.9/1963
- 180) Popilov L., Ia., Spravocinik po electriceshim i ultrazvuko-  
vii metodam obrabotki materialov, E.M. Maginostroenie,  
Leningrad, 1971
- 181) Makeeva T.I., Elektroscrovoe zagotovilence razrezanie  
metallov i splavov na ustanovke elektrom - 17, Problemi  
elektrocescoi obrabotki materialov, Moscova, 1962
- 182) Livința Ion, Studiul influențelor caracteristicilor electri-  
ce ale circuitului de lucru asupra caracteristicilor tehnolo-  
gice la debitarea plăcuțelor din carburi metalice prin  
eroziune complexă electric-electrochimică, Proiect de diplomă  
IPTVT, Facultatea de mecanică, 1979
- 183) Trușculescu M., Tache Ana Maria, Miteles Ioan, Budău Victor,  
Studiul metalelor. Tehnici de laborator, E.F. Ecda, 1977