

UNIVERSITATEA "POLITEHNICA" DIN TIMIȘOARA
Facultatea de Mecanică

Ing. LIVIU COMAN

*CONTRIBUȚII LA STUDIUL AMBUTISĂRII PRIN
ELECTROHIDROIMPULSURI A PIESELOR CU
FORME DE REVOLUȚIE*

– TEZĂ DE DOCTORAT –

BIBLIOTECA CENTRALĂ
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"
TIMIȘOARA

CONDUCĂTOR ȘTIINȚIFIC
Prof.dr.ing. **VASILE POPOVICI**

Timișoara
1996

618 477
366 A

CUPRINS

<i>Introducere</i>	3
<i>Lista principalelor simboluri utilizate</i>	4
<u>Cap.1. Realizări și tendințe în deformarea plastică la rece prin electrohidroimpulsuri</u>	5
1.1. Metode de deformare cu impulsuri de mare energie și caracteristici generale ale acestora.....	5
1.2. Posibilități tehnologice actuale ale ambutisării prin electrohidroimpulsuri și locul acesteia în cadrul celorlalte procedee de ambutisare.....	7
1.3. Bazele fizice ale ambutisării prin electrohidroimpulsuri.....	13
1.3.1. Stadiile formării canalului electroconductor ce închide spațiul de descărcare dintre electrozi.....	16
1.3.2. Caracteristici energetice ale canalului de descărcare.....	19
1.3.3. Caracteristici electrice ale canalului de descărcare.....	25
1.3.4. Cazul amorsării cu fir exploziv.....	29
1.3.5. Generarea și propagarea undei de șoc prin mediul de transmitere.....	31
1.3.6. Interacțiunea undei de șoc cu pereții camerei de descărcare.....	35
1.3.7. Interacțiunea undei de șoc și a fenomenelor secundare cu semifabricatul.....	39
1.3.8. Unele aspecte privind deformarea prin impulsuri purtătoare de mari energii.....	49
1.3.9. Influența unor factori asupra parametrilor impulsurilor de presiune dezvoltate de explozia electrohidraulică.....	60
<u>Cap.2. Obiectivele tezei de doctorat</u>	67
<u>Cap.3. Aparatura pentru cercetări experimentale</u>	70
3.1. Generatorul de impulsuri de înaltă tensiune.....	70
3.2. Camera universală de descărcare.....	74
3.3. Captoarele de presiune și sistemul de susținere și reglare al acestora.....	81

3.4. Pregătirea semifabricatelor.....	88
Cap.4. Studii teoretice și cercetări experimentale.....	89
4.1. Cercetări experimentale privind influența unor parametri asupra modului, gradului de deformare și adâncimii maxime de ambutisare, la prelucrarea mono și multiimpuls, la descărcarea cu străpungerea directă a spațiului de lichid.....	89
4.1.1. Prelucrarea în regim monoimpuls.....	89
4.1.2. Prelucrarea în regim multiimpuls.....	96
4.2. Studii teoretice și cercetări experimentale privind determinarea presiunii în camera de descărcare.....	102
4.2.1. Studii teoretice și cercetări experimentale privind parametrii electrici ai circuitului de descărcare.....	102
4.2.2. Determinarea presiunii în camera de descărcare.....	111
4.3. Studii teoretice și cercetări experimentale privind distribuția de presiune pe suprafața semifabricatului.....	120
4.4. Determinarea legăturii dintre presiune și adâncimea de ambutisare. Determinarea profilului piesei ambutisate.....	126
4.5. Schema logică a programului de simulare a desfășurării procesului de ambutisare.....	132
4.6. Influența diferiților factori asupra presiunii dezvoltate în camera de descărcare cilindrică.....	135
4.7. Principii de bază privind modelarea procesului de ambutisare a pieselor cu forme de revoluție prin electrohidroimpulsuri.....	147
Cap.5. Concluzii finale. Contribuții personale.....	153
Bibliografie.....	157
Anexe.....	162

INTRODUCERE

Prezenta lucrare se constituie într-o sinteză a studiilor teoretice și cercetărilor experimentale efectuate de autor în domeniul deformării plastice la rece cu ajutorul electrohidroimpulsurilor, având în vedere că procedeele de deformare bazate pe tehnica impulsurilor purtătoare de mari energii se utilizează pe o scară din ce în ce mai largă, datorită avantajelor pe care le oferă.

Teza de doctorat elaborată își propune să contribuie, prin studiile teoretice și cercetările experimentale conținute, la analiza globală a modului de desfășurare a procesului de ambutisare prin electrohidroimpulsuri a pieselor cu forme de revoluție, în condițiile utilizării tensiunilor înalte de descărcare (15... 45 kV). Se lărgeste astfel domeniul informațiilor accesibile referitoare la acest aspect și se oferă posibilitatea predicției și simulării procesului studiat.

Teza este structurată pe cinci capitole, dezvoltându-se pe 170 de pagini și conținând 201 relații de calcul, 167 figuri, 24 tabele și un program de calcul și simulare a procesului scris în limbajul BORLAND PASCAL 7.0. Deasemenea, sunt prezentate 110 referințe bibliografice.

Pe această cale, autorul dorește să-și exprime întreaga sa grațitudine față de toți cei care au făcut posibilă realizarea acestei lucrări și în special față de conducătorul științific, Prof dr.ing. VASILE POPOVICI, a cărui îndrumare competentă și sprijin moral s-au făcut simțite pe tot parcursul elaborării tezei.

Deasemenea, autorul mulțumește specialiștilor de la U.C.M.R. S.A. pentru sprijinul acordat în realizarea practică a instalației experimentale, precum și celor de la Institutul de Cercetare HIDEROM pentru ajutorul acordat la efectuarea experimentelor.

O mențiune specială trebuie făcută pentru cei doi colegi de profesie, Mihai Glăvan și Nicușor Neagu, fără a-l căror ajutor, realizarea acestei lucrări ar fi devenit mult mai greoaie

În final, dar nu în ultimul rând, autorul mulțumește colegilor de la Fac. de Inginerie a Universității "Eftimie Murgu" din Reșița care, prin sfaturile lor utile au contribuit și ei la finalizarea prezentei lucrări.

Reșița, la 24 septembrie 1996

AUTORUL

LISTA PRINCIPALELOR SIMBOLURI UTILIZATE

U_0 - tensiunea de încărcare a bateriei de condensatoare;
 U_c - căderea de tensiune pe bateria de condensatoare;
 C - capacitatea bateriei de condensatoare;
 C_{sd} - capacitatea spațiului de descărcare;
 L - inductanța ;
 R_{sd} - rezistența spațiului de descărcare;
 l - distanța dintre electrozi, respectiv lungimea firului de amorsare;
 h - distanța dintre axa descărcării și semifabricat;
 S_{max} - adâncimea maximă de ambutisare;
 s_i - adâncimea de ambutisare pentru raza curentă r_i ;
 $P_{u\delta}$ - presiunea undei de șoc;
 P_g - presiunea bulei de gaz;
 P_{rs} - presiunea în unda reflectată de la semifabricat;
 P_{rp} - presiunea în unda reflectată de la peretele camerei de descărcare;
 P_d - presiunea undei directe la incidență normală pe semifabricat;
 P_{rc} - presiunea în unda reflectată de la capacul camerei de descărcare;
 P_{rez} - presiunea rezultantă pe semifabricat;
 P_l - presiunea măsurată în direcție longitudinală pe axa descărcării;
 P_t - presiunea măsurată în direcție transversală pe axa descărcării;
 ρ_0 - densitatea mediului de transmitere;
 ϵ - grad relativ de deformare;

ρ_{sd} - rezistivitatea spațiului de descărcare;
 σ_{sd} - conductibilitatea electrică a spațiului de descărcare;
 ϵ_{sd} - permitivitatea spațiului de descărcare;
 r_i - raza curentă a semifabricatului;
 R - raza semifabricatului;
 r_c - raza canalului de descărcare;
 t - timp;
 T - durata primei semiperioade de oscilație a curentului;
 T_m - durata corespunzătoare atingerii valorii maxime a curentului în canalul descărcării;
 t_d - durata descărcării;
 A - caracteristica scânteii;
 E - intensitatea câmpului electric;
 I - intensitatea curentului electric;
 γ - indicele efectiv al adiabatei plasmei canalului;
 η, ψ - randamente de transformare a energiei;
 W - energie;
 W_0 - energia înmagazinată în bateria de condensatoare;
 j - impulsul specific la vaporizarea firului de amorsare;
 e - energia specifică de vaporizare;
 d - diametrul firului de amorsare;
 g - grosimea semifabricatului;
 S - suprafață;
 c_0 - viteza sunetului în mediul de transmitere;
 m - masa semifabricatului.

CAPITOLUL 1

REALIZĂRI ȘI TENDINȚE ÎN DEFORMAREA PLASTICĂ LA RECE PRIN ELECTROHIDROIMPULSURI

1.1. Metode de deformare cu impulsuri de mare energie și caracteristici generale ale acestora

După cum se știe, din punct de vedere tehnologic, în cazul folosirii tehnicii impulsurilor, s-au impus următoarele metode de deformare :

- Deformarea prin explozie. S-a impus și s-a răspândit după cel de-al doilea război mondial, în special în ultimii 35 de ani. Ținând cont de natura explozivului și de durata undei de șoc dezvoltate, se disting trei metode de deformare : cu explozivi violenți (brizanți), cu explozivi lenți (propulsori) și, ca variantă tehnică, prin detonarea unui amestec de gaze combustibile.

- Deformarea prin electrohidroimpulsuri. Are la bază efectul electrohidraulic descoperit de L.A.Iutkin și a început să fie utilizat industrial din anul 1950. Procedeu folosește ca sursă de energie descărcarea electrică de înaltă tensiune în lichid, sub formă de impuls de scurtă durată, deformarea semifabricatului producându-se fie sub acțiunea singulară a undei de șoc rezultate, fie sub acțiunea succesivă a undei de șoc și, ulterior, a fluxurilor de lichid cavitațional și postcavitațional.

- Deformarea prin impulsuri magnetice. Se bazează pe cercetările fizicianului L.Kapița din 1924, începând să fie utilizată industrial din anul 1962. Principiul constă în folosirea interacțiunii dintre două câmpuri magnetice impulsive de înaltă tensiune, unul creat prin descărcarea unei baterii de condensatoare într-o bobină - sculă iar celălalt creat în semifabricat prin efect Foucault.

- Deformarea pneumo-mecanică. Cunoscută din anul 1948, a început să fie utilizată din anul 1958. Acest procedeu utilizează energia potențială înmagazinată într-un gaz aflat sub înaltă presiune, energie care poate fi cedată, în momentul destinderii adiabatică, unui piston inclus în utilajul de presare.

Principalele caracteristici generale ale acestor metode sunt prezentate sumar în tabelul 1.1.

TABELUL 1.1.

Procedeele de deformare	Electrohidroimpulsuri		Deformare prin explozie		Amestec de gaze detonante		Impulsuri magnetice	Deformare pneumo - mecanică
	Cu fir exploziv	Cu strâpungere	Violentă		Prin combustie	Prin detonare		
			Fără contact	Cu contact				
APLICAȚII UZUALE	Umflare Ambutisare Calibrare Răsfângere Placare Lărgire Tăiere	Umflare Ambutisare Calibrare Răsfângere Placare Lărgire Tăiere	Ambutisare adâncă Placare Răsfângere Lărgire Calibrare Tăiere Sinterizare	Ambutisare adâncă Tăiere Placare Sinterizare	Ambutisare Răsfângere Calibrare Lărgire	Ambutisare Răsfângere Calibrare Lărgire	Umflare Gătuire Calibrare Fretare Reliefare	Foajare Matrișare Sinterizare Calibrare Extrudare Refulare
	3	2	5	2	2	2	1	1
DIMENSIUNI LIMITĂ (m)			Fără limite					
VITEZA UNDEI DE ȘOC (m / s)	6000	6000	1200-7500	1200-7500	300 - 2400	600 - 6000	7500	15 - 60
DURATA UNDEI VITEZA DE DEFORMARE (m / s)	μ s	μ s	μ s	μ s	ms	ms	μ s	ms
ENERGIA UZUAL ELIBERATĂ (kJ)	15 - 210	15 - 210	18 - 120	20 - 130	18 - 60	18 - 60	15 - 210	15 - 210
	150 - 200	100 - 150	6000 / 1 kg substanță ex- plozivă	6000 / 1 kg substanță ex- plozivă	mică	mică	150 - 200	700
AVANTAJ PRINCIPAL	Prelucrare ușor repro - ductibilă	Prelucrare ușor repro - ductibilă	Realizarea pieselor mari	Realizarea pieselor mari	Precizie	Precizie	Productivitate mare , realizare de piese complexe	Precizie, prelucrarea materialelor cu plas - ticitate scăzută
CONSUM ENERGETIC	mic	mic	mare	mare	mic	mic	mic	mic
COSTUL UTILAJULUI	mediu	mediu	mic	mic	mediu ; mare	mediu ; mare	mediu ; mare	mediu
COSTUL SCUDELOR	mic	mic	foarte mic	mic	mic	mic	mare	mediu
PRODUCTIVITATEA (piese / oră)	360	360	4	4	2	6 - 12	1000 - 12000	300

1.2. Posibilități tehnologice actuale ale ambutisării prin electrohidroimpulsuri și locul acesteia în cadrul celorlalte procedee de ambutisare

În tehnica modernă de prelucrare prin deformare plastică la rece a metalelor cu ajutorul impulsurilor, descărcarea electrică în lichid este unul dintre principalele mecanisme de realizare a deformării.

Sunt cunoscute la ora actuală două metode de realizare a descărcării electrice în lichid: cu străpungerea spațiului de lichid, respectiv cu utilizarea așa-zisului "*fir exploziv*" sau fuzibil, cu rol de amorțire a canalului descărcării electrice. Utilizarea uneia sau alteia dintre aceste metode este determinată de valorile caracteristice ale parametrilor circuitului electric de descărcare și, în special, de tensiunea de încărcare și capacitatea bateriei de condensatoare.

Lichidul cel mai des utilizat este apa, gradul de impurificare al acesteia jucând un rol important în desfășurarea etapei inițiale, de străpungere a spațiului de dielectric lichid (la metoda cu fir exploziv, gradul de impurificare nu are implicații majore).

Schemele de principiu consacrate în realizarea pieselor cu forme de revoluție sunt cele prezentate în figurile 1.1a și 1.1b [97, 100].

Cea mai utilizată metodă pentru realizarea operațiilor de ambutisare este cea din figura 1.1.b (aici, cu străpungerea spațiului dintre electrozi). Semnificațiile notațiilor sunt următoarele : **S** - sursă de alimentare în curent alternativ; **Tr** - transformator ridicător de tensiune; **Rd** - redresor; **C** - baterie de condensatoare (cu rol de acumulator de energie); **E** - eclator. Ambele scheme pot lucra fie cu străpungerea spațiului de lichid, fie cu amorțirea descărcării electrice prin fuzibil.

Toate elementele unei instalații de deformare prin electrohidroimpulsuri, în afară de electrozi, sunt combinate într-un agregat - generator de impulsuri de înaltă tensiune și de transmitere a acestora la electrozi, pentru realizarea lucrului mecanic de deformare. Generatoarele sunt universale și pot fi folosite în combinație cu ansambluri tehnologice cu destinație multiplă, de pildă ștanțare - mandrinare, ambutisare - calibrare, etc.

După cum se observă, cele două scheme diferă prin amplasarea axei descărcării electrice față de suprafața semifabricatului care se deformează. La prima (fig.1.1.a) axa descărcării este amplasată în interiorul semifabricatului, schema fiind utilizată în special la deformarea pieselor tubulare. Ea mai poate fi însă folosită și la efectuarea operațiilor de ambutisare, în regim multiimpuls, atunci când piesa are deja un grad oarecare de deformare, în urma mai multor impulsuri succesive.

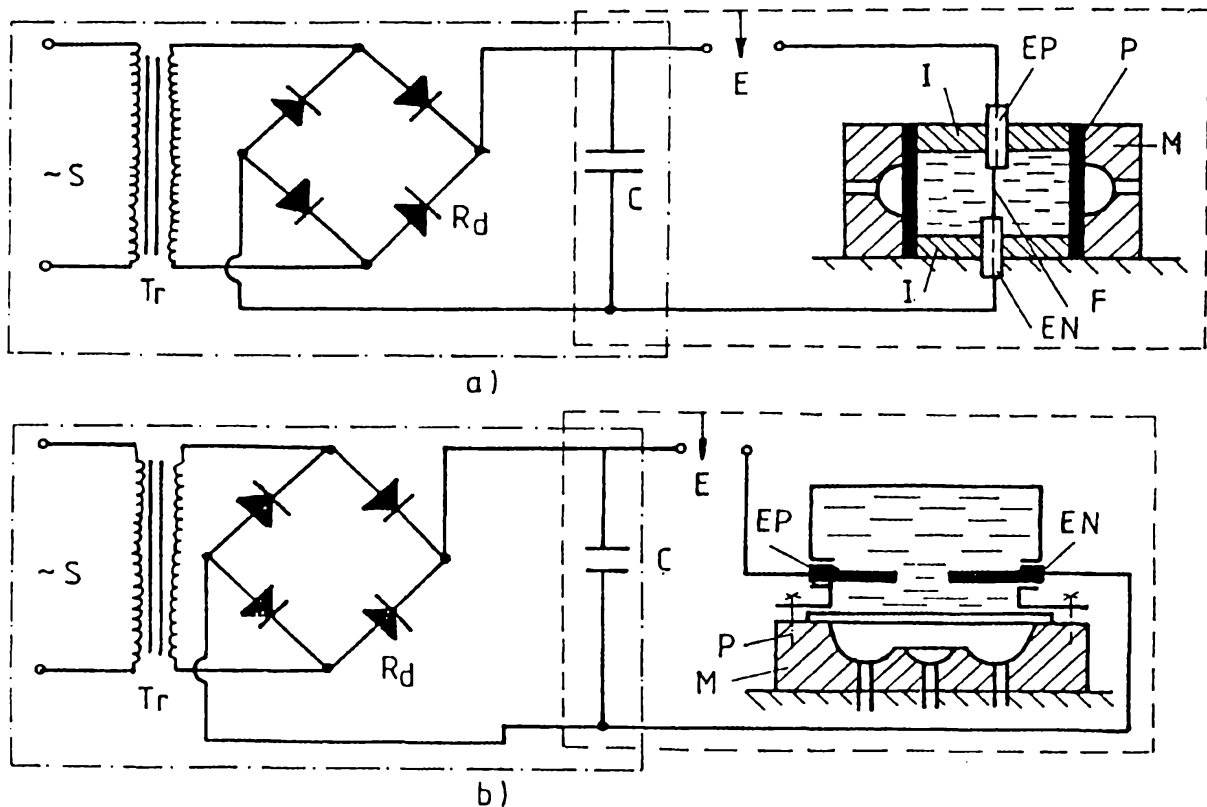


Fig.1.1. Schemele de principiu ale deformării prin electrohidroimpulsuri

Cea de-a doua schemă (fig.1.1.b), se utilizează la ambutisarea pieselor de orice formă, pornind de la semifabricate plane, în regim mono sau multiimpuls, cu adâncimi de ambutisare relativ mici. Pentru adâncimi mari de ambutisare se lucrează în regim multiimpuls, piesele cu un anumit grad de deformare obținut prin schema din figura 1.1.b, putând fi ulterior prelucrate după schema din figura 1.1.a.

Ansamblul tehnologic este principala parte a instalației, în care se desfășoară procesul de deformare, aici avînd loc transformarea energiei electrice înmagazinată în bateria de condensatoare, în energie a undei de șoc, a fluxurilor de lichid cavitațional și postcavitațional sau a bulei de gaz și, ulterior, în energia de deformare a semifabricatului supus prelucrării. El include echipamentul tehnologic, camera de descărcare cu electrozii, sistemul de alimentare cu apă și indicatorul de nivel al acesteia, agregatul hidraulic cu mecanismele de strângere și deplasare a echipamentului, etc.

O influență mare asupra eficienței de utilizare a energiei descărcării o exercită amplasarea reciprocă a camerei de descărcare și a matriței, față de semifabricatul plan supus deformării (fig.1.2.). Varianta cea mai simplă de amplasare a matriței în camera de descărcare (deschisă sau închisă) este prezentată în fig.1.2.a., fiind caracterizată printr-o eficiență destul de slabă a procesului. Variantele din fig.1.2.b. și 1.2.c. au dimensiunile camerei de descărcare minim posibile. La varianta din fig.1.2.d., camera de descărcare este amplasată în partea de jos, iar matrița se află deasupra camerei.

Acest lucru îmbunătățește condițiile de așezare a semifabricatului și de scoatere a piesei finite, permițând, deasemenea, utilizarea cu randament mai ridicat a energiei bulei de gaz.

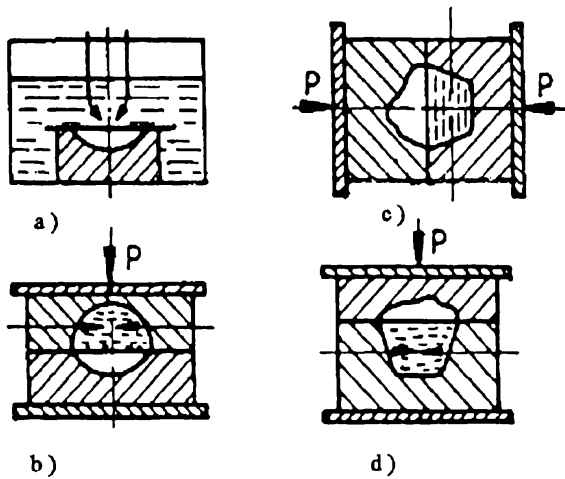


Fig.1.2. Posibilități de amplasare reciprocă a camerelor de descărcare

În funcție de criteriile constructive, schemele tip ale camerelor de descărcare pot fi clasificate conform celor prezentate în fig. 1.3.

Camerele închise sunt caracterizate de volumul mic al lichidului în comparație cu camerele deschise. Descărcarea poate avea loc între cei 2 electrozi (fig.1.4.b) sau între un electrod și semifabricat (fig. 1.4.d). Descărcarea prin inițiator poate fi realizată atât între electrozi imobili (fig.1.4.a, f), cât și prin electrod mobil (fig.1.4. e, c). Acest ultim principiu al electrodului mobil se poate păstra și pentru

descărcarea cu străpungerea directă a spațiului de descărcare.

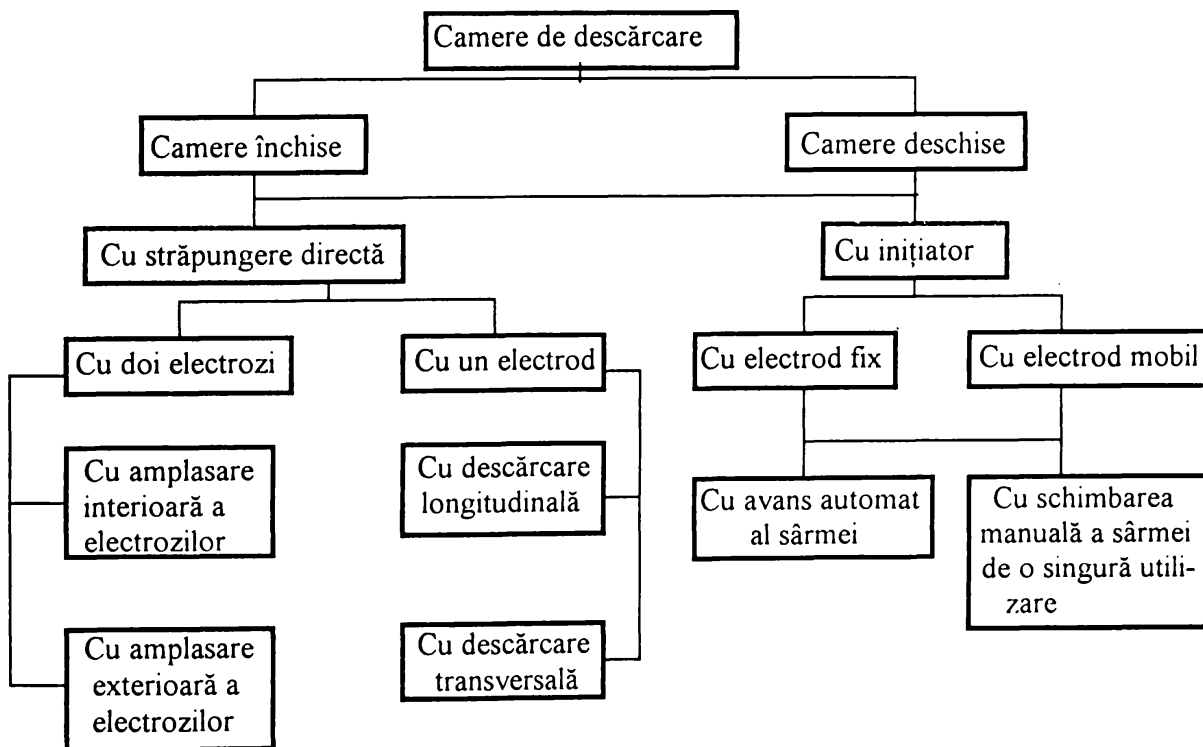
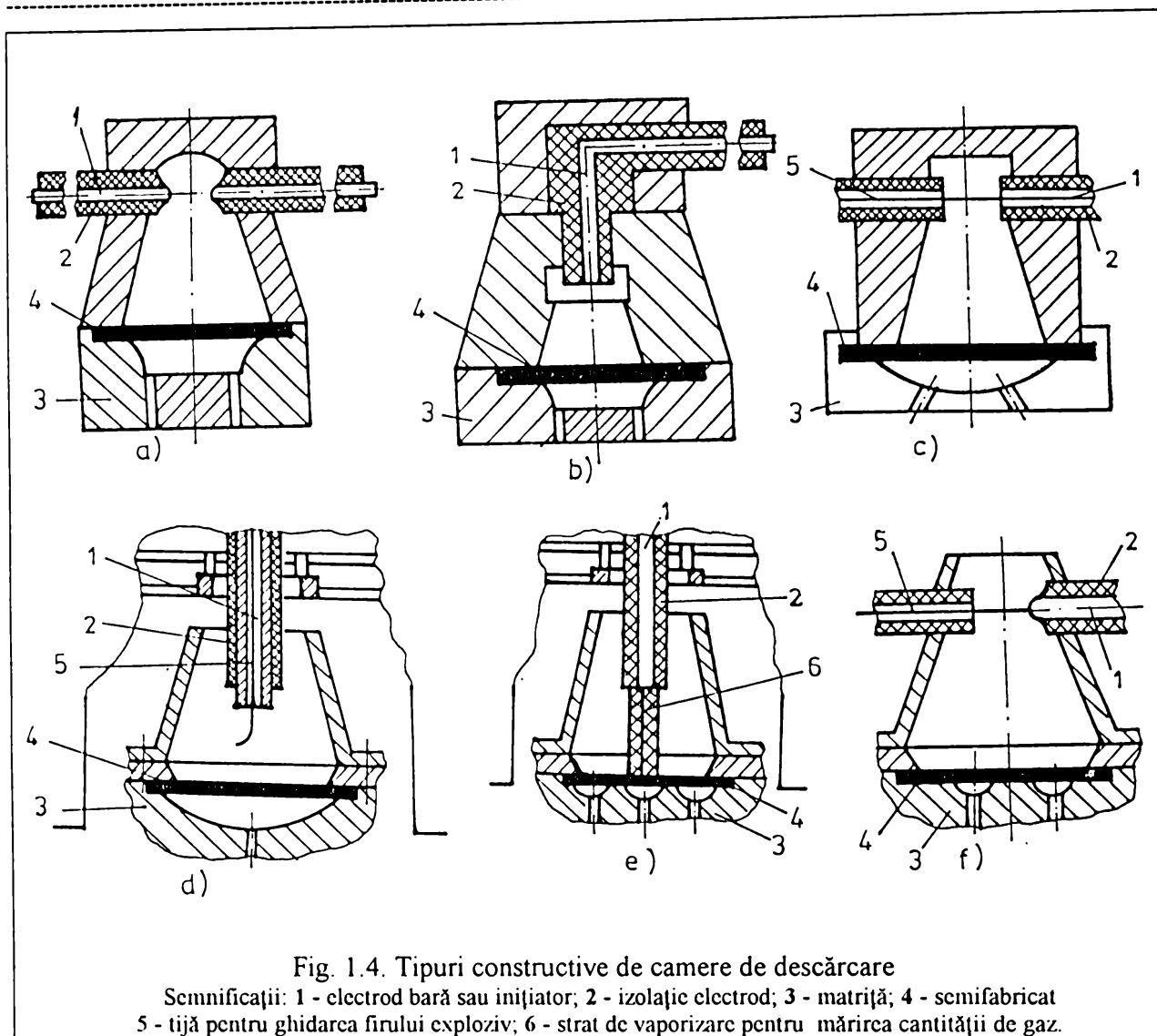


Fig.1.3. Clasificarea camerelor de descărcare

Dintre schemele de cameră închisă și electrozi fixi sau mobili, în condiții egale, o eficiență mai ridicată o asigură camera cu descărcarea paralelă cu planul semifabricatului (fig.1.4.a, b, f). În



instalațiile cu cameră închisă și străpungere prin inițiator, de cele mai multe ori este folosit electrodul mobil și se efectuează avansul automat al sârmei.

Pentru sugerarea posibilităților tehnologice oferite de deformarea prin electrohidroimpulsuri, în raport cu alte procedee de deformare ce folosesc tehnica impulsurilor purtătoare de mari energii, este prezentată diagrama din figura 1.5., corespunzătoare ambutisării unor piese semisferice, din disc plat de aluminiu [30]. Experimentele au fost efectuate utilizând diferite procedee de deformare cu impulsuri de mare energie, nivelul acestei energii fiind specific fiecărui procedeu în parte. Raportul g/D_0 s-a păstrat constant în timpul experimentelor, la valoarea 0,005, iar limitele sunt definite de : A - semisferă ($y/D_0 = 0,5$); B - calotă sferică ($y/D_0 = 0,1$).

Au fost reprezentate următoarele cazuri : 1- Ex., 453 kg RDX; 2 - Ex., 45 kg RDX; 3 - Ex., 4,5 kg RDX ; 4 - EH, 10 MJ; 5 - presă hidraulică de 7500 kN; 6 - Ex., 0,45 kg RDX; 7 - EH, 1 MJ; 8 - Ex., 0,45 kg B.S.; 9 - EM, 1 MJ; 10 - EH, 100 kJ; 11 - Ex., 0,045 kg B.S.

Semnificațiile sunt următoarele: Ex. - deformare prin explozie cu exploziv RDX sau B.S.; EH- deformare prin electrohidroimpulsuri; EM - deformare prin impulsuri magnetice.

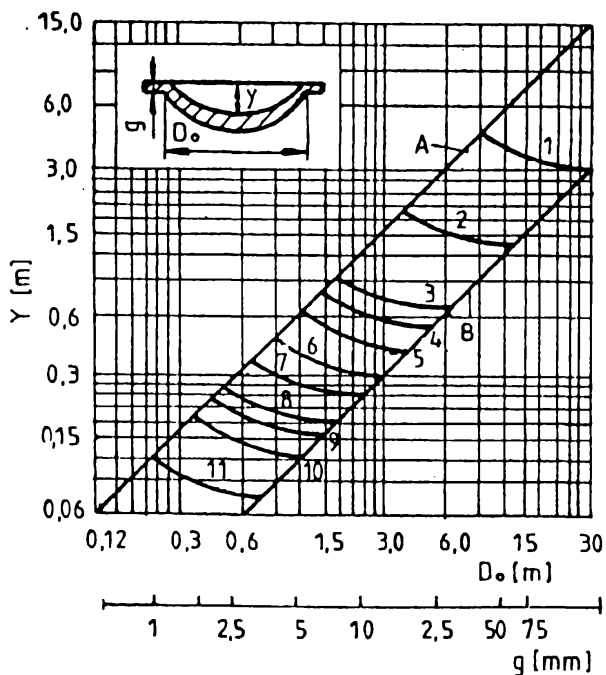


Fig. 1.5. Posibilități tehnologice la ambutisarea unui disc plat de aluminiu prin impulsuri de mare energie

energia este direct proporțională cu pătratul tensiunii. Este însă foarte dificil de realizat un condensator capabil să înmagazineze cantități mari de energie și să reziste la tensiuni înalte. Ca urmare, trebuie realizată o corelație între capacitate, tensiune și cerințele tehnologice impuse. Prin conectarea mai multor condensatoare între ele se pot realiza baterii care să stocheze valori energetice de 50 - 150 kJ și chiar mai mult.

În S.U.A. se lucrează cu două sisteme. În cazul mai simplu, tensiunile sunt de până la 5000 V și bateriile de condensatoare au capacități de aproximativ 1000...3000 μF . Instalațiile mai avantajoase din punct de vedere energetic, dar mai scumpe, lucrează cu tensiuni de 20000 V și corespunzător, capacități mici. Instalații care depășesc 30000 V ajungând până la 50000 V, se găsesc deocamdată în stadiul încercărilor, deoarece aici apar probleme deosebite de cuplare și izolare, iar costurile unor astfel de instalații sunt foarte mari. La tensiuni mari lucrează, de exemplu, instalații rusești de curățire a pieselor turnate (50 kV, 4 μF).

Din punct de vedere productiv se poate lucra cu tensiuni de 5 - 15 kV și energii de 10 - 15 kJ, în instalații care costă între 7000 - 20000 \$; durata de încărcare este sub 10 secunde, pentru a permite o producție de serie rațională.

Conform diagramei prezentate, la un nivel de energie a descărcării electrice în lichid de 100 kJ (acest nivel corespunde, de exemplu, unei tensiuni de descărcare de 20 kV, la o capacitate a bateriei de condensatoare de 500 μF , deci unei instalații de putere relativ mare), se poate obține, la un singur impuls, o semisferă cu diametrul de 400 mm (adâncime 200 mm), la o grosime a semifabricatului de 2 mm.

Energia electrică înmagazinată de un condensator se poate exprima prin relația $E = CU^2 / 2$, unde C - capacitatea, în F; U - tensiunea, în V; E - energia în W·s sau J. Din această relație rezultă că

Instalația de tip HIVOPAK (de la General Dynamics Advanced Products Div., San Diego) are o energie de 15 kJ la o tensiune de 7500 V și o capacitate de 535 μ F. Suprafața de așezare necesară este de aproximativ 2,7 m², timpul de încărcare al instalației este de 10 secunde, iar durata de descărcare de $3 \cdot 10^{-6}$ secunde. Pentru bateria de condensatoare se garantează o durată de viață de $3 \cdot 10^4$ descărcări. Tensiune de cuplare este de 110, respectiv 220 V. Această instalație costă 17500 \$ când este completă.

Compania BBC a conceput așa-zisa “ instalație megașoc “, având următoarele caracteristici tehnice:

- tensiunea de alimentare: 220 V, 50 Hz;
- puterea de instalare: 5 kW;
- tensiunea la bornele condensatoarelor: 0...20 kV;
- energia descărcării: 1,5...9 kJ;
- durata de încărcare: 6 secunde;
- curentul de încărcare: 150 mA.

Preocupări în acest domeniu au fost semnalate și la firmele “ Cincinnati Shapers ” din S.U.A., “ Vickers ” din Anglia, “ Shimadzu ” și “ Japax ” din Japonia, precum și în Rusia și Republica Bielorussiană. Astfel, în Anglia funcționează îndeosebi instalații cu energii de până la 20 kJ, firma “ Vickers ” creînd însă o serie de prese electrohidraulice cu energii de la 10 la 100 kJ. Firma “ Shimadzu ” produce o gamă de instalații cu energii de până la 45 kJ și tensiuni de până la 30 kV. Firma “ Rohr ” din S.U.A. realizează instalații cu patru nivele de energie, de la 14,4 la 57,6 kJ.

Dintre instalațiile de energii mici (cu energie de rezervă până la 45 kJ) realizate în fosta U.R.S.S., se pot enumera: “ Molnia 3 “, “ Udar - 5 “, “ Udar - 12 “, “ T 1220 “ (“ Udar - 12 M “), “ Udar - 20 “, “ Udar - 20 M “, “ T 1223 “, “ Udar - 20c “, “ T 1225 “, etc. În tabelul 1.2. se prezintă câteva caracteristici ale unor astfel de instalații electrohidraulice.

Instalațiile de 10 și 20 kJ rusești au generatoare de impulsuri de tensiune aproape identice, fiind completate cu un singur tip de condensatoare de impuls, cu capacitatea de 200 μ F și tensiunea de 10 kV. Energia de descărcare se reglează prin schimbarea tensiunii în gama 5 - 10 kV. Aceste instalații sunt formate din 3 blocuri automate: tehnologic, de forță și blocul de comandă, amplasate fie pe un cadru ca la “ Udar - 12 “, fie separat, ca la “ Udar - 20c “ și “ T 1223 “.

În prezent se manifestă tendința de concentrare și de concepere a unor instalații și mașini care să realizeze prelucrarea prin acțiune hidrostatică, urmată de cea a unei explozii și apoi de cea a unei descărcări electrice. Prin acțiunea hidrostatică se asigură deformarea prealabilă a semifabricatelor, iar prin celelalte se finalizează. În acest mod se extind prelucrările și la materiale greu deformabile cu

grosimi între 6,3...12,7 mm. La firma “ Cincinnati Shapers “ s-a realizat o instalație pentru prelucrarea unor piese tubulare cu diametrul de 203 mm și lungimi de 915 mm.

TABELUL 1.2.

Utilaj	Energia în impuls (kJ)	Cotele interioare ale camerei de descărcare		Grosimea minimă a peretelui camerei (mm)
		Diametru (mm)	Înălțime (mm)	
UDAR - 12	10	80 / 130	30	50
		80 / 120	35	50
		45 / 300	25	25
UDAR - 20	20	80 / 70	37	52
UDAR - 16K	80	40 / 800	530	100
UDAR - 14	150	1050 / 1700	900	150
UDAR - 11	150	1750	350	150

În ceea ce privește legătura procedului studiat cu celelalte procedee de ambutisare cunoscute, este de precizat faptul că pot fi găsite fie unul, fie mai multe elemente comune, cum ar fi: modul de realizare al sarcinii aplicate și distribuția acesteia pe suprafața semifabricatului, mediul de transmitere a energiei, caracterul rigid sau nerigid a unui element activ, forma intermediară sau finală a piesei ambutisate, etc. În tabelul 1.3. au fost astfel reprezentate principalele procedee de ambutisare utilizate, cu pornire de la un semifabricat plan.

1.3. Bazele fizice ale ambutisării prin electrohidroimpulsuri

Deformarea prin electrohidroimpulsuri reprezintă un proces complex, care implică o serie de fenomene fizico - mecanice prin a căror acțiune, cumulată sau individuală, se produce schimbarea formei semifabricatului. În cazul ambutisării, semifabricatul plan este obligat să ia forma cavității din matrița pe care este așezat.

Principalele fenomene ce sunt implicate în transformarea energiei electrice înmagazinate în bateria de condensatoare în lucru mecanic de deformare sunt:

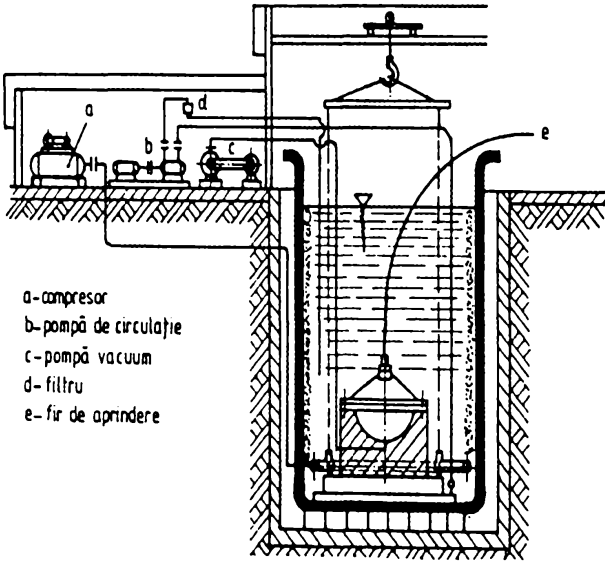
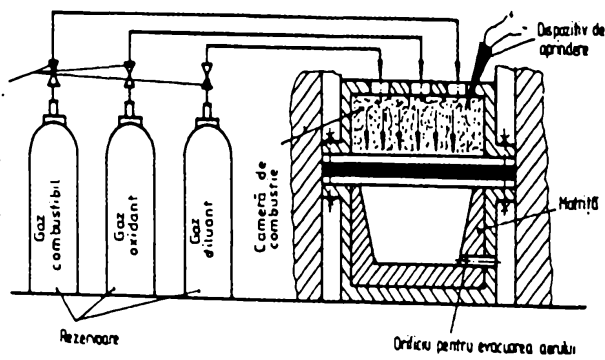
1. *Formarea canalului electroconductor ce închide (scurtcircuitează) spațiul de descărcare dintre electrozi;*
2. *Generarea și propagarea undei de șoc prin mediul de transmitere, precum și interacțiunea acesteia cu pereții camerei de descărcare;*
3. *Interacțiunea frontului undei de șoc cu semifabricatul;*
4. *Apariția fluxurilor de lichid cavitațional și postcavitațional și acțiunea acestora asupra semifabricatului;*

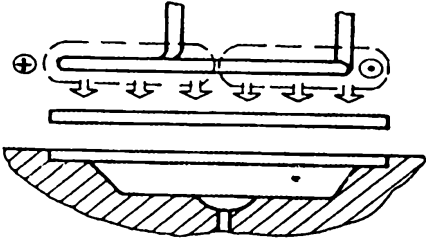
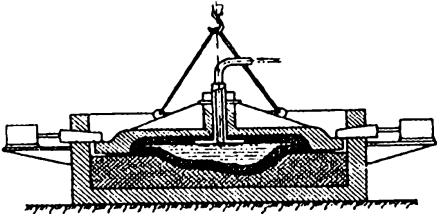
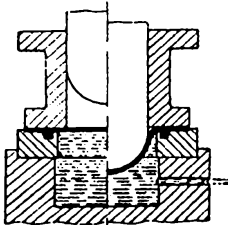
5. Deformarea semifabricatului;

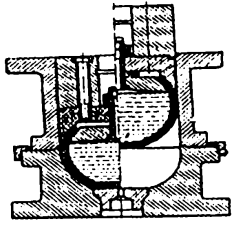
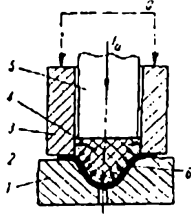
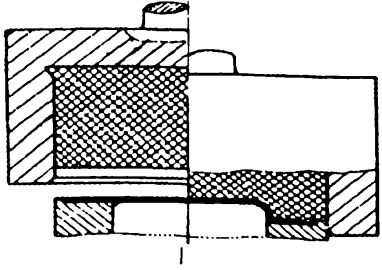
6. Apariția și propagarea undelor de tensiune elastică și plastică în materialul supus deformării.

Fiecare din aceste fenomene se află într-o relație de interdependență cu celelalte, ceea ce duce la dificultăți în încercarea de a găsi relații de legătură care să permită nu numai reproductibilitatea procesului ci și predictibilitatea sa.

TABELUL 1.3.

Nr. Crt	Procedul de ambutisare	Schema tehnologică de principiu a procedului de ambutisare	Caracteristici principale
1.	PRIN EXPLOZIE	<p>Ambutisare prin explozie în apă</p>  <p>a-compresor b-pompă de circulație c-pompă vacuum d-filtru e-fir de aprindere</p>	<ul style="list-style-type: none"> • mediul de transmitere : apă, aer sau medii pulverulente ; • se utilizează la producția de unicate în industria de armament, aeronautică sau chimică ; • semifabricate de dimensiuni sau grosimi foarte mari (peste 25 mm) sau din aliaje greu deformabile ; • în funcție de tipul explozivului (propulsor sau brizant) se obțin presiuni ale undei de șoc între 750 ÷ 10.000 MPa și viteze de deformare între 70 ÷ 100 m/s.
2.	PRIN DETONAREA UNUI AMESTEC DE GAZE COMBUSTIBILE	<p>Schema unei instalații complete</p>  <p>Ventil de distribuție Gaz combustibil Gaz oxidant Gaz diluant Cameră de combustie Dispozitiv de aprindere Matriță Orificiu pentru evacuarea aerului Rezervoare</p>	<ul style="list-style-type: none"> • se aplică la piese de dimensiuni mici și mijlocii • amestecul poate fi format din: metan și oxigen ($C_2H_4+2O_2$), acetilena și oxigen ($C_2H_2+2,5O_2$), hidrogen și oxigen ($2H_2+O_2$) sau benzină-aer la utilajele de tip Petro - Forge; • la detonarea prin auto-aprindere, se obțin presiuni de 800 ÷ 1000 MPa, în funcție de presiunea inițială a amestecului și de raportul stoichiometric.

<p>3.</p>	<p>PRIN IMPUL SURI MAG- NETICE</p>		<ul style="list-style-type: none"> • presiunile dezvoltate pot atinge 3500 MPa iar viteza lor de propagare se situează între limitele 3000÷6000 m/s; viteza de deformare între 300 ÷ 400 m/s; • producție de serie a pieselor mici, cu disponibilități mari pentru automatizare; • grosimea semifabricatelor între 1 și 7 mm, funcție de material și energia instalației. Se recomandă materiale cu rezistivitate mică.
<p>4.</p>	<p>HIDRAULICĂ</p>	<p>Ambutisare hidraulică cu husă de cauciuc</p>  <p>Ambutisare hidraulică cu acțiune directă a lichidului asupra semifabricatului</p>  <p>Ambutisare hidraulică cu poanson rigid</p>	<ul style="list-style-type: none"> • agentul hidraulic utilizat este apa sau uleiul; • în toate cazurile, distribuția de presiune este uniformă pe suprafața semifabricatului; • placa rigidă se utilizează, de obicei, la piese sferice, conice, parabolice sau la care ar fi necesare mai multe operații; • poansonul rigid se utilizează la ambutisarea pieselor foarte adânci, dintr-o singură operație; • presiunile hidrostactice uzuale sunt cuprinse între 5÷30 MPa; • starea de deformare și tensiuni este mult mai avantajoasă, permițând obținerea unor piese cu adâncime de ambutisare mare; • se utilizează la producția de serie mică sau mijlocie; • semifabricate cu grosimi între 1÷12 mm sau chiar mai mari, din aliaje feroase sau neferoase; • calitate bună a suprafețelor piesei, datorită lipsei frecării între elementele active ale sculei și semifabricat; • ca și dezavantaje, pot fi enumerate: necesitatea unor agregate hidraulice destul de scumpe, realizarea unor etanșări sigure precum și

		 <p>Ambutisare hidraulică cu diafragmă de cauciuc și placă activă rigidă</p>	<p>probabilitatea dezaxării semifabricatului în timpul deformării, tocmai datorită lipsei frecării.</p>
5.	CU AJUTORUL CAUCIUC - CULUI	<p>1- placă activă 2- semifabricat 3- inel de reținere 4- poanson de cauciuc 5- portpoanson 6- piesă ambutisată</p>  <p>Ambutisare cu poanson de cauciuc</p>  <p>Ambutisarea cu placă activă din cauciuc</p>	<ul style="list-style-type: none"> • procedeul se aplică în producția de serie mică sau chiar mare, la materiale cu grosimi între 0,2÷1,5 mm; • se aplică, de obicei, la neferoase sau la oțeluri moi; • presiunile dezvoltate sunt cuprinse între 35+50 MPa; • presiuni de tip hidrostatic, uniform distribuite, permițând grade de deformare mai mari, datorită unei stări de tensiuni și deformații mai favorabilă.

În continuare vor fi prezentate principalele stadii ale studiilor teoretice și cercetărilor experimentale existente la ora actuală pe plan național și mondial, privitoare la primele cinci fenomene enumerate mai sus și implicate în deformarea prin electrohidroimpulsuri.

1.3.1. Stadiile formării canalului electroconductor ce închide (scurtcircuitează) spațiul de descărcare dintre electrozi

Modul de formare a canalului de descărcare depinde de modul de inițiere a descărcării electrice: cu străpungere directă sau cu fir exploziv. Considerațiile de mai jos sunt făcute pentru cazul străpungerii directe a dielectricului lichid, ulterior fiind făcută particularizarea pentru amorsarea cu fir.

Procesul de dezvoltare intensă a descărcării este precedat de stadiul de formare a canalului electroconductor ce scurtcircuitază spațiul dintre electrozi. Metoda cea mai simplă (dar nu și cea mai eficientă) este metoda de formare a canalului electroconductor prin străpungerea de înaltă tensiune a spațiului de descărcare. Această metodă se recomandă a fi utilizată la ambutisarea pieselor de formă complexă, când această formă nu permite stabilizarea amplasării corespunzătoare a celor doi electrozi sau folosirea eficientă a unor metode de inițiere a descărcării. Metoda necesită, deasemenea, și instalații cu tensiuni mari de descărcare, care să depășească valoarea tensiunii de străpungere a lichidului. Întrucât apa este mediul lichid cel mai utilizat, la aceasta se vor rezuma considerațiile făcute în continuare.

La ora actuală există trei teorii privitoare la străpungerea lichidelor electroizolante, însă toate sunt incomplete și insuficient verificate experimental [47]. Acestea sunt:

1. Teoria ionizării (Peek), asemănătoare cu teoria lui Townsend de străpungere a gazelor, conform căreia descărcarea se dezvoltă “ cu un front continuu “ [1], iar rolul hotărâtor în autonomia descărcării îl au procesele de pe catod; datorită neconcordanțelor cu rezultatele experimentale, teoria este puțin folosită la străpungerea lichidelor;

2. Teoria strimerului, care explică dezvoltarea descărcării electrice sub forma unui canal îngust de mare conductibilitate și care consideră ca proces fundamental, procesul de ionizare intensă a acestuia prin șoc electronic, fotoionizare și termoionizare [1];

3. Teoria străpungerii termice, conform căreia , datorită încălzirii lichidului la trecerea unui curent electric, în lichid se formează bule de vapori care, împinse de forțele câmpului , de-a lungul liniilor de câmp electric, formează punți gazoase între electrozi; prin ionizări ulterioare apar, în primele faze, descărcări electrice în punțile gazoase, care, în final, inițiază străpungerea lichidului.

Literatura de specialitate [19, 65] indică relații de calcul pentru distanța dintre electrozi, la a cărei depășire, regimul de strimer trece în regim termic. Cum însă regimul termic nu prezintă interes practic din cauza distanțelor foarte mari între electrozi și, implicit, a pierderilor energetice mari, prezentarea se va rezuma doar la descărcarea în regim de strimer.

Fenomenologic, procesul poate fi prezentat în felul următor: la aplicarea tensiunii înalte la intervalul de descărcare (între electrodul pozitiv, izolat pe toată suprafața sa în afară de capăt și electrodul negativ, în aceleași condiții de izolație), are loc străpungerea acestuia, însoțită de formarea canalului electroconductor, care începe cu formarea unor așa-zise “ *amorse* “ sau a unei serii de amorse în creștere (în literatură, pentru “ *amorsă* “ se mai utilizează și denumirea de “ *leader* “, deși, luat ca atare, termenul este destul de puțin sugestiv). Amorsa este, de fapt, un canal ionizat, puternic luminescent, cu un diametru de ordinul a 0,1...2 mm, înconjurat de domeniul luminescenței de difuzie. Apariția stadiului “ *amorsă* “ de dezvoltare a descărcării devine posibilă după ce densitatea curentului atinge o anumită mărime critică. Stadiul “ *amorsă* “ se termină în momentul în care una

sau mai multe amorse ating electrodul opus, scurtcircuitând, în ultimă instanță, spațiul de descărcare. Este format astfel canalul de descărcare.

Intensitatea câmpului electric se calculează în funcție de geometria spațiului de descărcare, adică în funcție de forma fiecăruia dintre cei doi electrozi. Astfel, în lucrarea [19] se indică relațiile:

- pentru cuplul de electrozi vârf - vârf:

$$E \cong \frac{2 \cdot U_0}{r \cdot \ln \frac{4 \cdot l_d}{r}} \quad (1.1)$$

- pentru cuplul de electrozi vârf - placă:

$$E \cong \frac{2 \cdot U_0}{r \cdot \ln \frac{2 \cdot l_d}{r}} \quad (1.2)$$

unde r este raza de curbură a vârfului, iar l_d este lungimea porțiunii neizolate a electrodului.

Pentru generarea amorselor este necesar ca intensitatea câmpului la suprafața electrodului să depășească o anumită mărime de prag, de ordinul a câtorva zeci de kV/cm. Experimentele au demonstrat că intensitatea minimă a câmpului la care apar amorsele este de aproximativ 36 kV/cm, valoare care corespunde vârfului pozitiv și planului negativ [41]. Dacă se ține cont [41] că la calculul pierderilor energetice în perioada de formare a descărcării se admite valoarea $0,25 \cdot W_0$, unde W_0 este energia totală stocată în bateria de condensatoare, atunci este necesară mărirea acestei valori minime a intensității câmpului electric la valoarea de 40 kV/cm.

Studiul străpungerii lichidelor conductoare nedegazificate a demonstrat că și formarea amorselor este precedată de un alt stadiu, așa-zisul stadiu local - paravârf (sau " *preamorsă* "), înlocuit ulterior de stadiul " *amorsă* " , în decursul căruia viteza de creștere a amorselor are o valoare maximă. Dinamica creșterii sistemului de amorse depinde de parametrii electrici inițiali ai circuitului de descărcare, forma spațiului dintre electrozi, conductibilitatea mediului, etc.

După scurtcircuitarea spațiului de descărcare de către amorsă începe cel de-al doilea stadiu, stadiul principal al descărcării, în cadrul căruia are loc degajarea aproape completă a energiei acumulate în bateria de condensatoare. Sub acțiunea trecerii curentului descărcării de densitate mare, precum și datorită incompresibilității lichidului, presiunea în canalul de descărcare (obținut ca urmare a scurtcircuitării electrozilor de către amorsă) crește și poate să atingă zeci de mii de atmosfere.

Această creștere a presiunii se poate explica și prin considerarea spațiului de descărcare ca o plasmă densă de temperatură joasă, în care are loc transformarea energiei câmpului electric a condensatoarelor încărcate în energie gazocinetică de mișcare a particulelor de plasmă.

În continuare, datorită presiunii ridicate și a dilatării cu viteză mare a canalului de descărcare (sub acțiunea presiunii gazocinetice), se formează o undă de șoc. Parametrii acestei unde de șoc sunt determinați atât de procesele care au loc în plasma propriu-zisă a canalului, cât și de mediul înconjurător hidrodinamic. La abordarea acestui fenomen trebuie să se țină cont și de interdependența proceselor care au loc la granița dintre cele două medii, prin cooptarea legilor hidrodinamicii și acusticii neliniare.

Simultan cu formarea undei de șoc, canalul în expansiune al descărcării duce la mișcarea lichidului din jurul său, creînd așa-zisul "*flux de întârziere*", care determină dezvoltarea unei bule de gaz. Acest fenomen poate duce la un al doilea impuls de presiune, de o intensitate mai mică decît cea de pe frontul undei de șoc, interacțiunea dintre cele două trebuind deasemenea să fie luată în considerare.

De remarcat că de problemele utilizării descărcării electrice de mare putere în medii condensate este legată o diversitate de fenomene fizice și cerințe tehnologice. În aceste condiții, la elaborarea echipamentului (în special a celui electric) pentru instalațiile de deformare, va fi necesară o imagine clară despre caracterul sarcinii ca și consumator de energie și despre circuitul de descărcare, ca un tot unitar. Consumatorul de energie este spațiul de descărcare (mai exact canalul descărcării în spațiul de descărcare), caracteristicile lui depinzând de caracteristicile electrice ale circuitului de descărcare și, el însuși, fiind element al acestui circuit, influențează caracteristicile electrice, asigurând astfel condiționarea reciprocă a fenomenelor.

Problemele propagării undelor de șoc, de modificare a profilului acestora, de interacțiune cu semifabricatul supus deformării, joacă un rol important la determinarea mărimilor presiunilor sub care se produce deformarea, mărimi care se modifică în timp și spațiu. Trebuie, deasemenea, remarcat faptul că, fără studiul condițiilor de formare a canalului de descărcare și a fenomenelor ce însoțesc străpungerea dielectricilor lichizi și a mediilor lichide posesoare de electroconductibilitate apreciabilă, nu se poate avea o imagine absolut clară privind procesul de transformare a energiei câmpului electric a condensatorului în energie de deformare a piesei de prelucrat.

1.3.2. Caracteristici energetice ale canalului de descărcare

Din punctul de vedere al caracteristicilor electrice, în stadiul de formare a canalului electrconductor, se pot semnală următoarele: considerând o geometrie a spațiului de descărcare de tip bară-plan (adică electrodul pozitiv de tip bară, izolat pe toată lungimea sa în afară de capăt, iar cel negativ fiind constituit din chiar piesa de prelucrat), la aplicarea tensiunii între cei doi electrozi, în perioada dinainte de începerea creșterii amorsoarelor, consumurile de energie sunt determinate de

curentul de conductibilitate ionică [41].

Mărimea acestui curent depinde de conductibilitatea mediului și mărimea suprafeței de contact a sistemului de electrozi cu lichidul. Consumurile de energie sunt legate de transmiterea căldurii în volumul mare de lichid din jurul spațiului dintre electrozi. Timpul acestui stadiu se micșorează, de regulă, la creșterea tensiunii și electroconductibilității mediului.

În perioada de creștere a sistemului de amorse, suprafața reală de contact a lichidului cu suprafața sistemului de electrozi crește. Acest lucru duce la creșterea curenților de conductibilitate, cu atât mai mult cu cât sistemul de amorse va fi mai ramificat datorită efectului Corona.

Deasemenea, dacă în cazul lichidelor cu conductibilitate mică, cota parte de energie ce se degajă în canalele amorselor este și ea mică, la creșterea conductibilității va crește și această parte de energie, conducând la efecte hidroacustice mult mai intense în acest stadiu. Însă randamentul electroacustic în acest caz este mic și nu depășește zecimi de procent [41]. Din acest motiv trebuie ținut cont de impuritățile și substanțele chimice dizolvate în apă care ar putea duce la o creștere prea mare a conductibilității.

Realizarea străpungerii fie în apă distilată, fie în apă cu impurități, se produce cu o oarecare întârziere, chiar dacă tensiunea aplicată depășește cu mult tensiunea de străpungere minimă. Prin timp de întârziere a străpungerii se înțelege timpul scurs de la momentul aplicării tensiunii la spațiul dintre electrozi până la formarea canalului descărcării.

În cazul intervalelor lungi $< + \text{bară} > - < - \text{plan} >$, când raza la vârful barei este cu mult sub lungimea intervalului între electrozi și când intensitatea câmpului lângă suprafața electrodului pozitiv este mai mare decât mărimea de prag, timpul de străpungere are, în general, două componente:

$$t_s = t_i + t_a \quad (1.3)$$

în care t_i - timpul de întârziere (timpul stadiului preamorsă); t_a - timpul de dezvoltare normală a amorsei.

Dinamica dezvoltării canalului de descărcare în aceste perioade depinde esențial de repartiția câmpului în spațiul de descărcare (fig. 1.6.a - în stadiul dinaintea apariției amorselor; fig. 1.6.b - la dezvoltarea sistemului de amorse [41]).

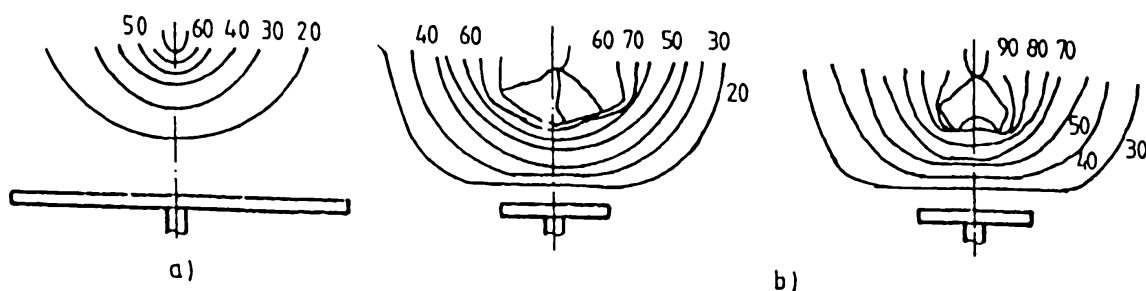


Figura 1.6. Caracterul schimbării câmpului electric în spațiul de descărcare

În stadiul de amorse, câmpul este determinat de tensiune și geometria spațiului de descărcare (mărimea porțiunii neizolate a electrozilor pozitiv și negativ, distanța dintre electrozi, etc.).

Cifrele de pe desen corespund raportului procentual dintre potențialele echipotențiale corespunzătoare și electrod, atunci când suprafața electrodului negativ depășește cu mult suprafața electrodului pozitiv. Odată cu apariția amorselor, intensitatea maximă a câmpului deviază spre capul amorsei, deformând apreciabil câmpul spațial. Consumurile energetice în perioada de formare a canalului conducător trebuie să fie abordate după stadiile corespunzătoare de dezvoltare a străpunerii.

Oricum, în practică, impedanța caracteristică a majorității circuitelor de descărcare se dovedește a fi cu mult sub mărimea rezistenței spațiului de descărcare în stadiul "preamorsă". Din acest motiv pierderile de energie și, implicit, scăderea tensiunii ce va fi aplicată efectiv canalului de descărcare, pot fi obținute prin analizarea procesului tranzitoriu dintr-un circuit ce conține o capacitate și o rezistență [41]:

$$U_c = U_0 \cdot e^{-t/(R_{sd} \cdot C)} \quad (1.4)$$

în care U_c - căderea de tensiune la capacitatea C ; U_0 - tensiunea inițială de încărcare a bateriei de condensatoare; R_{sd} - rezistența spațiului de descărcare în stadiul "preamorsă".

Cercetările experimentale, efectuate la tensiuni cuprinse între $U_0 = 20 \div 50 \text{ kV}$ și la rezistențe electrice specifice ale apei cuprinse între $\rho_{sd} = 5 \div 70 \Omega \cdot m$, au arătat [78] că mărimea R_{sd} nu depinde de mărimea tensiunii aplicate și deci, pentru domeniile respective de schimbare a parametrilor, la spații de descărcare lungi nu există nici un fel de procese active care să ducă la schimbarea conductibilității electrice.

Pentru determinarea rezistenței se utilizează corelația între conductibilitatea electrică specifică σ_{sd} și capacitatea C_{sd} a spațiului de descărcare:

$$C_{sd} \cdot R_{sd} = \varepsilon / \sigma_{sd} \quad (1.5)$$

unde ε este permitivitatea mediului.

Pentru a obține intensitate maximă, electrodul pozitiv de obicei se ascute, dar datorită eroziunii ce se instalează în urma unei funcționări prelungite, el tinde să ia forma semisferică. Așa cum s-a acceptat mai sus, suprafața electrodului negativ (piesa de prelucrat) este cu mult mai mare decât cea a electrodului pozitiv. În aceste condiții, analizând câmpul electric în spațiul dintre electrodul sferic și suprafața încărcată, se poate presupune că, în urma unui grad ridicat de neomogenitate a câmpului sferei încărcate (de rază mică), influența electrodului plan asupra imaginii câmpului se va exercita numai în apropierea electrodului plan respectiv. Ca urmare, este necesar să se rezolve problema privind câmpul sferei încărcate în prezența unei granițe plane. Cum însă influența condițiilor de graniță este esențială doar în zona electrodului plan, se poate înlocui

această graniță cu una sferică, obținând astfel o problemă sferic simetrică. Eventual, de influența condițiilor de graniță se poate ține cont prin introducerea unui coeficient de corecție. În acest caz, capacitatea sistemului se poate scrie:

$$C_{sd} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon}{\left(\frac{1}{r_b} - \frac{1}{l}\right)} \cdot k \quad (1.6)$$

în care r_b - raza de rotunjire a barei pozitive; l - distanța între electrozi; k - coeficient de corecție $k=0,85$ [41].

Ținând cont de relația (1.5), rezistența spațiului poate fi calculată cu:

$$R_{sd} = \frac{k}{2 \cdot \pi \cdot \sigma_{sd}} \cdot \left(\frac{1}{r_b} - \frac{1}{l}\right) \quad (1.7)$$

Pentru determinarea tensiunii înaintea momentului începerii stadiului " *amorsă* ", conform relației (1.4), este necesar ca timpul curent t să fie înlocuit cu durata stadiului " *preamorsă* ".

Experiențele au dovedit că timpul stadiului " *preamorsă* " variază invers proporțional cu σ_{sd} , adică la creșterea conductibilității electrice specifice scade durata stadiului " *preamorsă* ". Dependența duratei stadiului " *preamorsă* " de rezistivitatea specifică a apei, la o tensiune de 30 kV este redată mai jos [41]:

ρ_{sd} [$\Omega \cdot m$]	120,5	58,4	29,3	10,0
t_i [μs]	12,4	10,7	5,6	2,9

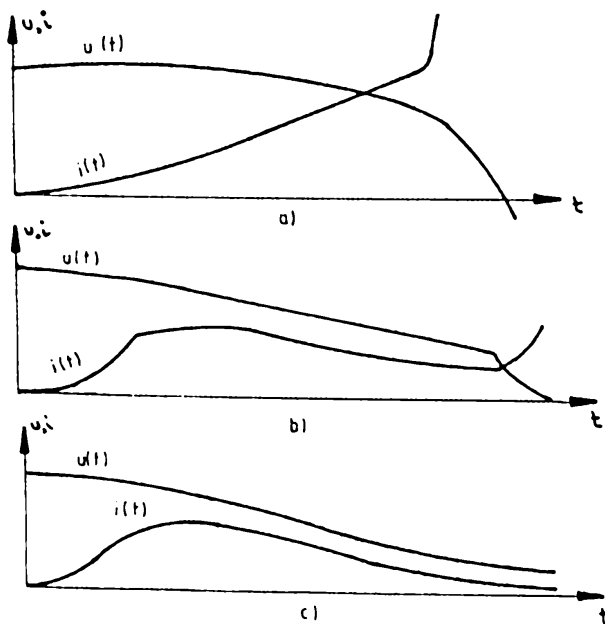


Fig. 1.7. Curbele de variație ale curentului și tensiunii la spațiul de descărcare în timpul formării canalului.

În ceea ce privește influența tensiunii, trebuie remarcat că la creșterea acesteia, timpul stadiului " *preamorsă* " mai întâi scade brusc apoi, la atingerea de către tensiune a unei valori de prag oarecare (40 kV), se schimbă ne semnificativ. Oricum, se pare că [41], în cazul unei tensiuni ce depășește tensiunea de prag și la o conductibilitate electrică a apei de $\sigma = 10^{-1} \Omega^{-1} \cdot m^{-1}$, pierderile de energie în stadiul " *preamorsă* " pot fi neglijate.

În figura 1.7 sunt prezentate curbele de variație ale curentului și tensiunii la spațiul de descărcare în timpul formării canalului [41], iar în figura 1.8 câteva fotografii corespunzătoare diferitelor stadii de dezvoltare a amorselor.

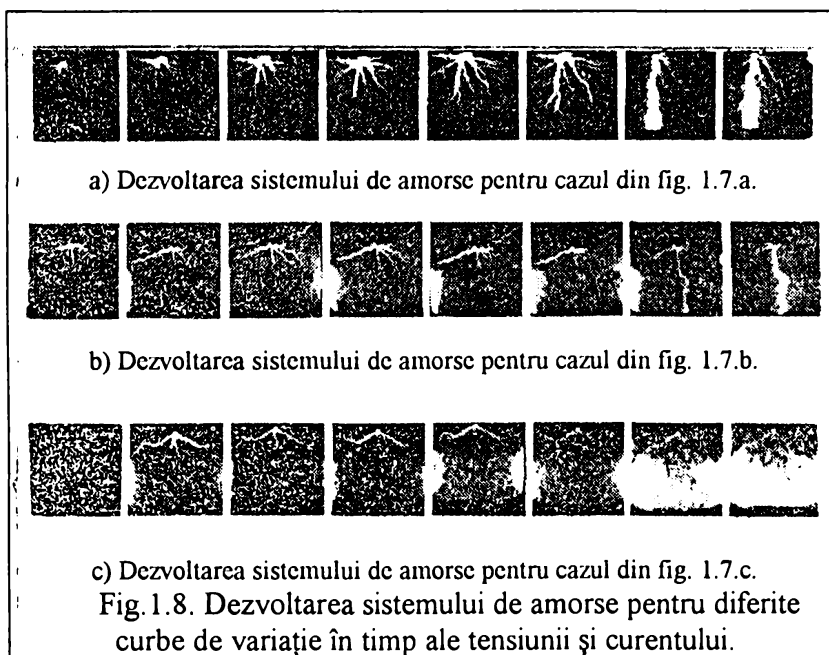
Momentului apariției luminiscentei pe

electrodul pozitiv îi corespunde începutul stadiului "amorsă" și creșterea curentului prin spațiul de descărcare. Ulterior, odată cu creșterea sistemului de amorse se observă și creșterea curentului. La străpungerea spațiilor scurte, creșterea monotonă a curentului se observă inclusiv până în momentul scurtcircuitării uneia dintre amorse la electrodul opus (fig.1.7.a).

Odată cu creșterea distanței dintre electrozi (a spațiului de descărcare), curentul poate avea un maxim și atunci străpungerea ulterioară va avea loc după o scădere apreciabilă a curentului (fig.1.7.b). Reducerii acestuia îi corespunde reducerea intensității luminoase, apoi sistarea totală a luminiscentei amorselor. Creșterea acestora însă nu se oprește, ci continuă sub formă de ramificații fine neluminiscente, inclusiv până la atingerea de către o amorsă a electrodului opus. Mărirea ulterioară a distanței dintre electrozi duce la așa-zisele descărcări neterminate (fig.1.7.c).

În procesul de dezvoltare a descărcării se manifestă și o neomogenitate a luminiscentei

amorsei pe lungimea sa (spre bază luminiscenta are o intensitate mărită). Dacă la o conductibilitate electrică specifică a apei de $10^{-2} \Omega^{-1} \cdot m^{-1}$ luminiscenta se observă numai în zona din apropierea electrodului, atunci la mărirea conductibilității până la $10^{-1} \Omega^{-1} \cdot m^{-1}$, amorsa este luminiscentă practic pe toată lungimea sa. În afară de aceasta, creșterea



conductibilității determină și creșterea numărului de amorse.

Deasemenea, creșterea tensiunii la intervalul de descărcare (la o valoare constantă a conductibilității electrice specifice a apei) conduce la mărirea vitezei de creștere a amorselor.

Principalele legități de dezvoltare a străpungerii în perioada de formare a canalului de descărcare sunt următoarele:

1. În spațiul dintre electrozi $< + \text{bară} > - < - \text{plan} >$, bara reprezintă un loc de concentrare apreciabilă a câmpului electric;

2. Pe măsura creșterii amorselor, domeniul de concentrație maximă a câmpului se deplasează spre capul fiecăreia dintre ele;

3. Cu cât este mai mare conductibilitatea electrică a lichidului, cu atât este mai activ procesul de formare a amorsoanelor, astfel încât se mărește numărul acestora, precum și suprafața secțiunii transversale a fiecăreia dintre ele luate separat. Aceste fenomene duc, evident, la creșterea suprafeței de contact dintre sistemul de amorse și lichid și, implicit, la mărirea curentului, încălzire și apariția luminiscentei în locurile de densitate maximă a curentului, adică la baza ramificației. Simultan, creșterea curentului duce la mărirea pierderilor de energie, energie consumată pentru încălzirea întregului volum de lichid din zona de descărcare;

4. Un număr mare de ramuri ale sistemului de amorse duce la reducerea concentrației câmpului lângă capul fiecăreia dintre aceste ramuri și, respectiv, la reducerea vitezei de creștere. În consecință, conductibilitatea determină viteza de propagare a amorsei în spațiul dintre electrozi;

5. Tensiunea inițială determină, de asemenea, viteza de creștere a ramificațiilor sistemului de amorse și aproape nu influențează asupra numărului acestora;

6. Consumurile energetice pentru formarea canalului de descărcare sunt determinate, în principal, de durata stadiului " amorsă " a descărcării.

Pentru determinarea experimentală a pierderilor de energie în timpul formării canalului de descărcare, cu ajutorul filmărilor rapide s-a estimat lungimea amorsoanelor, numărul acestora, diametrul și, implicit, suprafața lor de contact cu lichidul [78]. Cercetările efectuate în domeniile de schimbare a parametrilor descărcării $U_0 = 20 \div 50 \text{ kV}$, $C = (0,5 \div 10) \cdot 10^{-6} \text{ F}$, $l = 20 \div 120 \text{ mm}$, $\sigma_{sd} = 10^{-2} \div 10^{-1} \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ și $S_e = 1 \div 40 \text{ cm}^2$ (S_e - suprafața porțiunii neizolate a vârfului pozitiv) au permis obținerea următoarei expresii pentru calculul consumului de energie în stadiul de formare a descărcării:

$$\Delta W = K \cdot l \cdot \sigma_{sd} \cdot (S_e + S_0) \quad (1.8)$$

unde K și S_0 sunt constante, $K = 10^8 \text{ V}^2 \cdot \text{s/m}^2$ iar $S_0 = 11 \text{ cm}^2$ (considerată ca suprafață de referință).

După cum rezultă din expresia de mai sus, în gama studiată de schimbare a parametrilor descărcării, mărimea pierderilor de energie nu este deteminată de parametrii circuitului de descărcare ci depinde doar de forma spațiului dintre electrozi și de conductibilitatea electrică a lichidului. Distanța dintre electrozi, pentru străpungerea căreia sunt necesare maxim 10% din energia bateriei de condensatoare, se poate determina cu expresia:

$$l_{\Delta W = 25\%} = \frac{C \cdot U_0^2}{8 \cdot K \cdot \sigma_{sd} \cdot (S_e + S_0)} \quad (1.9)$$

Rezultatele comparației datelor experimentale cu cele calculate după relația (1.8), pentru diferiți parametri ai circuitului de descărcare și diferite conductibilități electrice ale apei, sunt prezentate în tabelul 1.4 [41].

TABELUL 1.4.

C [μF]	l [mm]	S _e [cm ²]	ρ [Ω·m]	ΔW _{exp} [%]	ΔW _{cal} [%]	C [μF]	l [mm]	S _e [cm ²]	ρ [Ω·m]	ΔW _{exp} [%]	ΔW _{cal} [%]
3	21	3,14	5,6	21	27,2	3	75	45	28	100	86,5
3	21	11,77	5,6	30	44	3	75	45	28	64	62,6
3	33	3,14	5,6	39	42,7	3	120	2,36	31,2	12	13,7
3	40	3,14	5,6	46	52	3	120	2,36	28,3	9,3	15,1
3	75	1,32	10,9	64	46,2	3	120	10,2	31,2	18	21,6
3	75	1,32	10,9	78	58,5	3	120	10,2	28,3	14	24,6
3	75	1,32	10,9	54	35,4	3	75	16,6	10,9	71	50,6
3	75	1,32	10,9	43,5	28,4	1	100	1,5	14	58	71
3	75	1,32	10,9	32,5	22,6	1	75	1,5	14	22	53
3	75	1,32	10,9	29,3	21,8	9	75	1,5	10,9	30	23

1.3.3. Caracteristici electrice ale canalului de descărcare

Procesul de formare a canalului de descărcare se termină prin închiderea spațiului dintre electrozi, concomitent cu micșorarea rezistenței (fig.1.7.a). Caracteristicile hidrodinamice ale descărcării sub formă de scânteie pot fi obținute dacă este cunoscut regimul de degajare a energiei în canalul de descărcare. La rândul său, degajarea energiei $W(t)$ depinde esențial de principalele caracteristici hidrodinamice. Schimbarea presiunii $P_a(t)$ în canal și a razei $a(t)$ în timpul procesului de dilatare, duce la schimbarea rezistenței active $R(t)$ care determină capacitatea plasmei de a transforma energia câmpului electric în energie de mișcare termică a particulelor.

Dacă determinarea experimentală a legii de degajare a energiei nu creează dificultăți deosebite, rezolvarea problemei pentru obținerea energiei $W(t)$ fără a apela date experimentale este complicată de o serie de circumstanțe.

În lucrarea [41] este prezentat un model pentru determinarea parametrilor electrice pornind de la soluția procesului tranzitoriu într-un circuit cu rezistență activă neliniară. Astfel, ecuația diferențială a procesului tranzitoriu este de forma:

$$\frac{d^2 i}{dt^2} + \frac{1}{L} \cdot \frac{d}{dt}(i \cdot R) + \frac{i}{L \cdot C} = 0 \quad (1.10)$$

în care i - curentul de descărcare; L și C - inductivitatea totală și capacitatea totală a circuitului.

În circuitele cu elemente neliniare, rezolvarea procesului tranzitoriu este posibilă dacă este cunoscută dependența elementului neliniar fie de curentul de descărcare, fie de parametrii constanți (L, C, U_0) și timp.

Obținerea dependenței rezistenței canalului de curentul descărcării se face pe baza ecuației de bilanț energetic. Această ecuație, în ipoteza procesului adiabatic de dilatație și neglijarea pierderilor, este scrisă sub forma:

$$P_a \frac{dv}{dt} + \frac{1}{\gamma - 1} \cdot \frac{d(P_a \cdot v)}{dt} = i^2 \cdot R \quad (1.11)$$

în care P_a , v și γ sunt presiunea, volumul și, respectiv, indicele efectiv al adiabatei plasmei canalului ($v = \pi \cdot a^2 \cdot l$, cu a - raza canalului de descărcare, l - lungimea canalului de descărcare).

Primul termen din stânga al ecuației este puterea electrică care se dezvoltă în spațiul de descărcare. Al doilea termen arată viteza de schimbare a energiei interne a plasmei canalului.

Între rezistență și energia internă se poate stabili o dependență de forma [54,55]:

$$W_{ip} = \frac{P_a \cdot v}{\gamma - 1} = A \cdot \frac{l^2}{R} \quad (1.12)$$

în care mărimea A , denumită caracteristica scânteii, este determinată din expresia:

$$A = \frac{\left(1 + \frac{1}{x_i}\right) \cdot \left(\frac{3}{2} \cdot k \cdot T + \frac{D}{3}\right) + V_i \cdot e}{\mu_e \cdot e} \quad (1.13)$$

iar

$$\mu_e = \frac{e}{\left(k \cdot T \cdot m_e\right)^{0.5} \cdot n \cdot \left[\left(\frac{9 \cdot \pi}{8}\right)^{0.5} \cdot Q_{en} + \frac{x_i}{\sqrt{3}} \cdot Q_{ej}\right]} \quad (1.14)$$

în care x_i - gradele de ionizare ale atomilor de oxigen și hidrogen; D - energia de disociere a moleculelor de apă; V_i - potențialul de ionizare a atomilor de oxigen și hidrogen; e - sarcina electronului; μ_e - mobilitatea electronilor; m_e - masa electronului; n - concentrația de particule în plasma canalului de descărcare; Q_{en} , Q_{ej} - secțiuni efective de dispersie pe atomi neutri și, respectiv, ioni.

După datele experimentale prezentate în lucrarea [71], s-a apreciat valoarea caracteristicii scânteii la $A \approx 0,25 \cdot 10^5 \text{ V}^2 \cdot \text{sec} / \text{m}^2$. Experimentele efectuate cu descărcări având parametrii $U_0 = 40 \text{ kV}$, $C = 3,22 \text{ } \mu\text{F}$, $L = 2,15 \text{ } \mu\text{H}$ și $l = 20 \div 200 \text{ mm}$ au arătat [41] că, pentru toate lungimile spațiului de descărcare (deci la valori variabile ale rezistenței canalului și ale curentului ce parcurge canalul), mărimea caracteristicii scânteii s-a modificat nesemnificativ pe parcursul primei semiperioade a curentului de descărcare.

Pentru a se evita acumularea erorilor de calcul, mărimea A a fost determinată [71] prin metoda aproximării liniare iterative, cu folosirea expresiei:

$$A_k = \frac{\frac{2}{l^2} \cdot \int_0^k i^2 \cdot R \cdot dt - \sum_{j=1}^{k-1} A_j \cdot \int_{t_{j-1}}^k \frac{da}{R \cdot a} dt}{\frac{2}{R_k} + \int_{t_{k-1}}^k \frac{dt}{R \cdot a} dt} \quad (1.15)$$

Determinarea mărimii lui **A** pentru mai multe valori ale parametrilor electrici (U_0 , C , L , l), a permis determinarea limitelor de schimbare a parametrilor circuitului electric ($U_0^2 / (L \cdot l)$, în $W/m \cdot s$), pentru care mărimea caracteristicii scânteii poate fi considerată constantă [41]:

$$2,5 \cdot 10^{14} < \frac{U_0^2}{L \cdot l} < 5 \cdot 10^{16} \quad (1.16)$$

De remarcat că mărimea caracteristicii **A** a fost obținută folosind metoda inițierii cu un fuzibil de 0,003 mm. Față de aceasta, la metoda prin străpungere, lungimea canalului de descărcare este de aproximativ două ori mai mare decât distanța dintre electrozi, ca urmare a ramificării (la metoda inițierii se poate considera că distanța dintre electrozi este egală cu lungimea canalului de descărcare). Din acest motiv, ținând cont de relația (1.12), este necesară mărirea caracteristicii scânteii de 4 ori ($A = 10^5 \text{ V}^2 \cdot \text{sec}/\text{m}^2$).

Ținând cont că $A = \text{constant}$, la o dependență liniară a razei canalului de descărcare $a(t)$ de timp, ecuația bilanțului energetic (1.11), utilizând relația (1.12), poate lua forma:

$$\int_0^k i^2 R dt = A \cdot l^2 \left[\frac{1}{R} + 2 \cdot (\gamma - 1) \cdot \int_0^k \frac{dt}{R \cdot t} \right] \quad (1.17)$$

Mergând în continuare pe această cale se poate determina legea de variație a energiei în timp prin rezolvarea complexă a ecuației procesului tranzitoriu. Astfel, a fost obținută [41] expresia rezistenței canalului de descărcare sub forma expresiei (1.18), cu α constant, expresie analoagă celei descoperite de Rompe și Weitzel pentru rezistența canalului scânteii la descărcarea în aer [1]. Însă această dependență integrală complexă nu este convenabilă pentru calcule estimative.

$$\left(\frac{R}{l} \right)^2 = \frac{A}{2} \cdot \frac{t^{4\alpha(\gamma-1)}}{\int_0^k i^2 t^{4\alpha(\gamma-1)} dt} \quad (1.18)$$

În aceste condiții, legătura între curentul de descărcare și rezistența activă neliniară permite, prin folosirea unor coeficienți $m_i = U_0 \cdot (C/L)^{1/2}$ și $m_t = \pi \cdot (L \cdot C)^{1/2}$, aducerea ecuației (1.10) la o formă adimensională:

$$B_k = \frac{A \cdot l^2}{U_0^2 \cdot \pi \cdot \sqrt{LC}} \quad (1.19)$$

Mărimea B_k este combinația adimensională a constantelor dimensionale U_0 , C , L , l , A și poate fi utilizată ca un criteriu de similitudine al caracteristicilor electrice și energetice ale canalului de descărcare, în scopul aplicării legii similitudinii la experimentări.

Dacă se omite din expresia (1.19) caracteristica scânteii A , se va obține un parametru generalizat B_0 , introdus pentru prima dată de I.Z.Okuni [71].

Un alt criteriu de similitudine al caracteristicilor electrice la descărcarea periodică este partea de energie η care se degajă în canal în prima semiperioadă [71]. Aceasta înseamnă că la descărcări cu $\eta = \text{constant}$, curbele adimensionale ale curenților de descărcare, tensiunilor și vitezelor de degajare ale energiei în canalele de descărcare se suprapun.

Expresia care leagă ambele criterii de similitudine este [41]:

$$\eta^3 = \pi^2 \cdot B_k \quad (1.20)$$

De remarcat că mărimea η se modifică în intervalul $0 \dots 1$. Divizând acest interval într-un șir de valori discrete (0,1; 0,2; 0,3... 1), procesul tranzitoriu poate fi reprezentat prin familia de curbe adimensionale ale curentului de descărcare. În figura 1.9., procesul tranzitoriu este reprezentat sub forma unei familii de curbe adimensionale ale curentului de descărcare, obținute pe cale experimentală [41], pentru un șir discret de valori ale criteriului de similitudine η .

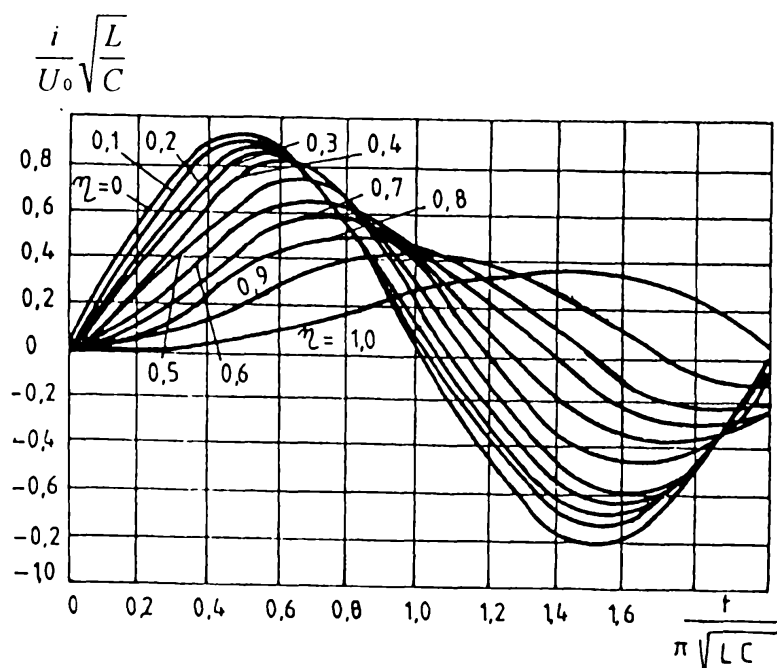


Fig. 1.9.
Familia de curbe
adimensionale ale
curentului de
descărcare.

Cunoscând parametrii circuitului electric de descărcare și distanța dintre electrozi, rezolvarea procesului tranzitoriu folosind criteriul de similitudine η se face în felul următor : cu relațiile (1.19) și (1.20) se află valoarea părții de energie η , iar curba corespunzătoare se determină din figura 1.9. Apoi, coordonatele adimensionale ale curentului și timpului se raportează la coeficienții m_i și m_t , recalculându-se valorile respective. Valoarea lui A se adoptă corespunzător modului de realizare a

scânteii (prin străpungere, respectiv prin inițiere cu fuzibil).

Pentru o determinare completă a principalelor caracteristici electrice ale circuitului de descărcare (inclusiv a tensiunii reale de descărcare, după depășirea stadiului “amorsă”), se poate utiliza și diagrama din figura 1.10., pentru prima semiperioadă pozitivă a curentului de descărcare

[41].

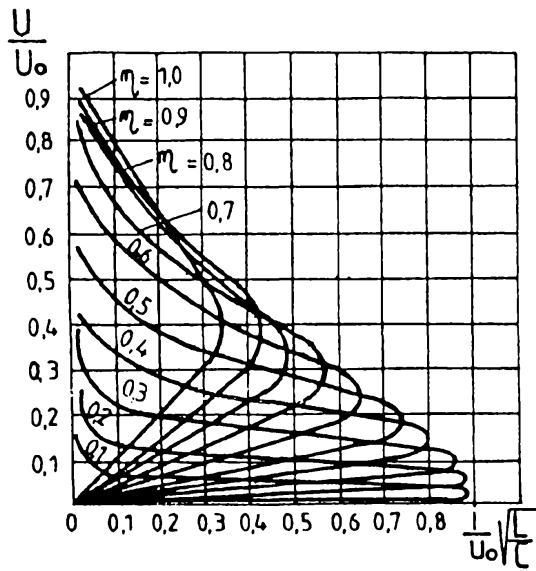


Fig. 1.10. Seria de caracteristici dinamice voltamperice în formă adimensională pentru diferite valori ale criteriului de similitudine η .

Ca urmare a analizei procesului tranzitoriu [41], obținut sub formă parametrică, s-au aflat expresiile de estimare pentru primul maxim al curentului I_m , decrementul de amortizare Δ și durata primei semiperioade T .

De exemplu, pentru regimul oscilant de descărcare :

$$I_m = U_0 \sqrt{\frac{C}{L}} \cdot \left(1 - 0,65 \cdot \eta^2 \right) ; \quad \Delta = \left(1 - \eta^{\frac{3}{2}} \right)^{\frac{2}{3}} ;$$

$$T = \left(1 + 0,65 \cdot \eta^2 \right) \cdot \pi \cdot \sqrt{LC} \quad (1.21)$$

1.3.4. Cazul amorsării cu fir exploziv

În cazul amorsării descărcării prin intermediul firului exploziv se remarcă absența unei teorii unitare care să descrie complet fenomenul din punct de vedere electric și hidrodinamic ceea ce duce, în final, la recomandări de utilizare contradictorii.

Din punct de vedere electrotehnic, fenomenul poate fi descris de ecuația [65]:

$$R_0 \cdot I + L_0 \cdot \frac{dI}{dt} + \frac{1}{C_0} \cdot \int I dt + U_0 + U_c = 0 \quad (1.22)$$

în care U_c este căderea de tensiune pe firul exploziv. Rezolvarea liniară a ecuației (1.22) este greoaie datorită neliniarității rezistenței $R(t)$ și inductivității $L(t)$ a conductorului în timpul descărcării.

Variația curentului de descărcare în funcție de timp, pentru diferite regimuri de descărcare este prezentată în figura 1.11[18]. La creșterea curentului pe porțiunea $t_1 - t_2$ a diagramei, firul se încălzește rapid, ceea ce duce la topirea și apoi la vaporizarea sa.

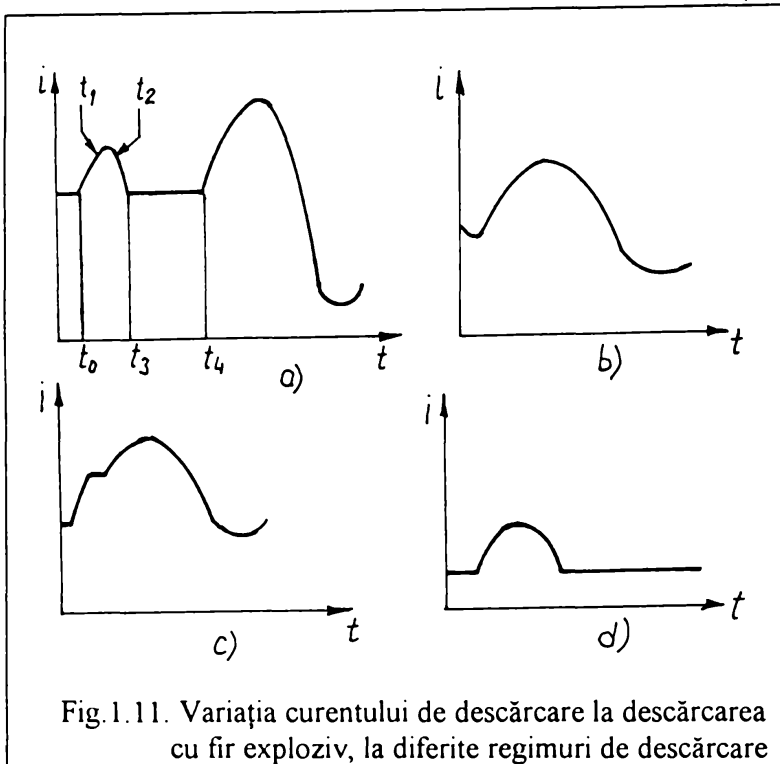


Fig.1.11. Variația curentului de descărcare la descărcarea cu fir exploziv, la diferite regimuri de descărcare

Rezistența metalului vaporizat crește foarte mult, aceasta conducând la o scădere bruscă a curentului pe porțiunea $t_2 - t_3$. Pe porțiunea $t_3 - t_4$ curentul se menține constant, la o valoare scăzută, doar datorită fenomenului de ionizare termică. Ionizarea de șoc lipsește, pe de o parte datorită densității foarte mari a gazului (cea ce duce la lungimi mici ale cursei electronilor), iar pe de altă parte, datorită creșterii peste o valoare limită a energiei electronilor. Referitor la acest ultim

aspect, experiențele [1] arată că, odată cu creșterea energiei electronului, probabilitatea de ionizare crește la început, trece printr-un maxim, după care începe să scadă (fig. 1.12). Se pare că fenomenul s-ar datora faptului că, la ciocnirea electronului cu un atom, are loc o acțiune reciprocă între câmpurile lor electromagnetice. Când viteza electronului este foarte mare, durata acțiunii reciproce a acestor câmpuri se micșorează considerabil, adică se micșorează impulsul care este comunicat atomului. Astfel, se micșorează și viteza inițială necesară pentru smulgerea unui electron din atomul ciocnit. Ionizarea de șoc va apare doar la momentul t_4 , atunci când densitatea gazului scade.

Există cazuri când porțiunea $t_3 - t_4$ lipsește, creîndu-se astfel condițiile unor străpungeri repetate (fig. 1.11.b, 1.11.c). Dacă energia rămasă în bateria de condensatoare este insuficientă unei străpungeri ulterioare, această "pauză de curent" tinde la infinit.

Conform lucrării lui Cnare [26], curentul de aprindere în firul exploziv este dat de :

$$I_b = \left[\left(3 \cdot J \cdot \frac{U_0}{L} \right)^{2/3} - 2,25 \cdot \frac{J^2}{C} \cdot \left(3 \cdot J \cdot L^{1/2} \cdot U_0 \right)^{-2/3} - 2 \cdot R \cdot \frac{J}{L} - 2 \cdot \frac{E_f}{L} \right]^{1/2} \quad (1.23)$$

cu: $J = j \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \int_0^{t_b} i^2 dt \quad (1.24)$

$$E_f = e \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot l = \int_0^{t_b} i^2 \cdot R_f \cdot dt \quad (1.25)$$

unde: J - impulsul la vaporizarea firului; j - impulsul specific la vaporizare (impuls / unitatea de

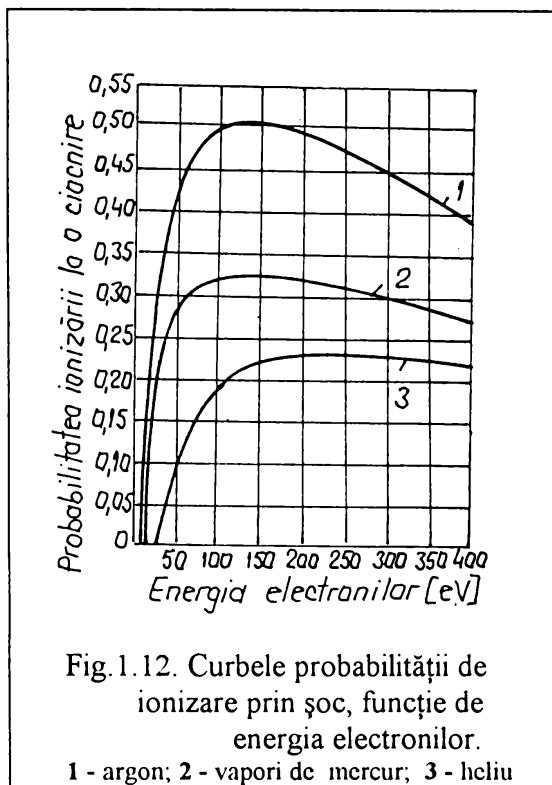
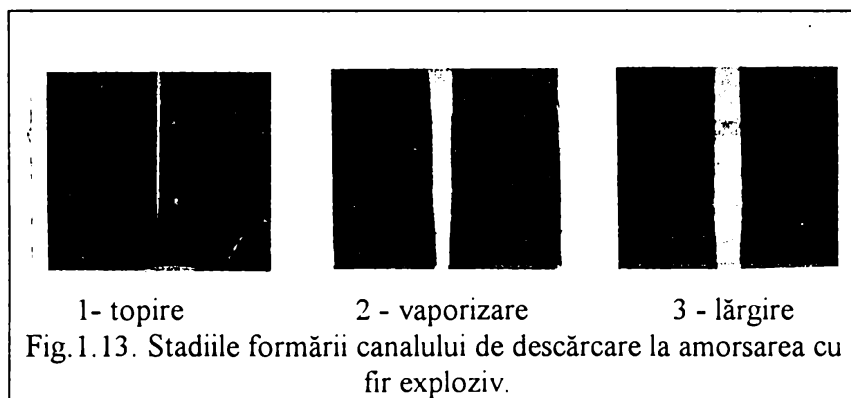


Fig.1.12. Curbele probabilității de ionizare prin șoc, funcție de energia electronilor.
1 - argon; 2 - vapori de mercur; 3 - heliu

suprafață, în $[N \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}]$); E_r - energia de vaporizare a firului; e - energia specifică de vaporizare (energie / unitatea de volum), în $[J / m^3]$; R_r - rezistența electrică a firului; R, L - rezistența, respectiv inductivitatea circuitului de descărcare; d, l - diametrul și lungimea firului exploziv. Relația de mai sus se bazează pe date experimentale obținute cu un fir de aur cu diametrul de 0,038 mm, lungime 1mm și capacități de 0,25 și 1 μF , la tensiuni între 1 și 8 kV.

Pe de altă parte, experimentele au demonstrat [51] posibilitatea evaporării preferențiale și locale, în puncte distincte de-a lungul firului, vaporii ejectați putând conține particule relativ mari de metal lichid. Figura 1.13 prezintă stadiile formării canalului de descărcare în cazul amorsării cu fir exploziv.

După modul în care are loc transformarea de fază a firelor explozive, acestea se pot împărți în [18]: *subțiri*, transformarea de fază având loc în intervalul $t_1 - t_2$ și *groși*, la care același fenomen se petrece în intervalul $t_2 - t_3$. Regimurile de explozie ale firelor cuprind trei categorii: *explozie rapidă*,



1- topire 2 - vaporizare 3 - lărgire
Fig.1.13. Stadiile formării canalului de descărcare la amorsarea cu fir exploziv.

lentă și *topirea*. Explozia rapidă se caracterizează printr-un interval de timp $t_1 - t_2$ foarte scurt în care se produce vaporizarea firului, în comparație cu timpul de creștere a curentului în intervalul $t_0 - t_1$. Topirea este

regimul caracteristic pentru cazurile în care energia de alimentare este insuficientă pentru vaporizarea firului. Explozia lentă se constituie într-un regim intermediar ca durată între primele două.

1.3.5. Generarea și propagarea undei de șoc prin mediul de transmitere

Presiunea dezvoltată în unda de șoc depinde, evident, de presiunea dezvoltată în canalul de descărcare iar viteza undei, de viteza de dilatare a canalului de plasmă. Structura canalului de plasmă și aprecierea zonală a presiunilor în interiorul canalului, așa cum este acceptată în lucrările [19,65]

este prezentată în figura (1.14). Astfel, conform aceluiași lucrări, parametrii inițiali ai canalului de plasmă și ai câmpului de presiuni sunt:

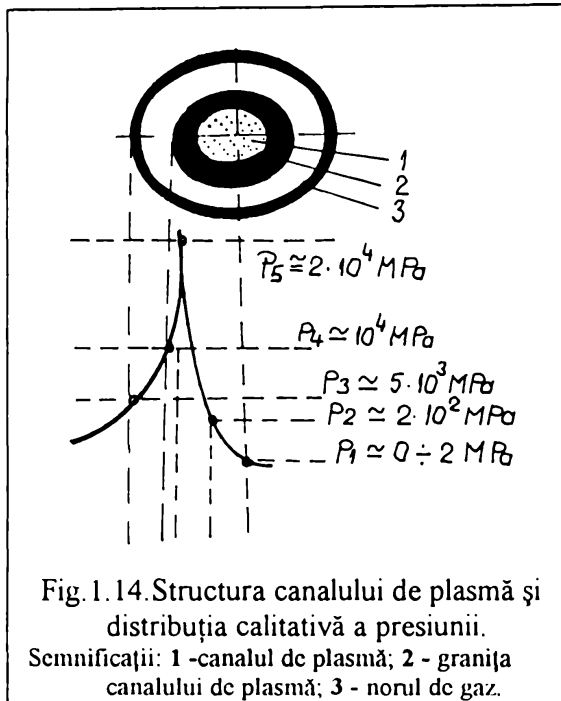


Fig. 1.14. Structura canalului de plasmă și distribuția calitativă a presiunii.
Semnificații: 1 - canalul de plasmă; 2 - granița canalului de plasmă; 3 - norul de gaz.

(1·L₀).

Considerând un front al undei sferic, Reley [19,65] indică următoarea relație pentru calculul valorii maxime a razei cavitații, atunci când viteza de expansiune devine nulă:

$$r_{c \max} = \eta_g \cdot \left(\frac{W_c}{\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot P_{c0}} \right)^{1/3} \quad (1.30)$$

în care η_g reprezintă raportul dintre energia cavitații bulei de gaz W_c și energia degajată în canal W_c iar P_{c0} reprezintă presiunea inițială în cavitatea bulei de gaz.

Naugolnih și Roy[19,65], studiind lărgirea canalului de descărcare, dau următoarele relații pentru calculul presiunii și razei canalului:

$$P_c = \rho_0 \cdot \frac{\ddot{V}_c}{4\pi \cdot r_c} - \frac{1}{2} \cdot \rho_0 \cdot \frac{V_c^2}{16\pi \cdot r_c^4} \quad (1.31)$$

$$r_c = \alpha \cdot \sqrt[3]{\frac{1}{\rho_0}} \cdot \sqrt[3]{\tau^2} \cdot \sqrt[3]{W_c(t)} \cdot y \quad (1.32)$$

unde : $\alpha = [(3/4) \cdot \pi \cdot (\gamma - 1)]^{1/5}$; $y = r_c / r_{c0}$; $\tau = L_0 C_0$

În relațiile de mai sus s-au folosit următoarele notații: V_c - volumul canalului de plasmă; \ddot{V}_c - accelerația mișcării de dilatare a canalului; W_c - energia degajată în canalul de plasmă; ρ_0 - densitatea mediului de transmitere; L_0 , C_0 - inductivitatea și capacitatea circuitului de descărcare; r_{c0} - raza

- viteza inițială de lărgire a canalului de descărcare:

$$v_c = 7,9 \cdot 10^{-2} (\dot{N}/I)^{1/4} \quad [\text{m/s}] \quad (1.26)$$

- temperatura inițială a plasmei:

$$T = 56 \cdot (\dot{N}/I)^{1/6} \quad [^\circ\text{K}] \quad (1.27)$$

- viteza inițială a frontului undei [m/s]:

$$v_f = 7,5 \cdot 10^2 \{1 + [1 + 4,4 \cdot 10^{-8} (\dot{N}/I)]^{1/2}\}^{1/2} \quad (1.28)$$

- presiunea inițială pe frontul undei:

$$P_u = 6,4 \cdot 10^{-5} (\dot{N}/I)^{1/2} \quad [\text{Pa}] \quad (1.29)$$

unde \dot{N}/I este dată ca fiind viteza de creștere a puterii electrice în canalul de plasmă. Okuni [19,65] indică, pentru un regim de descărcare periodic cu decrement mare de amortizare (considerat ca fiind cel mai potrivit), o valoare $\dot{N}/I = (0,2 \dots 0,22) \cdot U_0 /$

inițială a canalului de descărcare (funcția y fiind tabulată în [19]); γ - coeficientul adiabatic al plasmiei canalului.

Presiunea maximă în unda de compresiune, la distanța r de axa descărcării se poate evalua cu:

$$P_{uc} = K \cdot \frac{1}{r} \cdot \left(\frac{C_0 \cdot U_0^6 \cdot \rho_0^2}{L_0^2} \right)^{1/5} \tag{1.33}$$

unde K este un coeficient adimensional. Eliminând K și ρ_0 din relație, se obține:

$$P_{uc} \cong 10^4 \cdot \frac{1}{r} \cdot \left(\frac{C_0 \cdot U_0^6}{L_0^2} \right)^{1/5} \tag{1.34}$$

În cazul simetriei cilindrice, parametrii canalului și undei se dau sub forma [65]:

– raza canalului: $r_c = r_{co} \cdot y$ (1.35)

– presiunea în direcție transversală pe axă:

$$P_p \cong \rho_0 \cdot \frac{r_c^2 \cdot l}{2 \cdot \tau \cdot r} \cdot \frac{f(x)}{y^2 \cdot \ln \frac{2 \cdot \tau \cdot c_0 \cdot x}{r_{co} \cdot y}} \tag{1.36}$$

– presiunea în direcție longitudinală:

$$P_l = \frac{\rho_0 \cdot c_0 \cdot r_c^2}{2 \cdot r \cdot \theta} \cdot \int_{x_1}^{x_2} \frac{dz}{dx} dx \tag{1.37}$$

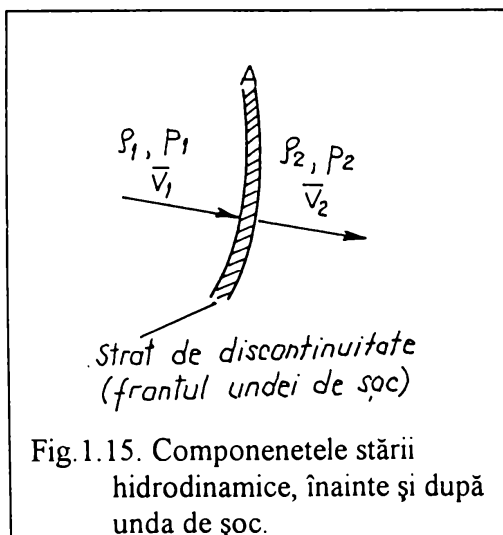
unde $z = y^2 \cdot dy/dx$ și $x_{1,2} = x - \frac{r_c}{c_0 \cdot \tau} \pm \frac{l}{2 \cdot c_0 \cdot \tau}$ (1.38)

Funcțiile $f(x)$ și z sunt, ca și x , funcții tabulate [19], iar c_0 reprezintă viteza sunetului în mediul de transmitere. Variabila θ reprezintă timpul caracteristic care determină intensitatea căderii de presiune în punctul de calcul considerat. Unele lucrări [84], definesc variabila θ ca fiind timpul

caracteristic în care presiunea frontului de undă în punctul considerat al spațiului scade de "e" ori.

În ceea ce privește propagarea undei de șoc în lichid, după ce frontul acesteia se desprinde de marginea canalului de plasmă (aserțiune făcută în subcapitolele anterioare), majoritatea lucrărilor de specialitate [4,13,20,76,77] se bazează pe analogia calitativă cu undele de șoc generate de detonarea explozivilor.

Baza modelului matematic folosit pentru descrierea procesului de propagare a undei de șoc în lichide constă în



ecuațiile conservării masei, energiei și impulsului. Aceste teoreme de conservare dau relațiile de salt pentru mărimile de stare peste suprafața de șoc, considerată suprafață de discontinuitate. Aceste relații reprezintă o idealizare a faptului că, în straturi foarte subțiri (cu ordinul de mărime al lungimii drumului liber al moleculei lichidului), gradientii mărimilor de stare și de material pot avea valori mari. În cadrul teoriei mecanicii mediilor continue aceste comportări sunt asociate discontinuităților, respectiv undei de șoc de compresiune. Pentru curgerile staționare, fără forțe masice, de frecare și termice, legile de conservare pot fi scrise, în forma lor cea mai simplă, sub forma [20,65,110]:

$$\begin{aligned} \rho_1 \cdot v_1 &= \rho_2 \cdot v_2 \\ p_1 + \rho_1 \cdot v_1^2 &= p_2 + \rho_2 \cdot v_2^2 \\ W_1 + 0,5 \cdot v_1^2 + \frac{p_1}{\rho_1} &= W_2 + 0,5 \cdot v_2^2 + \frac{p_2}{\rho_2} \end{aligned} \quad (1.39)$$

unde cu ρ_1 , ρ_2 au fost notate densitățile mediului de transmitere înainte și după unda de șoc; p_1 , p_2 - presiunile în mediul de transmitere înainte și după unda de șoc; v_1 , v_2 - vitezele straturilor adiacente ale mediului de transmitere, pe frontul undei, înainte și după unda de șoc; W_1 , W_2 - energiile în unda de șoc, înainte și după frontul acesteia.

Dacă procesul este considerat adiabatic (conform lui Bridgmann, citat în lucrarea [65]), până la presiuni de aproximativ 2500 MPa, atunci se poate găsi o relație între presiune și densitate, după frontul undei de șoc, de forma [20]:

$$p_2 = \frac{\rho_1 \cdot c_1^2}{n} \cdot \left[\left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right)^n - 1 \right] \quad (1.40)$$

care reprezintă de fapt ecuația de stare a lui Tait [20, 65]. În această relație, în cazul utilizării apei ca mediu de transmitere, se dau valorile $n = 7,15$ și $(\rho_1 \cdot c_1^2)/n = 304,7$ MPa.

Deasemenea, lucrarea [20] indică o relație de calcul a vitezei undei de șoc, ca o funcție de distanță și timp:

$$v(r, t) = \frac{p(r, t) - p_1}{\rho_1 \cdot c_1} + \frac{1}{\rho_1 \cdot r} \int_0^t [p(r, t) - p_1] dt \quad (1.41)$$

unde $p(r, t)$ - presiunea în punctul considerat de rază r , la momentul t ; c_1 - viteza undei de șoc în mediul de transmitere, la densitatea ρ_1 .

După ce unda de șoc se desprinde de granița canalului, variația în timp a presiunii în apă se poate exprima prin dependența exponențială [84]:

$$p = A \cdot e^{-\frac{t}{\theta}} \cdot \frac{1}{r} \quad (1.42)$$

cu următoarele semnificații: A - coeficient ce depinde de puterea sursei de energie; k - exponent depinzând de amplitudinea undei, cu valori între 1 și 1,5.

Relația de mai sus poate avea o formă particulară [20,65]:

$$p(t) = p_{\max} \cdot e^{-t/\theta} \quad (1.43)$$

unde p_{\max} este presiunea maximă dezvoltată de frontul undei de șoc.

Pentru energia undei de șoc este indicată relația [65]:

$$W_u = \frac{1}{\rho_1 \cdot c_1} \int_0^t p^2(t) dt \quad (1.44)$$

O altă relație de calcul a presiunii pe frontul undei de șoc este indicată în lucrarea [97], de forma:

$$p = \frac{325 \left[(1,2 + 0,5 \cdot \sqrt{C}) \cdot U + 4 \cdot l + 32 \right]}{R} \quad (1.45)$$

unde R reprezintă rezistența circuitului de descărcare.

1.3.6. Interacțiunea undei de șoc cu pereții camerei de descărcare

Studiului influenței formei și volumului camerei de descărcare asupra mărimii și repartiției câmpului de presiune în lichid și pe semifabricat îi sunt consacrate un număr destul de mare din lucrările de specialitate [18,65,69,80,84,100]. Astfel, studiile se bazează pe considerații ce pornesc de la forma camerei de descărcare (cilindrică, conică, parabolică, exponențială) și volumul acesteia.

În funcție de volum, camerele de descărcare se pot împărți în *camere de volum mare* și *camere de volum mic* [19,65]. Camerele de descărcare de volum mare sunt considerate acele camere, la care volumul este mai mare decât volumul bulei de gaz, desfășurarea procesului și eficiența acestuia fiind puternic influențate de undele de șoc reflectate de la pereții camerei (fenomenul de cavitație lipsind). Într-un mod similar, pentru aceste tipuri de camere, se tratează problemele legate de utilizarea reflectoarelor de undă [23,84,94]. Pentru camerele de volum mic, la care volumul este comparativ ca mărime cu mărimea bulei de gaz, principalele influențe în desfășurarea procesului de deformare le au undele de șoc și presiunea bulei de gaz.

Interacțiunea undei de șoc cu pereții camerei de descărcare modifică distribuția și mărimea câmpului de presiuni în orice zonă a spațiului de lichid, poate modifica momentul apariției cavitației și, deasemenea, cota de energie a fenomenelor secundare (fenomene cavitaționale și postcavitaționale), în raport cu energia undei de șoc, ce participă la deformarea semifabricatului.

În general, determinarea modelelor matematice ce descriu procesul de propagare a undelor de șoc directe (incidente) și reflectate, pentru camere de volum mare, pornesc de la o formă generalizată de cameră, de genul celei reprezentate în figura 1.16 și de la o formă sferică a frontului undei de șoc.

Ecuția în plan a curburii peretelui camerei este de forma $y = f(x)$, celelalte notații din figură având următoarele semnificații: R_0 - raza camerei în secțiunea de ieșire (asimilată cu raza semifabricatului plan); R_{si} - raza unui punct oarecare "i" de pe semifabricat, măsurată în planul acestuia; γ - unghiul sub care se vede întregul semifabricat plan; γ_{ri} - unghiul format de unda directă (sau de direcția r_{oi}) cu axa Oy; r_{oi} - distanța de la punctul O la punctul "i" de pe semifabricat; α_1, α_2 - unghiurile formate de razele reflectate cu axa Oy; h, h_1 - distanțele dintre axa descărcării și semifabricat, respectiv dintre axa descărcării și peretele camerei, măsurate perpendicular pe semifabricat; A_1, A_2 - puncte de reflexie pe peretele camerei. Punctul O este considerat ca fiind situat pe axa descărcării, la mijlocul distanței dintre electrozi.

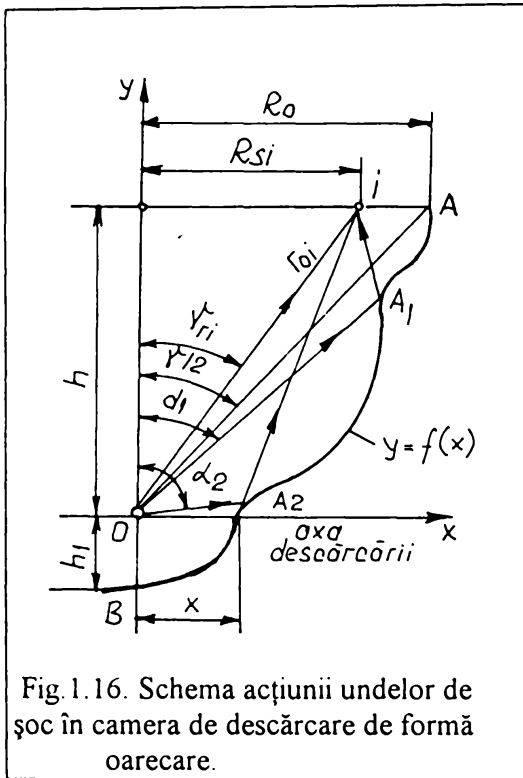


Fig.1.16. Schema acțiunii undelor de șoc în camera de descărcare de formă oarecare.

În lucrarea [65] este prezentat un model de acțiune a undelor de șoc directe și reflectate, pornind de la scrierea ecuației (1.43) sub forma:

$$P_i(t) = P_{\max} \cdot e^{-t/\theta} \cdot \cos \gamma_n \tag{ 1.46 }$$

unde γ_{ri} se poate înlocui cu h / r_{oi} .

Această abordare nu este singulară, ea pornind de la premisa că energia consumată pentru deformare depinde de unghiul sub care se vede semifabricatul, această energie reprezentând, în cazul unei surse sferice de energie, aproximativ $\gamma / 4\pi$ din întreaga energie concentrată în undă [4,34,35].

Presiunea în unda reflectată de la perete poate fi descrisă de expresia:

$$P_{rp}(t) = P_{\max} \cdot e^{-\frac{t-t_0}{\theta}} \cdot \frac{h}{r_{oi}} \cdot \left[A \cdot \sigma(t-t_0) - B \cdot E_i \cdot \left(\frac{t-t_0}{\theta} \right) \cdot \sigma(t-t_1) \right] \tag{ 1.47 }$$

unde $\sigma(t)$ este funcția Heaviside; E_i - logaritm integral; t_0, t_1 - timpii scurși până la atingerea punctului considerat de către unda de șoc incidentă și reflectată; A, B - coeficienți de reflectare de forma:

$$A = \frac{\left[(2-x)^2 - 4 \cdot (1-x)^{1/2} \cdot (1-\delta_1^2 \cdot x)^{1/2} \right]^2 - D^2 \cdot x^4 \cdot (1-\delta_1^2 \cdot x) \cdot (\delta_2^2 \cdot x - 1)^{-1}}{\left[(2-x)^2 - 4 \cdot (1-x)^{1/2} \cdot (1-\delta_1^2 \cdot x)^{1/2} \right]^2 + D^2 \cdot x^4 \cdot (1-\delta_1^2 \cdot x) \cdot (\delta_2^2 \cdot x - 1)^{-1}} \tag{ 1.48 }$$

$$B = \frac{\left[(2-x)^2 - 4 \cdot (1-x)^{1/2} \cdot (1-\delta_1^2 \cdot x)^{1/2} \right]^2 \cdot 2D \cdot x^2 \cdot (1-\delta_1^2 \cdot x)^{1/2} \cdot (\delta_2^2 \cdot x - 1)^{-1}}{\left[\pi \cdot (2-x)^2 - 4 \cdot (1-x)^{1/2} \cdot (1-\delta_1^2 \cdot x)^{1/2} \right]^2 + D^2 \cdot x^4 \cdot (1-\delta_1^2 \cdot x) \cdot (\delta_2^2 \cdot x - 1)^{-1}} \quad (1.49)$$

în care s-a folosit următorul sistem de parametri :

$$x = \frac{1}{\delta_2^2 \cdot \cos^2 \alpha_1} \quad ; \quad \delta_1 = c_l / c_t \quad ; \quad \delta_2 = c_l / c_o \quad ; \quad D = \rho_o / \rho_l \quad (1.50)$$

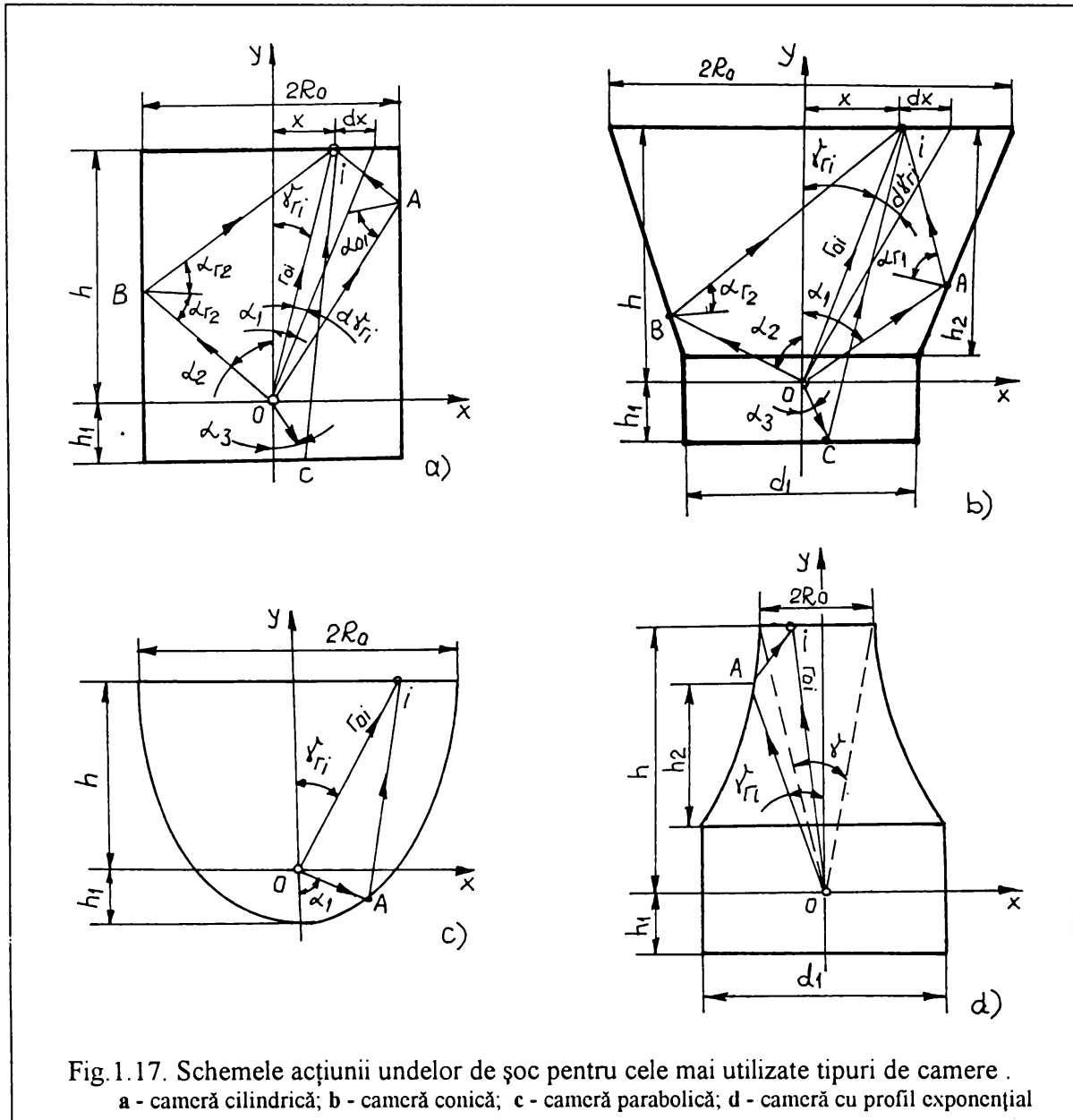


Fig. 1.17. Schemele acțiunii undelor de șoc pentru cele mai utilizate tipuri de camere .
 a - cameră cilindrică; b - cameră conică; c - cameră parabolică; d - cameră cu profil exponențial

unde \$c_l\$ și \$c_t\$ reprezintă vitezele de propagare ale undelor longitudinale și transversale în metal; \$c_o\$ - viteza de propagare a sunetului în mediul lichid; \$\rho_o\$, \$\rho_l\$ - densitățile mediului lichid și ale materialului suprafeței de reflexie.

Presiunea în unda reflectată de la semifabricat, în punctul "i", este dată de relația [65]:

$$P_{rsi}(t) = P_i(t) - \rho_o \cdot c_o \cdot v_s \quad (1.51)$$

unde produsul $\rho_o \cdot c_o$ reprezintă impedanța acustică a lichidului, iar v_s este viteza de deplasare a semifabricatului în timpul deformării.

În figura 1.17. au fost reprezentate schemele de calcul ale acțiunii undelor de șoc directe și reflectate pentru cele mai cunoscute tipuri de camere de descărcare.

Pentru camerele cilindrice și conice [18,19,65,80] presiunea în unda directă ce cade pe semifabricat poate fi scrisă și sub forma:

$$P_i(x) = P_d \cdot \cos \gamma_i \quad (1.52)$$

caz în care P_d ar trebui să reprezinte presiunea dezvoltată pe semifabricat de către unda de șoc directă, la o incidență normală (r_{oi} perpendicular pe semifabricat). Variabila x poate fi interpretată și ca raza curentă a punctului "i" considerat de pe semifabricat, măsurată în planul semifabricatului.

Presiunea în unda reflectată de la perete este dată de expresia:

$$P_{rp}(x) = \frac{P_{dp}(x)}{r(\alpha)} \cdot K_1(\alpha) \cdot K_2(\alpha) \cdot f(t) \quad (1.53)$$

în care P_{dp} este presiunea în unda directă ce lovește peretele camerei de descărcare; $K_1(\alpha)$ - coeficient ce ține seama de divergența undelor la reflectarea pe pereții camerei; $K_2(\alpha)$ - coeficientul de reflexie al undei de șoc pe peretele camerei; $r(\alpha)$ - raza de curbură a frontului undei reflectate, ce depinde de unghiul de reflexie; r_o - raza de curbură a frontului undei directe ce lovește peretele camerei; $f(t)$ - funcție ce depinde de timp și care exprimă legea variației presiunii de-a lungul frontului undei de șoc.

Pentru camerele de descărcare exponențiale și parabolice, în general se adoptă ca ipoteză de lucru, ipoteza acusticii geometrice [84,104].

În ceea ce privește energia undelor de șoc, lucrarea [80] prezintă un mod de apreciere al acestora, preluat din [18]. Astfel, pentru camerele de descărcare cilindrice și conice (fig. 1.17.a și 1.17.b), energia totală captată de semifabricat se poate deduce din relația:

$$W = \iint_{m \times} W_u(x) \cdot x \cdot dx \cdot d\gamma_n \quad (1.54)$$

unde $W_u(x)$ este distribuția de energie a undei de șoc.

Pornind de la ipoteza că energia frontului undei de șoc însumează atât energia undei directe cât și energia undei reflectate, se poate scrie:

$$W_u(x) = W_d(x) + W_r(x) \quad (1.55)$$

În acest caz, s-a găsit [18,80]:

$$W = \frac{\theta}{2 \cdot \rho_0 \cdot c_0} \int_0^{r/2} \int_0^{R_0} \left\{ [P_i(x)]^2 + [P_{rp}(x)]^2 + [P_{rc}(x)]^2 \right\} \cdot x \cdot dx \cdot d\gamma_{ri} \quad (1.56)$$

unde θ - constantă exponențială.

Cercetările efectuate asupra undei de șoc incidente pe peretele camerei au dus la determinarea unui unghi critic $\alpha_r = \alpha_{cr}$, la care coeficientul de reflexie devine nul. Se dă astfel valoarea $\alpha_{cr} = 3^\circ$. Pentru $\alpha_r > 18^\circ$, coeficientul de reflexie este aproximativ egal cu 1 [65].

1.3.7. Interacțiunea undelor de șoc și a fenomenelor secundare cu semifabricatul

Rezultatul tuturor fenomenelor ce au loc în camera de descărcare, de orice natură ar fi ele, duc la apariția impulsurilor de presiune pe semifabricatul plan. Cauzele apariției impulsurilor de presiune și modul de propagare al acestora prin lichid au fost prezentate pe scurt în subcapitolele anterioare. Repartiția câmpului de presiune pe semifabricat, fenomenele ce apar la impactul undei de șoc cu semifabricatul fac și la ora actuală obiectul studiilor teoretice și cercetărilor experimentale. În general însă, concluziile teoretice sunt contradictorii și cu aplicabilitate restrânsă, deoarece complexitatea fenomenelor ce apar și mai ales instabilitatea lor (mai ales la descărcarea cu străpungerea directă a spațiului dintre electrozi) duc la un grad de predictibilitate redus.

Multe studii pornesc de la ipoteza unei analogii între explozia electrohidraulică și explozia încărcăturilor brizante în apă [4,18,34,52,53,59]. Aceasta însă nu poate fi generalizată datorită

diferențelor între formele surselor de energie; astfel, explozia electrohidraulică este întotdeauna o sursă liniară, pe când încărcăturile explozive sunt considerate, în majoritatea cazurilor, ca și surse punctiforme.

Oricum, este în general acceptat un câmp de distribuție al presiunii de genul celui prezentat în figura 1.18.

Lucrarea [19] conține o analiză a acțiunii undei de șoc asupra semifabricatului plan nefixat, cu impedanță acustică mare, în spatele său aflându-se un spațiu cu rezistență acustică mică. Ecuația presiunii rezultante în punctul "i" de pe semifabricat poate fi scrisă sub forma:

$$P_{rezi}(t) = 2 \cdot P_i(t) - \rho_0 \cdot c_0 \cdot v_s \quad (1.57)$$

asemănătoare relației (1.51), unde $P_i(t)$ este de forma

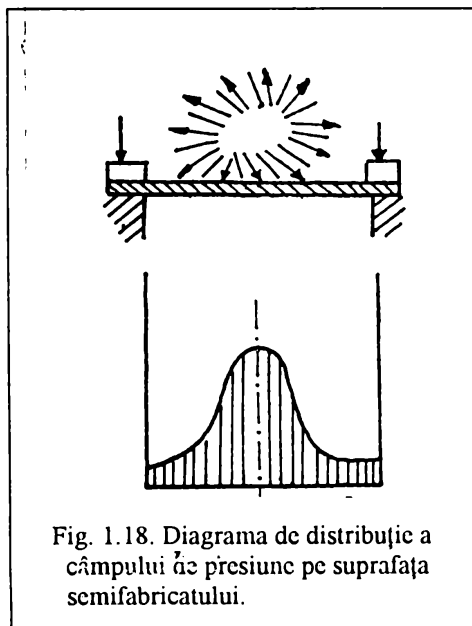


Fig. 1.18. Diagrama de distribuție a câmpului de presiune pe suprafața semifabricatului.

(1.43).

Se găsește, în final:

$$s_{\max} = \frac{2 \cdot P_{\max} \cdot \theta}{\rho_0 \cdot c_0} \tag{1.58}$$

în care s_{\max} este adâncimea maximă de ambutisare în punctul considerat.

Cole [20] studiază presiunea în mediul de transmitere, într-un punct oarecare din fața semifabricatului, în funcție de o mărime " $t - x/c_0$ ", unde x este distanța dintre punctul cercetat în lichid și semifabricat. El găsește astfel expresia (1.60) pentru presiunea rezultantă pe semifabricat, în care mărimea β este considerată a fi măsura inerției relative a semifabricatului, definită prin:

$$\beta = \frac{\rho_0 \cdot c_0}{m} \cdot \theta \tag{1.59}$$

unde m este masa semifabricatului.

$$P_{\text{rezi}}(t) = P_{\max} \left[e^{-\frac{t-x/c_0}{\theta}} + \frac{1+\beta}{1-\beta} \cdot e^{-\frac{t-x/c_0}{\theta}} - \frac{2 \cdot \beta}{1-\beta} \cdot e^{-\beta \left(\frac{t-x/c_0}{\theta}\right)} \right] \tag{1.60}$$

Două exemple de distribuții ale câmpurilor de egală presiune obținute prin această metodologie, trasate ca funcții de poziție și timp, sunt prezentate în figura 1.19 [65].

După cum se observă, în fața semifabricatului presiunea scade rapid, trece prin zero, după care, la un moment dat, devine negativă. Durata de timp scursă până la anularea presiunii depinde de valoarea lui β și definește momentul apariției cavitației t_k , calculabil cu relația [20,65]:

$$t_k = \frac{\ln \beta}{\beta - 1} \cdot \theta \tag{1.61}$$

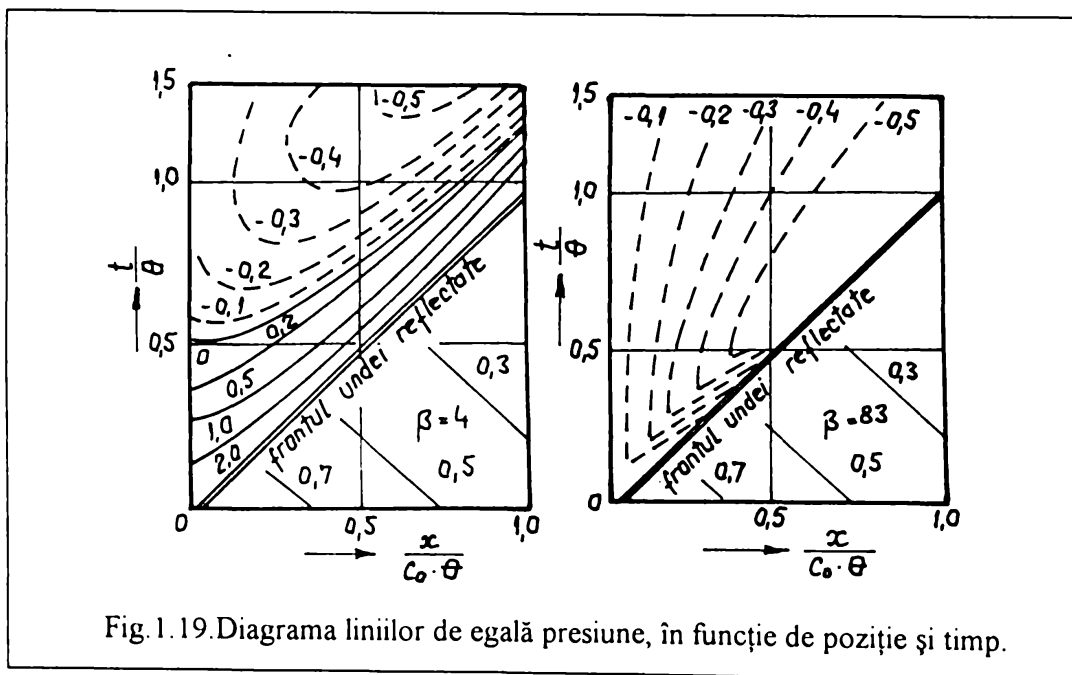


Fig. 1.19. Diagrama liniilor de egală presiune, în funcție de poziție și timp.

Datorită apariției acestui fenomen de cavitație, Cole [20,65] consideră că, începând din momentul t_k , intervine o separare a semifabricatului de stratul de lichid (disociere), deformarea producându-se numai sub acțiunea vitezei căpătate până în acel moment. Se determină astfel adâncimea maximă de ambutisare în zona centrală a semifabricatului, sub forma:

$$s_{\max} = \frac{P_{\max}}{\rho_0 \cdot c_0} \cdot \left(\frac{2 \cdot \ln \beta}{R_c \cdot g} \cdot \beta \cdot \frac{-1}{1 - \beta} \right)^{1/2} \quad (1.62)$$

în care R_c - limita de curgere a materialului semifabricatului; g - grosimea semifabricatului.

Diferențele dintre rezultatele experimentale și cele calculate cu relația (1.62) au dus la luarea în considerare și a forțelor de rezistență la deformare plastică, ceea ce a dus la concluzia unei încărcări repetate a semifabricatului [20,65], datorită stratului de lichid dintre acesta și unda de compresiune. În final, se propune ca valoarea lui s_{\max} obținută cu (1.62) să fie înmulțită cu valoarea $(1 + \beta/4)^{1/2}$, pentru a lua în considerare și fenomenele secundare care pot duce la mărirea gradului de deformare rezultat la piesa ambutisată.

Lucrarea [18] conține un studiu de caz particular al procesului de interacțiune dintre fenomenele impulsive și semifabricat, când raza semifabricatului este egală cu distanța dintre axa descărcării și semifabricat (fig. 1.20 [65]). Sunt evidențiate trei etape de desfășurare a procesului: prima etapă începe în momentul impactului undelor de șoc cu semifabricatul și se termină în momentul apariției cavitației, la momentul t_k ; a doua etapă este considerată a fi acțiunea fluxului hidraulic cavitațional iar a treia, acțiunea fluxului hidraulic postcavitațional.

Cercetările teoretice [18] pornesc de la ipoteza că întreaga energie a fluxului de lichid cavitațional se transformă în lucru mecanic de deformare plastică a semifabricatului, astfel încât analiza procesului se reduce la ecuația:

$$m \cdot a_s + K \cdot s = 0 \quad (1.63)$$

în care a_s este accelerația semifabricatului iar K este un coeficient de acțiune utilă. Ecuația nu ține cont de rezistența la deplasare a semifabricatului. Datorită faptului că viteza lichidului cavitațional este mai mare decât cea a semifabricatului și a stratului de lichid adiacent, apar pierderi de energie. Considerând cazul ciocnirii neelastice, pierderile ce apar la acțiunea fluxului de lichid cavitațional asupra semifabricatului se pot scrie sub forma [18,65]:

$$\Delta W = \frac{m_1 \cdot m_2}{2 \cdot (m_1 + m_2)} (v_1 - v_2)^2 \quad (1.64)$$

unde m_1 , v_1 - masa și viteza lichidului de cavitație; m_2 , v_2 - masa și viteza semifabricatului și a stratului de lichid adiacent. Considerând $m_1 < m_2$ și $v_1 - v_2 = \Delta v$, rezultă:

$$\Delta W = m_1 \cdot \Delta v^2 / 2 \quad (1.65)$$

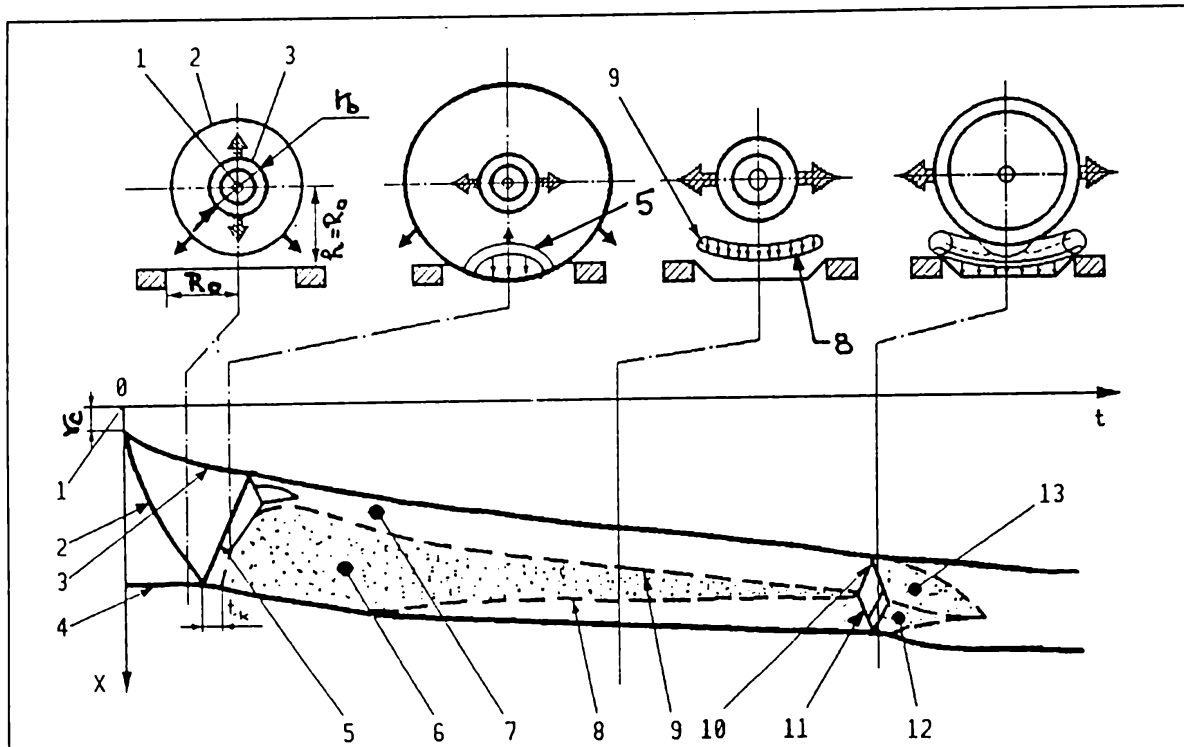


Fig.1.20. Diagrama de evoluție a procesului de interacțiune dintre fenomenele impulsive și semifabricat.

Semnificații: r_c - raza canalului de descărcare; r_b - raza bulcii de gaz (inițial $r_c = r_b$); 1 - canalul de descărcare;

2 - frontul undei de șoc; 3 - granița bulcii de gaz; 4 - curba deformării semifabricatului; 5 - evoluția undei reflectate; 6 - zona lichidului de cavitație; 7 - zonă suplimentară zonei 6; 8 - frontul undei de compresie din interiorul zonei de cavitație; 9,10,11 - unde de compresie datorate încărcărilor repetate; 12,13 - zone de cavitație.

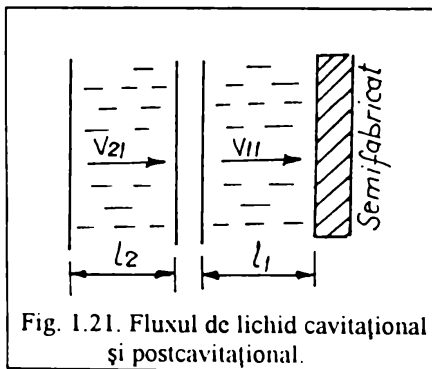


Fig. 1.21. Fluxul de lichid cavitațional și postcavitațional.

Rezultă că pierderile de energie în acest stadiu vor fi cu atât mai mici, cu cât diferența Δv este mai mică. Aceasta impune o viteză mare de deplasare a semifabricatului.

După încetarea acțiunii lichidului cavitațional, acesta va avea aceeași viteză de deplasare cu a semifabricatului, adică v_{11} , fiind de grosimea l_1 (fig.1.21). Stratul de lichid de grosime l_2 , care are aspectul unui flux de bule gazoase, se poate considera că are o viteză medie $v_{2l} > v_{11}$.

Viteza de deplasare a stratului de lichid adiacent semifabricatului, v_{11} , scade continuu, datorită rezistenței la deplasare a semifabricatului. Ca urmare, la un moment dat, stratul l_2 aderă la stratul l_1 și semifabricat, ceea ce se traduce prin apariția undelor de presiune la granița dintre cele două straturi.

În lucrarea [65] este prezentat, pentru camera de descărcare de volum mare, un model de calcul iterativ a presiunii rezultante pe semifabricat bazat pe relația:

$$P_{\text{rezi}}(t) = 2 \cdot 10^4 \cdot \left(\frac{C_0 \cdot U_0^6}{L_0^2} \right)^{1/5} \cdot \frac{h}{r_{oi}} + \sum_{k=1}^n P_{\text{rpk}}(t) - \rho_0 \cdot c_0 \cdot v_s \quad (1.66)$$

obținută ca o combinație a relațiilor (1.34), (1.51), (1.57), unde n reprezintă numărul punctelor în care are loc reflexia. Influența volumului și formei camerei de descărcare este luată în considerare prin termenii h și r_{oi} , respectiv x și α_l din relațiile (1.48), (1.49) și (1.50).

Modelul se bazează pe ipoteza că semifabricatul se deplasează sub acțiunea undelor de șoc numai pe durata t_k . Se discretizează acest timp în p cuante de timp notate cu $\Delta t_{kp} = 10^{-8}$ [s], considerându-se că, pe o cantă de timp, presiunea rezultantă pe semifabricat este constantă și egală cu valoarea medie a distribuției presiunii pe cuanta respectivă $P_{\text{med}\Delta t}$.

Ecuția de mișcare a semifabricatului plan, care se deformează în cuanta de timp Δt_{kp} , se scrie sub forma:

$$m \cdot a_s + \rho_0 \cdot c_0 \cdot v_s = P_{\text{med}\Delta t} - F_0 \quad (1.67)$$

unde F_0 reprezintă forța de rezistență la deplasare a semifabricatului și, pentru intervalul de timp Δt_{kp} este considerată constantă.

Adâncimea de ambutisare la momentul Δt_{kp} este dată de relația:

$$s_{\Delta t} = \frac{P_{\text{med}\Delta t} - F_0}{\beta \cdot m} \cdot \left[\frac{\theta}{\beta} \cdot (e^{-\beta/\theta \cdot t} - 1) + t \right] \cdot \theta \quad (1.68)$$

Pentru o evaluare cantitativă a procesului de transformare a energiei undei de șoc în energie mecanică de deformare, se definește [18,65] un coeficient K_1 al acțiunii utile, de forma:

$$K_1 = \frac{m \cdot v_{tk}^2}{2 \cdot W_{\text{tus}}} \quad (1.69)$$

unde v_{tk} reprezintă viteza maximă a semifabricatului în timpul acțiunii undelor de șoc, iar W_{tus} reprezintă energia totală a undelor de șoc, dedusă din relația (1.44):

$$W_{\text{tus}} = \frac{P_{\text{max}}^2 \cdot \theta}{2 \cdot \rho_0 \cdot c_0} \quad (1.70)$$

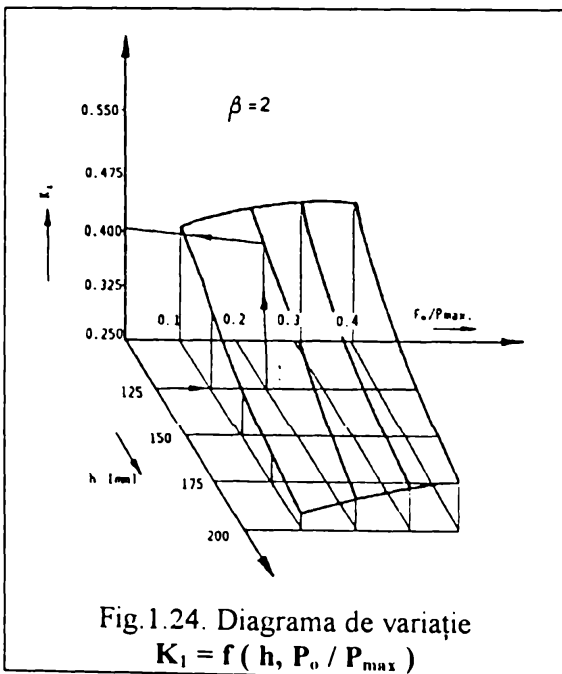
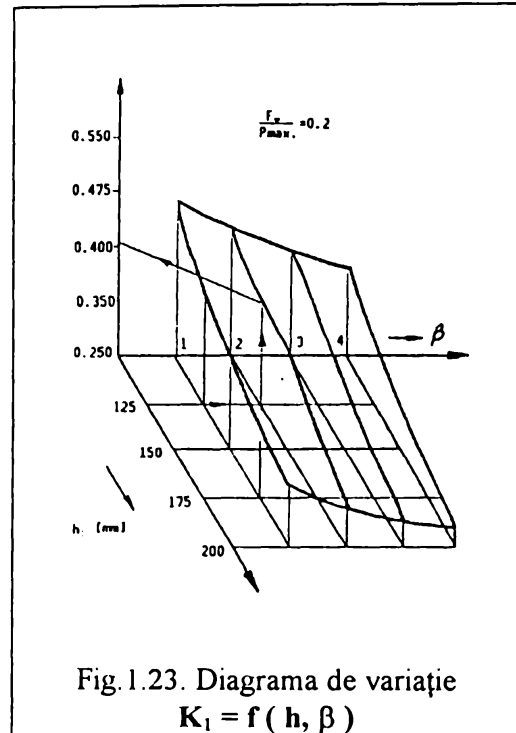
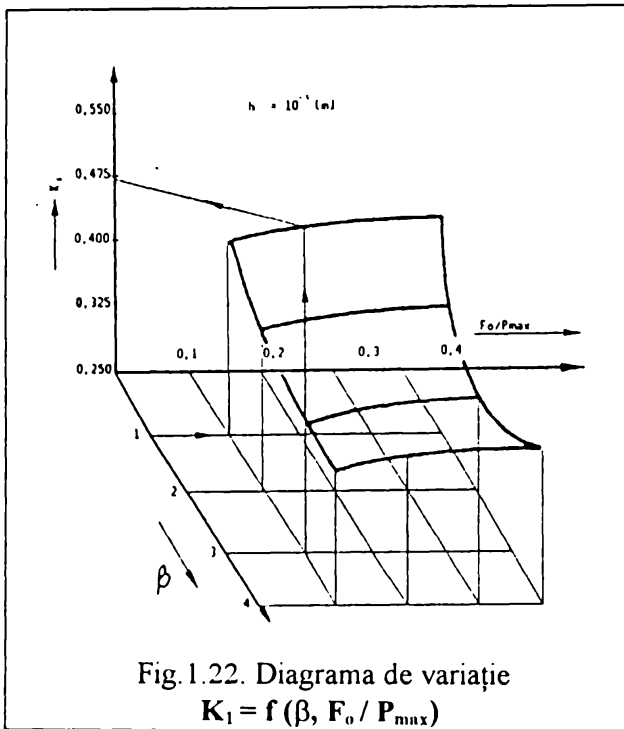
Energia undei directe este calculată cu expresia:

$$W_{\text{dt}} = \frac{1}{\rho_0 \cdot c_0} \cdot \int_0^t (P_{\text{max}} \cdot e^{-t/\theta})^2 dt \quad (1.71)$$

iar energia undei reflectate de la semifabricat cu o relație de tipul:

$$W_{\text{rsi}} = \frac{1}{\rho_0 \cdot c_0} \cdot \int_0^t (P_{\text{max}} \cdot e^{-t/\theta} - \rho_0 \cdot c_0 \cdot v_s)^2 dt \quad (1.72)$$

Diagramele de variație ale coeficientului K_1 în funcție de valorile distanței h dintre axa descărcării și semifabricat, inerției relative a semifabricatului β și raportului F_0 / P_{max} , pentru camera



de descărcare cilindrică - conform [65] - sunt prezentate în figurile 1.22, 1.23 și 1.24.

În aceeași lucrare este definită o valoare critică a raportului F_o / P_{max} la care apare cavitația, valoare care, în cazul utilizării apei ca mediu de transmitere, se calculează cu relația:

$$(F_o / P_{max})_{cr} = 0,12 + 0,1556 / \beta \quad (1.73)$$

Cavitația va apare la o valoare a raportului mai mică decât această valoare critică dată de relația (1.73).

Pentru calculul timpului de apariție a cavitației în camera de descărcare cilindrică este propusă o dependență funcțională sub forma unei

regresii liniare multiple:

$$t_k = 138,06 - 8,49 \cdot \beta + 0,30 \cdot h + 39,2 \cdot (F_o / P_{max}) \quad (1.74)$$

Înlocuind P_{max} din expresia de mai sus cu expresia sa scrisă în funcție de parametrii circuitului de descărcare se obține:

$$t_k = 138,06 - 8,49 \cdot \beta + 0,30 \cdot h + 39,21 \cdot \frac{F_o}{10^4} \cdot \left(\frac{L_o^2}{C_o \cdot U_o^6} \right)^{1/5} \quad (1.75)$$

În urma cercetărilor efectuate [65] s-au stabilit influențele principale asupra timpului de apariție a cavitației t_k , pentru camerele de volum mare. Acestea sunt trecute centralizat în tabelul 1.5.

TABELUL 1.5.

Parametru direct	Tendința parametrului direct	Parametrul implicat (dependent de parametrul direct)	Tendința parametrului implicat	Tendința timpului de apariție a cavitației
Diametrul semifabricatului	creștere	Inerția relativă a semifabricatului	descreștere	creștere
	creștere	Volumul camerei de descărcare	creștere	creștere
Grosimea semifabricatului	creștere	Inerția relativă a semifabricatului	descreștere	creștere
Densitatea materialului semifabricatului	creștere	Inerția relativă a semifabricatului	descreștere	creștere
Distanța dintre axa descărcării și semifabricat	creștere	Volumul camerei de descărcare	creștere	creștere
Densitatea mediului de transmitere	creștere	Inerția relativă a semifabricatului	creștere	descreștere
Viteza de propagare a sunetului în lichid	creștere	Inerția relativă a semifabricatului	creștere	descreștere
Rezistența la deplasare a semifabricatului	creștere			creștere
Tensiunea de încărcare a bateriei de condensatoare	creștere	Presiunea maximă în unda de șoc	creștere	descreștere
Capacitatea bateriei de condensatoare	creștere	Presiunea maximă în unda de șoc	creștere	descreștere
Inductanța circuitului de descărcare	creștere	Presiunea maximă în unda de șoc	descreștere	creștere

A acțiunea comună a fluxurilor de lichid cavitațional și postcavitațional poate fi caracterizată de un coeficient K_{1r} , exprimat prin [65]:

$$K_{1r} = \frac{W_{fc} + W_{fp}}{W_{dt}} = \frac{m \cdot \frac{v_{tk}^2}{2}}{W_{dt}} + \frac{W_{dp}}{W_{dt}} + \frac{W_{rsi}}{W_{dt}} + \frac{W_{rp}}{W_{dt}} - 1 \quad (1.76)$$

unde, în afară de semnificațiile cunoscute, se mai întâlnesc: W_{fc} - energia fluxului de lichid cavitațional; W_{fp} - energia fluxului postcavitațional; W_{dp} - energia de deformare plastică a semifabricatului, începând din momentul t_k și până la sfârșitul deformării.

Energia de deformare plastică se poate calcula cu relația:

$$W_{dp} = \int_{\varepsilon_{ik}}^{\varepsilon} \sigma \cdot d\varepsilon \quad (1.77)$$

Considerând o curbă de ecruisare exponențială, de tipul:

$$\sigma_{real} = C_1 \cdot \varepsilon^\alpha \tag{1.78}$$

cu C_1 , α - constante de material, date în [38], energia de deformare plastică se poate scrie sub forma ecuației (1.79) [64]. Semnificațiile notațiilor sunt următoarele: C_0 - raportul dintre raza semifabricatului și raza interioară a flanșei; C_1 - raportul dintre raza exterioară și raza interioară a flanșei; C_2 - coeficient ce ia în considerare energia suplimentară consumată la îndoirea semifabricatului peste muchia matriței, $C_2 = 1...4$; C_3 - coeficient care ia în considerare energia consumată pentru a învinge frecarea dintre flanșă și matriță, $C_3 = 1,1...1,3$ [38].

$$W_{dp} = C_2 \cdot C_3 \cdot \frac{\pi \cdot C_1}{1+\alpha} \cdot \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{C_0 - C_1}{C_0 - 1} \cdot \ln C_0 \right)^{1+\alpha} \cdot (C_0 - 1) \cdot R_0^2 \cdot g + \frac{4 \cdot C_1}{1+\alpha} \cdot \left(\frac{4}{3} \cdot \frac{s^2}{R_0^2} \right)^{1+\alpha} \cdot \pi \cdot 4R_0^2 \cdot g \tag{1.79}$$

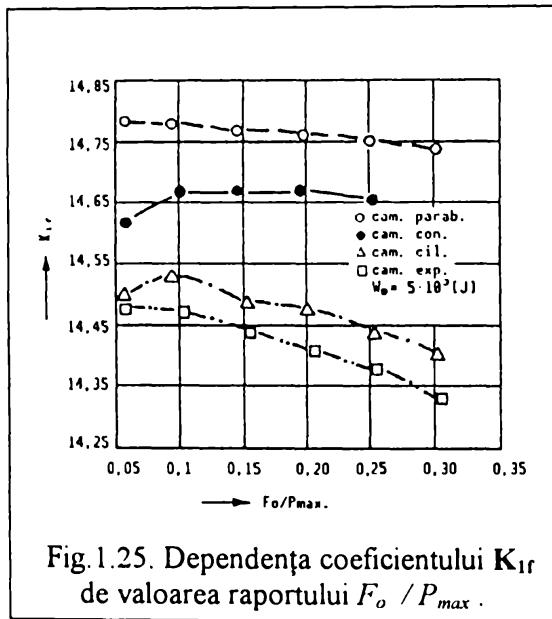


Fig. 1.25. Dependenta coeficientului K_{Ir} de valoarea raportului F_o / P_{max} .

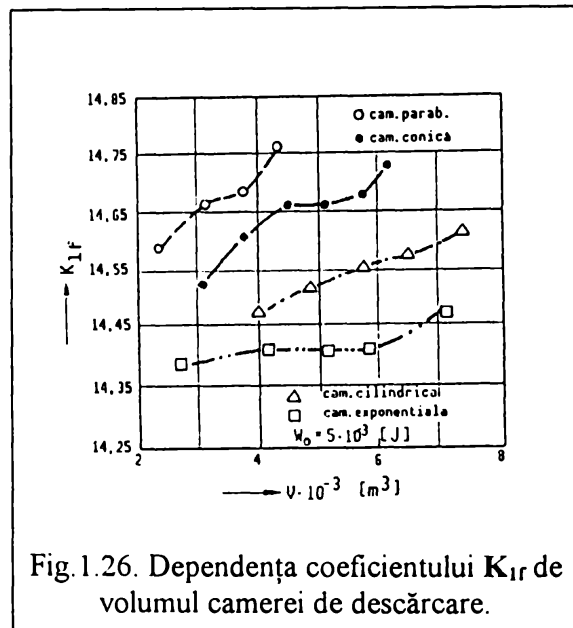


Fig. 1.26. Dependenta coeficientului K_{Ir} de volumul camerei de descarcare.

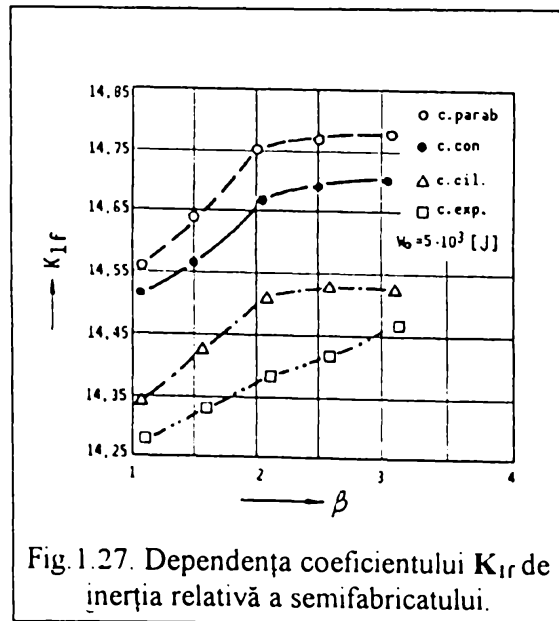


Fig. 1.27. Dependenta coeficientului K_{Ir} de inertia relativa a semifabricatului.

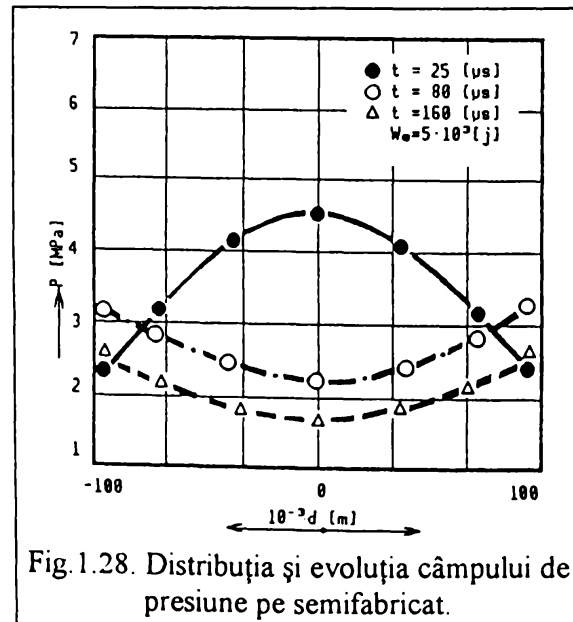


Fig. 1.28. Distribuția și evoluția câmpului de presiune pe semifabricat.

Câteva dintre dependențele coeficientului K_{I_f} de diferiți parametri - conform [64] - sunt redate în figurile 1.25, 1.26 și 1.27. Distribuția și evoluția în timp a presiunii pe suprafața semifabricatului, pentru camera de descărcare cilindrică, este redată în figura 1.28.

În ceea ce privește camerele de descărcare de volum mic, se presupune că deformarea semifabricatului are loc în două etape [19]: prima, în care semifabricatul se află sub acțiunea undelor de șoc iar a doua, când semifabricatul se află sub acțiunea presiunii dezvoltate de bula de gaz (considerând că mărimea acestei presiuni este comparabilă cu cea a undei de șoc). Oricum, durata celei de-a doua etape este mai mare decât cea corespunzătoare acțiunii undelor de șoc, acțiunea bulei de gaz exercitându-se asemănător unei presiuni cvasistatice [19,65].

Pentru camera închisă de volum mic, raza bulei de gaz se poate obține din [19,65]:

$$r_c \cdot \dot{r}_c + \frac{3}{2} \cdot \dot{r}_c = \frac{1}{\rho_0} \cdot \left[P_{ch} - \left(\frac{r_{c0}}{r_c} \right)^{3\gamma} - P_{c0} \right] \quad (1.80)$$

unde r_c și P_{c0} reprezintă raza, respectiv presiunea inițială a bulei de gaz; γ - coeficient adiabatic; P_{ch} - presiunea bulei de gaz la distanța h .

Presiunea dezvoltată de bula de gaz este dată de relația [65]:

$$P_{max} = \frac{314,48}{h} \cdot \left(\eta_1 \cdot \frac{W_0}{t_d} \right)^{1/2} \quad (1.81)$$

în care t_d - timpul de descărcare al bateriei de condensatoare, în care s-a înmagazinat energia electrică W_0 ; η_1 - randamentul de transformare a energiei electrice în energie utilă pentru canalul de descărcare. Valoarea presiunii maxime dată de relația (1.81) este și valoarea presiunii pe frontul undei de compresiune [19,65].

Studiul câmpului de presiune pe suprafața semifabricatului la aceste tipuri de camere [65] a dus la concluzia că acțiunea utilă a undelor de șoc, definită prin coeficientul K_I , nu diferă semnificativ de cea obținută la camerele de volum mare, însă distribuția de presiune este mai uniformă. Aceasta se explică prin faptul că drumul undelor reflectate este mult mai scurt iar durata de acțiune a undelor de șoc este, desemenea, mai mică. Deasemenea, se pare că fenomenul cavitației nu mai apare.

În ipoteza că suma energiilor bulei de gaz și a undei de șoc (directe și reflectate de la pereți) se transformă - cu pierderi de energie datorate reflexiei undelor de șoc pe semifabricat - în energie cinetică a semifabricatului, se poate scrie ecuația bilanțului energetic sub forma [65]:

$$W_{cg} + W_{d11} + W_{rp} = m \cdot \frac{v_{t1}^2}{2} + W_{rs} + W_{dp} \quad (1.82)$$

în care W_{cg} - energia bulei de gaz; W_{d11} - energia totală a undelor de șoc directe; v_{t1} - viteza semifabricatului la momentul t_1 ; W_{rp} - energia cedată semifabricatului de către undele de șoc

reflectate de la pereții camerei de descărcare; W_{dp} - energia de deformare plastică a semifabricatului, consumată începând cu timpul t_1 .

Aici, timpul t_1 se calculează cu relația $t_1 = r_1 / c_0$, unde r_1 este distanța dintre mijlocul distanței între electrozi și cel mai apropiat punct de reflexie.

Adoptând o metodică de calcul pentru energiile undelor de șoc asemănătoare cu cea de la camerele de volum mare și utilizând, pentru W_{dp} relația (1.79), energia bulei de gaz se scrie sub forma [65]:

$$W_{cg} = m \cdot \frac{v_{tl}^2}{2} + \frac{1}{\rho_0 \cdot c_0} \cdot \sum_{j=1}^{t_1/\Delta t_1} \int_0^{\Delta t_1} \left[\sum_{i=1} P_{rsi}(t) \right]^2 dt + C_2 \cdot C_3 \cdot \frac{\pi \cdot C_1}{1 + \alpha} \cdot \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{C_0 - C_1}{C_0 - 1} \cdot \ln C_0 \right)^{1+\alpha} \cdot (C_0 - 1) \cdot R_0^2 \cdot g + \frac{4 \cdot C_1}{1 + \alpha} \left(\frac{4}{3} \cdot \frac{s^2}{R_0^2} \right)^{1+\alpha} \cdot \pi \cdot 4R_0^2 \cdot g - \frac{1}{\rho_0 \cdot c_0} \int_0^{t_1} (P_{max} \cdot e^{-\nu t})^2 dt - \frac{1}{\rho_0 - c_0} \cdot \sum_{j=1}^{t_1/\Delta t_1} \int_0^{\Delta t_1} \left[\sum_{k=1} P_{rp k}(t) \right]^2 dt \tag{1.83}$$

Și în acest caz se poate defini un coeficient al acțiunii utile a bulei de gaz, sub forma:

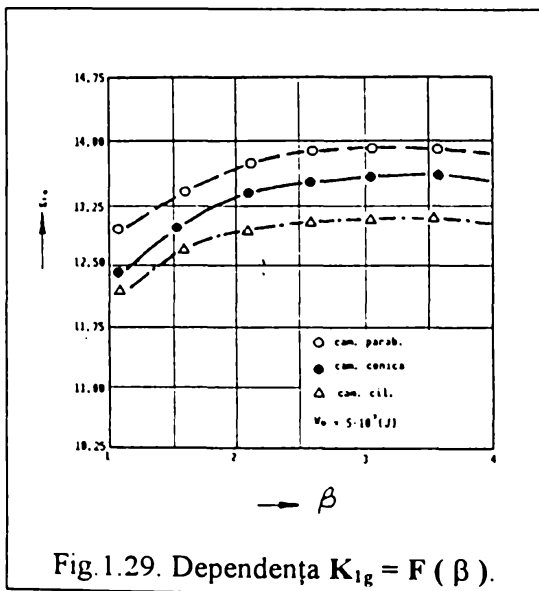


Fig. 1.29. Dependenta $K_{I_g} = F(\beta)$.

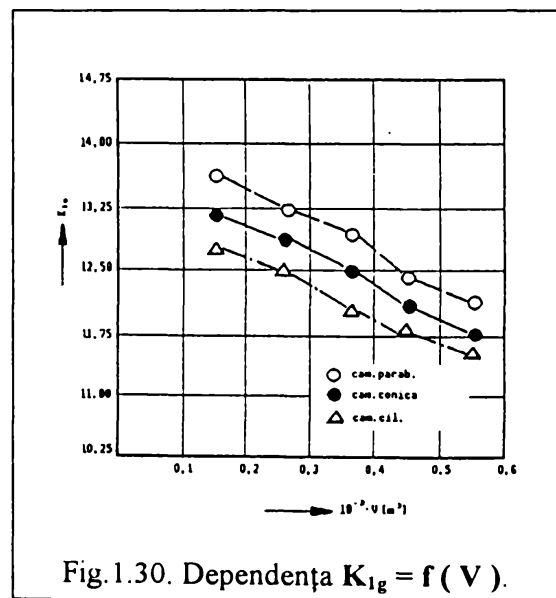


Fig. 1.30. Dependenta $K_{I_g} = f(V)$.

$$K_{I_g} = W_{cg} / W_{dt1} \tag{1.84}$$

Diagramele de variație ale coeficientului K_{I_g} funcție de inerția relativă a semifabricatului, volumul camerei de descărcare și raportul F_0 / P_{max} sunt redată în figurile 1.29, 1.30 și 1.31 [65].

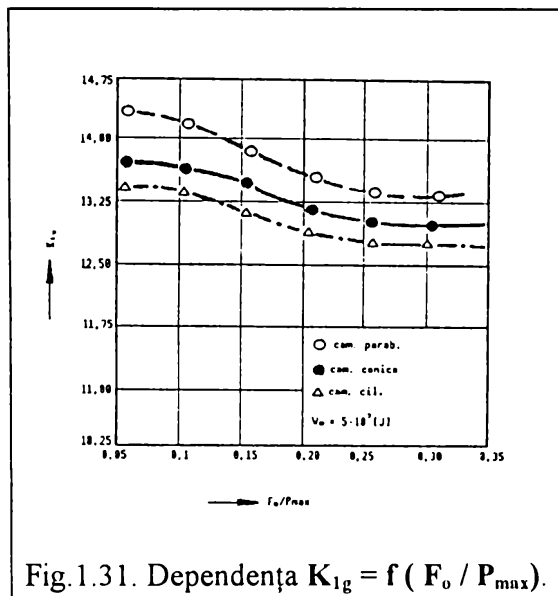


Fig. 1.31. Dependenta $K_{1g} = f (F_0 / P_{max})$.

1.3.8. Unele aspecte privind deformarea prin impulsuri purtătoare de mari energii

Este acceptat faptul că mecanismul de deformare plastodinamic, în condițiile deformării cu puteri și viteze mari, diferă de cel plastostatic [4,28,30,33,41,52,57]. Cu toate acestea, nu au fost încă elucidate în suficientă măsură principiile fundamentale ce stau la baza teoriei deformațiilor la viteze mari.

Este făcută o distincție clară între viteza de deformare, definită ca variația gradului de deformare în unitatea de timp, $\dot{\epsilon} = d\epsilon / dt$ și viteza de deformare (viteza de impact), care se definește ca fiind viteza cu care forțele exterioare de deformare sunt aplicate materialului de prelucrat.

În cazul ambutisării prin electrohidroimpulsuri, viteza undei de șoc (viteza de impact) poate atinge 6000 m/s, iar viteza de deformare 15...210 m/s, procesul de deformare desfășurându-se în intervalul de 10...150 μs .

În prezent există mai multe legi de variație ale rezistenței la deformare în funcție de viteza de deformare, care descriu influența vitezei pornind de la diverse premise de calcul (ipoteza solidului rigid continuu și izotrop, ipoteza structurii discrete a solidului, ipoteza energetică a curgerii, etc.). Principalele relații de calcul propuse în literatură sunt [108]:

$$\text{- legea logaritmică: } R_{cd} = R_c + A \cdot \ln \dot{\epsilon} \quad (1.85)$$

$$\text{- legea exponențială: } R_{cd} = R_c \cdot \dot{\epsilon}^n \quad (1.86)$$

$$\text{- legea hiperbolică: } R_{cd} = \frac{\dot{\epsilon}}{C_1 \cdot \sinh a_1} \quad (1.87)$$

$$\text{- legea curgerii vâscoase: } R_{cd} = R_c + \eta \cdot \dot{\epsilon} \quad (1.88)$$

$$\text{- legea influenței cumulate a temperaturii și vitezei: } R_{cd} = R_c \cdot (\dot{\epsilon} / \epsilon)^{AT} \quad (1.89)$$

- legea generalizată propusă de S.K. Samantha:

$$R_{cd} = A + B \cdot \ln \epsilon + T \cdot (C + D \cdot \ln \dot{\epsilon} + F \cdot \ln \epsilon \cdot \ln \dot{\epsilon}) \quad (1.90)$$

în care: R_{cd} - limita dinamică de curgere; R_c - limita statică de curgere; $A, B, C, D, F, C_1, a_1, n, \eta$ - constante de material determinate experimental; $\epsilon, \dot{\epsilon}$ - gradul de deformare, respectiv viteza de deformare; T - temperatura.

Pentru un material plasto - vâcos, considerând constanți toți ceilalți parametri ai deformării, se poate scrie [97]:

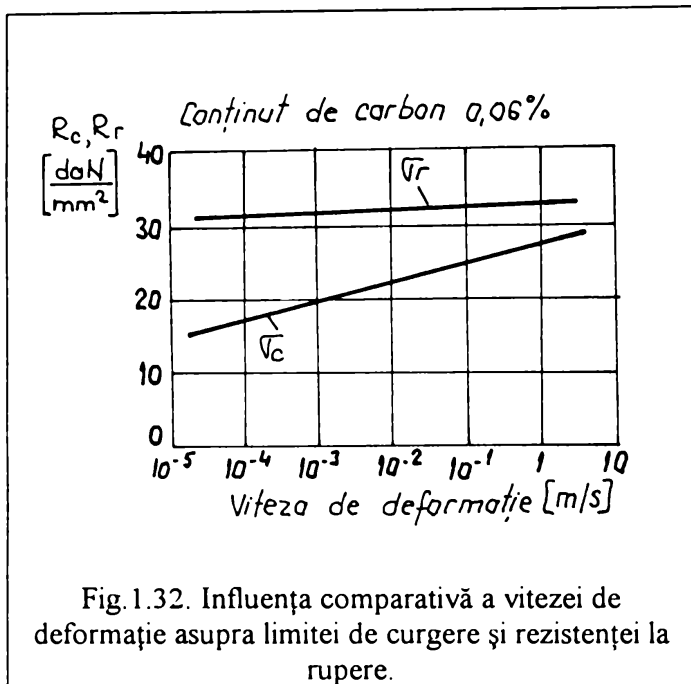


Fig.1.32. Influența comparativă a vitezei de deformare asupra limitei de curgere și rezistenței la rupere.

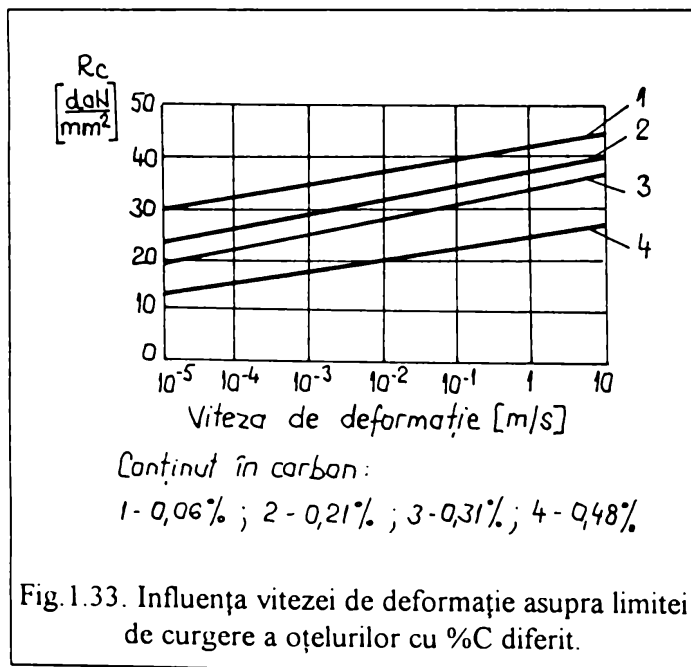


Fig.1.33. Influența vitezei de deformare asupra limitei de curgere a oțelurilor cu %C diferit.

$$R_{d2} = R_{d1} \cdot \left(\frac{\dot{\epsilon}_2}{\dot{\epsilon}_1} \right)^m \quad (1.91)$$

unde R_{d2} este rezistența la deformare pentru viteza de deformare ϵ_2 ; R_{d1} - rezistența la deformare pentru viteza de deformare ϵ_1 , iar m un exponent ce caracterizează vâscozitatea materialului.

Pentru metalele și aliajele reale, $0 < m < 0,3$, cu $m \rightarrow 0$ pentru temperaturi joase, respectiv $m \rightarrow 0,3$ pentru temperaturi ridicate de deformare, în lipsa presiunii hidrostactice.

Experimentele efectuate de diverși cercetători au dus la concluzia că, pentru viteze medii de deformare (până la 10 m/s), influența vitezei, la temperaturi joase, se face simțită mai ales asupra limitei de curgere, așa cum se vede în figurile 1.32 și 1.33. În consecință, în relația (1.91), exponentul m va avea valori diferite pentru cele două cazuri de înlocuire a parametrului R_d cu rezistența la rupere R_r , respectiv cu limita de curgere R_c . În tabelul 1.6. sunt prezentate câteva valori pentru exponentul m (s-a notat cu m_r exponentul pentru determinarea rezistenței

la rupere și cu m_c exponentul pentru determinarea limitei de curgere), la un domeniu de viteze între $3 \cdot 10^{-5} \dots 3$ m/s, pentru tablă din oțel.

Așa după cum se observă, la diverse materiale, rezistența la rupere și limita de curgere se modifică în mod diferit. Astfel, limita de curgere la fierul ARMCO crește de 2,2 ori, la oțelurile inoxidabile de 1,5 ori iar la aliajele de titan de 1,2 ori. Rezistența la rupere la fierul ARMCO va crește de 1,4 ori, iar la oțelurile inoxidabile de 1,06 ori [41].

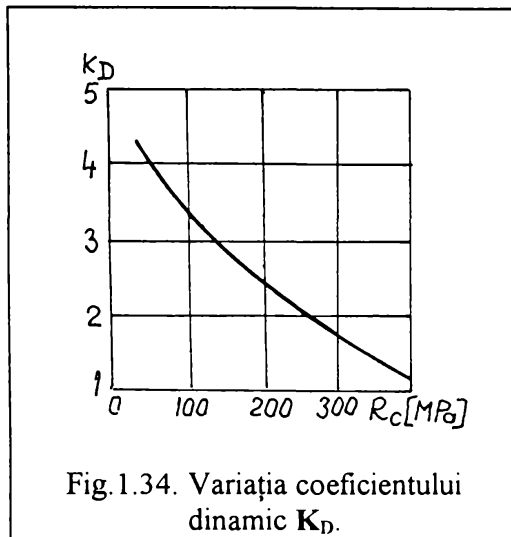


Fig.1.34. Variația coeficientului dinamic K_D .

TABELUL 1.6.

Conținut în C [%]	m_c	m_r
0,06	0,042	0,007
0,21	0,037	0,008
0,34	0,037	0,015
0,48	0,028	0,014
1,03	-	0,016

Raportul dintre limita de curgere dinamică și cea statică (corespunzătoare vitezelor până la $7 \cdot 10^{-5}$ m/s), poartă denumirea de coeficient dinamic K_D (fig.1.34).

Creșterea vitezei de deformare impune luarea în considerare și a forțelor de inerție proprii, fapt care duce

la o distribuție diferențiată a eforturilor și deci la modificarea condițiilor de deformare. În consecință, starea de deformare nu mai este uniformă (când nu depinde de timp și poziție, $\epsilon \neq f(t,x)$), ci neuniformă, efectele undelor elastice și plastice de deformare nemaiputând fi neglijate. Se constată în acest caz o deplasare a diagramei caracteristice tensiune - deformare spre valori mai ridicate cu aproximativ 10...20% față de diagrama caracteristică stabilită la încercări statice (fig.1.35).

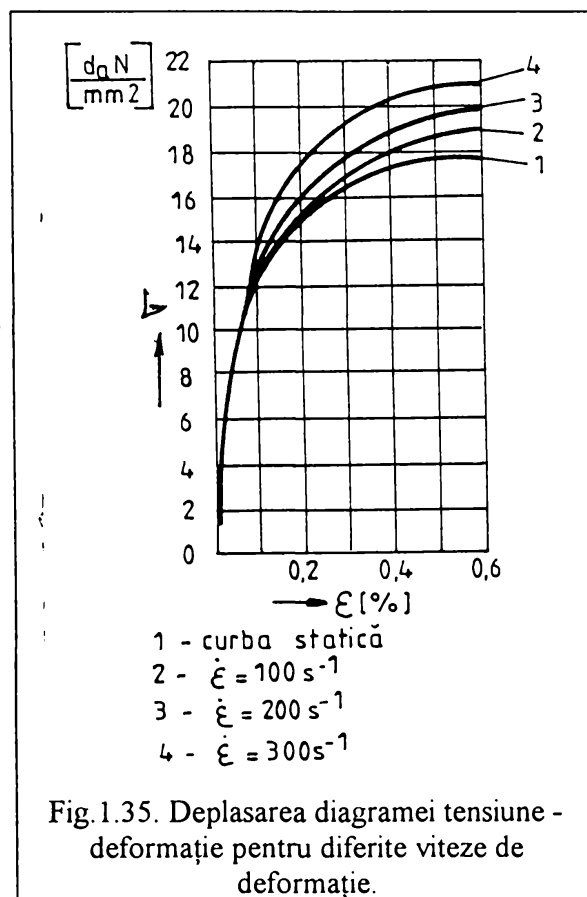


Fig.1.35. Deplasarea diagramei tensiune - deformare pentru diferite viteze de deformare.

Pe de altă parte, în domeniul static de deformare, căldura degajată este disipată suficient de rapid pentru a se putea considera că procesul se desfășoară izoterm. La viteze medii și mari de deformare, căldura dezvoltată nu are timp să se disipe în mediul înconjurător, astfel încât în structură va rămâne înmagazinată energie sub formă

de căldură, procesul desfășurându-se mai mult adiabatic. Acest lucru poate avea ca efect scăderea rezistenței la deformare.

Această căldură se concentrează în zona planelor de alunecare active, fiind deci o manifestare locală a efectului termic. Intensitatea efectului termic poate fi apreciată după variația de temperatură.

Calcularea efectului termic θT (diferența de temperatură între condițiile dinamice și statice de desfășurare a procesului de deformare) se poate face după mai multe relații și anume:

$$\theta T = \frac{\delta \cdot R_{cd}}{427 \cdot c \cdot \rho} \cdot 10^6 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (1.92)$$

în care $\delta = \ln (l_1 / l_0)$ este gradul logaritmic de deformare (al raportului între dimensiunile finale și inițiale); R_{cd} - limita dinamică de curgere, în daN / mm²; c - căldura specifică, în kcal / kg^oC; ρ - densitatea, în kg / m³.

$$\theta T = \frac{\alpha_k \cdot A}{427 \cdot V_0 \cdot c \cdot \rho} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (1.93)$$

unde A - lucrul mecanic efectuat de forțele exterioare, în daN·m; α_k - coeficient adimensional de evacuare a căldurii $\alpha_k = 0,85 \dots 0,90$; V_0 - volumul metalului deformat, în m³

O altă relație este determinată considerând că, pe de o parte, în timpul deformării, căldura apare ca urmare a transformării lucrului mecanic în energie termică, conform relației:

$$Q = K \cdot \int_{l_0}^l R_{cd} \cdot V \cdot \frac{dl}{l} \quad (1.94)$$

iar pe de altă parte, căldura necesară pentru ridicarea temperaturii cu valoarea θT este:

$$Q = m_T \cdot c \cdot \theta T \quad (1.95)$$

Din egalarea celor două relații rezultă:

$$\theta T = \frac{K \cdot R_{cd}}{m_0 \cdot \rho \cdot c} \cdot \ln \frac{l_0}{l} \quad (1.96)$$

sau conform [41]:

$$\theta T = \frac{K \cdot R_{cd}}{m_0 \cdot \rho \cdot c} \cdot \ln \frac{1}{1 - \varepsilon} \quad (1.97)$$

în care: K - echivalentul caloric al lucrului mecanic; V - volumul materialului care recepționează cantitatea de căldură; ε - gradul de deformare; $m_0 = m_T / m$ - masa relativă de captare a căldurii (dacă căldura este captată de întreg volumul de material, $m_0 = 1$); m_T - masa de captare a căldurii; m - masa zonei deformat.

Efectele vitezei și condițiile termodinamice ale procesului de deformare sunt prezentate în tabelul 1.7.

În calculele practice, cu suficientă precizie, rezistența specifică la deformare poate fi luată, ca valoare minimă, egală cu limita dinamică de curgere R_{cd} . Masa relativă de captare a căldurii, la viteze de deformație de peste 0,15 m/s, devine întotdeauna subunitară, micșorându-se odată cu creșterea vitezei. Manifestarea efectului termic duce la activarea planelor de alunecare suplimentare, crescând astfel gradul de deformare posibil de obținut.

Rezultanta celor două procese contradictorii, de ecrisare și recristalizare, trebuie dedusă în funcție de viteza de desfășurare a proceselor respective. Se mărunțesc grăunții, se schimbă orientarea

TABELUL 1.7.

Efectul sau condiția de deformare	Domeniu de viteze [m/s]		
	$0 \div 3 \cdot 10^3$ (static)	$0,003 \div 10^2$ (mediu)	$10^2 <$ (dinamic)
Izotermică	X		
Stare constantă	X	X	
Crește R_{ed}		X	X
Adiabatică		X	X
Efectul propagării undelor de deformare			X
Stare variabilă			X

cristalelor și a limitelor de grăunți, apar tensiuni interne. Pe de altă parte, o anumită cotă din energia de deformare se transformă în căldură, încep procesele de revenire și recristalizare, se elimină deformările rețelei cristaline, se micșorează tensiunile interne. Astfel, dacă viteza de ecrusare este mai mare decât viteza de recristalizare, atunci rezistența la deformare va crește.

Oricum, datele prezentate în literatura de specialitate în legătură cu modificarea caracteristicilor fizico-mecanice ale metalelor deformate cu puteri și viteze mari sunt contradictorii și, în aceste condiții, este imposibil de stabilit o relație de legătură simplă și general valabilă între eforturi, deformații și viteza de deformație. În prezent se acceptă existența unei *viteze critice* de deformație, care delimitează intervalul când începe să se manifeste în mod însemnat influența vitezei de deformație asupra rezistenței la deformare.

Efectul acestei influențe trebuie studiat prin prisma propagării undelor elastice și plastice de deformare, a schimbărilor energetice și termice, a forțelor de deformare, etc.

Implicit, la aplicarea prin șoc a sarcinii, se acceptă existența unei *viteze limită* de deformație, viteză la care se produc scăderi importante de plasticitate. Practica a demonstrat că această valoare limită a vitezei depinde de mulți factori, dintre care viteza de impact și complexitatea formei geometrice a piesei sunt cei mai importanți. Unele valori experimentale ale vitezei limită de impact (corespunzătoare vitezei limită de deformație) sunt prezentate în tabelul 1.8 și 1.9 [30].

O oarecare clarificare a mecanismului de deformare cu impulsuri de mare energie o aduce teoria conform căreia în materialul supus deformării are loc o excitare a undelor elastice și plastice, propagarea acestora din urmă făcându-se sub forma unor unde de deformare [2, 28, 33, 38, 57]. Întrucât viteza de propagare a undelor elastice este mai mare decât cea a undelor plastice, este de așteptat ca deformațiile elastice să fie regăsite în întreg volumul de material, pe când cele plastice numai într-un volum mic, bine determinat.

Viteza de propagare a undelor elastice se poate determina cu relația:

$$c_e = (E / \rho)^{1/2} \quad (1.98)$$

în care E - modulul de elasticitate longitudinal; ρ - densitatea materialului prin care se propagă undele elastice.

TABELUL 1.8.

Material (după ASME)	Temperatura de determinare [°C]	Viteza limită de impact [m/s]	
		experimentală	teoretică
2024 - 0 (aluminiu)	20	70	55
	200	75	
	400	85	
17 - 7 PH (OL inox semiauste - nitic)	20	105	140
	500	90	
	1000	120	
Rene 41 (superaliaj de nichel)	20	105	150
	500	105	
	1000	105	

Viteza de propagare a undelor plastice este

dată de expresia:

$$c_p = \sqrt{\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\sigma}{\varepsilon}} \text{ sau } c_p = (D / \rho)^{1/2} \quad (1.99)$$

în care D reprezintă modulul de plasticitate. În domeniul neliniar al deformărilor plastice, D nu are o valoare constantă (cum are E în domeniul deformațiilor elastice), el depinzând de gradul de deformare $D = f(\varepsilon)$. Pentru simplificare însă, se poate utiliza și în acest caz o variație liniară, prin aproximarea curbei de variație cu o dreaptă. Este cazul tipic al ridicării curbelor de ecrusare $\sigma = f(\varepsilon)$ sau $\sigma = f(\psi)$, în care D are o valoare constantă. Cum atât E cât și D reprezintă panta de înclinare a dreptelor în domeniile respective și cum întotdeauna $D < E$, rezultă deci că este îndeplinită inegalitatea $c_e > c_p$, concluzie care a fost enunțată cu anticipație.

În consecință, dacă deformarea plastică cuprinde un volum mic în raport cu cel cuprins de deformarea elastică (și care poate fi întregul volum al semifabricatului), rezultă că efectul energiei cheltuite este mic, ceea ce implică o rezistență la deformare mare. Cu alte cuvinte, se poate considera că variația rezistenței la deformare în funcție de timp este direct proporțională cu rezistența la deformare și invers proporțională cu timpul, adică:

$$\frac{d\sigma}{dt} = m \cdot \frac{\sigma}{t} \quad (1.100)$$

unde m este un coeficient de proporționalitate care depinde de caracteristicile materialului și de temperatură.

Scrind relația (1.100) sub forma:

$$\frac{d\sigma}{\sigma} = m \cdot \frac{dt}{t} \quad (1.101)$$

TABELUL 1.9.

Material (după ASME)	Stare	Viteza limită de impact [m/s]	
		experimentală	teoretică
Aliaje Al 1100 100 2024 S 2024 ST	îmbunătățit 1/2 tare	60	53
		33	10
	îmbunătățit recopt	60	53
		60	87
Aliaje Mg F J	recopt	60	70
	recopt	60	90
Aliaje Cu	îmbunătățit laminat la rece	60	70
		15	12
Oțeluri SAE 1022 SAE 1095 302 inox	lam. la rece normalizat recopt	30	28
		60	70
		60	147

și integrând între limitele $\sigma_1 - \sigma_2$, corespunzătoare duratelor de deformare $t_1 - t_2$, rezultă:

$$\int_{\sigma_1}^{\sigma_2} \frac{d\sigma}{\sigma} = -m \cdot \int_{t_1}^{t_2} \frac{dt}{t} \quad (1.102)$$

de unde se obține: $\ln \sigma_2 = \ln \sigma_1 + m \cdot \ln (t_1 / t_2)$ sau $\sigma_2 = \sigma_1 \cdot (t_1 / t_2)^m$ (1.103)

Dacă se face înlocuirea $(t_1 / t_2) = (\varepsilon_1 / \varepsilon_2)$ se obține o relație identică cu (1.91).

La relațiile prezentate mai sus se mai pot adăuga diverse forme matematice care încearcă să descrie cât mai exact influența undelor de șoc. Astfel, viteza de propagare a undelor de șoc în material este dată de relația:

$$c_s = \sqrt{\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}} \quad (1.104)$$

în care $(\sigma_1 - \sigma_2)$ este saltul de tensiune din care se determină saltul corespunzător de viteză și deformație:

$$v_1 - v_2 = c_s \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \quad (1.105)$$

$$-(\sigma_1 - \sigma_2) = c_s \cdot \rho \cdot (v_1 - v_2) \quad (1.106)$$

În tabelul 1.10 sunt prezentate vitezele de propagare ale deformațiilor elastice în diferite materiale [107].

De remarcat că dacă punerea sub efort se realizează prin mecanismul propagării undelor plastice, atunci descărcarea care urmează se realizează prin unde elastice, în condițiile unui mecanism

TABELUL 1.10.

Tipul undeii și forma corpului solicitat	Oțel	Cupru	Aluminiu	Beriliu
Unde longitudinale într-o placă	$5,94 \cdot 10^5$	$4,56 \cdot 10^5$	$6,32 \cdot 10^5$	$8,93 \cdot 10^5$
Unde longitudinale într-un fir	$5,19 \cdot 10^5$	$3,67 \cdot 10^5$	$5,09 \cdot 10^5$	$8,93 \cdot 10^5$
Unde în cazul solicitării hidrostactice	$3,22 \cdot 10^5$	$2,25 \cdot 10^5$	$3,10 \cdot 10^5$	$5,16 \cdot 10^5$
Unde transversale într-o placă	$2,98 \cdot 10^5$	$2,12 \cdot 10^5$	$2,92 \cdot 10^5$	$6,31 \cdot 10^5$

complicat de interacțiune dintre undele plastice de încărcare și cele elastice de descărcare.

Deasemenea, trebuie ținut seama și de faptul că, în zonele de discontinuitate, undele de tensiune se interferează, se reflectă, se refractă și se compun, producând efecte care trebuiesc luate în considerare, dar care nu întotdeauna sunt ușor de intuit. Astfel, dacă la interfața dintre două medii sosește o undă incidentă de tensiune, cu mărimea σ_d , atunci tensiunea σ_r a undeii reflectate și tensiunea σ_t a undeii transmise sunt date de relațiile:

$$\sigma_r = \frac{\sigma_d \cdot (\rho_2 \cdot c_{L2} - \rho_1 \cdot c_{L1})}{\rho_2 \cdot c_{L2} + \rho_1 \cdot c_{L1}} \quad (1.107)$$

$$\sigma_t = \frac{2 \cdot \sigma_d \cdot \rho_2 \cdot c_{L2}}{\rho_2 \cdot c_{L2} + \rho_1 \cdot c_{L1}} \quad (1.108)$$

în care indicii 1 și 2 indică cele două medii iar c_L este viteza undelor longitudinale.

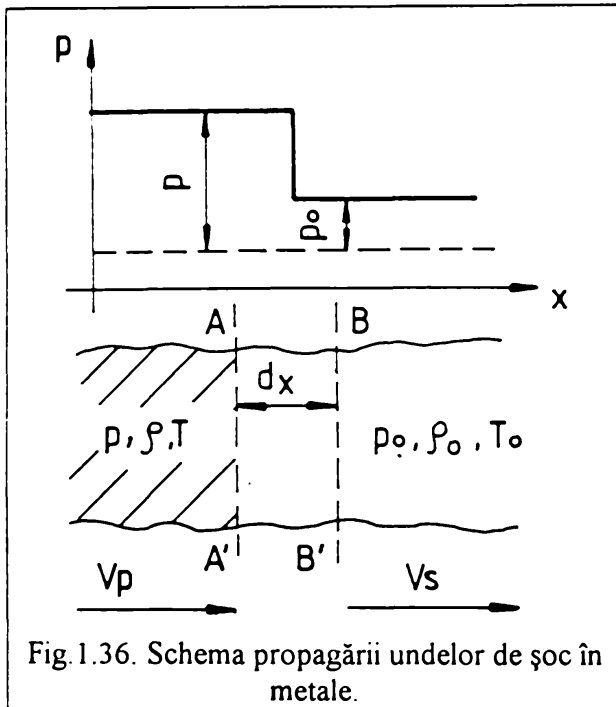


Fig. 1.36. Schema propagării undelor de șoc în metale.

În cazul undelor de șoc, v , ε și σ au salturi, astfel încât este necesară clarificarea mecanismului de propagare a acestor tipuri de unde. În acest sens, în majoritatea studiilor se consideră cazul unei unde de șoc elastice de compresie, care se propagă într-o bară dreaptă după direcția x (fig.1.36). Viteza inițială de propagare este cu atât mai mare cu cât este mai mare variația de presiune în unda de inițiere. Acest fapt se poate demonstra pe baza legilor de conservare a masei și impulsului.

Frontul undei de șoc la momentul t este materializat de planul AA' , iar după intervalul de timp dt , prin planul BB' . Se notează cu S

suprafața porțiunii din frontul de undă considerat, cu p_0 și ρ_0 presiunea și densitatea mediului neperturbat iar cu p și ρ aceleași mărimi, dar ale mediului perturbat, adică în spatele frontului de undă. Prin compresia care se exercită asupra stratului de grosime dx , în timpul dt , masa de material dintre planele AA' și BB' crește cu $dM = (\rho - \rho_0) \cdot S \cdot dx$. Această cantitate de substanță dM s-a deplasat în intervalul dt (de la stânga la dreapta) prin suprafața S , cu viteza v_p . Ca urmare, se poate scrie:

$$dM = \rho \cdot S \cdot v_p \cdot dt \quad (1.109)$$

Pe baza legii conservării masei se poate scrie:

$$(\rho - \rho_0) \cdot S \cdot dx = \rho \cdot S \cdot v_p \cdot dt \quad (1.110)$$

Dar $dx / dt = v_s$, reprezintă viteza de deplasare a frontului undei. În consecință:

$$v_s = \frac{\rho}{\rho - \rho_0} \cdot v_p \quad (1.111)$$

În unele cazuri, în locul densității se utilizează volumul unității de masă (volumul specific), $V = 1/\rho$, relația (1.111) devenind:

$$\frac{v_s}{v_p} = \frac{V_0}{V_0 - V} \quad (1.112)$$

Considerând legea conservării impulsului, se poate scrie că, în timpul dt , materialul din stratul de grosime dx primește impulsul:

$$(p - p_0) \cdot S \cdot dt = v_p \cdot \rho_0 \cdot S \cdot dx \quad (1.113)$$

aici obținându-se a doua expresie pentru viteza undei:

$$\frac{dx}{dt} = v_s = \frac{p - p_0}{\rho_0 \cdot v_p} \quad (1.114)$$

din acestea putându-se deduce ulterior ecuațiile lui Riemann [93].

La atingerea suprafeței opuse, unda este reflectată ca o undă de întindere ce se propagă înapoi în material, fiind treptat absorbită de unda inițială. În acest interval de existență al undei reflectate, frontul acesteia reprezintă un prag,, a cărui depășire de către unda inițială duce la salturi ale vitezei v , tensiunii σ și deformației ε . Aceste salturi sunt practic incontrollable, ele putând duce la zone cu concentratori de tensiune pe piesa de deformat, în funcție de configurația geometrică a acesteia. Aceste zone pot fi cel mult estimate, fiind necesară însă o verificare experimentală.

În ceea ce privește forțele de inerție, care se opun celor de deformare, ducând la creșterea rezistenței materialului, se poate scrie:

$$F_i = m \cdot a \quad (1.115)$$

în care F_i - forța de inerție; m - masa semifabricatului; a - accelerația.

Considerând, simplificat, o deformare uniformă și o variație uniformă a vitezei în timpul deformării, se poate scrie că:

$$a = dv / dt \approx v / t \quad (1.116)$$

unde v este viteza undei de șoc în momentul impactului cu semifabricatul. În aceste condiții, pentru fiecare caz concret de piesă în parte, trebuie determinată o relație de legătură $\varepsilon = \Phi(v)$. Astfel, se poate scrie:

$$a = \Phi(v) / \varepsilon \quad (1.117)$$

forța de inerție putându-se calcula și cu relația:

$$F_i = m \cdot \frac{\Phi(v)}{\varepsilon} \quad (1.118)$$

$$\text{Astfel, se poate scrie: } \delta \sigma = F_i / A_s \quad (1.119)$$

unde $\delta \sigma$ este creșterea rezistenței la deformare datorată forțelor de inerție; A_s - secțiunea semifabricatului în zona considerată.

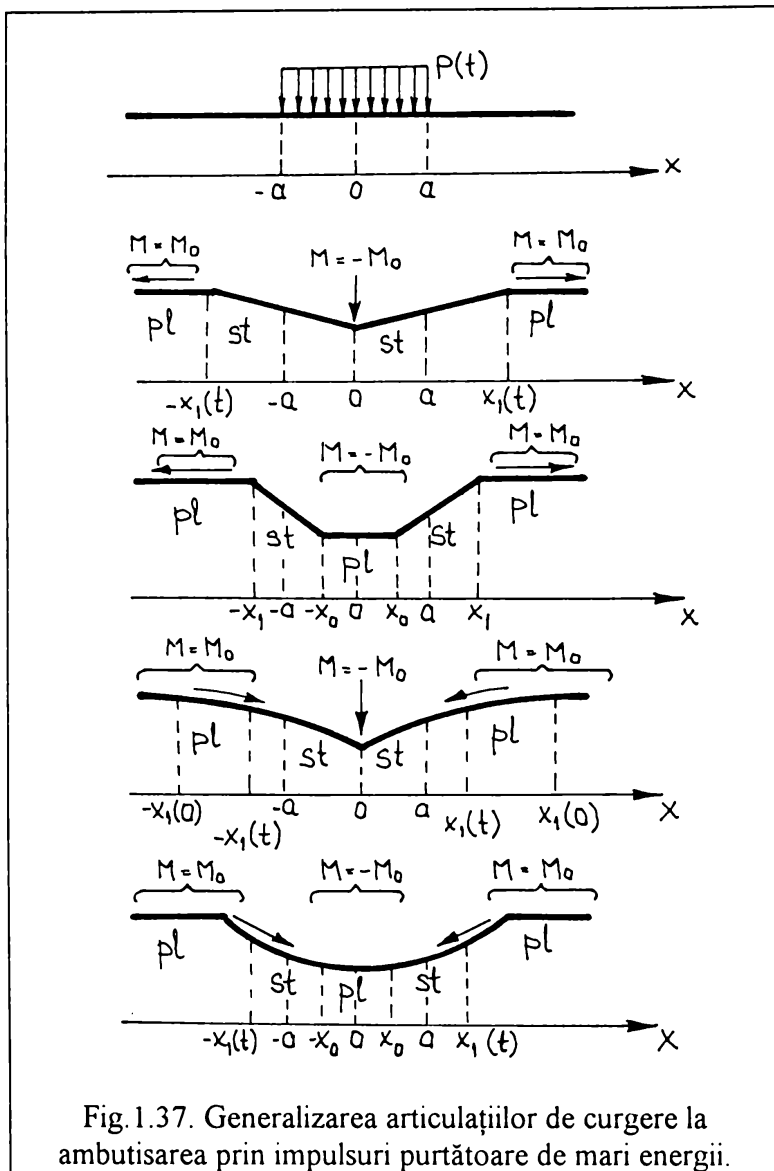


Fig.1.37. Generalizarea articulațiilor de curgere la ambutisarea prin impulsuri purtătoare de mari energii.

În literatura de specialitate se remarcă un număr destul de mic de lucrări consacrate formei pe care o poate lua semifabricatul în timpul deformării, ele fiind, eventual, destinate studiilor unor modele matematice care să estimeze deformațiile și tensiunile radiale și tangențiale [65,74,85].

Un model interesant adoptat la ambutisare este cel bazat pe generalizarea articulațiilor plastice (de curgere) introduse mai demult în calculele de sarcină portantă ale stăcii construcțiilor. Un exemplu de model este prezentat în figura 1.37, constituind cazul unei grinzi infinite încastrate la ambele capete și care, între $-a$ și a este încărcată cu o sarcină uniform distribuită în spațiu dar variabilă în timp, $p(t)$. În punctul central O și în alte două puncte

simetrice față de acesta, se consideră câte două articulații plastice $\pm X_0(t)$, $\pm X_1(t)$ care se deplasează în sensul săgeților, după cazurile prezentate în figurile 1.35,a,b,c,d, în funcție de variația sarcinii. În locul unui criteriu de variație a tensiunii bazat pe o lege de ecrusare liniară, s-a presupus un criteriu simplificat, de forma $|M| = M_0$, adoptat în special la procesele de încovoiere. La curgerea plastică, în articulațiile de curgere, momentul încovoiator din grindă este egal ca valoare cu moment limită constant (fără ecrusare). Articulațiile separă între ele porțiuni de grindă rigide "st", plastice "pl" (fig.1.37) sau rigide și plastice între ele. Întregul sistem se mișcă astfel încât momentul încovoiator total provocat de sarcina exterioară $p(t)$ și de forțele de inerție, să fie împărțit pe grindă, cu respectarea egalității $|M| = M_0$ pe porțiunile plastice și în articulațiile de curgere și cu respectarea inegalității $|M| < M_0$, pe porțiunile rigide.

În ceea ce privește aspectele specifice la nivel microstructural, trebuie spus că, încă de la primele stadii de deformare se dezvoltă o deplasare multiplă de dislocații, fenomen care are loc

practic în multe planuri neparalele. Se remarcă deasemenea, trecerea la maclare intensă, cu densitate ridicată, distanța între două macle învecinate fiind doar de $10^{-4} \dots 10^{-6}$ cm. În timpul scurt de acțiune al presiunilor înalte ($10 \dots 150 \mu\text{s}$), densitatea de dislocații crește până la o valoare de $10^{12} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, lucru care asigură o ridicare a proprietăților plastice ale materialului, mărirea gradului de deformare admisibil, micșorarea numărului de treceri. Rămâne de analizat care este ponderea surselor Frank - Read de multiplicare a dislocațiilor și care este ponderea apariției de noi dislocații ca urmare a introducerii energiei unei de șoc (energie care duce la micșorarea distanțelor interatomice, la modificarea structurii spectrului energetic al corpurilor solide, la dilatarea și conturarea zonelor energetice, etc.).

Intensitatea solicitării de șoc are o gamă largă. Astfel, șocurile slabe pot să provoace tensiuni de ordinul a 10^2 Pa, în timp ce exploziile puternice, tensiuni de până la 10^{10} MPa. Viteza de creștere a presiunii joacă și ea un rol important, deoarece ea este cea care determină puterea care se introduce în material. Astfel, dacă presiunea crește cu viteza de 10^2 MPa / μs , puterea care se introduce în material este de aproximativ $100 \text{ MW} / \text{cm}^3$.

Este necesar, deasemenea, să se remarce posibilitatea apariției transformărilor polimorfe și de fază, a proceselor de descompunere și sinteză, de formare a defectelor și, dimpotrivă, de perfecționare a structurii. Unii autori [8,92] consideră că în zonele de creștere locală a temperaturii (planele de alunecare), se poate depăși temperatura punctelor de transformare. În aceste locuri, la răcire, pot avea loc transformări structurale, ca urmare a unei încălziri - răcirii bruște. Acest lucru este însă puțin probabil, datorită următoarelor elemente:

- este greu de imaginat că într-un timp atât de scurt să aibă loc două transformări: una la încălzire și una la răcire;

- în domeniul temperaturilor caracteristice deformării la rece (prin definiție sub temperatura de recristalizare; obișnuit 20°) este necesară o creștere mult prea mare a temperaturii pentru a intra în domeniul transformărilor structurale. În consecință, acest aspect este caracteristic deformării la semicald sau la cald. În acest sens, în tabelul 1.11 se redau [92] valorile efectului termic calculat cu

TABELUL 1.11.

Material	Temperatura de deformare [$^\circ\text{C}$]	R_{cd} [MPa]	c [kcal / kg $^\circ\text{C}$]	ρ [kg / m 3]	OT pentru $\delta=1$ [$^\circ\text{C}$]
OȚEL					
la $\dot{\delta} = 1 \text{ s}^{-1}$	950 ÷ 1200	50 ÷ 100	0,15	$7,8 \cdot 10^3$	10 ÷ 20
$\dot{\delta} = 80 \div 100 \text{ s}^{-1}$	950 ÷ 1200	100 ÷ 200	0,15	$7,8 \cdot 10^3$	20 ÷ 40
CUPRU	800 ÷ 900	40 ÷ 80	0,09	$8,9 \cdot 10^3$	12 ÷ 45
ALAMĂ	650 ÷ 700	25 ÷ 50	0,09	$8,4 \cdot 10^3$	8 ÷ 15
ALUMINIU 99,5	450 ÷ 550	10 ÷ 25	0,22	$2,7 \cdot 10^3$	4 ÷ 10
ALIAJE de Al	400 ÷ 500	40 ÷ 100	0,22	$3,0 \cdot 10^3$	15 ÷ 35
ALIAJE de Mg	370 ÷ 460	30 ÷ 60	0,24	$1,8 \cdot 10^3$	15 ÷ 35

relația (1.92) și verificat experimental pentru $\delta = 1$, pentru diferite materiale.

- oricum, în lucrarea [8] s-a constatat că apariția transformărilor de fază are loc în mod preferențial în locul geometric al punctelor de interferență dintre undele de tensiune incidente și reflectate. Cum planele de alunecare (pe care se manifestă efectul termic) sunt distribuite statistic și nu preferențial în masa semifabricatului, rezultă că nu atât acest efect termic este cauza transformărilor de fază, cât schema particulară de eforturi a frontului de interferență.

Desigur că este posibilă și existența unui mecanism combinat și simultan de influență a vitezei, atât prin schema de eforturi cât și prin condițiile termice pe care aceasta le creează.

În unele condiții (când unda de șoc este apropiată de unda plană (deci la distanțe mari de axa descărcării), se poate manifesta mecanismul alunecării sincrone paralele, cu densitate dislocațională obișnuită, care realizează o mică parte din deformația totală. În această împrejurare este posibilă apariția, în mod omogen, a noi dislocații, a căror deplasare ulterioară nu mai are loc, astfel încât atât ecruisarea cât și urmele de alunecare sunt mici.

Pentru metale, în jur de 95% din lucrul mecanic de deformare se transformă în căldură și doar 5% se acumulează în material sub formă de dislocații suplimentare sau alte defecte. Deasemenea, trebuie remarcat faptul că la viteze mari ale undelor de șoc, deformațiile elastice devin atât de mari încât legea lui Hooke se dovedește a fi inacceptabilă, legătura dintre tensiuni și deformații devenind neliniară. Pentru undele de comprimare acest lucru duce la gradienti discontinui de deformare pe frontul undei care se extinde.

De toate aceste probleme este necesar a se ține seama, chiar dacă numai calitativ, atât la prescrierea regimurilor tehnologice optime de ambutisare prin electrohidroimpulsuri, cât și la alegerea unei configurații a piesei de prelucrat care să satisfacă atât cerințe funcționale cât și tehnologice.

1.3.9. Influența unor factori asupra parametrilor impulsurilor de presiune dezvoltate de explozia electrohidraulică

Un aspect important care deosebește procedeul de deformare cu undă de șoc de deformarea mecanică convențională, este modul de aplicare al presiunii de deformare, cu totul diferit. După cum se observă în figura 1.38, în timp ce la ambutisarea convențională aplicarea forței se face pe zone de suprafață continuu crescătoare, unda de șoc își oferă impulsul întregii suprafețe a semifabricatului, astfel încât toate zonele piesei se deplasează concomitent, chiar dacă distribuția de presiune pe suprafața semifabricatului poate fi diferită de la un punct la altul. Pe de altă parte, această distribuție diferențiată a presiunii poate duce la zone cu concentratori, în funcție de geometria piesei de

ambutisat.

Din cele prezentate anterior a rezultat că impulsul de presiune ajuns în orice punct al lichidului are cel puțin două mari componente: impulsul de presiune propriu al undei și componenta

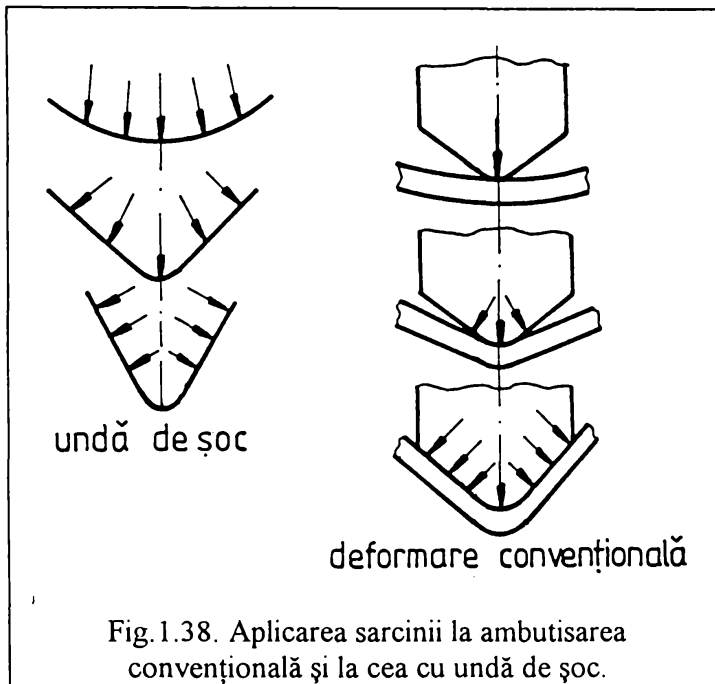


Fig.1.38. Aplicarea sarcinii la ambutisarea convențională și la cea cu undă de șoc.

datorată fie fluxului hidraulic cavitațional (la camerele de volum mare) fie cea datorată expansiunii bulei de gaz (la camerele de volum mic).

Dintre parametrii care influențează mărimea impulsului de presiune, cei care au fost supuși unui număr mai mare de studii sunt cei legați de parametrii electrici ai circuitului de descărcare (tensiunea de încărcare a bateriei de condensatoare U_0 , capacitatea bateriei C , inductanța circuitului de descărcare L_0) și de parametrii

dimensionali ai spațiului de descărcare (distanța între electrozi l pentru descărcarea cu străpungere, respectiv lungimea l_r și diametrul d_r a firului exploziv, la descărcarea prin inițiator).

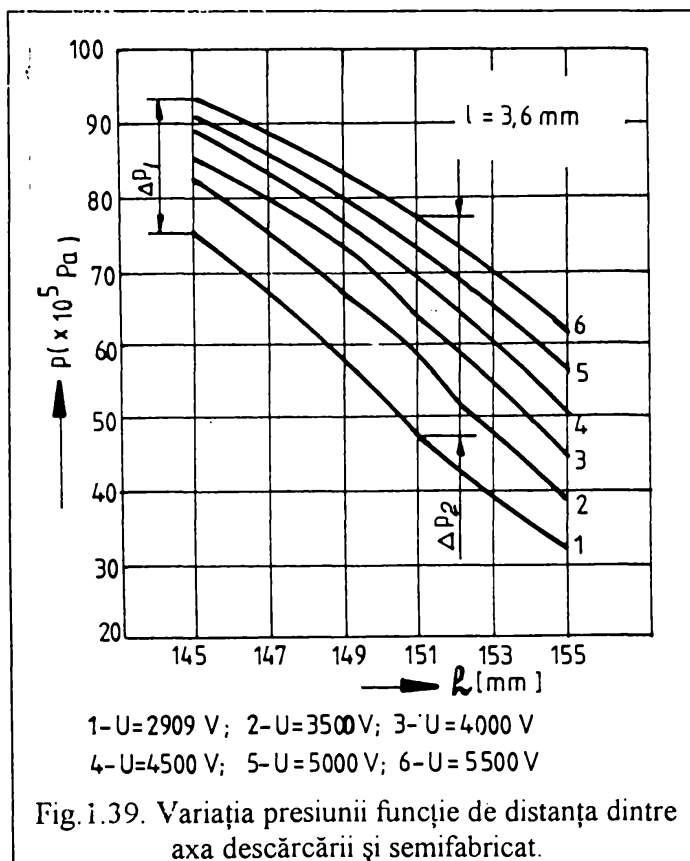


Fig.1.39. Variația presiunii funcție de distanța dintre axa descărcării și semifabricat.

Din cercetări experimentale [5] s-a stabilit că, reprezentând $p = f(h)$, pentru mai multe tensiuni, la $l = constant$ (fig.1.39), se constată o creștere a diferenței $\Delta p = p_{max} - p_{min}$, pentru aceeași distanță l între electrozi (diferență corespunzătoare variației maxime de tensiune $\Delta U = U_{max} - U_{min}$), odată cu creșterea distanței față de axa descărcării h . Acest lucru s-ar datora duratei limitate de existență a bulei de gaz, la distanțe mari de axa descărcării, ceea ce duce la dispariția celei de-a doua componente. În acest fel presiunea scade, generându-se și o contraundă de presiune, prin revenirea lichidului în spațiu dintre electrozi

(implozia bulei de gaz). Gradientul de scădere a presiunii, care determină panta de înclinare a curbei, este cu atât mai mare cu cât scade tensiunea U , lucru care duce la apariția mult mai rapidă și la distanțe h mai mici a undei de contrapresiune. Experimentele [5] au fost efectuate păstrând constante următorii parametri : capacitatea bateriei de condensatoare $C = 143,2 \cdot 10^{-6}$ F; diametrul fuzibilului $d_f = 0,3$ mm, din cupru; diametrul electrozilor $d_e = 10$ mm.

Deasemenea, creșterea tensiunii duce la creșterea inductanței circuitului de descărcare, ceea ce implică o creștere mai lentă a presiunii.

În ceea ce privește influența distanței dintre electrozi este unanim recunoscută existența unei valori optime a acestei distanțe [5, 17, 18, 19, 41]. Un astfel de exemplu este prezentat în figura 1.40,

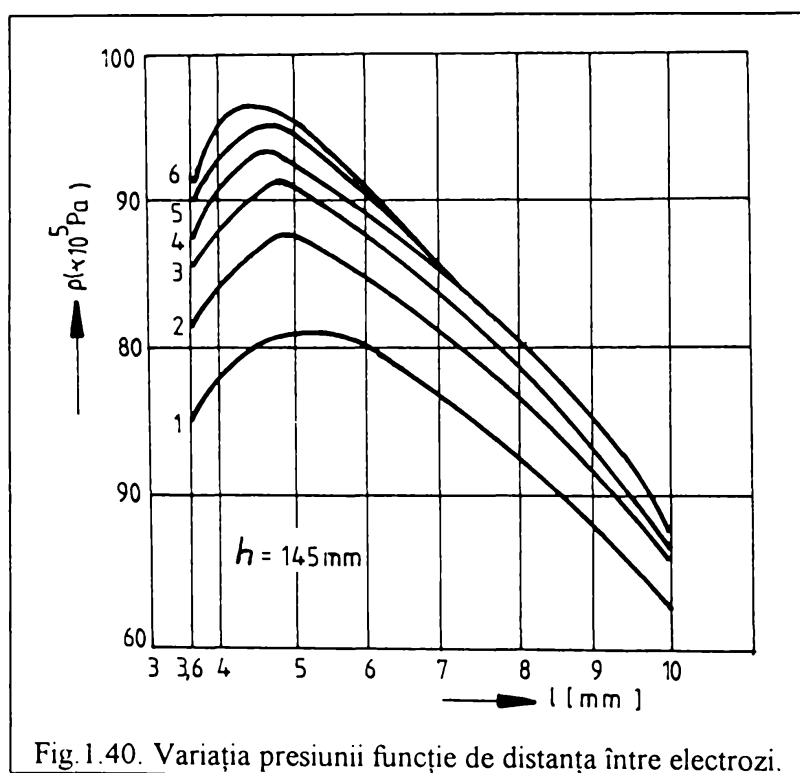


Fig. 1.40. Variația presiunii funcție de distanța între electrozi.

conform lucrării [5].

Explicația, în cazul în care distanța l este mai mică decât această distanță optimă l_{opt} , poate consta în faptul că, deși rezistența canalului de descărcare scade și crește energia degajată în canal, energia plasmei canalului nu este suficientă pentru a asigura o durată de existență corespunzătoare a bulei de gaz. Pentru $l > l_{opt}$, rezistența canalului de descărcare crește, reducând curentul de descărcare și deci energia electrică ce participă

la ridicarea energiei interne a plasmei canalului. Efectul este același ca și în primul caz.

În lucrarea [97] este indicată următoarea relație de calcul a acestei distanțe optime:

$$l_{opt} = \frac{0,74 \cdot U_0 - 19,5}{S^{1/3}} \cdot C + 4,6 \cdot U_0 - 110 \quad [\text{mm}] \quad (1.120)$$

în care S este suprafața electrodului aflată în contact cu apa. Este indicat ca aceasta să nu depășească $3 \dots 4 \text{ cm}^2$.

În lucrarea [65], folosind un fir de amorsare de Cu cu diametrul de 0,8 mm și măsurând presiunea pe placă mobilă, se obțin diagramele de variație ale acestora în funcție de timp, la diferite valori ale parametrilor electrici ai circuitului de descărcare, diagrame prezentate în figurile 1.41, 1.42,

1.43. Se remarcă scăderea puternică a presiunii în intervalul 100...200 μs , această durată reprezentând de fapt durata de acțiune a undelor de șoc.

Din analiza rezultatelor obținute, reiese o reducere a timpului de acțiune a undelor de șoc odată cu creșterea tensiunii și o mărire a acestuia la creșterea inductanței circuitului de descărcare.

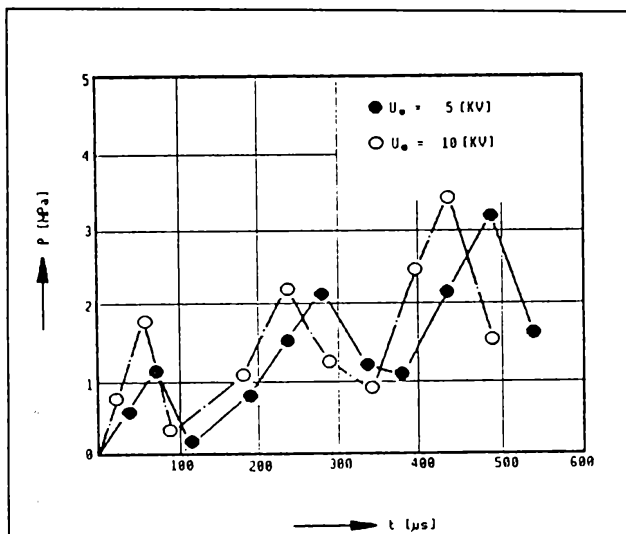


Fig. 1.41. Variația presiunii în timp pe placa mobilă, pentru diferite valori ale tensiunii U_0 .

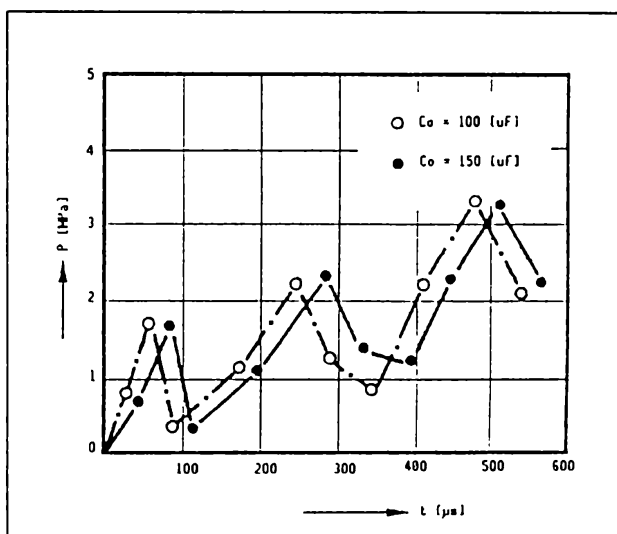


Fig. 1.42. Variația presiunii în timp pe placa mobilă, pentru diferite valori ale capacității C_0 .

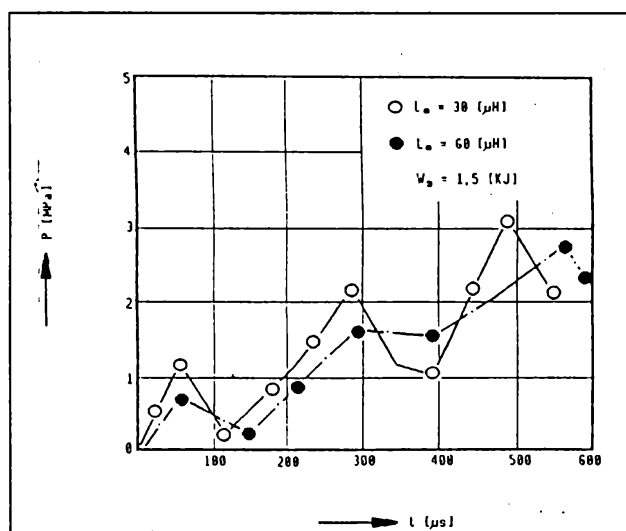


Fig. 1.43. Variația presiunii în timp pe placa mobilă, pentru diferite valori ale inductanței L_0 .

Creșterea capacității bateriei de condensatoare, la aceeași energie a descărcării, conduce la o durată mai mare de acțiune a unei de șoc (deci o întârziere a apariției cavității).

Se observă că presiunea dezvoltată în camera de descărcare are un caracter oscilatoriu, ceea ce ar duce la concluzia unei încărcări neuniforme a semifabricatului.

În ceea ce privește variația vitezei de deplasare a centrului semifabricatului în timp (viteză care depinde, evident, de viteza unei de șoc), aceeași lucrare [65] prezintă diagramele din figurile 1.44, 1.45 și 1.46, obținute în cazul

ambutisării cu flanșă fixă.

Din analiza acestor diagrame reiese că, în prima parte a procesului de deformare, corespunzătoare intervalului de timp 0...300 μs , are loc o accelerare și o creștere puternică a vitezei semifabricatului, după care acestea scad, ca urmare a micșorării presiunii pe semifabricat (micșorare apărută ca rezultat al apariției golului de cavităție). După atingerea acestui minim primar de viteză, se

constată o nouă creștere a acesteia datorită efectului cumulat al fluxurilor cavitațional și postcavitațional, după care scăderea vitezei este definitivă, semifabricatul oprindu-se.

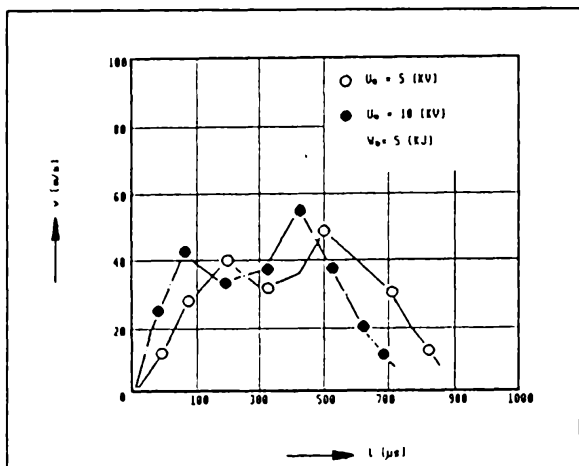


Fig. 1.44. Dependenta vitezei de deplasare a centrului semifabricatului de timp, pentru diferite valori ale tensiunii U_0 .

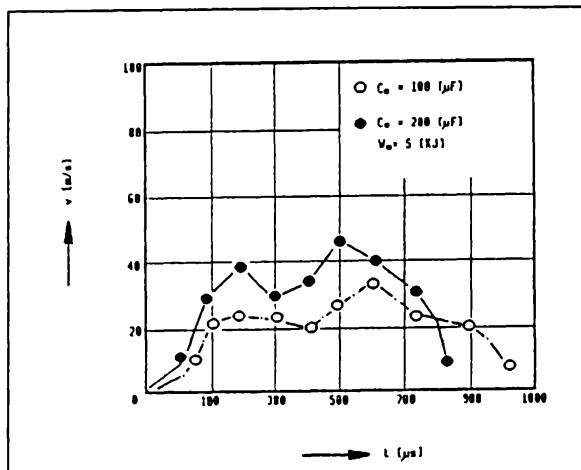


Fig. 1.45. Dependenta vitezei de deplasare a centrului semifabricatului de timp, pentru diferite valori ale capacității C_0 .

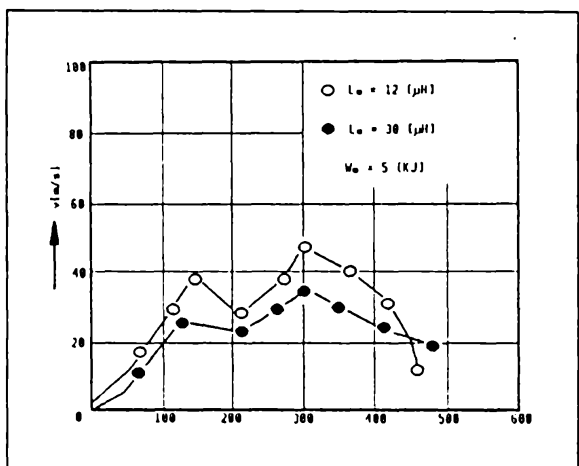


Fig. 1.46. Dependenta vitezei de deplasare a centrului semifabricatului de timp, pentru diferite valori ale inductanței L_0 .

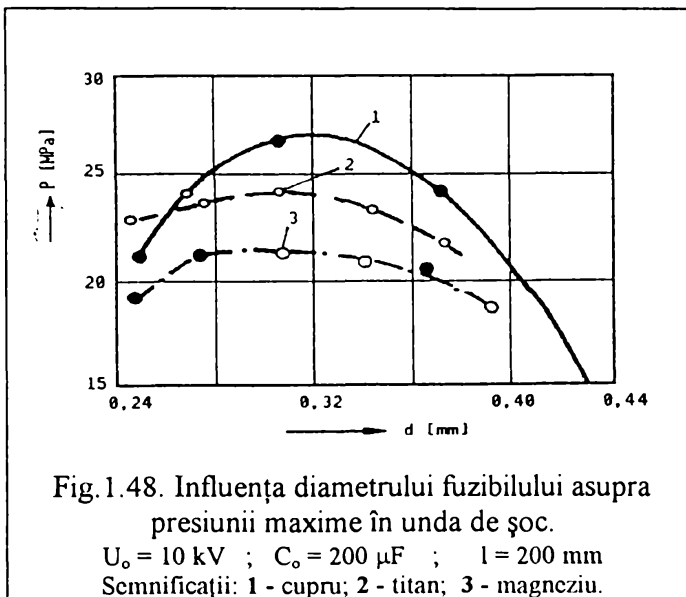
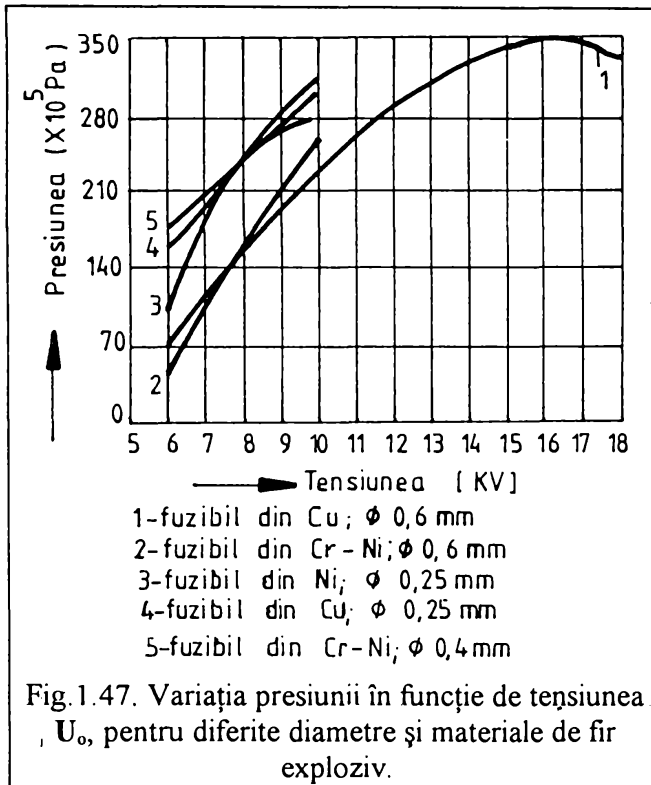
Creșterea tensiunii duce la mărirea vitezei de deplasare a semifabricatului iar creșterea inductanței are ca rezultat micșorarea vitezei. Timpul de deformare a semifabricatului este mai mare dacă, la aceeași energie de descărcare, capacitatea se mărește. Deasemenea, diferențele dintre minimul primar și maximum absolut al vitezei de deplasare a semifabricatului se micșorează.

Se concluzionează că energia înmagazinată de semifabricat are aceleași tendințe de variație ca și energia descărcării în sine. Astfel, creșterea

tensiunii duce la o creștere a energiei mult mai accentuată decât în cazul creșterii capacității bateriei de condensatoare.

În ceea ce privește descărcarea cu folosirea firului exploziv, este recunoscută existența unui diametru optim a firului de amorsare, valoarea acestui diametru optim depinzând de parametrii electrici ai circuitului de descărcare și de materialul firului [6,13,18,19,26,30,41,59,65].

O dependență între presiunea undei de șoc și tensiune, pentru diferite materiale și diametre ale firului exploziv, este prezentată în figura 1.47 [30]. În acest caz, capacitatea bateriei de condensatoare a fost de 24 μ F.



$$S_{opt} = k_1 \cdot C_o \cdot U_o \cdot f_o^{-2,3} \tag{1.121}$$

$$l_{opt} = k_2 \cdot U_o \cdot f_o^{-2,3} \tag{1.122}$$

$$\text{sau } S_{opt} = A \cdot (U_o / L_o)^{2/3} \cdot (L_o / C_o)^{1/2} \tag{1.123}$$

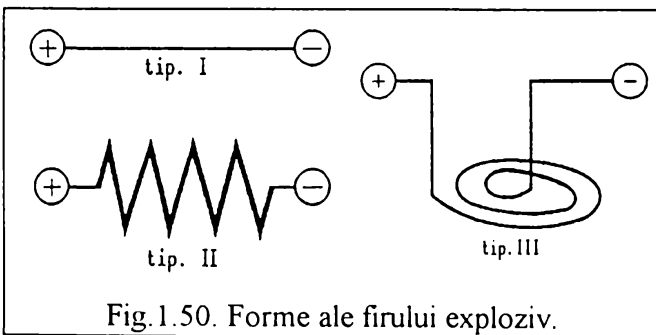
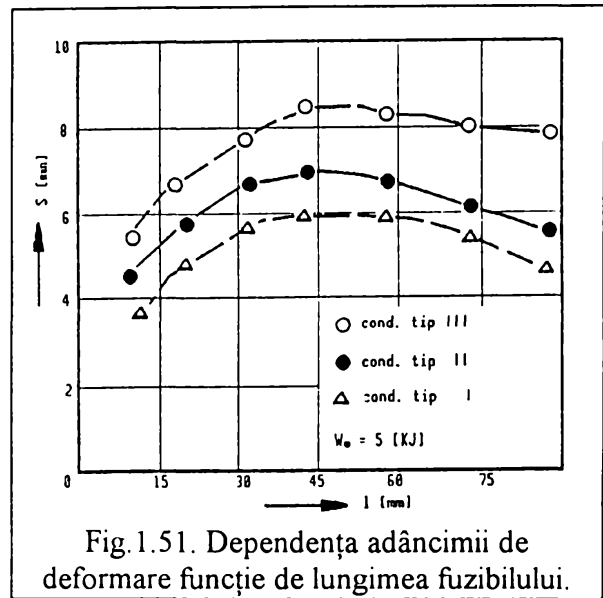
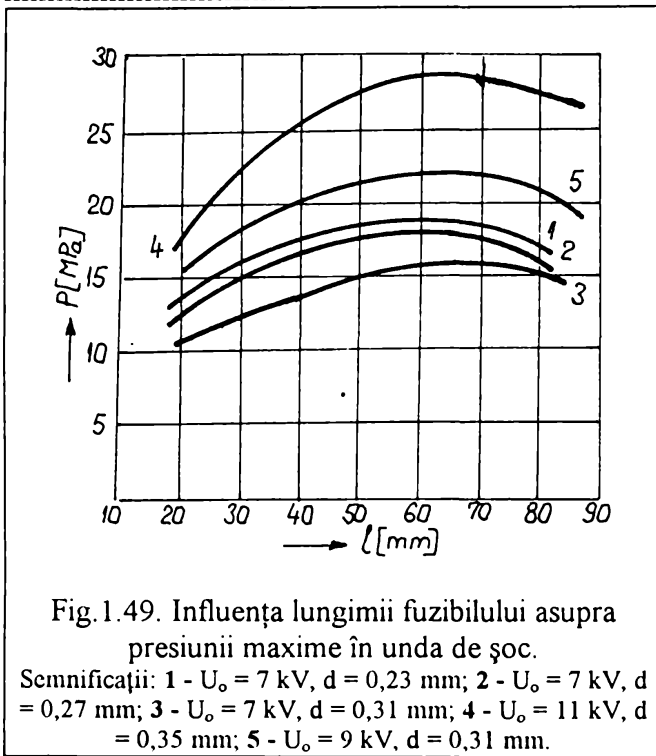
unde k_1 , k_2 și A sunt coeficienți de material; S_{opt} și l_{opt} - aria secțiunii transversale și lungimea optimă a firului exploziv. Deasemenea, se pare că, pe lângă influențele parametrilor dimensionali ai firului exploziv amintite mai sus, se poate regăsi și o altă influență și anume cea a formei firului exploziv.

Pentru orice combinație a parametrilor circuitului electric de descărcare, există valori optime ale diametrului și lungimii firului, valori care dau cel mai mare randament de transformare a unei forme de energie în alta.

Rezultatele experimentale obținute în [18] privind amplitudinea presiunii undei de șoc în funcție de materialul firului și de dimensiunile acestuia sunt prezentate, pentru diferite condiții de experimentare, în figurile 1.48 și 1.49.

Cercetările privind influența materialului asupra eficienței procesului de transformare a energiei electrice în energie mecanică prin explozie electrohidraulică, au condus la următoarea ordine de clasificare, în sens descrescător: wolfram, aluminiu, magneziu, cupru [18,65].

În general, lucrările consacrate acestei teme conțin rezultate experimentale, fără a fi indicate relații de calcul (analitice sau empirice) ale dimensiunilor optime, în funcție de condițiile concrete de lucru. Totuși, lucrarea [18] indică astfel de relații de calcul, de forma:



Folosind configurații de genul celor prezentate în figura 1.50, în lucrarea [65] este prezentată influența acestora asupra adâncimii maxime de deformare (bineînțeles, ca o măsură a amplitudinii presiunii), la ambutisarea cu flanșă fixă. Dependența grafică este prezentată în figura 1.51.

Având în vedere toate cele expuse pe parcursul acestui capitol, rezultă că

ambutisarea prin electrohidroimpulsuri presupune cunoașterea și stăpânirea unui număr mare de procese interdependente, asupra cărora se exercită influențe din partea unei mulțimi de factori. Cu toate că lucrările care tratează acest procedeu nu sunt chiar puține, ele nu reușesc să ofere indicații valide și veridice asupra modului concret de desfășurare a procesului, indicații care să permită prescrierea unor recomandări tehnologice universal valabile.

CAPITOLUL 2

OBIECTIVELE TEZEI DE DOCTORAT

Din studiul literaturii de specialitate, se poate desprinde foarte clar concluzia generală că fenomenul ambutisării prin electrohidroimpulsuri este un proces foarte complex, ce implică atât fenomene electrice (de transformare a energiei înmagazinate în bateria de condensatoare în energie gazocinetică de mișcare a particulelor de plasmă din canalul de descărcare și de dilatare a canalului în stadiul de “amorsă” al descărcării), cât și procese mecanice și hidrodinamice, legate de formarea undei de șoc, propagarea acesteia prin mediul de descărcare, interacțiunea cu pereții camerei de descărcare și cu semifabricatul, precum și de mecanica deformării plastice a semifabricatului. În figura 2.1. este prezentată o schemă generală a principalilor parametri ce influențează desfășurarea procesului de ambutisare prin electrohidroimpulsuri, precum și interdependențele dintre aceștia.

Această mulțime de parametri face destul de dificil studiul teoretic și suprapunerea acestuia peste rezultatele cercetării experimentale. Astfel, cercetările teoretice și experimentale sunt direcționate spre rezolvarea următoarelor categorii de probleme:

- studierea metodelor de stabilire a regimurilor de transformare a impulsurilor de tensiune în impulsuri hidrodinamice;
- conceperea unor noi scheme de prelucrare;
- perfecționarea utilajelor în vederea măririi durabilității și lărgirii posibilităților acestora de prelucrare a unor piese mari;
- perfecționarea camerelor de descărcare în scopul măririi randamentului energetic pe ciclu;
- optimizarea regimurilor de deformare;
- conceperea unor echipamente electrice cu performanțe ridicate.

Aproape fiecare categorie de parametri din cei enumerați mai sus au fost abordați fie în studii teoretice, fie în cercetări experimentale. Cu toate acestea, unele aspecte fie nu au fost rezolvate integral, fie au un domeniu îngust de aplicabilitate, unele dintre ele nefiind nici măcar subiecte de studiu.

În conexiune directă cu acești factori de decizie, o serie de lucrări sunt consacrate posibilității utilizării efectului combinat al ambutisării hidraulice urmată de deformarea prin electrohidroimpulsuri. Deasemenea, un alt domeniu de interes pentru cercetători îl constituie influența gradului de deformare, a vitezei de deformație și a presiunii asupra caracterului comportamental la deformare a materialului semifabricatului.

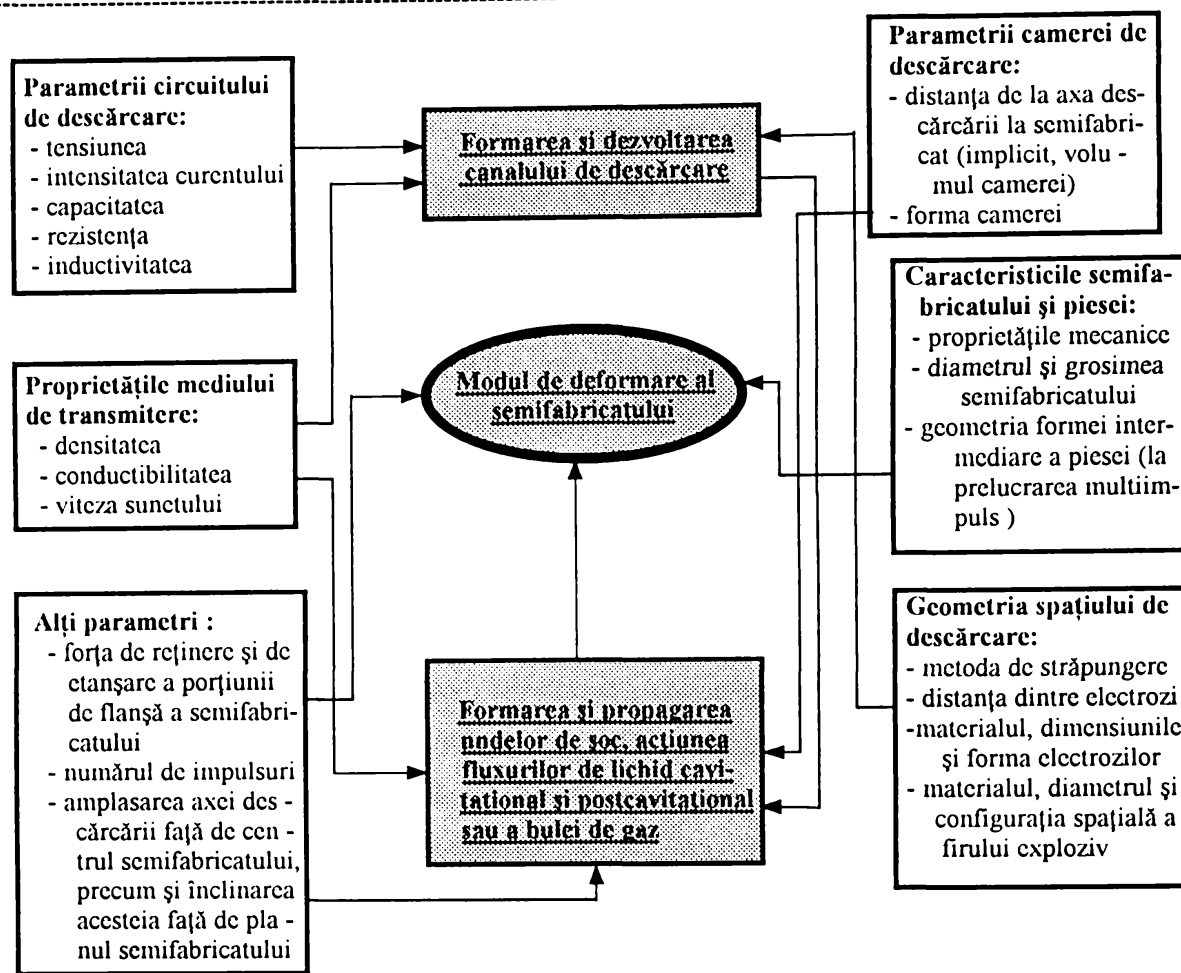


Fig.2.1.

În consecință, se pot trage o serie de concluzii, pe baza cărora se pot stabili și unele dintre direcțiile cercetărilor teoretice și experimentale ale prezentei lucrări:

1. Majoritatea experimentelor privesc fenomene ce se petrec la o tensiune de descărcare cuprinsă între 5 ÷ 15 kV, lucrările consacrate tensiunilor înalte de descărcare fiind într-un număr foarte redus ;

2. Deși există studii parțiale privind influența diverșilor factori asupra desfășurării procesului de ambutisare prin electrohidroimpulsuri, nu există o teorie unitară globală, teorie care să permită modelarea și simularea procesului de deformare cu ajutorul calculatorului;

3. În condițiile tensiunilor înalte de descărcare, nu este elucidată într-un mod satisfăcător influența geometriei spațiului de descărcare asupra desfășurării procesului de deformare;

4. Datorită lipsei de date experimentale, nu există certitudinea păstrării și aplicabilității legităților fenomenologice determinate la tensiuni între 5 ÷ 15 kV și în domeniul tensiunilor înalte, cuprinse între 15 ÷ 45 kV ;

5. Deși au fost luate în considerare mai multe tipuri de variații ale distribuției de presiune în lichid și pe suprafața semifabricatului (ținând cont și de undele reflectate, de fluxul de lichid

cavitațional și postcavitațional, de bula de gaz, etc.), nu s-a luat în considerare schimbarea formei frontului undei de șoc, schimbare care duce și la modificarea modului de incidență a undei de șoc pe semifabricat;

6. În contextul modelării și simulării procesului de deformare, nu există stabilit un minim de criterii de similitudine care să permită studiul experimental la scară redusă, pe modele;

7. Marea majoritate a studiilor teoretice și experimentale se referă la prelucrările monoimpuls, neexistând indicații fenomenologice sau tehnologice asupra prelucrărilor prin impulsuri succesive.

În concluzie, lucrarea își propune următoarele direcții definitorii de studiu:

1. *Determinarea unei relații de calcul a presiunii care să țină seama de schimbarea formei frontului undei de șoc;*

2. *Determinarea influenței geometriei spațiului de descărcare asupra presiunii frontului undei de șoc și a gradului de deformare rezultat la piesă în cazul utilizării unor tensiuni de descărcare cuprinse între 15 ÷ 45 kV. În mod asemănător tensiunilor sub 15 kV, în studiul acestei categorii de factori legați de geometria spațiului de descărcare vor intra:*

2.1. *La descărcarea cu străpungerea directă a spațiului dintre electrozi:*

2.1.1. *Influența distanței între electrozi;*

2.1.2. *Influența materialului și formei electrozilor.*

2.2. *La descărcarea prin inițiere cu fir exploziv:*

2.2.1. *Influența lungimii și diametrului firului exploziv;*

2.2.2. *Influența configurației spațiale a firului exploziv și, implicit, a interdependenței dintre lungimea firului exploziv și distanța dintre electrozii suport.*

3. *Stabilirea unei teorii unitare de abordare a procesului de ambutisare prin electrohidroimpulsuri, pe baza studiilor teoretice și a cercetărilor experimentale conținute în literatura de specialitate precum și în prezenta lucrare, teorie care, verificată experimental, să permită modelarea și simularea procesului de deformare cu ajutorul calculatorului;*

4. *Stabilirea și verificarea experimentală a unui minim de criterii de similitudine în cazul inițierii descărcării cu fir exploziv, astfel încât, în contextul simulării computerizate, să fie mărit procentul de predictibilitate a procesului;*

5. *Determinarea unor reguli tehnologice de prelucrare în regim multiimpuls, aplicabile ambutisării prin electrohidroimpulsuri a pieselor cu forme de revoluție.*

CAPITOLUL 3

APARATURA PENTRU CERCETĂRI EXPERIMENTALE

3.1. Generatorul de impulsuri de înaltă tensiune

Pentru obținerea impulsurilor de înaltă tensiune au fost utilizate generatoarele unei instalații rusești de tip GIT 50 - 5x1/4C de curățire electrohidraulică a pieselor turnate, aflată în dotarea U.C.M.R. S.A. Reșița, care au fost cuplate la o cameră închisă universală de descărcare, de concepție proprie. Schema electrică de principiu a generatorului este prezentată în figura 3.1.

Principalii parametri ai generatorului sunt prezentați în tabelul 3.1.

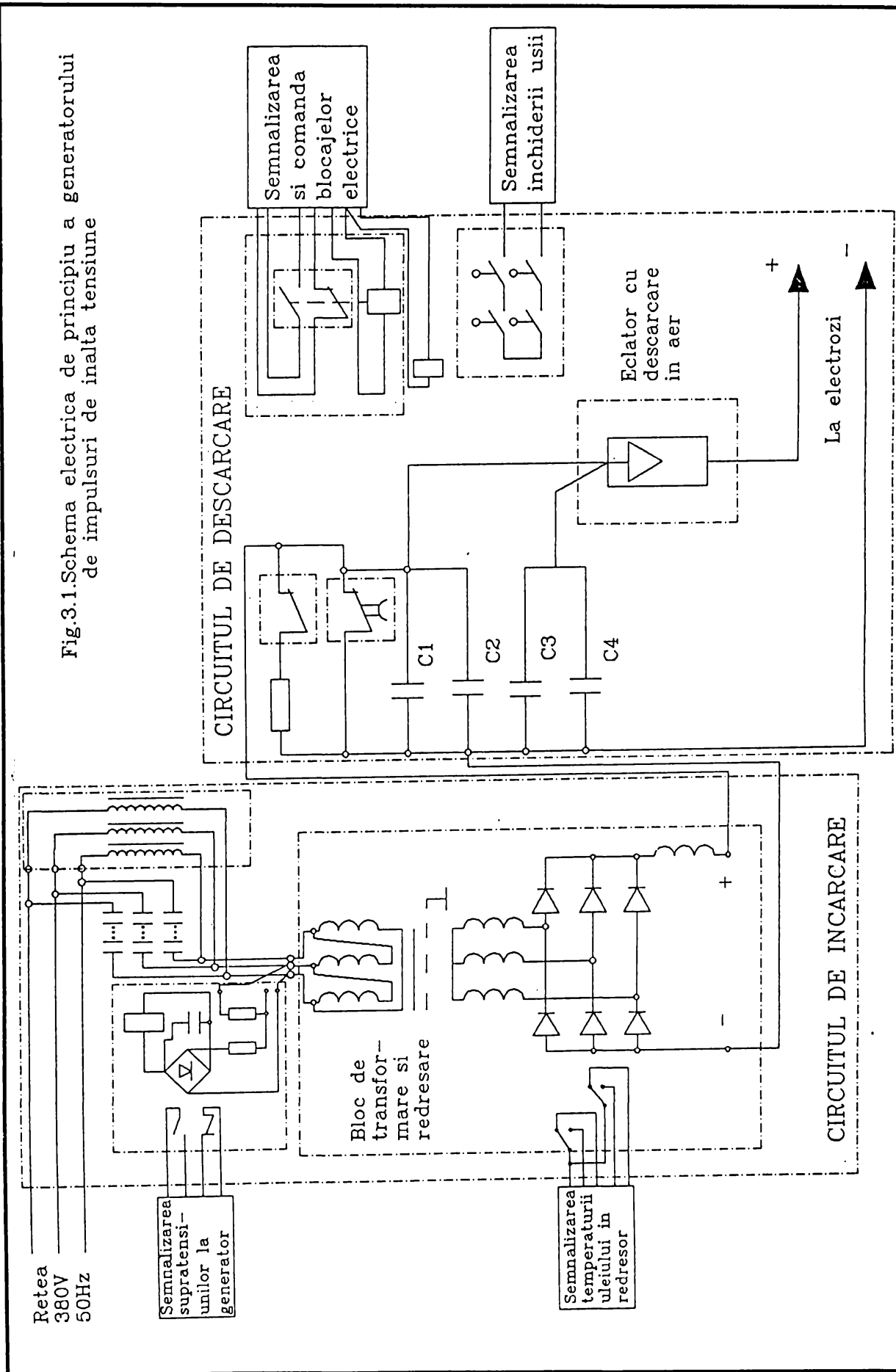
TABELUL 3.1.

Caracteristici principale	Valori nominale	Abateri critice [%]
Puterea nominală [kW]	10	± 20
Tensiunea nominală maximă de ieșire [kV]	50	± 5
Frecvența nominală de ieșire [Hz]	2	± 10
Energia maximă a descărcării [kJ]	5	± 20
Numărul canalelor de descărcare	1	–
Tensiunea de alimentare [V]	380	± 5
Frecvența curentului rețelei de alimentare [Hz]	50 ; 60	± 2
Puterea totală [kVA]	18	± 15
Valoarea minimă a factorului de putere a generatorului	0,73	–
Valoarea nominală a curentului ce străbate bobina de șoc [A]	20	± 10
Inductanța bobinei de șoc la curentul nominal [mH]	32	± 10
Valoarea curentului nominal redresat [A]	0,4	± 5
Puterea nominală minimă în partea curentului redresat [kW]	17	–
Randamentul minim al redresorului [%]	92	–
Factorul minim de putere al redresorului	0,93	–
Randamentul minim al generatorului [%]	0,80	–

În figurile 3.2, 3.3 și 3.4 sunt prezentate vederile generale ale generatorului, panoului de comandă al generatorului și al interiorului dulapului de conexiuni.

Pentru reglarea tensiunii, instalația este prevăzută cu un eclator cu descărcare în aer de tip RI 5-50/40 UHL 4, de producție rusească. Principalii parametri ai eclatorului sunt prezentați în tabelul

Fig.3.1.Schema electrica de principiu a generatorului de impulsuri de inalta tensiune



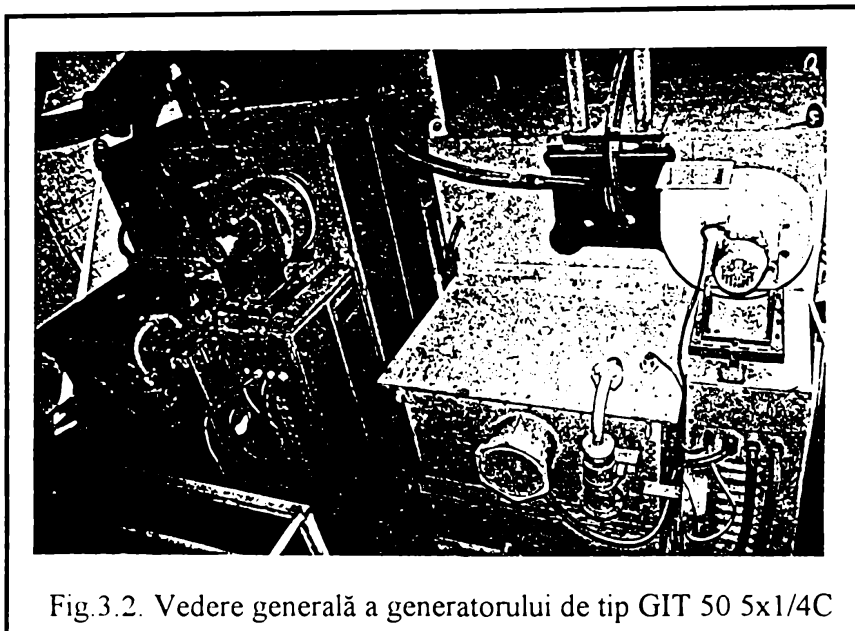


Fig.3.2. Vedere generală a generatorului de tip GIT 50 5x1/4C

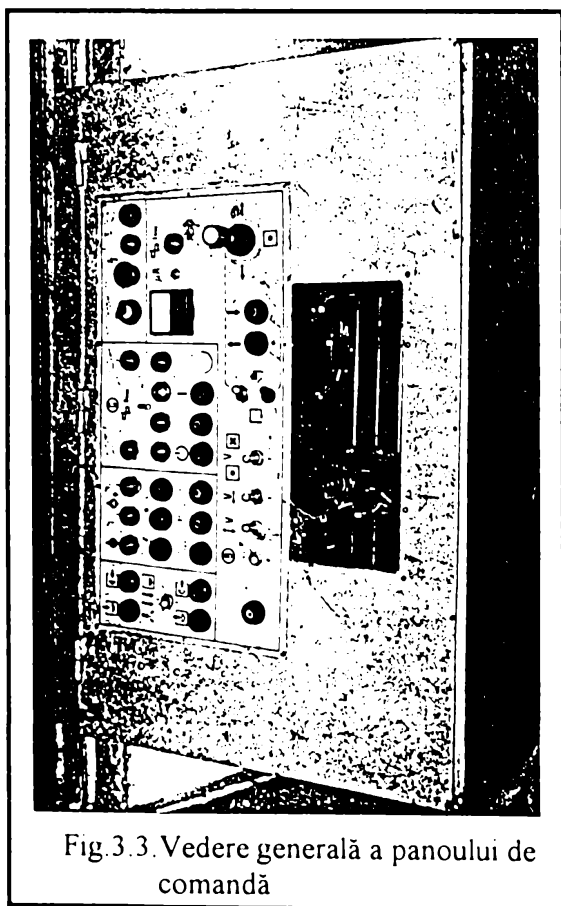


Fig.3.3. Vedere generală a panoului de comandă

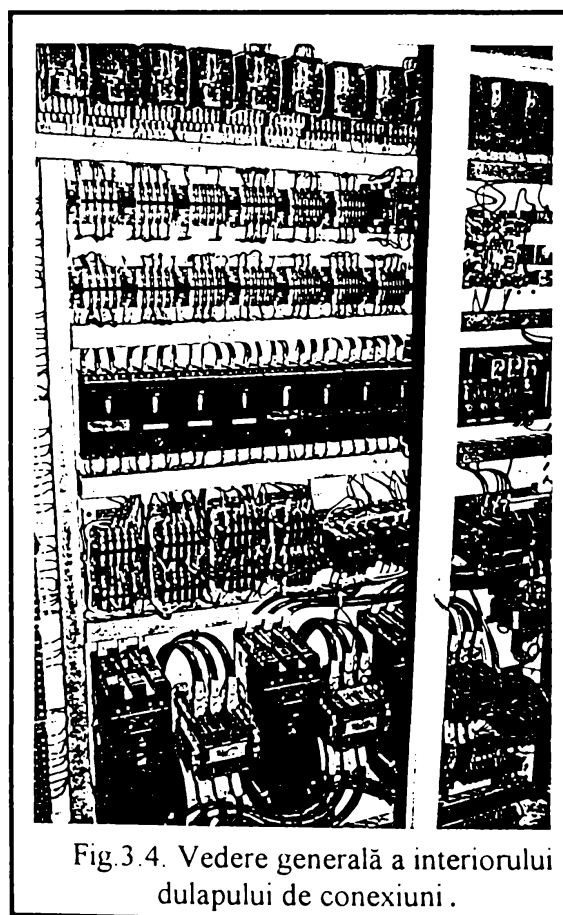


Fig.3.4. Vedere generală a interiorului dulapului de conexiuni .

3.2. (fără cei care, implicit, sunt definiți de parametrii generatorului), iar o vedere generală a acestuia este redată în figura 3.5.

Reglarea tensiunii se face prin mărirea sau micșorarea distanței dintre cele două talere ale

eclatorului, măsurarea făcându-se cu ajutorul unei truse de cale. Diagrama de corespondență distanță-tensiune este prezentată în figura 3.6.

TABELUL 3.2.

Parametrii principali	Valoarea nominală	Abateri critice [%]
Amplitudinea maximă a impulsului de curent [kA]	40	–
Inductivitatea maximă a eclatorului [μH]	0,3	–
Durata maximă a impulsului de curent [μs]	50	–

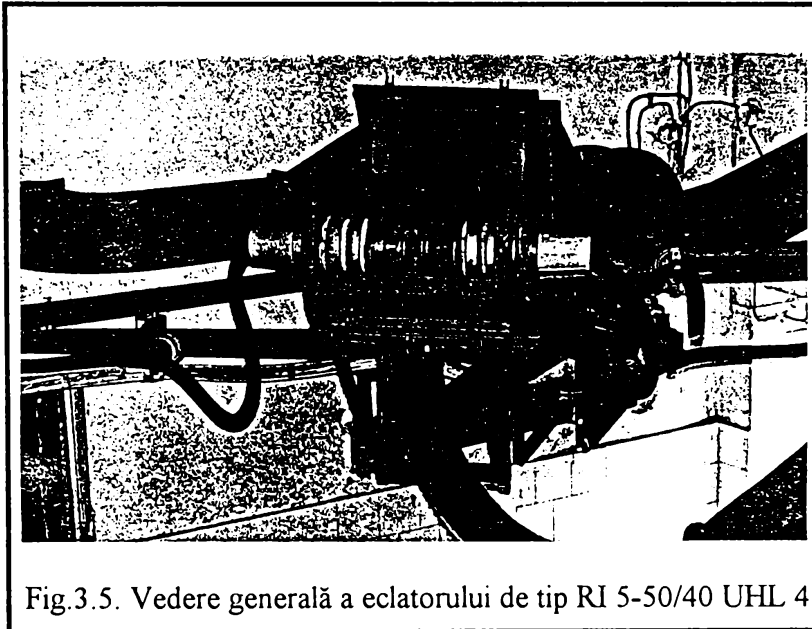


Fig.3.5. Vedere generală a eclatorului de tip RI 5-50/40 UHL 4

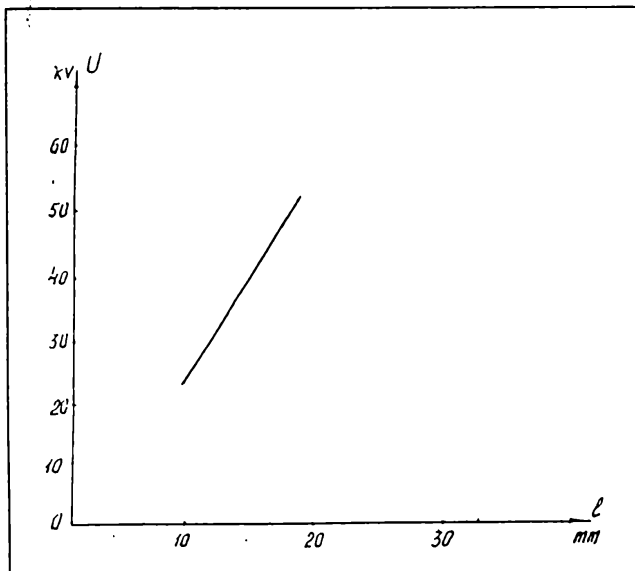


Fig. 3.6. Diagrama de corespondență distanță - tensiune pentru eclatorul cu descărcare în aer de tip RI 5-50/40 UHL 4

Conform acestei diagrame, la o reglare a distanței din 0,25 în 0,25 mm, vor corespunde tensiunile de descărcare pe spațiul de apă dintre electrozii camerei de descărcare, conform tabelului 3.3.

Bateria de condensatoare a unui singur generator (din grupul celor două, legate în paralel) este formată dintr-un grup de 4 condensatoare, tot de construcție rusească, de tip IKG 50 UHL 4, fiecare cu o capacitate nominală de 1 μF și o inductivitate maximă de 800 nH, tensiunea nominală fiind de 50 kV.

TABELUL 3.3.

Distanță [mm]	Tensiune [V]	Distanță [mm]	Tensiune [V]	Distanță [mm]	Tensiune [V]	Distanță [mm]	Tensiune [V]
<i>INTERVAL</i>	<i>10 - 20 KV</i>	8,40	19126	11,50	28430	15,00	39672
5,15	10000	8,65	19828	11,75	29233	15,25	40475
5,40	10702	8,90	20530	12,00	30036	15,50	41278
5,65	11404	9,15	21232	12,25	30839	15,75	42081
5,90	12106	9,40	21934	12,50	31642	16,00	42884
6,15	12808	9,65	22636	12,75	32445	16,25	43687
6,40	13510	9,90	23338	13,00	33248	16,50	44490
6,65	14212	<i>INTERVAL</i>	<i>23,6 - 50 kV</i>	13,25	34051	16,75	45293
6,90	14914	10,00	23612	13,50	34854	17,00	46096
7,15	15616	10,25	24415	13,75	35657	17,25	46899
7,40	16318	10,50	25218	14,00	36460	17,50	47702
7,65	17020	10,75	26021	14,25	37263	17,75	48505
7,90	17722	11,00	26824	14,50	38066	18,00	49308
8,15	18424	11,25	27627	14,75	38869		

3.2. Camera universală de descărcare

În scopul determinărilor experimentale a fost proiectată o cameră universală de descărcare pentru operații de ambutisare, prevăzută cu posibilitățile de reglare necesare unui studiu detaliat al principalilor parametri ai procesului. Schița simplificată a camerei este prezentată în figura 3.7.

După cum se observă, incinta camerei de descărcare este formată din cilindrul exterior (2), așezat pe placa de bază (1), în care poate culisa cilindrul interior (3), etanșarea realizându-se cu ajutorul unor inele "O". În incintă este fixat suportul matriță (44), pe care se pot așeza matrițe (22) de diferite dimensiuni. Etanșarea dintre suport și matriță se poate realiza tot cu inele "O", fixate pe suprafața cilindrică laterală a suprafețelor de așezare ale suportului matriță. Reținerea flanșei mobile a semifabricatului se face cu inelul de reținere (21), fixat cu ajutorul a 4 șuruburi (20). Etanșarea dintre semifabricat și matriță se poate realiza fie cu un inel "O" așezat pe fața frontală a matriței, fie printr-o construcție specială a inelului de reținere (21). Umplerea și golirea camerei se face prin orificii practicate în placa de bază (1).

Închiderea camerei de descărcare se face cu ajutorul capacului (5), în care se află fixat și sistemul de reglare a electrozilor. Acționarea și strângerea capacului (5) se realizează prin șurubul (13), fixat în capac printr-un lagăr de rostogolire închis în carcasa (10), aceasta din urmă fiind fixată de capacul (5) prin intermediul șuruburilor (9). Lagărul de rostogolire radial-axial asigură, pe de o parte, păstrarea poziției axei descărcării în timpul strângerii capacului (poziție care, în timpul strângerii, ar putea fi modificată prin rotirea capacului datorită frecării dintre suprafețele în contact

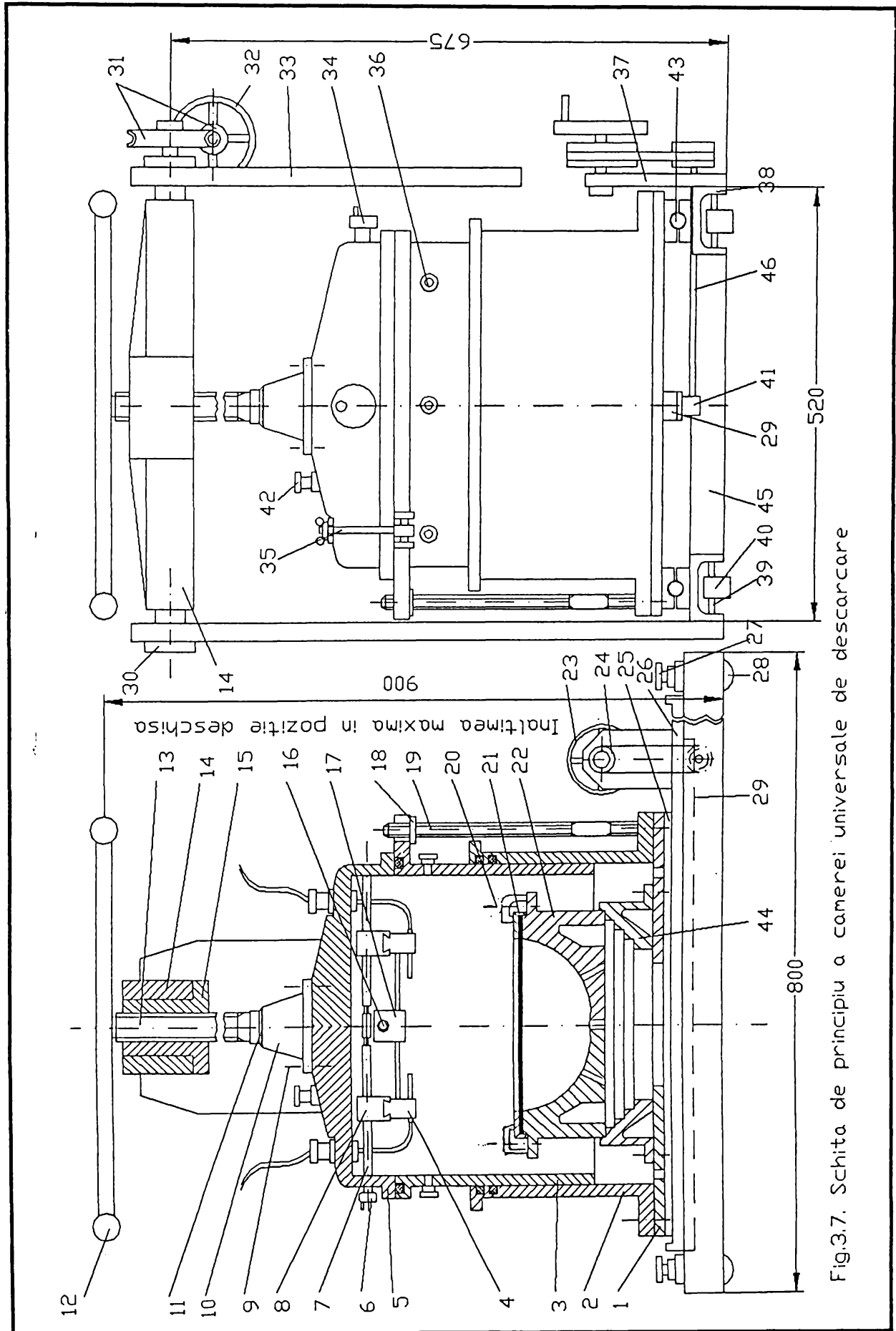


Fig.3.7. Schita de principiu a camerei universale de descarcare

ale șurubului cu capacul) și, pe de altă parte, permite rotirea intenționată în plan, cu 360° , a axei descărcării. Tamburul gradat (11) permite un control rapid și precis al deplasării axiale a șurubului și implicit, a distanței dintre axa descărcării și semifabricat.

Piulița (15) este fixată cu ușoară strângere și asigurată cu șuruburi în axul de basculare (14). Acest ax este așezat pe suportii (33) prin intermediul unor lagăre radiale de alunecare (30). Suportii (33) sunt, la rândul lor, fixați de cadrul orizontal format din profilele U 120 (38) și (45), profile sudate între ele. Astfel, prin rigidizarea cadrului orizontal format de profilele (38) și (45), cu suportii (33) și axul de basculare (14) s-a obținut structura de rezistență a camerei de descărcare.

Pentru a ușura manevrele în interiorul incintei (scoaterea piesei, înlocuirea semifabricatului sau a matriței, etc.), întregul subansamblu inferior format din placa de bază (1) și cei doi cilindrii (2) și (3), poate fi deplasat orizontal, după deschiderea și ridicarea capacului (5). În acest scop, placa de bază (1) este așezată pe profilele (38) prin intermediul unui ghidaj liniar cu bile (43). Pentru antrenare se utilizează un angrenaj pinion-cremalieră, la care cremaliera (29) este fixată de placa de bază (1), iar pinionul (41) este fixat în consolă pe axul (46). Acționarea se face printr-o transmisie cu curea dințată, roțile de curea (24) fiind fixate pe suportul (37), acesta din urmă fiind, deasemenea, fixat de profilul (38). Antrenarea este manuală, prin roata de mână (23).

Elementele numerotate cu (25) și (26) reprezintă ghidajele liniare, fixate pe placa de bază (1) și, respectiv pe profilul (38). Precizia poziționării sub capac, la revenire, se realizează prin

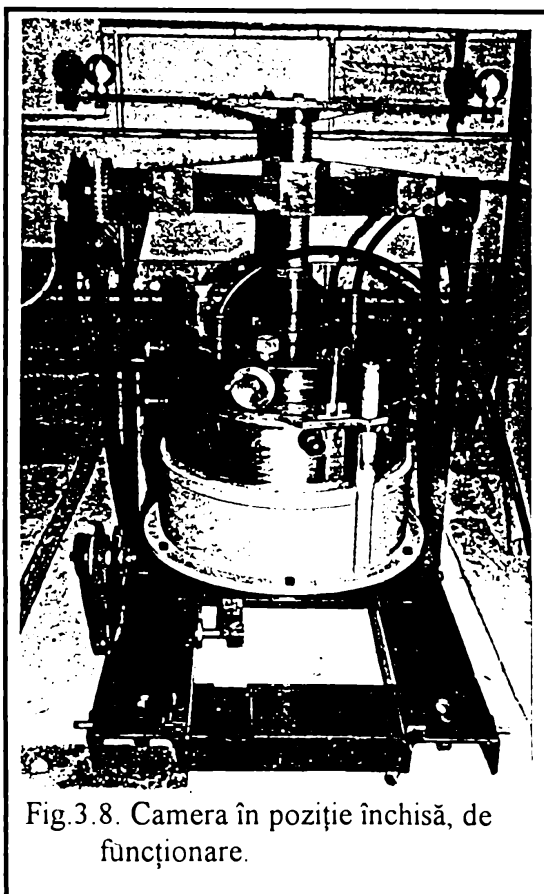


Fig.3.8. Camera în poziție închisă, de funcționare.

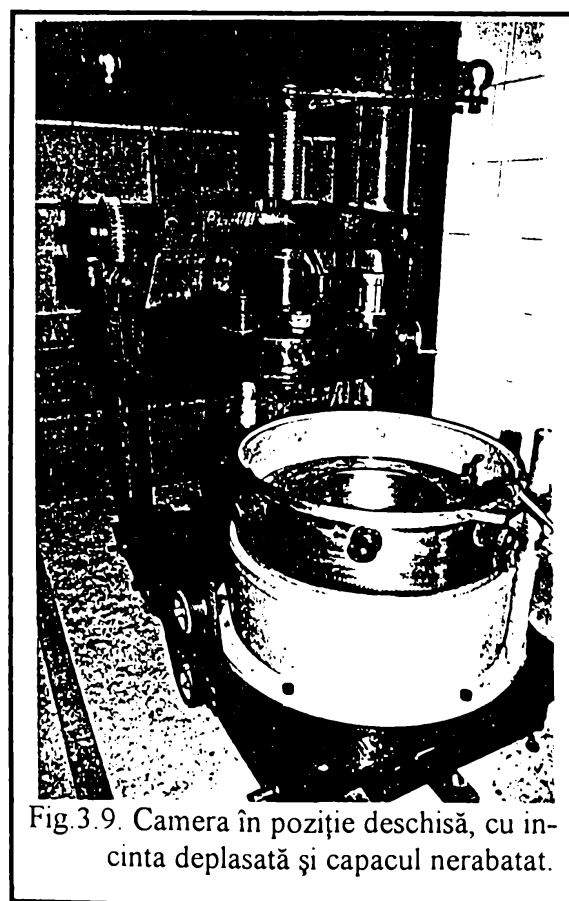


Fig.3.9. Camera în poziție deschisă, cu incinta deplasată și capacul nerabatat.

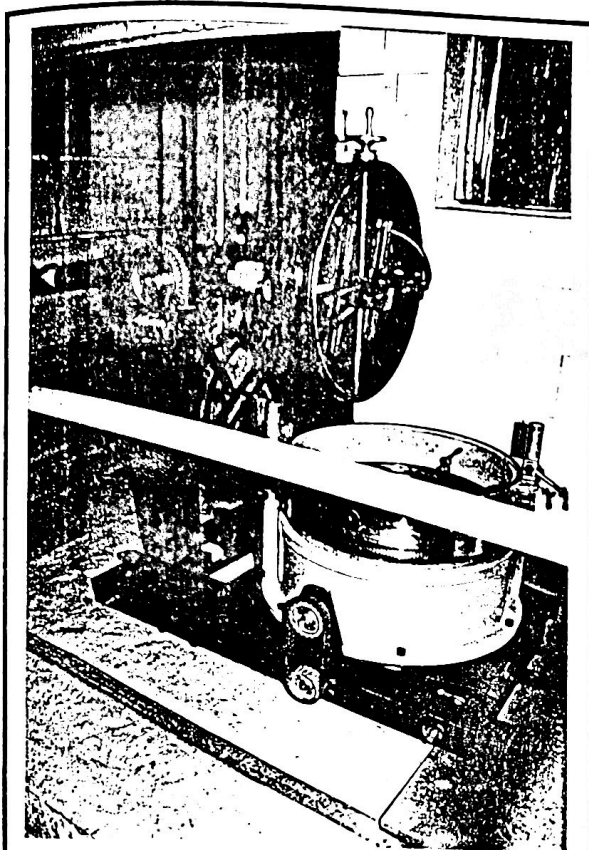


Fig.3.10. Camera în poziție deschisă și capacul rabătut la 90° înspre incintă

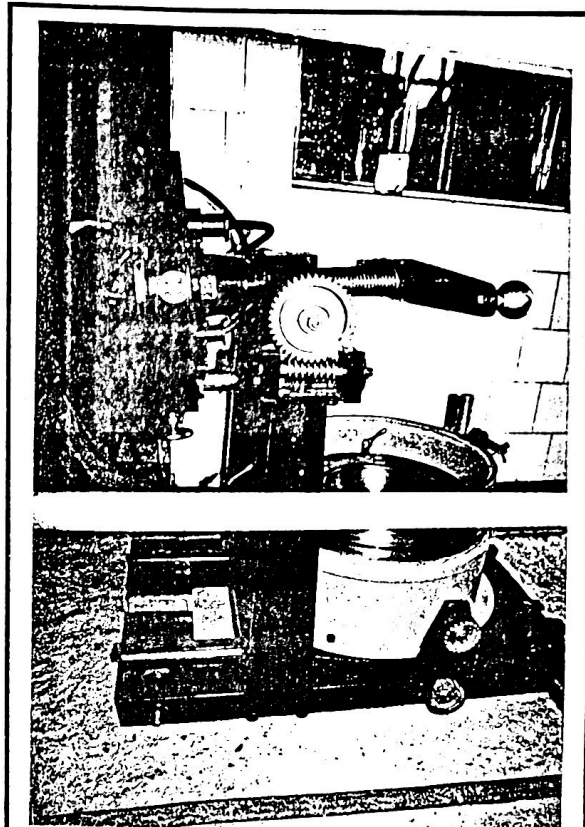


Fig.3.11. Camera în poziție deschisă și capacul rabătut la 90° în spatele incintei

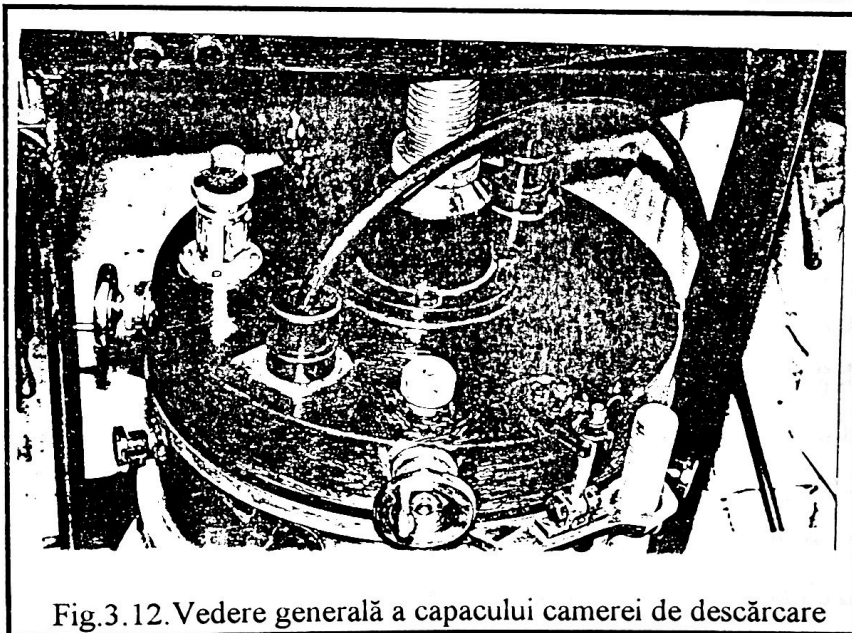


Fig.3.12. Vedere generală a capacului camerei de descărcare intermediul unor opritori.

intermediul unor opritori.

Pentru a ușura reglajul electrozilor, axul de basculare (14) poate fi rotit (basculat) la 90°, împreună cu capacul și cu întregul sistem de reglare a electrozilor. Aceasta se realizează prin angrenajul melc-roată melcată (31), acționat prin roata de mână (32). Întregul sistem de antrenare este fixat pe suportul (33).

Reglajul distanței dintre axa descărcării și semifabricat se face cu ajutorul șurubului (13), prin ridicarea simultană a capacului (5) și a cilindrului (3), după ce, în poziție închisă, cele două elemente

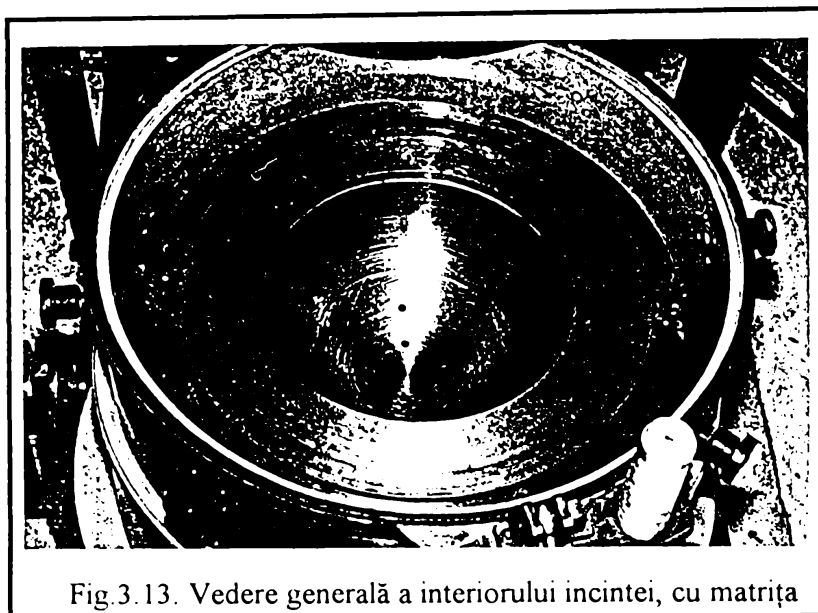


Fig.3.13. Vedere generală a interiorului incintei, cu matrița

au fost fixate prin șurubul (35), prevăzut cu o piuliță fluture. După ridicarea cilindrului (3) în poziția necesară, se reglează și piulițele (18), pe tije filetate (19), la același nivel cu cilindrul. Aceste piulițe se constituie în elemente de sprijin ale cilindrului (3), pentru ca acesta, în momentul strângerii capacului (5), să nu se deplaseze în jos. În figurile 3.8, 3.9, 3.10, 3.11, 3.12, 3.13 sunt redată câteva ipostaze ale funcționării camerei de descărcare.

Sistemul de reglare a distanței dintre electrozi constă în următoarele (fig.3.14) : în capacul (5) este poziționat șurubul dublu (7), cu două zone, una având filet stânga și una având filet dreapta. În fiecare zonă este poziționat câte un corp de ghidare (8), prevăzut cu ghidaj coadă de rândunică, în care pot culisa portelectrozii de textolit (4), ce susțin electrozii (21). Electrozii sunt îmbrăcați, la rândul lor, într-o izolație de textolit (48), în interiorul căreia se introduce și conexiunea dintre electrod și cablul de alimentare (47). Etanșeizarea și izolarea electrică a conexiunii, pentru a evita conturnările, precum și rigidizarea electrodului în interiorul izolației de textolit s-a făcut prin turnarea unei rășini epoxidice de tip **DINOX 010S**. Rezultate bune au dat, din punct de vedere mecanic, al etanșării și electroizolant și rășina poliaminamidică de tip **ROMAMID 700** sau adezivii bicompenți pe bază de rășini epoxidice de tip **ALOREX 103** sau **ALOREX 103R**.

Pentru a putea studia influența formei electrozilor asupra desfășurării procesului în cazul străpungerii directe a spațiului de lichid, aceștia au în capăt un orificiu filetat, în care se pot fixa vârfuri (49) de diferite forme și dimensiuni.

Prin rotirea șurubului (7) cu ajutorul roții de mână (6), se pot deplasa simultan cei doi electrozi, mărindu-se sau micșorându-se distanța dintre aceștia. Controlul deplasării se face tot prin

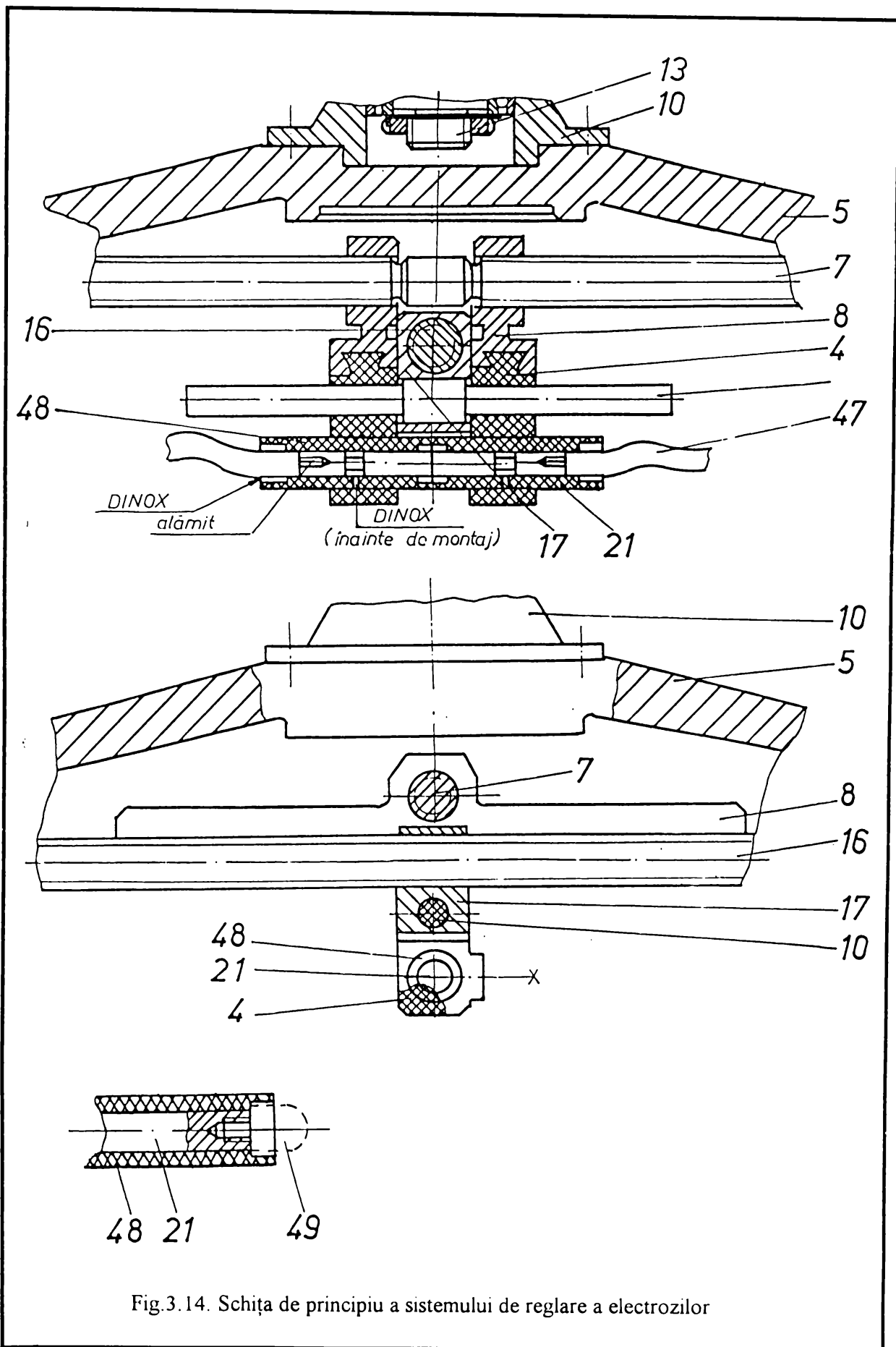


Fig.3.14. Schița de principiu a sistemului de reglare a electrozilor

intermediul unui tambur gradat, nereprezentat în figură.

Perpendicular pe șurubul dublu (7), este poziționat, tot în capacul (5), șurubul cu filet normal (16), prin a cărui rotire se poate deplasa liniar corpul intermediar (17). Acest corp intermediar este rigidizat, prin intermediul unei tije (20), de cei doi portelectrozi (4). În consecință, prin rotirea șurubului (16) cu ajutorul roții de mână (34), se pot deplasa simultan pe ghidajele coadă de rândunică portelectrozii (4), modificându-se astfel poziția axei descărcării în raport cu poziția centrală față de semifabricat (considerat ca punct de zero pentru reglaje). Controlul deplasării se face tot printr-un tambur gradat, nereprezentat în figură, reglarea fiind posibilă indiferent și independent de reglajul distanței dintre electrozi. În figura 3.15 este prezentat aspectul general al sistemului de reglare a electrozilor.

Pentru ca întregul ansamblu al camerei de descărcare să fie ușor deplasabil, el este prevăzut cu 4 role (40), fixate prin arborii (39) de profilele (38), și care, printr-un mecanism special

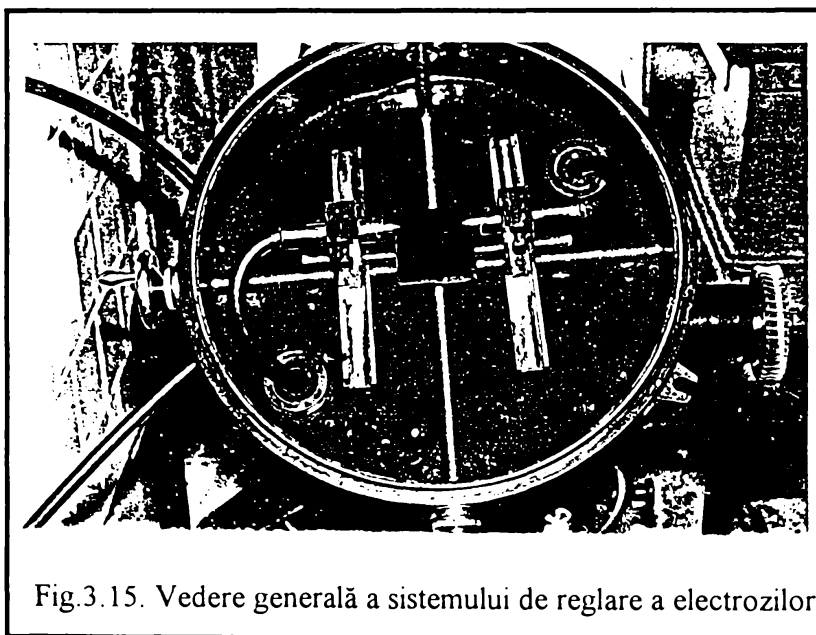


Fig.3.15. Vedere generală a sistemului de reglare a electrozilor

(27), se pot deplasa pe verticală. Astfel, după deplasare, rolele se pot retrage în interiorul profilului (38), permițând așezarea fermă a întregului ansamblu pe cadrul orizontal format de profilele (38) și (45).

În cilindrul (3) sunt practicate orificii de ieșire (36), pentru cablurile traductoarelor de presiune care pot fi montate în interiorul camerei, prin intermediul unui sistem special de susținere și reglare. Capacul (5) are prevăzute două orificii (42) de intrare, pentru cablurile de alimentare cu energie electrică a electrozilor.

În final, se prezintă principalele caracteristici ale camerei de descărcare:

- dimensiunile de gabarit ale cadrului de profile U 120: **800 x 520 mm**;
- înălțimea camerei de descărcare, măsurată în axul de basculare: **675 mm**;

- înălțimea maximă a camerei în poziție deschisă: **900 mm**;
- unghiul optim de basculare: **90 °**;
- diametrul interior al cilindrului mare: **φ 410 mm**;
- diametrul interior al cilindrului mic: **φ 385 mm**;
- diametrele exterioare ale matrițelor ce pot fi montate: **φ 305; φ 265; φ 225; φ 185; φ 145**;
- domeniul de reglare al distanței dintre axa descărcării și semifabricat: **20 - 200 mm**;
- domeniul de reglare al distanței dintre electrozi: **0 - 120 mm**;
- dezaxarea maximă posibilă a axei descărcării față de centrul semifabricatului: **100 mm**;
- unghiul de rotire în plan al axei descărcării: **360°**;
- precizia de reglare a distanței dintre axa descărcării și semifabricat: **0,1 mm**;
- precizia de reglare a distanței dintre electrozi: **0,05 mm**;
- cursa maximă pe orizontală a camerei: **400 mm**.

3.3. Captoarele de presiune și sistemul de susținere și reglare al acestora

După cum se știe, presiunile dezvoltate pe frontul undei de șoc au o durată de variație foarte rapidă, de ordinul zecimilor de milisecundă. Din largă gamă a traductoarelor ce pot fi folosite, s-au ales timbrele tensometrice, din trei motive principale: liniaritate a semnalului de ieșire, posibilitatea preluării unor sarcini (chiar dinamice) mari și preț relativ scăzut.

Astfel, în scopul măsurării presiunii din interiorul camerei de descărcare, precum și pentru stabilirea zonelor de schimbare a formei frontului undei de șoc, a fost conceput un captor tensometric de presiune cu element elastic de tip membrană circulară, a cărei construcție este prezentată în figura 3.16.

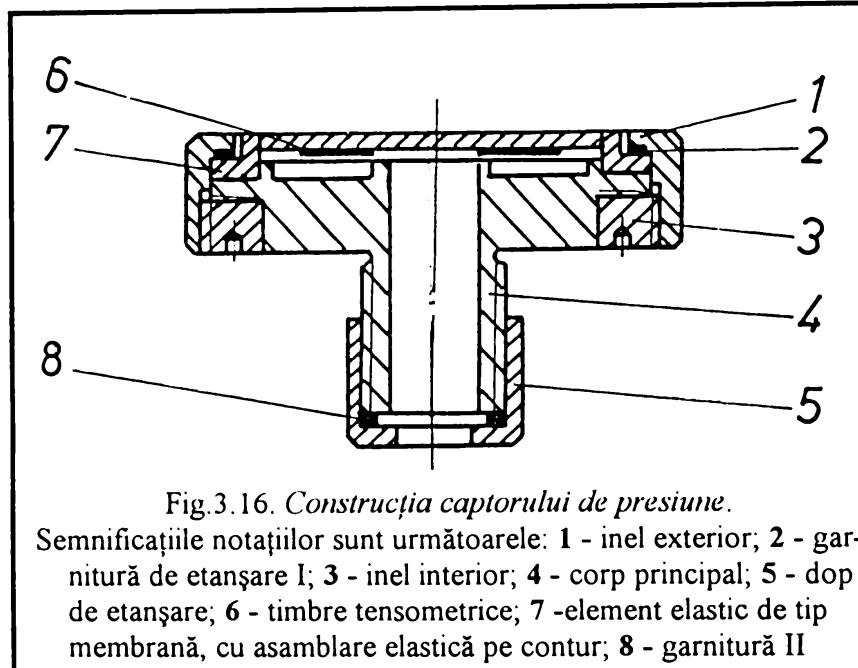
Elementele elastice, din **30 MoCN 20** îmbunătățit, au fost realizate în trei variante, cu grosimi ale membranei de **1,2**, **2,2** și, respectiv **3,2** mm. Deoarece măsurarea se face simultan în trei puncte din interiorul incintei, s-au executat câte trei captoare pentru fiecare variantă.

Timbrele tensometrice folosite sunt de tip **Hottinger LA 11 3/120** cu **$R = 118,4 \pm 0,5 \% \Omega$** și **$k = 1,95 \pm 1\%$** și **Mikrotechna M 120** cu **$R = 119,1 \pm 0,25\% \Omega$** și **$k = 2,05 \pm 1\%$** . După lipirea pe elementul elastic, în scopul asigurării împotriva umidității, timbrele au fost acoperite prin pensulare cu un lac electroizolant pe bază de rășină alchido-epoximelaminică de tip **5531 Ez**. Deasemenea, toate elementele demontabile ale captorului au fost etanșate cu cauciuc siliconic **CAF 730**.

Etalonarea dinamică a captoarelor a fost efectuată în cadrul Institutului de proiectare și cercetare pentru echipamente hidraulice Reșița. Diagramele de etalonare sunt prezentate în fig. 3.17.

În ceea ce privește măsurarea presiunii, este de remarcat faptul că până în prezent există un

număr relativ mare de lucrări în care au fost studiate caracterul și mărimea presiunilor dezvoltate în camerele de descărcare[5,13,18,19,42,59,65,71], determinările fiind făcute fie pe placă fixă, fie pe placă mobilă. S-a constatat astfel că distribuția de presiune și variația acesteia în timp este diferită pentru cele două cazuri.



Cu toate acestea, nici într-un caz, nici în celălalt, deși unele modele matematice țin cont de incidența frontului undei de șoc pe suprafața semifabricatului, nu se ia în considerare schimbarea formei frontului undei de șoc, ceea ce duce și la modificarea modului de incidență pe semifabricat. Din acest motiv a fost conceput un sistem de susținere a traductoarelor, sistem care să permită determinarea distribuției de presiune fie simulând placa fixă, fie simulând placa mobilă, luând în considerare și incidența frontului undei de șoc pe semifabricat. De asemenea, sistemul permite determinarea simultană a presiunii în trei puncte, din care unul în centrul semifabricatului iar celelalte două distanțate radial, spre marginea semifabricatului (distanța radială fiind, de asemenea, reglabilă). Compararea valorilor obținute cu cele două traductoare marginale permite studiul simetriei formei undei de șoc, în funcție de distanța dintre axa descărcării și semifabricat.

Construcția sistemului este prezentată în figura 3.18. După cum se observă, sistemul este așezat pe placa de bază circulară (1), în care sunt practicate două canale T diametral opuse, în lungul cărora pot culisa suportii captoarelor marginale de presiune, reglându-se astfel distanța radială a acestora față de captorul central (la care incidența frontului undei de șoc se consideră a fi normală). Suportii marginali sunt formați din corpul principal (2), cu ajutorul căruia se realizează fixarea rigidă pe placa (1) după stabilirea distanței radiale dorite; în corpul (2) se află tija filetată fixă (12) și suportul intermediar (4), între cele două existând un mic joc, pentru ca, prin înfiletare în corpul (2),

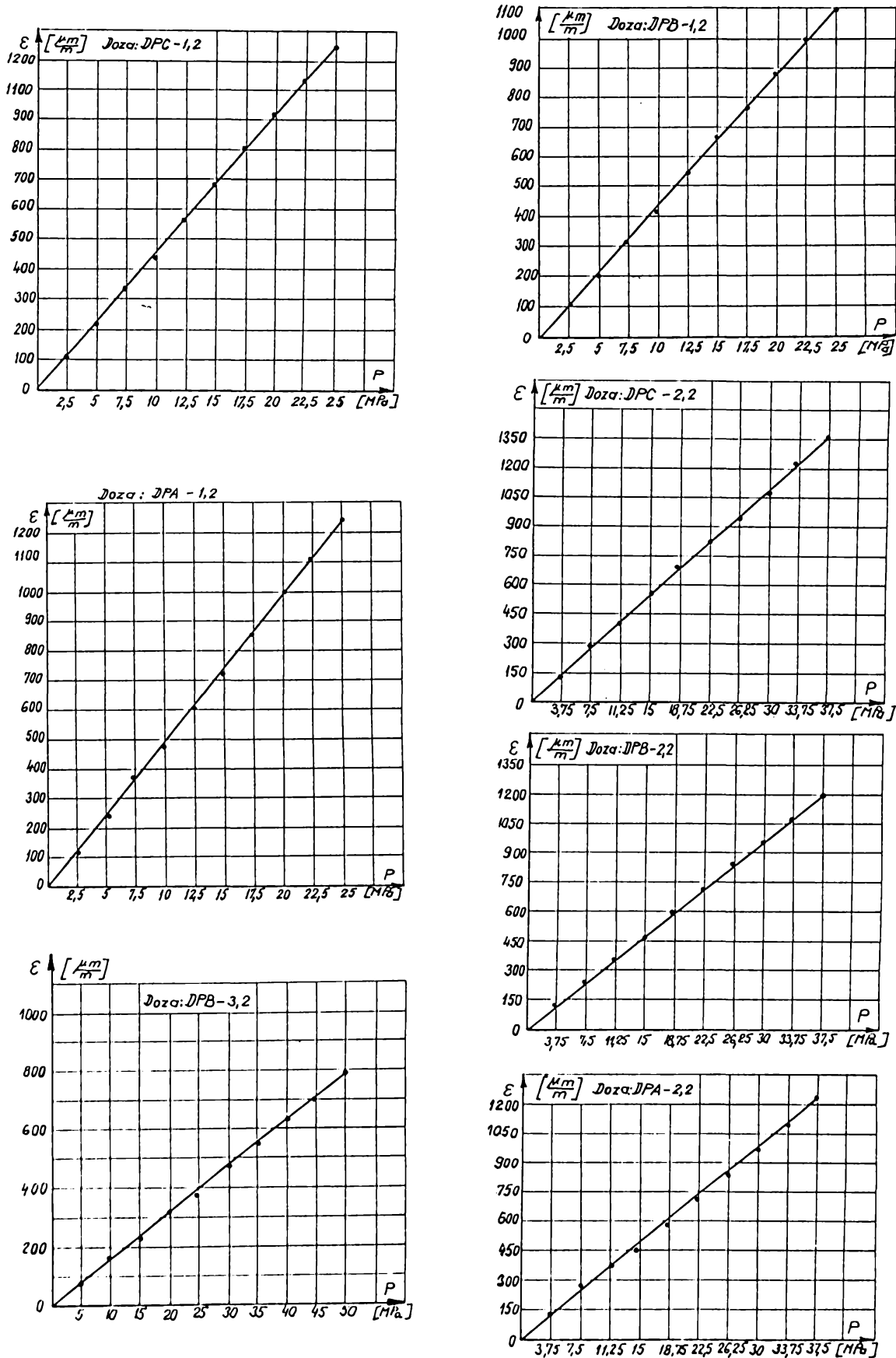


Fig. 3.17. Diagramele de etalonare ale captoarelor de presiune

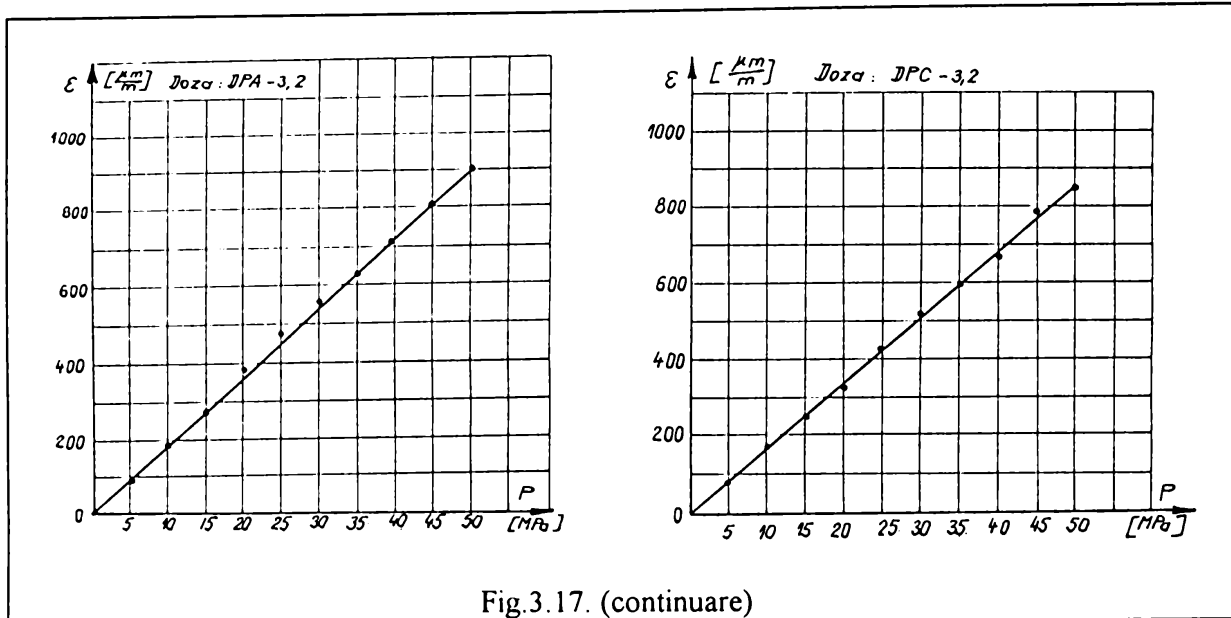


Fig.3.17. (continuare)

suportul intermediar (4) să se poată deplasa pe verticală, stabilindu-se astfel înălțimea captoarelor de presiune marginale față de captorul central; sudat de suportul intermediar (4) se află furca (5) care susține mecanismul de reglare a unghiului de înclinare a captoarelor marginale de presiune; acest mecanism este format din două inele dințate frontal (15) și (17), susținute de axul (14), inelul (17) fiind fixat cu strângere pe ax; tot cu strângere este fixat pe inelul (17) colierul gradat (16), cu diviziuni din 10° în 10° ; de inelul dințat (15) este fixată prin sudare placa suport (6) pe care este prins captorul de presiune (7). Blocarea suportului marginal la înălțimea dorită se face cu piulița (3).

Reglarea unghiului de incidență se face prin desfacerea piuliței fluture (13), ceea ce face ca, sub acțiunea arcului (18), inelele dințate (15) și (17) să iasă din angrenare și să fie permisă rotirea inelului (15) împreună cu placa suport (6) și captorul (7). Pasul unghiular este de 10° , putând fi urmărit prin intermediul colierului gradat (16). De remarcat că, inițial, rizul de zero este trasat la montaj, la poziția orizontală a captorului. După stabilirea unghiului de incidență se strânge din nou piulița fluture, cele două inele dințate reintrând în angrenare. Ansamblarea pe profil poligonal dintre elementele (14) și (5) împiedică rotirea întregului mecanism sub acțiunea presiunii din incintă.

Captorul central, așezat în centrul plăcii (1), este susținut de un cilindru în care a fost practicat un canal longitudinal pentru a permite ieșirea cablului de conexiune a traductoarelor tensometrice și pentru a evita agățarea sau rotirea cablului la înșurubarea sau deșurubarea cilindrului pe suportul (8). Reglarea înălțimii captorului central se face prin intermediul suportului (8) și a tijei filetate (9). Blocarea suportului captorului central pe placa (1) se face cu ajutorul piuliței (10).

Pentru simularea deplasării semifabricatului (placă mobilă), între placa suport (6) și captorul (7) se pot monta două variante de arcuri elicoidale de compresiune, ale căror caracteristici forță - deformație sunt prezentate în figura 3.22. Coeficientul dinamic luat în considerare are valoarea $K_{din}=2$

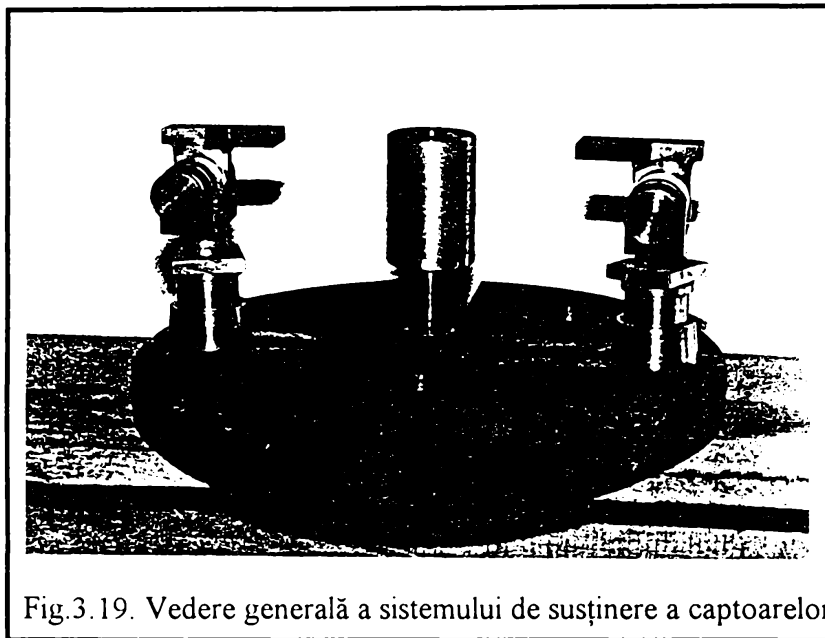


Fig.3.19. Vedere generală a sistemului de susținere a captoarelor

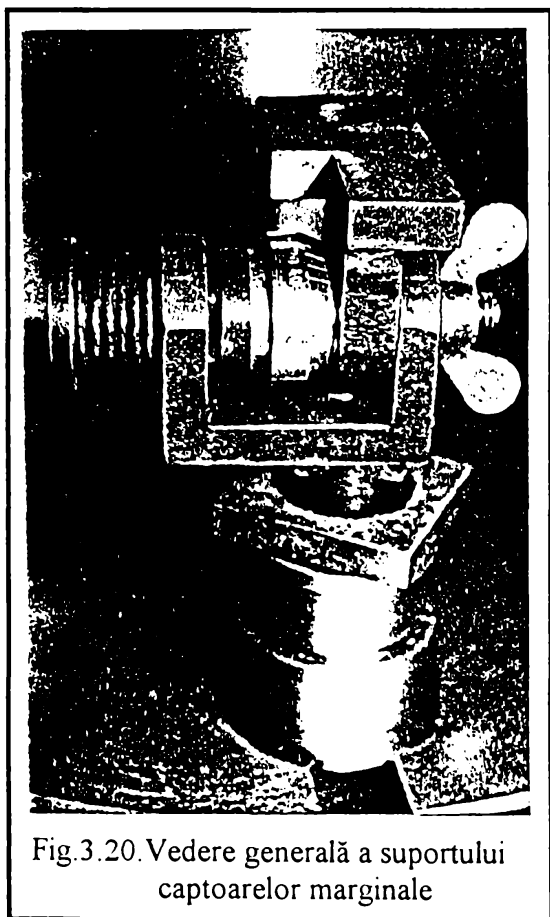


Fig.3.20. Vedere generală a suportului captoarelor marginale

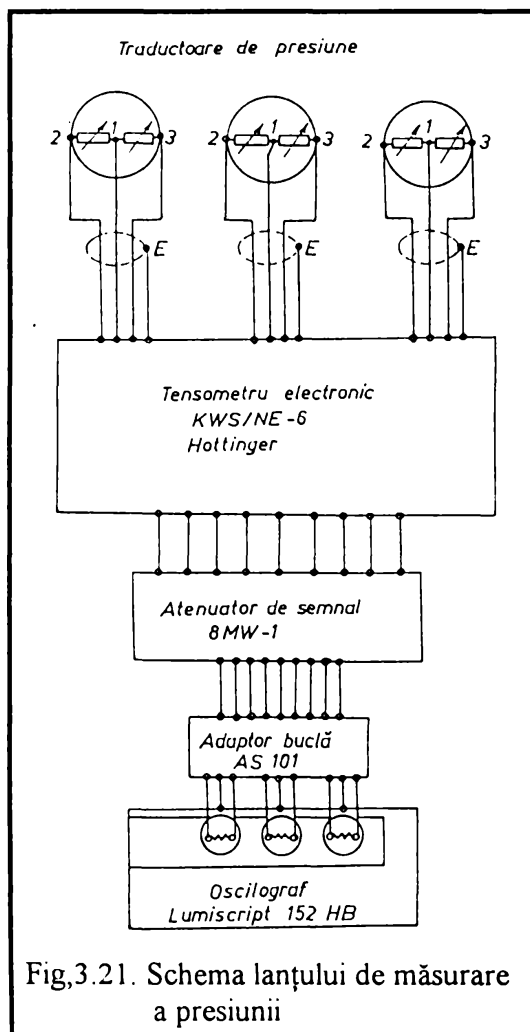
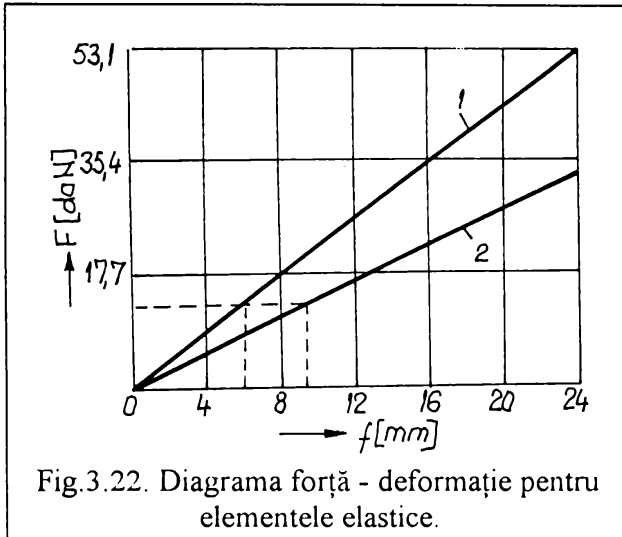


Fig.3.21. Schema lanțului de măsurare a presiunii

[73]. Arcurile se montează cu prestrângere, modul de obținere a punctelor caracteristice prestrângerii fiind reprezentat cu linie punctată.



În figura 3.19 este prezentată o vedere generală a sistemului de susținere a captoarelor iar în figura 3.20, o vedere generală a suportului captoarelor marginale. Aspectul general al interiorului camerei de descărcare cu suportul și captoarele montate este prezentat în figura 3.23.

Schema întregului lanț de măsurare a presiunii din interiorul camerei de descărcare este redată în figura 3.21, în figura 3.24 fiind prezentată aparatura de măsurare și înregistrare pe principiul tensometriei.

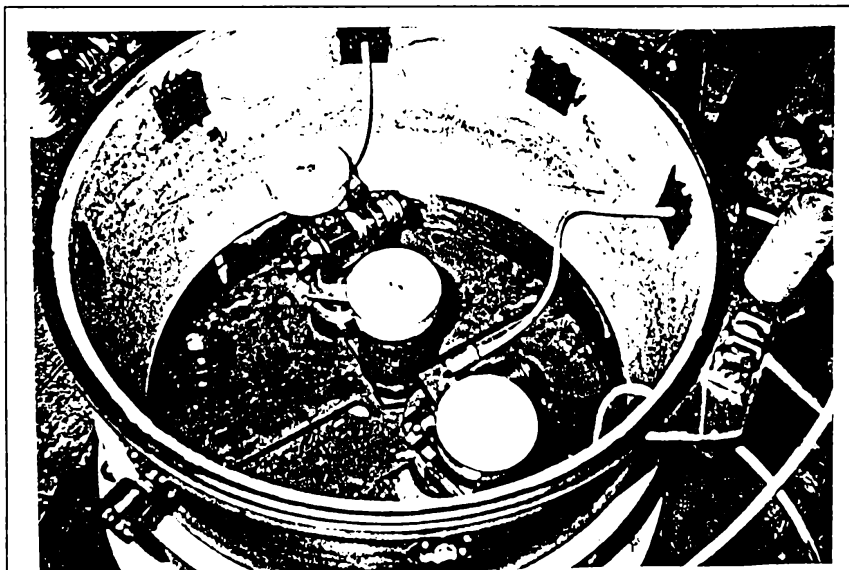


Fig.3.23. Vedere generală a interiorului camerei de descărcare, cu suportul și captoarele de presiune montate.

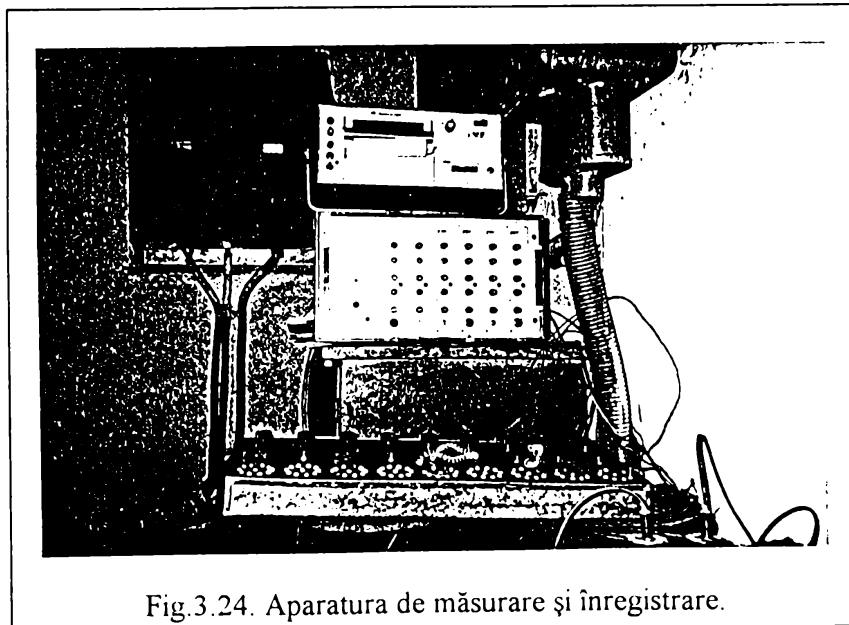


Fig.3.24. Aparatura de măsurare și înregistrare.

3.4. Pregătirea semifabricatelor

În vederea stabilirii gradelor relative de deformare și a adâncimii de ambutisare, pe suprafețele semifabricatelor plane au fost trasate în prealabil două tipuri de rețele : una circulară echidistantă cu distanța între cercurile concentrice de 5 mm și una radială cu pasul unghiular de 5°.

Aspectul general al rețelei de divizare este prezentat în figura 3.25.

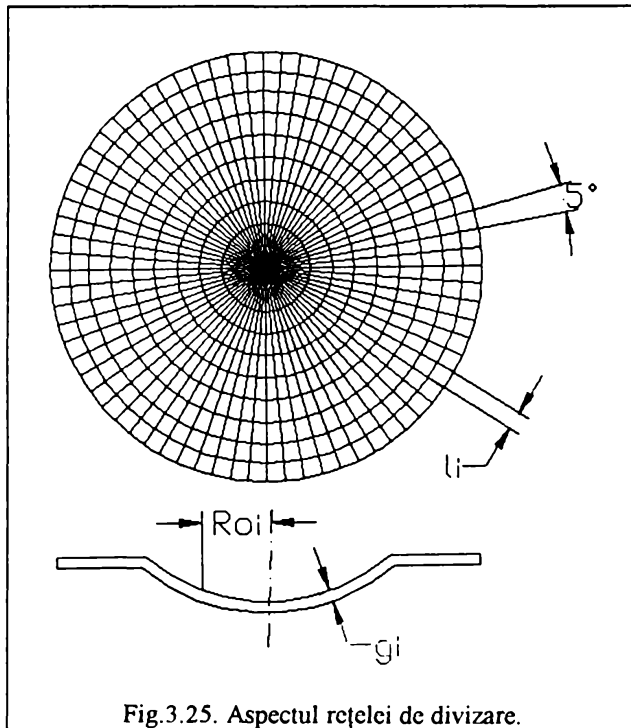


Fig.3.25. Aspectul rețelei de divizare.

Expresiile gradelor relative de deformare

sunt:

$$\mathcal{E}_\rho = \frac{R_i - R_{oi}}{R_{oi}} \cdot 100 \quad [\%]$$

$$\mathcal{E}_\theta = \frac{l_i - l_{oi}}{l_{oi}} \cdot 100 \quad [\%]$$

$$\mathcal{E}_g = \frac{g^o - g_i}{g_i} \cdot 100 \quad [\%]$$

în care \mathcal{E}_ρ - gradul relativ de deformare radială;
 \mathcal{E}_θ - gradul relativ de deformare tangențială (circumferențială); \mathcal{E}_g - subțierea relativă a materialului; R_{oi} - lungimea inițială a razei cercului considerat de pe rețeaua circulară; R_i - lungimea razei aceluiași cerc după deformare; l_{oi}

- lungimea inițială a coardei subîntinse de arc de cerc de rază R_{oi} cuprins între două linii radiale succesive; l_i - lungimea aceleiași coarde, după deformare; g_{oi} - grosimea inițială a semifabricatului în zona de rază R_{oi} ; g_i - grosimea materialului în aceeași zonă, după deformare.

CAPITOLUL 4

STUDII TEORETICE ȘI CERCETĂRI EXPERIMENTALE

4.1. Cercetări experimentale privind influența unor parametri asupra modului, gradului de deformare și adâncimii maxime de ambutisare la prelucrarea mono și multiimpuls, la descărcarea cu străpungerea directă a spațiului de lichid

4.1.1. Prelucrarea în regim monoimpuls

Pentru determinarea adâncimii maxime de ambutisare și a gradelor de deformare obținute în urma deformării prin electrohidroimpulsuri, la o singură descărcare (regim monoimpuls), a semifabricatelor plane, s-au supus experimentării semifabricate discoïdale din tablă, conform celor prezentate în tabelul 4.1. Diametrul semifabricatelor utilizate a fost de 293 mm, deformarea realizându-se în regim de flanșă mobilă.

TABEL 4.1.

Nr. crt.	Tip semifabricat	Grosimea materialului [mm]	Natura materialului	Rezistența la rupere R_m [MPa]	Limita de curgere R_c [MPa]	Alungirea minimă la rupere A [%]
1.	Tablă pentru construcții mecanice STAS 901-90	$1,25 \pm 0,14$ $1,50 \pm 0,15$	OL 37 recopt, STAS 500/2-80	330...460 ± 20	240	16
2.	Tablă neagră II U, STAS 1946-80	$1,00 \pm 0,12$	OL 34 recopt, STAS 500/2-80	290...410 ± 20	210	22
3.	Tablă pentru ambutisare A3, n-02 STAS 9485-80	$0,5 \pm 0,08$	oțel carbon cu compoziția chimică conform STAS 1988-80	270...370	240 ± 20	34
4.	Tablă zincată I, STAS 2028-80	$0,5 \pm 0,07$ $0,75 \pm 0,09$	OL 34 recopt, STAS 500/2-80	290...410 ± 20	210	22

Ungerea semifabricatului s-a făcut atât pe partea dinspre matriță, cât și pe partea dinspre inelul de reținere, doar pe zona de contact, folosindu-se unsoare de consistență 5 (tare), de tipul

U 75 Ca 2, STAS 562-86. S-a dovedit că, datorită gradului mare de consistență, se poate asigura astfel și etanșeitatea sistemului inel de reținere-semifabricat-matriță. Forța de strângere pe șurub la inelul de reținere, măsurată cu o cheie dinamometrică, a fost de 20 daN.

Matrița utilizată, din OLC 60, a avut cavitatea semisferică cu diametrul de 200 mm, raza de racordare la intrare fiind de 3 mm.

Parametrii a căror influență este studiată au fost selectați în funcție de importanța lor în modul de desfășurare a procesului și în funcție de posibilitățile de reglare pe care le prezintă utilajele de folosință industrială. Astfel, se urmărește influența asupra adâncimii maxime de ambutisare și asupra gradelor relative de deformare, a tensiunii de încărcare a bateriei de condensatoare, a distanței dintre axa descărcării și semifabricat, a distanței dintre electrozi, precum și a grosimii și a proprietăților fizico-mecanice ale materialului semifabricatului, toate în contextul tensiunilor foarte înalte de descărcare.

Influența unui parametru se determină în mod univoc, prin varierea acestuia, în timp ce ceilalți parametri se păstrează constanți.

Modul de măsurare a adâncimii de ambutisare și de stabilire a profilului piesei după o deformare monoimpuls este prezentat în figura 4.1, unde s_i este adâncimea de ambutisare corespunzătoare razei R_{oi} de pe semifabricatul plan, iar s_{max} reprezintă adâncimea maximă de ambutisare, măsurată în centrul piesei. Câteva din valorile și profilele obținute în diferite condiții de

experimentare sunt prezentate în fișele de rezultate din Anexa 1. În figura 4.2 sunt prezentate, comparativ, câteva profile obținute în diferite condiții de experimentare.

Din studiul profilelor obținute se observă, existența, la fundul piesei ambutisate, a unei zone aproape aplatizată, cu un diametru variabil D_1 și o rază de curbură foarte mare, deasemenea variabilă. În cazul tablelor subțiri, de 0,7 și 0,5 mm, această zonă este

vizibilă cu ochiul liber, la tablele groase fiind sesizabilă doar prin existența unei zone de salt a adâncimii de ambutisare s , salt către o a doua zonă, cu o variație aproape liniară a valorii lui s (fig.4.3). Valoarea diametrului D_1 scade odată cu creșterea adâncimii de ambutisare s_{max} (fig.4.4).

În aceste condiții, fenomenul poate fi asemănat cu cel produs prin aplicarea unui impuls de presiune uniform distribuită (sau cu rază de curbură foarte mare a frontului unde de șoc), pe o zonă circulară de diametru $D_2 > D_1$ (fig.4.5). Astfel, unda de șoc lovește semifabricatul plan în poziția 1, ducându-l în poziția 2, acest parcurs fiind caracterizat printr-o tendință redusă de formare a cutelor

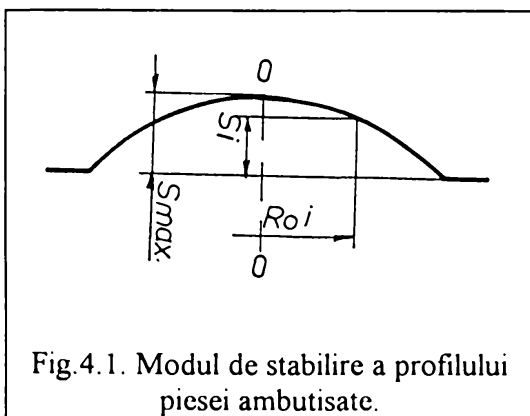


Fig.4.1. Modul de stabilire a profilului piesei ambutisate.

(localizată în porțiunea de sub inelul de reținere). Începând din poziția 2, datorită creșterii adâncimii de ambutisare, contracția transversală crește, tendința de formare a cutelor este tot mai accentuată, semifabricatul fiind frânat puternic datorită frecărilor cu inelul de reținere și cu matrița. Zona de formare a cutelor se extinde spre centrul semifabricatului, zona centrală începând să se aplatizeze datorită a două tendințe contrare: cea de frânare datorată apariției cutelor și cea de deplasare datorată existenței în continuare a unei presiuni cu $p > p_{nec}$ în zona centrală. În final, semifabricatul se oprește în poziția 3, ușoara curbură a zonei de diametru D_1 datorându-se diferenței de presiune ca urmare a unghiului de incidență diferit a frontului undei de șoc odată cu creșterea lui D_1 .

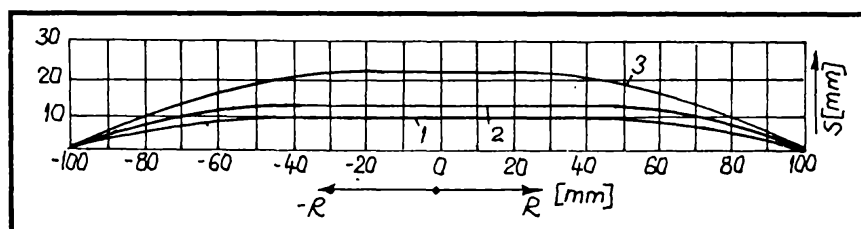


Fig.4.2. Câteva profile obținute la ambutisarea în regim monoimpuls.

- 1 - $U_0 = 26.824$ V; $l = 50$ mm; $h = 40$ mm; OL 37 g = 1,5 mm; $S_{max} = 9,7$ mm
- 2 - $U_0 = 30.036$ V; $l = 50$ mm; $h = 60$ mm; OL 37 g = 1,5 mm; $S_{max} = 13,2$ mm
- 3 - $U_0 = 26.824$ V; $l = 60$ mm; $h = 60$ mm; A 3 g = 0,5 mm; $S_{max} = 22,5$ mm.

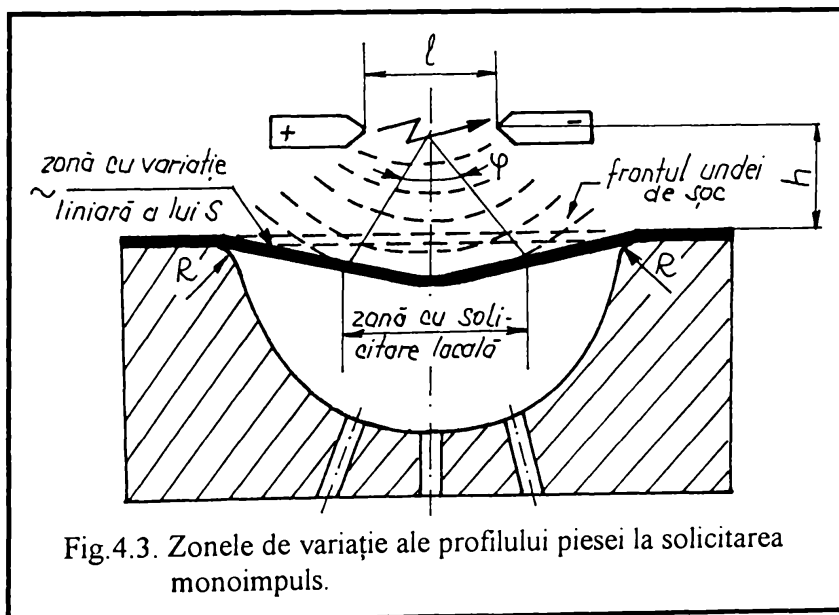


Fig.4.3. Zonele de variație ale profilului piesei la solicitarea monoimpuls.

Valoarea diametrului D_2 , corespunzătoare unui unghi la centru φ_2 , depinde de presiunea inițială de lovire care, la rândul ei, variază în funcție de valorile parametrilor ce caracterizează circuitul electric de descărcare, spațiul de descărcare și mediul de propagare al undei de șoc, precum și de grosimea semifabricatului.

Corespunzător celor prezentate mai sus și în urma măsurătorilor efectuate s-a stabilit schema generală de deformare și diagramele de variație ale gradelor de deformare (radial ϵ_p , tangențial ϵ_θ și

axial ϵ_g) la solicitarea monoimpuls a semifabricatelor plane de tablă, aceasta fiind prezentată în figura 4.6.

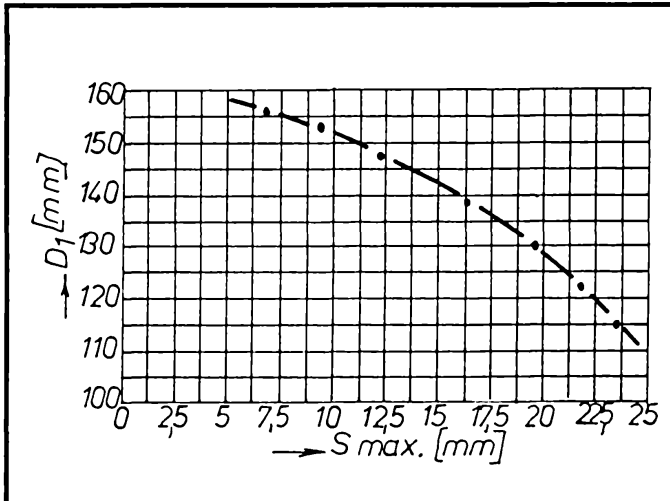


Fig.4.4. Variația diametrului porțiunii aplatizate D_1 în funcție de adâncimea maximă de ambutisare s_{max} . Material: Tablă zincată $g = 0,5$ mm; $l = 60$ mm; $h = 60$ mm. Rezultate obținute prin modificarea tensiunii.

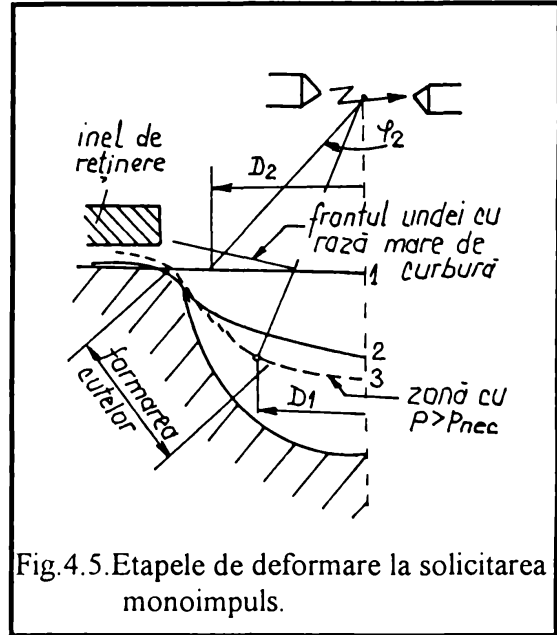


Fig.4.5. Etapele de deformare la solicitarea monoimpuls.

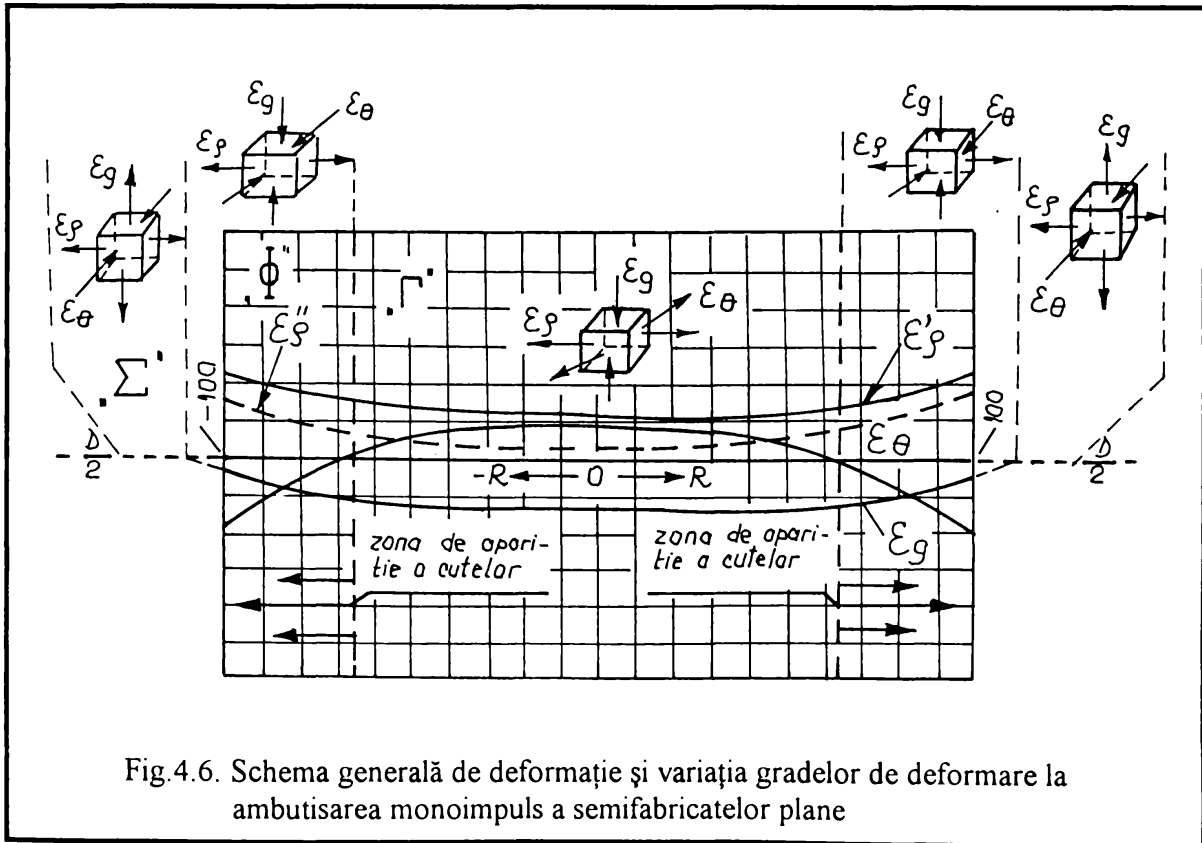


Fig.4.6. Schema generală de deformare și variația gradelor de deformare la ambutisarea monoimpuls a semifabricatelor plane

Se conturează astfel 3 zone principale pe piesa ambutisată: zona "Γ", cu un diametru variabil D_1 , având caracteristicile unei zone cu solicitare de întindere biaxială locală și subțiere puternică, cu rază de curbura mare, în unele cazuri aproape aplatizată; zona "Φ", caracterizată de existența cutelor

(contracție transversală) și de o variație aproape liniară a adâncimii de ambutisare s (tendința de cutare se reduce odată cu creșterea raportului g/D); zona "Σ", cu contracție transversală accentuată și tendință de îngroșare a materialului. Curbele ϵ''_p și ϵ'_p reprezintă pozițiile posibile ale lui ϵ_p față de solicitarea transversală ϵ_0 .

După cum s-a amintit anterior, tendința de cutare se reduce odată cu creșterea raportului g/D . Astfel, pentru $g/D \cdot 100 \geq 0,5$, tendința de cutare se manifestă doar spre exteriorul porțiunii de flanșă a

semifabricatului, datorită rigidității mai mari a acestuia. Acest fapt duce la o aplatizare a curbelor de variație ale lui ϵ_p , ϵ_0 și ϵ_g și, implicit, la valori mici ale contracției transversale.

Pentru exemplificarea celor de mai sus, în figura 4.7. sunt trasate diagramele de variație ale gradelor de deformare pentru trei tipuri de materiale.

În ceea ce privește influența diferiților factori asupra valorii lui s_{max} (influență exercitată, evident, prin intermediul presiunii), s-a urmărit dacă legăturile existenței unor valori optime se păstrează și în domeniul de tensiuni $20 \div 40 \text{ kV}$ și care sunt corelațiile dintre acestea. Câteva dintre dependențele lui s_{max} (funcția obiectiv) în raport cu diferiții parametri studiați (variabile de decizie), sunt prezentate în figurile 4.8., 4.9., 4.10., 4.11., 4.12., 4.13. și 4.14 (h- distanța dintre axa descărcării și semifabricat; l - distanța dintre electrozi; U_0 - tensiunea de

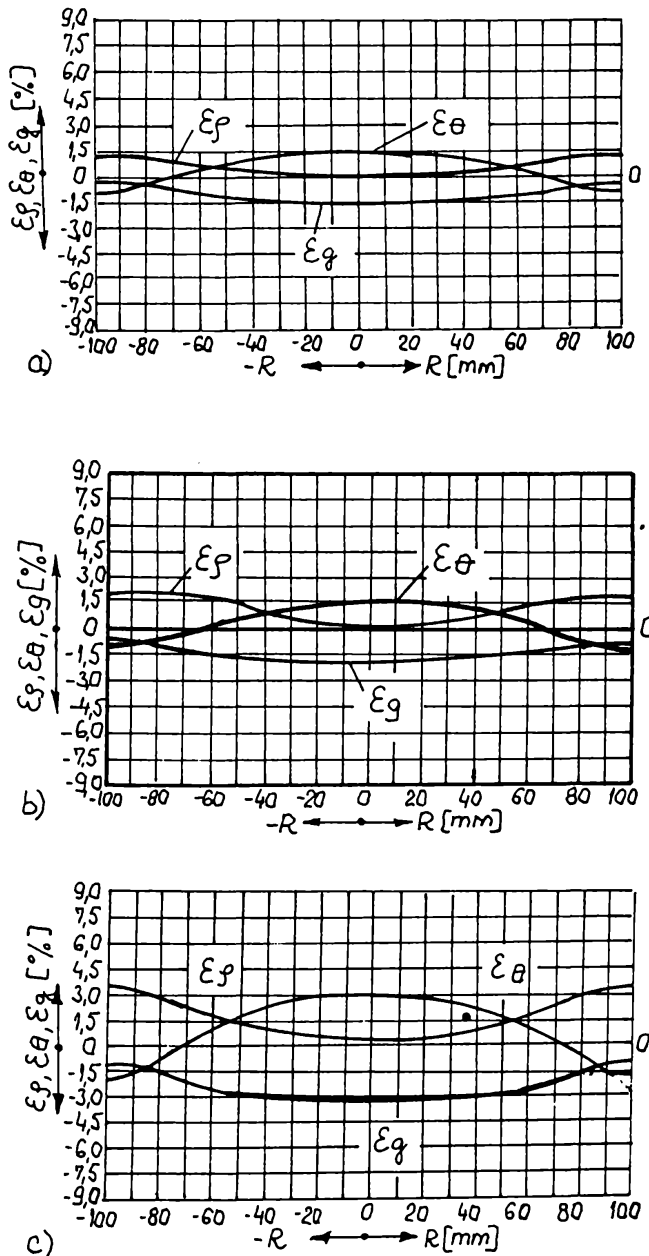
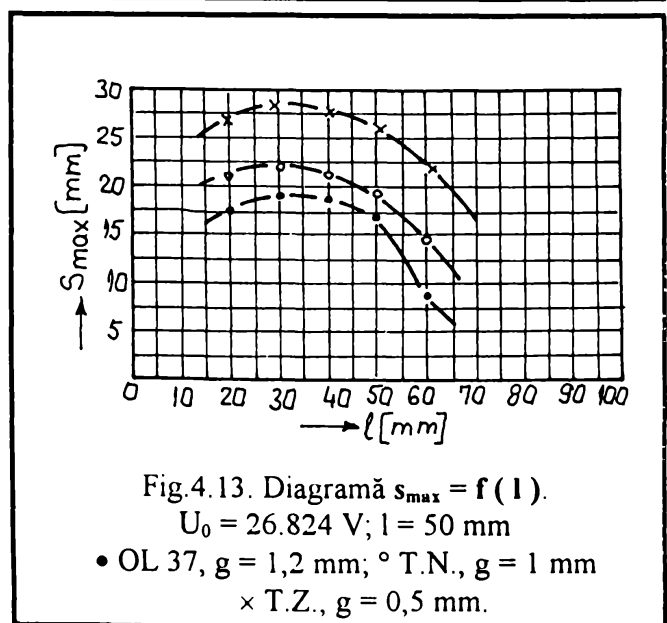
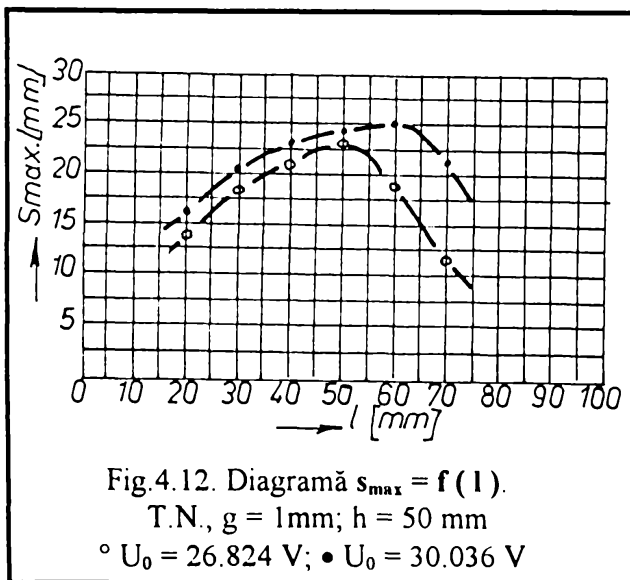
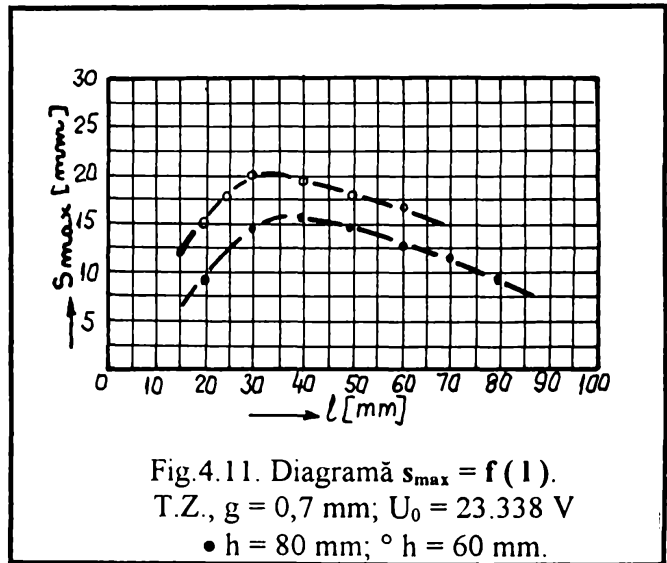
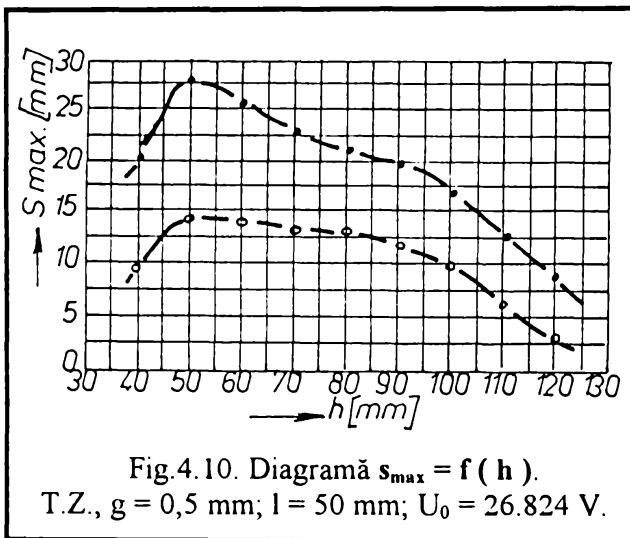
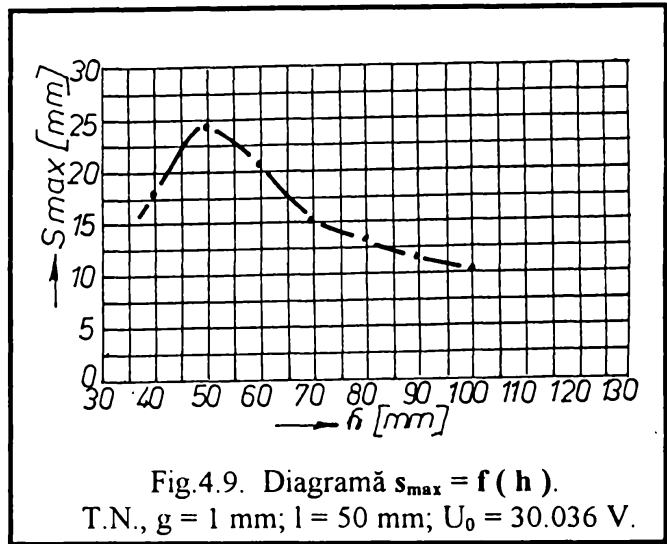
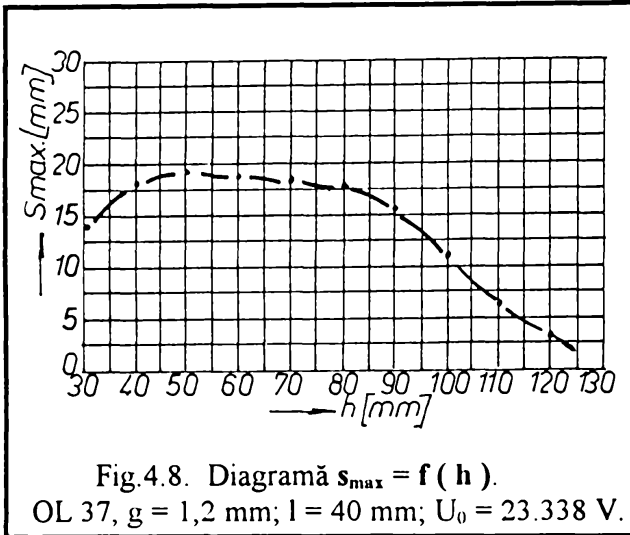
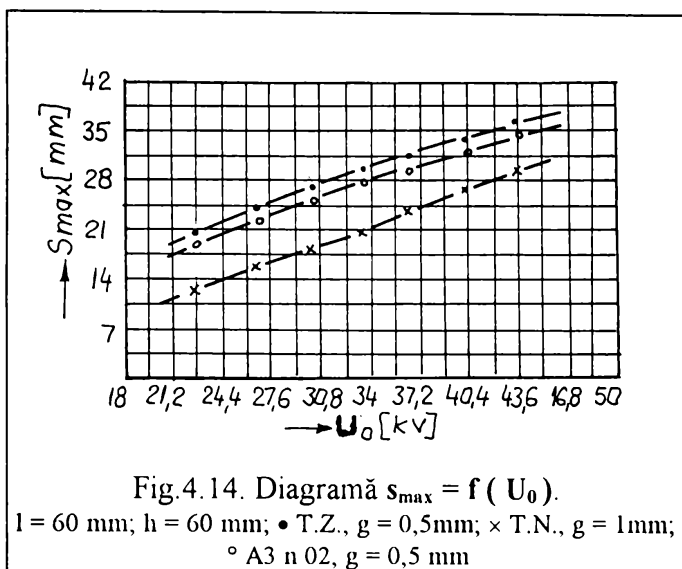


Fig.4.7. Diagrame de variație a gradelor de deformare.

a- OL 37, $g = 1,5 \text{ mm}$, $s_{max} = 13,8 \text{ mm}$; b - tablă neagră, $g = 1 \text{ mm}$, $s_{max} = 24,1 \text{ mm}$; c - tablă zincată, $g = 0,5 \text{ mm}$, $s_{max} = 26,6 \text{ mm}$.



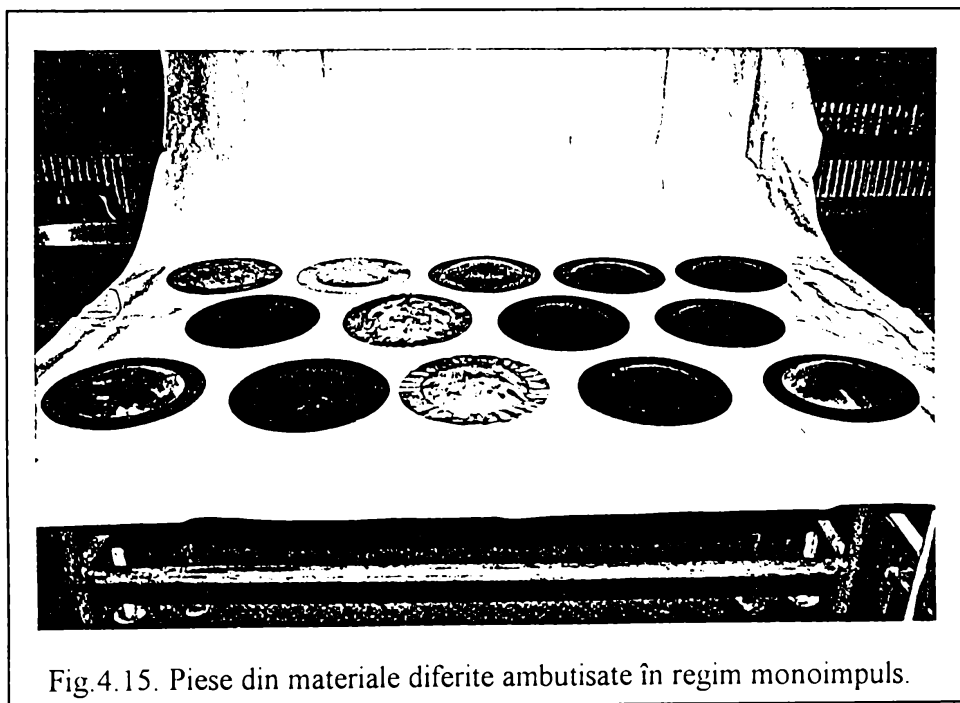


descărcare prin eclator a bateriei de condensatoare).

Se observă că, și pentru domeniul de tensiuni considerat, se pot stabili anumite condiții de optim, în scopul măririi adâncimii de ambutisare la prelucrarea monoimpuls (bineînțeles, un maxim al adâncimii de ambutisare presupune și existența unui maximal presiunii exercitate pe suprafața semifabricatului).

Astfel, funcție de tensiunea de descărcare a bateriei de condensatoare, se pot determina anumite distanțe optime între electrozi, la care presiunea obținută într-un punct oarecare din interiorul lichidului are valoare maximă. În plus însă, la fiecare pereche tensiune - distanță între electrozi există și o valoare optimă a distanței dintre axa descărcării și semifabricat (h_{opt}). Rezultă astfel că, pentru a obține o adâncime maximă de ambutisare la solicitarea monoimpuls, este nevoie de respectarea unei triplete optime de valori tensiune - distanță între electrozi - distanță axă-semifabricat, în condițiile în care capacitatea bateriei de condensatoare rămâne constantă.

În tabelul 4.2. sunt prezentate intervalele optime de valori la care adâncimea de ambutisare la solicitarea monoimpuls are valoare maximă, iar în figura 4.15. sunt prezentate câteva piese ambutisate în regim monoimpuls.

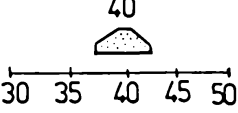
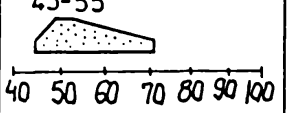
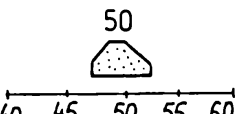
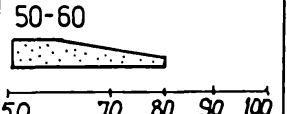
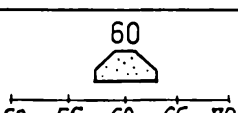
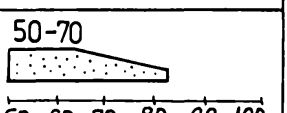
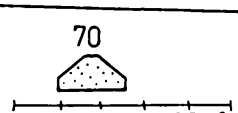
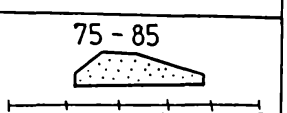
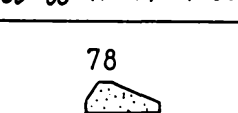
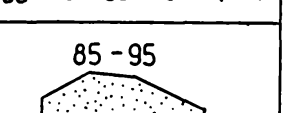
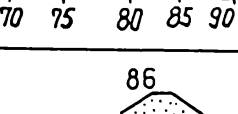
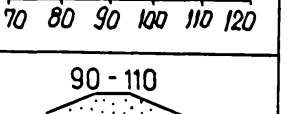


4.1.2. Prelucrarea în regim multiimpuls

În cazul necesității obținerii de piese cu adâncimi mari de ambutisare, prelucrarea într-un singur impuls este, evident, insuficientă. Se recurge astfel la ambutisarea multiimpuls, în regim lovitură cu lovitură sau regim automat (tren de impulsuri).

Este de așteptat ca, datorită tendinței de formare a cutelor și a ecrusării materialului, precum și datorită creșterii distanței dintre axa descărcării și semifabricat, deformarea acestuia din urmă să se producă mult mai greu decât la impulsul primar.

TABELUL 4.2.

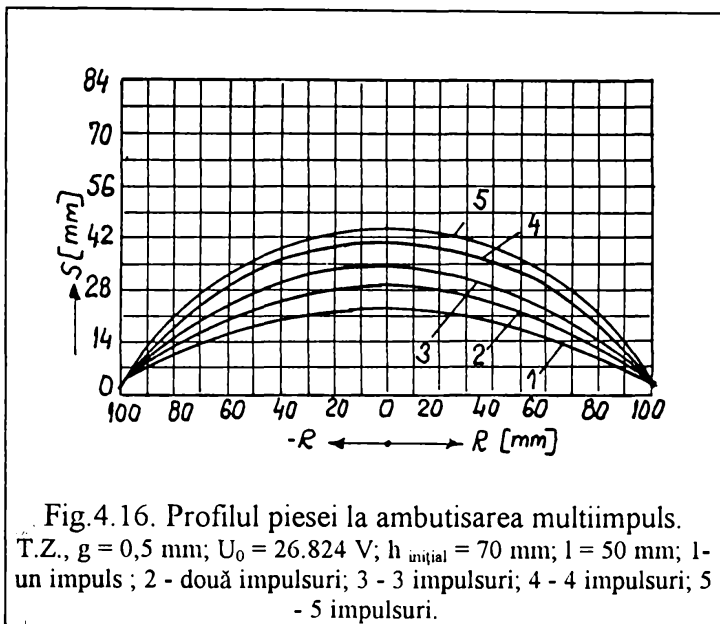
Tensiunea [V]	Distanța dintre electrozi [mm]	Distanța axă semifabricat [mm]
23.300	40 	45-55 
26.800	50 	50-60 
30.000	60 	50-70 
33.200	70 	75 - 85 
36.400	78 	85 - 95 
39.600	86 	90 - 110 

Într-adevăr, experimentele au confirmat acest lucru și, în plus, au demonstrat faptul că, dacă nu se recurge la reglaje suplimentare asupra parametrilor ce influențează presiunea pe semifabricat, la un moment dat continuarea ambutisării devine imposibilă. Pe de altă parte însă, la grade mari de deformare, eliberarea unei energii prea mari duce la ruperea fundului piesei ambutisate, ca urmare a subțierii excesive a acestuia.

Pentru a sugera schimbările ce intervin la profilul piesei ambutisate în regim multiimpuls, se ia exemplul din figura 4.16. Urmărind evoluția profilului, în cazul în care nu se fac nici un fel de modificări ale parametrilor inițiali, se constată creșterea curburii fundului

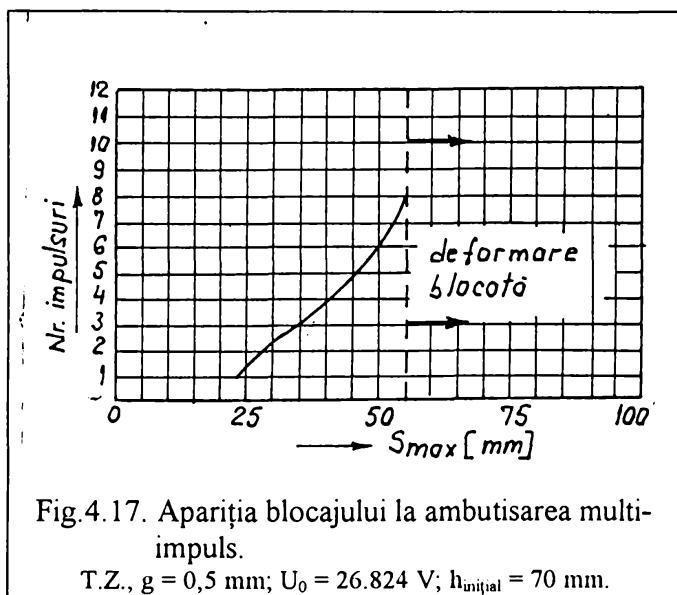
piesei ambutisate (zona "Γ") ca urmare a micșorării valorii diametrului util D_2 pe care acționează presiunea $p \geq p_{nec}$. Micșorarea acestui diametru are o cauză principală în mărirea distanței dintre axa descărcării și semifabricat dar și în creșterea rezistenței la deformare a semifabricatului ca urmare a creșterii tendinței de cutare și, implicit, a creșterii forțelor de frecare.

Deasemenea, datorită aceluiași fenomen, se remarcă o liniarizare și mai puternică a zonei “Φ” de trecere dintre fundul piesei și porțiunea de flanșă. (curbele 1, 2, 3, fig.4.16.).



La deformarea în continuare a semifabricatului, prin mărirea numărului de impulsuri aplicate, poate apare blocarea procesului de ambutisare datorită scăderii presiunii pe semifabricat sub cea necesară (fig.4.17).

Singurul remediu în cazul apariției blocajului îl constituie creșterea presiunii pe semifabricat, fie prin creșterea tensiunii, fie prin coborârea axei descărcării în cavitatea piesei ambutisate.



De remarcat faptul că accentuarea curburii fundului și a aplatizării zonei de trecere este mult mai pregnantă la materialele subțiri, datorită rigidității mai mici a acestora sau la materialele cu limită de curgere mai scăzută.

La aplicarea următoarelor impulsuri, lucrurile se schimbă radical, tendințele zonelor amintite fiind exact inverse (curbele 4 și 5, fig.4.16). Adică, zona “Γ” își mărește din nou raza de curbură, iar zona “Φ” își mărește curbura, ca urmare a captării unei

presiuni utile $p \geq p_{nec}$ pe o suprafață mai mare. Întrucât gradientul de scădere a razei de curbură pe zona “Φ” este mai mare decât gradientul de creștere a razei de curbură pe zona “Γ”, piesa va tinde din ce în ce mai mult la o formă emisferică. Mărirea suprafeței de captare a presiunii utile se datorează tocmai înclinării zonei respective, ceea ce duce la modificarea unghiului de incidență a frontului undei de șoc pe semifabricat (tendință spre o incidență normală).

Dacă, la un moment dat, se coboară axa descărcării în cavitatea semifabricatului, modul de deformare se schimbă din nou. Intervine din nou o micșorare a razei de curbură pe zona “Γ” și o mărire a acesteia pe zona “Φ”. La continuarea aplicării impulsurilor, tendințele razelor de curbură se

schimbă iarăși, în mod asemănător unui proces ciclic.

Aspectul general al unei piese semisferice, în diferite etape de ambutisare, prelucrată în regim multiimpuls, este prezentat în figura 4.18, iar în figura 4.19. sunt prezentate piese cu adâncimi mari

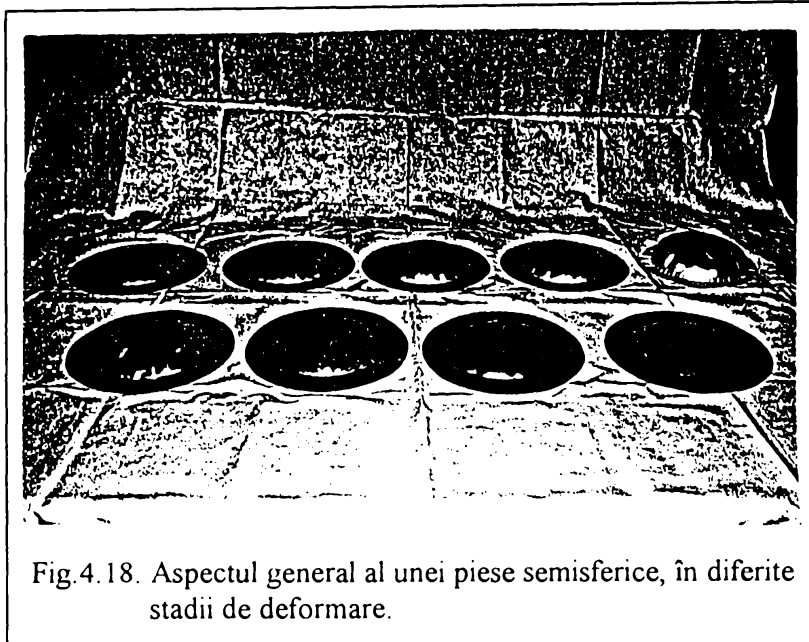


Fig.4.18. Aspectul general al unei piese semisferice, în diferite stadii de deformare.

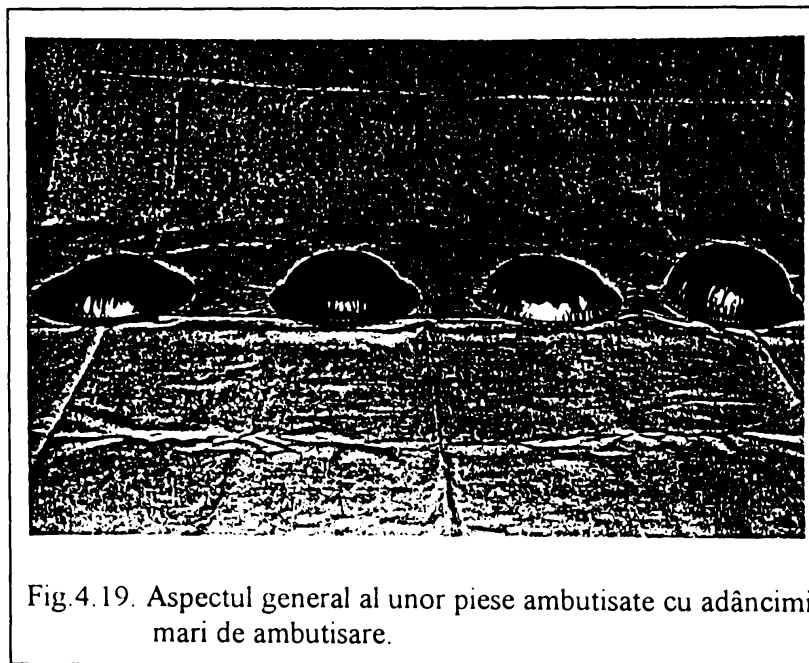
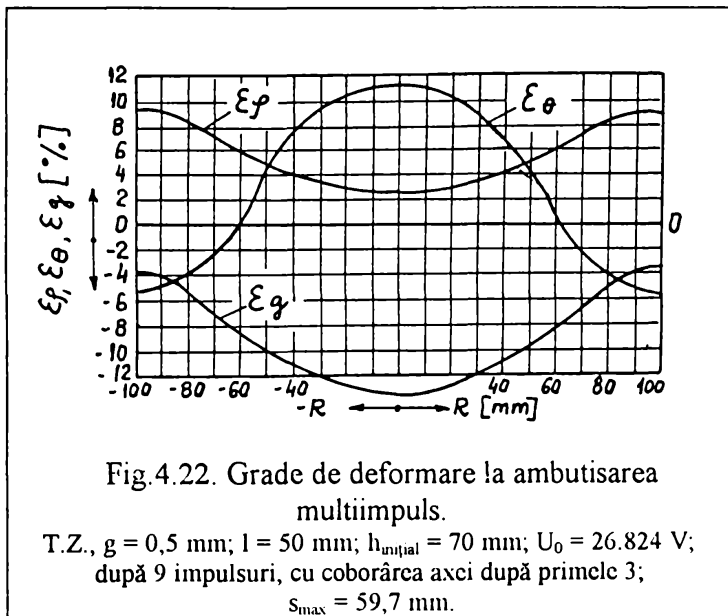
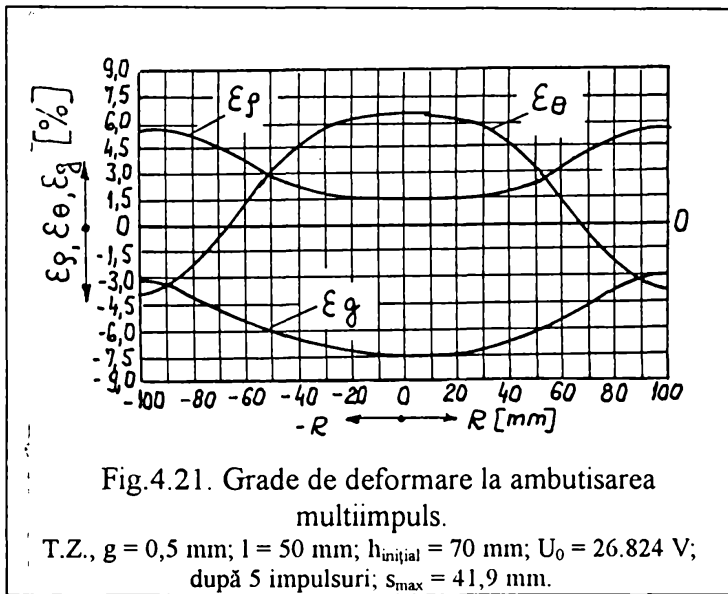
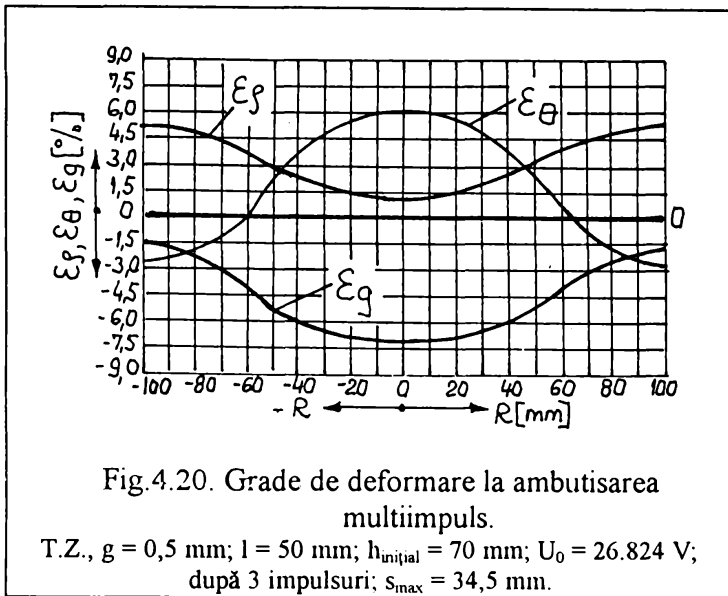


Fig.4.19. Aspectul general al unor piese ambutisate cu adâncimi mari de ambutisare.

de ambutisare, realizate în regim multiimpuls.

În ceea ce privește variația gradelor de deformare, aceasta este sugerată prin diagramele din figurile 4.20, 4.21 și 4.22. Se constată că, la aplicarea impulsurilor succesive, zona "Γ" își mărește diametrul, iar valorile extremelor de contracție și întindere transversală cresc.

Această mărire a zonei "Γ", cumulată cu majorarea valorilor absolute ale lui ϵ_0 , conduce la următorul fenomen: porțiunea inferioară a cutelor formate pe zona "Φ" la impulsul primar începe să



se îndrepte, pe când restul domeniului suferă o contracție transversală și mai puternică, ca urmare a pătrunderii semifabricatului în cavitatea matriței, deci a creșterii adâncimii maxime de ambutisare. Astfel, în timp ce porțiunea inferioară a cutei, dinspre fundul piesei, tinde să se îndrepte, înălțimea restului cutei se accentuează cu fiecare impuls primit.

În momentul în care apare lipirea fermă a semifabricatului de cavitatea matriței (începând cu zona superioară a matriței, de la raza de racordare) și pe măsură ce acest domeniu de copiere a formei se mărește, poate interveni o atenuare a cutei și în zona ei superioară, dinspre raza de racordare. Oricum, aceste gradiente de atenuare ale cutelor sunt mult mai mici decât gradientul de creștere a cutelor respective.

Din cele prezentate mai sus se poate trage concluzia că modul de deformare la impulsul primar este hotărâtor în ceea ce privește deformarea ulterioară a semifabricatului, în regimul multiimpuls. O deformare primară corectă, fără cute, întârzie amorsarea acestora până la grade relativ mari de deformare. Dacă la semifabricate cu $g/D \cdot 100 > 0,5$ este mai ușor de obținut o formă primară fără cute (D - diametrul matriței), la scăderea raportului este nevoie de măsuri suplimentare pentru

realizarea acestui deziderat. Astfel, pentru $0,35 \leq g/D \cdot 100 < 0,5$, adoptarea unei raze mici de racordare la matriță ($r = 1,5 \div 2g$) și asigurarea unei rețineri ferme a flanșei semifabricatului pot constitui măsuri eficiente pentru reducerea tendinței de cutare. La rapoarte $g/D \cdot 100 < 0,35$ însă, măsurile amintite nu mai sunt suficiente, fiind necesară utilizarea unor matrițe cu praguri de frânare (cea ce duce la o mărire a tensiunilor radiale).

La prelucrarea multiimpuls, apariția cutelor nu poate fi deplin înlăturată. Din acest motiv se va prevedea un adaos tehnologic pentru tundere, cu o înălțime ce poate atinge 15...20 % din înălțimea piesei ambutisate. În figura 4.23 este prezentată o piesă semisferică complet formată, putându-se observa clar zona de formare a cutelor.

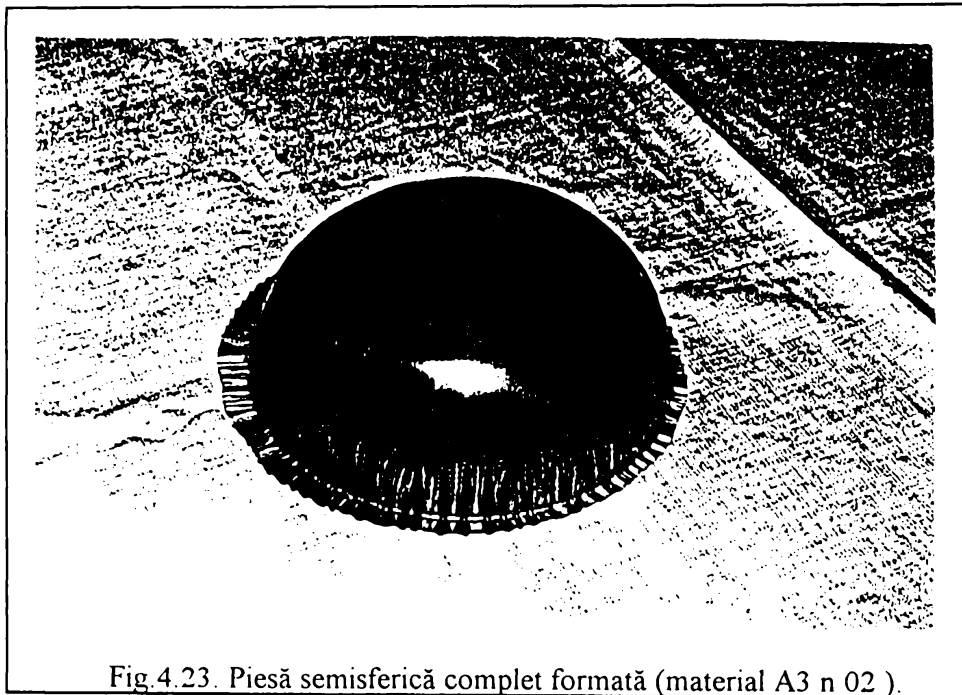


Fig.4.23. Piesă semisferică complet formată (material A3 n 02).

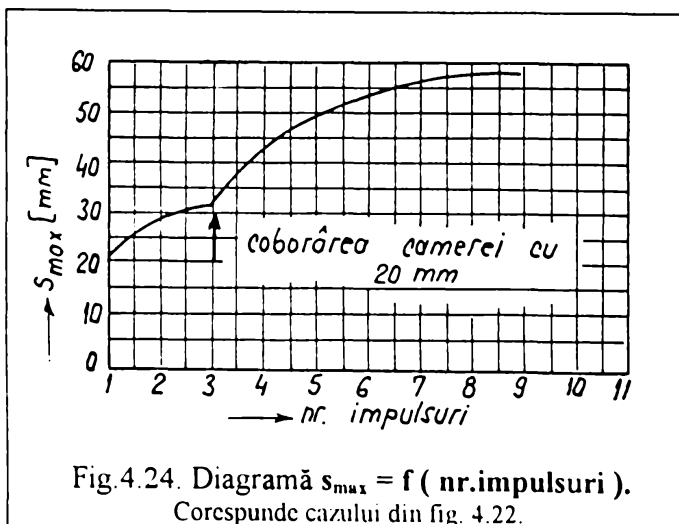


Fig.4.24. Diagramă $s_{max} = f$ (nr.impulsuri).
Corespunde cazului din fig. 4.22.

Pentru sugerarea numărului de impulsuri necesar obținerii unei anumite valori a adâncimii s_{max} , sunt prezentate diagramele din figurile 4.24 și 4.25.

În fig.4.24 a fost marcat și momentul coborârii axei descărcării, iar în fig.4.25 a fost trasat și graficul de variație a distanței dintre axa descărcării și semifabricat $h = f$ (nr. impulsuri). Saltul lui h de pe această diagramă corespunde ridicării axei descărcării după al 4 - lea impuls și recoborării ei după al 5 - lea impuls, cu aceeași valoare, adică 20 mm. Valoarea constantă a

lui h dintre impulsurile 1 și 2 se datorează coborârii axei descărcării, după primul impuls, cu o valoare egală cu s_{max} obținut după impulsul primar. Diagrama din figura 4.26 prezintă comparativ cazul ambutisării cu și fără coborârea axei descărcării.

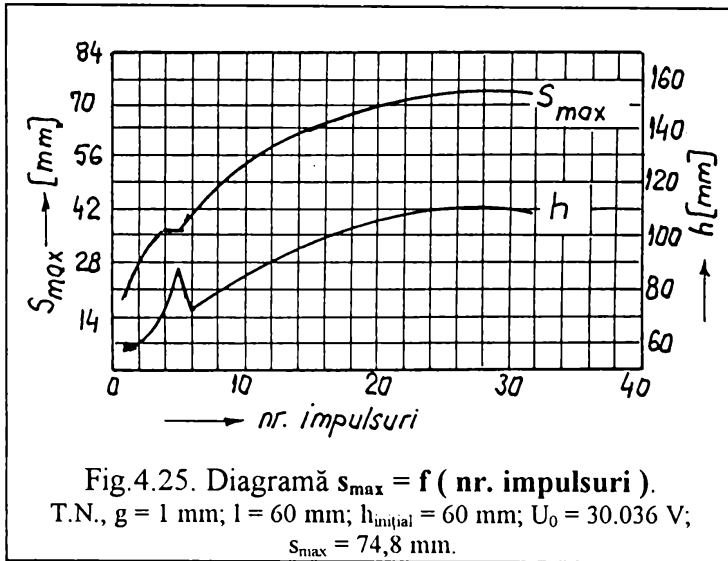


Fig. 4.25. Diagramă $s_{max} = f (nr. impulsuri)$.
T.N., $g = 1 \text{ mm}$; $l = 60 \text{ mm}$; $h_{inițial} = 60 \text{ mm}$; $U_0 = 30.036 \text{ V}$;
 $s_{max} = 74,8 \text{ mm}$.

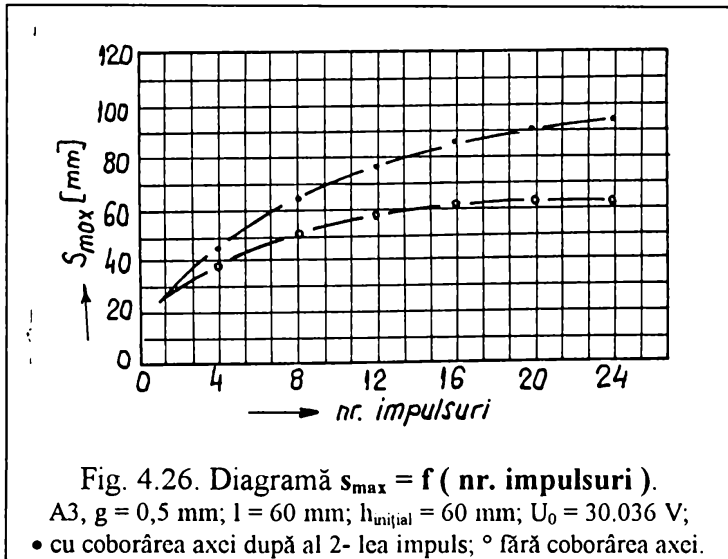


Fig. 4.26. Diagramă $s_{max} = f (nr. impulsuri)$.
A3, $g = 0,5 \text{ mm}$; $l = 60 \text{ mm}$; $h_{inițial} = 60 \text{ mm}$; $U_0 = 30.036 \text{ V}$;
• cu coborârea axei după al 2-lea impuls; ° fără coborârea axei.

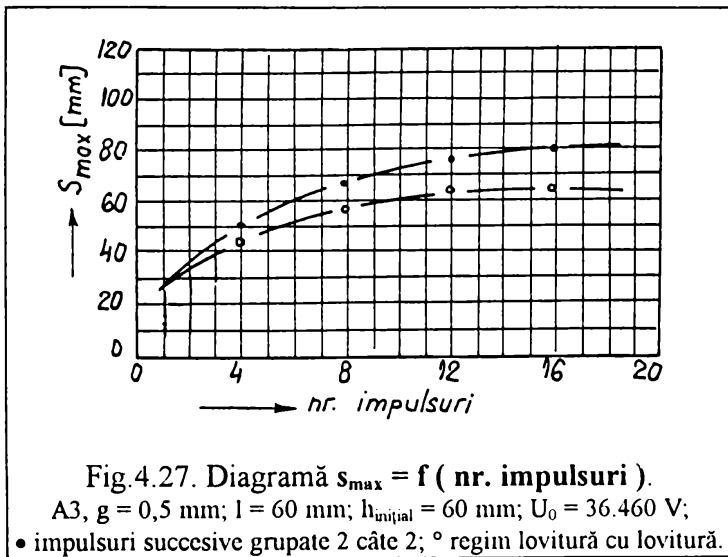


Fig. 4.27. Diagramă $s_{max} = f (nr. impulsuri)$.
A3, $g = 0,5 \text{ mm}$; $l = 60 \text{ mm}$; $h_{inițial} = 60 \text{ mm}$; $U_0 = 36.460 \text{ V}$;
• impulsuri succesive grupate 2 câte 2; ° regim lovitură cu lovitură.

Referitor la cele două regimuri posibile de lucru, automat și, respectiv, lovitură cu lovitură, este de amintit faptul că lucrul în regim automat, cu timpi mici între descărcări, poate avea ca efect creșterea adâncimii de ambutisare s_{max} cu până la 25 %. Pentru comparație este prezentată diagrama din figura 4.27.

În concluzie, în urma experimentelor și analizelor efectuate se poate afirma că starea de deformare la ambutisarea prin electrohidroimpulsuri este neuniformă și neomogenă, schema de deformării modificându-se aproape la fiecare impuls. Zona cea mai solicitată este porțiunea centrală a semifabricatului, aici apărând primele amorse de rupere.

Deasemenea, modificarea parametrilor procesului în timpul desfășurării acestuia, în scopul măririi presiunii utile captate de semifabricat, duce la o reluare ciclică a mecanismului de deformare.

4.2. Studii teoretice și cercetări experimentale privind determinarea presiunii în camera de descărcare

4.2.1. Studii teoretice și cercetări experimentale privind parametrii electrici ai circuitului de descărcare

Problema oricărui studiu experimental constă în stabilirea unor legături obiective care să stea la baza determinării ulterioare a dependențelor ce conduc procesele în studiu. În aceeași ordine de idei, pentru utilizare pe scară industrială, aceste dependențe trebuie supuse în continuare unor studii de optimizare în vederea găsirii regimului rațional de lucru al instalației tehnologice concrete.

La elaborarea instalațiilor de deformare plastică prin electrohidroimpulsuri, precum și la elaborarea regimului tehnologic optim caracteristic unei anumite operații, respectiv piesă de deformat, este necesară într-o primă fază, cunoașterea mărimii forței (presiunii) ce acționează asupra materialului de prelucrat și echipamentului tehnologic, în funcție de parametrii electrici ai circuitului de descărcare. Totodată, este necesară alegerea acelei combinații de parametri ai circuitului de descărcare care să permită obținerea efectului tehnologic maxim.

Legăturile dintre rezistența spațiului de descărcare și curentul de descărcare, dintre curentul de descărcare și parametrii inițiali ai circuitului de descărcare, prezentate în primul capitol, oferă posibilitatea determinării legii de degajare a energiei în canal și deci, a principalelor caracteristici hidrodinamice ale descărcării electrice în apă.

Pentru calcule practice însă, această soluție este prea voluminoasă și complexă. Din acest motiv, prezintă un interes deosebit obținerea unor expresii aproximative de calcul a presiunii, care să permită ulterior alegerea combinației optime de parametri electrici (pornind, bineînțeles, și de la presiunea necesară deformării), precum și calculul de rezistență al echipamentului.

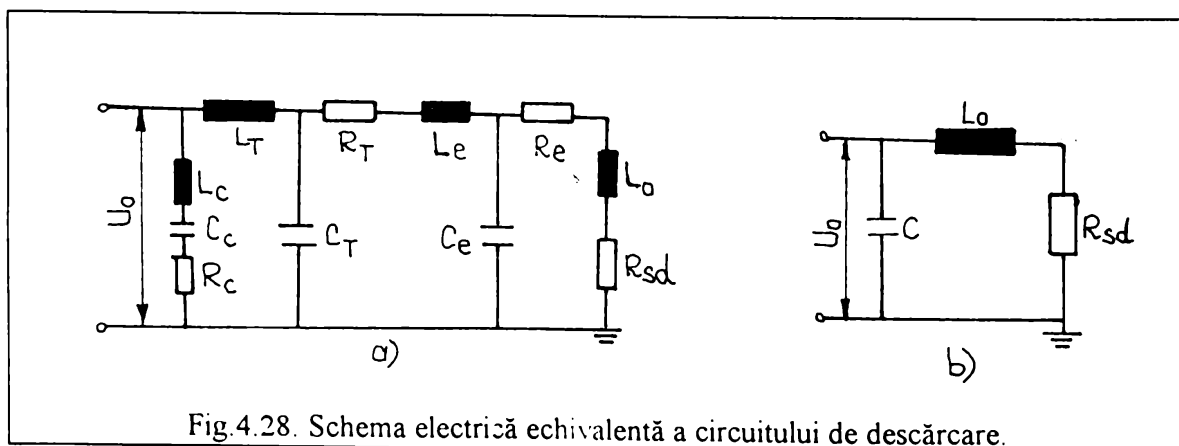


Fig.4.28. Schema electrică echivalentă a circuitului de descărcare.

Expunerea care urmează se bazează pe un studiu simplificat al proceselor care au loc în circuitul de descărcare, pe perioada descărcării, studiul fiind efectuat pe circuitul echivalent din figura 4.28.a. În parametrii circuitului de descărcare intră: valorile echivalente ale capacității C_c , inductanței

L_c și rezistenței active R_c ale bateriei de condensatoare, ale liniilor de transmitere a energiei (C_T , L_T , R_T), ale eclatorului (C_e , L_e , R_e), precum și ale inductanței L_o și rezistenței active R_{sd} a sarcinii.

Deoarece în generatoarele instalațiilor electrohidraulice industriale capacitatea bateriei de condensatoare depășește capacitățile celorlalte elemente ale schemei, acestea din urmă pot fi neglijate.

Rezistențele active ale elementelor circuitului de descărcare, în comparație cu rezistența activă a sarcinii (cu excepția descărcărilor cu distanțe mici între electrozi), sunt foarte mici și ele pot fi, la rândul lor, neglijate. Valoarea însumată a inductanțelor tuturor elementelor circuitului de descărcare se modifică nesemnificativ la schimbarea inductanței canalului de descărcare. Astfel, pe baza celor enunțate mai sus, schema echivalentă a circuitului se simplifică substanțial (fig.4.28.b).

Regimul de lucru al descărcării poate fi descris de ecuația:

$$U_0 = L_0 \frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt + U_{\pi} \quad (4.1)$$

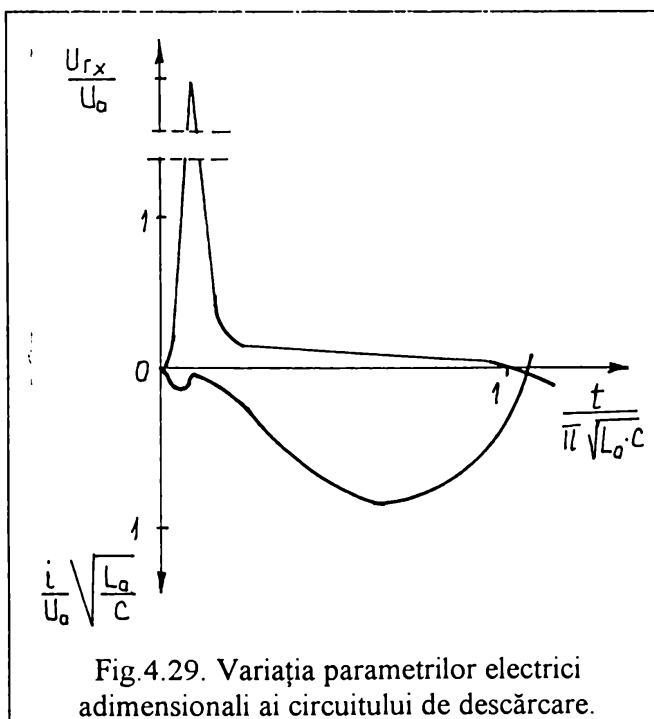


Fig.4.29. Variația parametrilor electrici adimensionali ai circuitului de descărcare.

în care U_{π} reprezintă tensiunea pe spațiul dintre electrozi la momentul t considerat. Prin rezolvarea ecuației de mai sus pot fi aflate principalele caracteristici electrice ale circuitului de descărcare și ale canalului descărcării, dependențele de timp ale curentului $i(t)$ și tensiunii U_{π} , ale puterii $N(t)$ și energiei $W(t)$ degajate în canalul descărcării. Schimbarea rezistenței canalului în timpul descărcării complică însă rezolvarea ecuației (4.1).

Transformarea efectivă a principalei cote de energie electrică în energie mecanică are loc în prima semiperioadă de descărcare.

Deasemenea, în acest segment de timp are loc și schimbarea esențială a rezistenței active a sarcinii.

Pentru rezolvarea ecuației (4.1) se poate folosi teoria matematică de transformare a funcțiilor, ecuația putând fi scrisă sub o formă adimensională:

$$1 = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{di(x)}{dx} + \pi \cdot \int_0^x i(x) dx + U_{\pi} \quad (4.2)$$

$$\text{în care: } x = \frac{t}{\pi \cdot \sqrt{L_0} \cdot C} \quad ; \quad i(x) = \frac{i(t) \sqrt{L_0}}{U_0 \cdot \sqrt{C}} \quad ; \quad U_{\pi} = \frac{U_{\pi}}{U_0}$$

Variația calitativă a acestor parametri în coordonate adimensionale este prezentată în figura 4.29.

Schimbarea tensiunii la sarcină poate fi descrisă, cu o precizie suficientă pentru scopuri practice, de un polinom de gradul trei de forma:

$$U_{rx} = b_0 + b_1 \cdot x + b_2 \cdot x^2 + b_3 \cdot x^3 \quad (4.3)$$

în care, pentru $x = 0$, $U_{rx} = 1$ și, evident, $b_0 = 1$.

Substituind expresia (4.3) în ecuația (4.2) și rezolvând expresia obținută cu ajutorul transformatei Laplace, se obține dependența schimbării curentului de descărcare sub forma:

$$i(x) = \frac{1}{\pi} \left[\pi^2 \cdot b_1 \cdot (\cos \pi \cdot x - 1) + 2\pi \cdot b_2 (\sin \pi \cdot x - \pi \cdot x) + 6 \cdot b_3 \left(1 - \cos \pi \cdot x - \frac{\pi^2 \cdot x^2}{2} \right) \right] \quad (4.4)$$

Coeficienții b_1 , b_2 , b_3 pot fi aflați cu ajutorul punctelor caracteristice ale curentului de descărcare:

a) la $x = x_1 \Rightarrow i(x) = 0$ - unde x_1 reprezintă durata primei semiperioade de descărcare;

b) la $x = x_m \Rightarrow i(x) = i_m$ - unde x_m timpul în care curentul de descărcare atinge valoarea maximă i_m ;

c) la $x = x_m \Rightarrow i'(x) = 0$.

Bazat pe cercetările asupra descărcărilor electrice în apă expuse în primul capitol, se poate defini caracteristica descărcării $\eta_1 = W_1 / W_0$ (raportul dintre energia degajată în prima semiperioadă W_1 și energia înmagazinată de bateria de condensatoare $W_0 = CU^2 / 2$) sub forma:

$$\eta_1 = \sqrt{\frac{A \cdot \pi \cdot l_r^2}{U_0^2 \cdot \sqrt{L_0 \cdot C}}} \quad (4.5)$$

în care $A = 0,25 \cdot 10^5 \text{ V}^2 \cdot \text{s} / \text{m}^2$ reprezintă caracteristica scânteii iar l_r materializează lungimea reală a canalului de descărcare. Datorită ramificării sistemului de amorse la descărcarea cu străpungerea directă a spațiului de lichid, se poate considera, fără a introduce erori serioase, că $l_r = 2l$, unde l reprezintă distanța dintre electrozi.

În aceste condiții, valorile lui x_1 , x_m și i_m se pot determina în funcție de influența caracteristicii η_1 , sub forma unor polinoame de gradul doi:

$$x_1 = \alpha_1 + \alpha_2 \cdot \eta_1 + \alpha_3 \cdot \eta_1^2 \quad (4.6)$$

$$x_m = \beta_1 + \beta_2 \cdot \eta_1 + \beta_3 \cdot \eta_1^2 \quad (4.7)$$

$$i_m = \delta_1 + \delta_2 \cdot \eta_1 + \delta_3 \cdot \eta_1^2 \quad (4.8)$$

Valorile coeficienților din expresiile (4.6), (4.7) și (4.8) pot fi determinați pe baza datelor

experimentale.

Revenind la coeficienții b_1, b_2, b_3 , aceștia pot fi aflați prin rezolvarea sistemului de ecuații în care intră expresiile (4.6), (4.7), (4.8), aplicate punctelor caracteristice:

$$\pi^2 \cdot b_1 (1 - \cos \pi \cdot x_1) - 2\pi \cdot b_2 (\sin \pi \cdot x_1 - \pi \cdot x_1) - 6b_3 \left[(1 - \cos \pi \cdot x_1) - \frac{\pi^2 \cdot x_1^2}{2} \right] = 0 \quad (4.9)$$

$$\pi^2 \cdot b_1 (1 - \cos \pi \cdot x_m) - 2\pi \cdot b_2 (\sin \pi \cdot x_m - \pi \cdot x_m) - 6b_3 \left[(1 - \cos \pi \cdot x_m) - \frac{\pi^2 \cdot x_m^2}{2} \right] = -\pi^3 \cdot i_m \quad (4.10)$$

$$\pi^2 \cdot b_1 \cdot \sin \pi \cdot x_m + 2\pi \cdot b_2 (1 - \cos \pi \cdot x_m) - 6b_3 (\sin \pi \cdot x_m - \pi \cdot x_m) = 0 \quad (4.11)$$

Rezolvarea numerică a sistemului de ecuații de mai sus, în limitele de valori ale criteriului $\eta = 0, 2 \dots 0,9$ (η definit de relația 1.20), în funcție de η_1 , conduce la expresiile generalizate de forma:

$$b_1 = k_1 + k_2 \cdot \eta_1 + k_3 \cdot \eta_1^2 + k_4 \cdot \eta_1^3 \quad (4.12)$$

$$b_2 = m_1 + m_2 \cdot \eta_1 + m_3 \cdot \eta_1^2 + m_4 \cdot \eta_1^3 \quad (4.13)$$

$$b_3 = n_1 + n_2 \cdot \eta_1 + n_3 \cdot \eta_1^2 + n_4 \cdot \eta_1^3 \quad (4.14)$$

Această metodă de calcul a $i(t)$ nu are, din punct de vedere practic, restricții referitoare la parametrii circuitului de descărcare, însă este destul de voluminoasă. Dependența de timp a curentului de descărcare și a puterii degajate pot fi însă determinate și din analiza circuitului de descărcare ca și circuit electric liniar la care, în loc de sarcină, este conectată o sursă de forță electromotoare variabilă în timp:

$$e = -U_{dr} = U_n \cdot e^{-\delta t} \cdot \cos \omega t \quad (4.15)$$

și care este descrisă de ecuația diferențială de gradul doi:

$$L_0 C \frac{d^2 U_0}{dt^2} + RC \frac{dU_0}{dt} + U_0 - U_n \cdot e^{-\delta t} \cdot \cos \omega \cdot t \quad (4.16)$$

Din ecuația (4.16) rezultă:

$$i(t) = B \cdot \sin \omega_0 t + D \cdot \cos \omega_0 t - e^{-\delta t} \cdot (D \cdot \cos \omega_0 t - F \cdot \sin \omega t) \quad (4.17)$$

$$N(t) = U_0 \cdot e^{-\delta t} \cdot \cos \omega t \cdot [(B \cdot \sin \omega_0 t + D \cdot \cos \omega t) - e^{-\delta t} \cdot (D \cdot \cos \omega t - F \cdot \sin \omega t)] \quad (4.18)$$

în care:

$$B = U_n \cdot \left(\frac{B_2}{\omega_0 \cdot L_0} - C \cdot \omega_0 \right) ; \quad D = \frac{B_1 \cdot U_0}{L_0} ; \quad F = \frac{U_n}{\omega \cdot L_0} (B_1 \cdot \delta + B_3)$$

$$B_1 = \frac{\delta \cdot (\omega_0^2 + \omega_1^2)}{(\omega_0^2 - \omega_1^2)^2 + 4\delta^2 \omega_0^2} ; \quad B_2 = \frac{\omega_0^2 \cdot (\omega_0^2 - \omega_1^2) + 2\delta^2 \omega_0^2}{(\omega_0^2 - \omega_1^2)^2 + 4\delta^2 \omega_0^2} ; \quad B_3 = \frac{\omega_1^2 \cdot (\omega_0^2 - \omega_1^2) + 2\delta^2 \omega_0^2}{(\omega_0^2 - \omega_1^2)^2 + 4\delta^2 \omega_0^2}$$

$$\omega_1^2 = \delta^2 + \omega^2 \quad ; \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_0 \cdot C}} \quad (4.19)$$

Pentru δ și ω se poate adopta un model matematic de forma:

$$\delta = f(U_0, C, L_0, l) \quad (4.20)$$

$$\omega = f_1(U_0, C, L_0, l) \quad (4.21)$$

Pentru expresiile (4.20) și (4.21) se pot adopta funcțiile de regresie:

$$\begin{aligned} \delta = & a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_3 + a_4 X_4 + a_{12} X_1 X_2 + a_{13} X_1 X_3 + a_{14} X_1 X_4 + a_{23} X_2 X_3 + \\ & + a_{24} X_2 X_4 + a_{34} X_3 X_4 + a_{123} X_1 X_2 X_3 + a_{124} X_1 X_2 X_4 + a_{234} X_2 X_3 X_4 + a_{134} X_1 X_3 X_4 \end{aligned} \quad (4.22)$$

$$\begin{aligned} \omega = & c_0 + c_1 X_1 + c_2 X_2 + c_3 X_3 + c_4 X_4 + c_{12} X_1 X_2 + c_{13} X_1 X_3 + c_{14} X_1 X_4 + c_{23} X_2 X_3 + \\ & + c_{24} X_2 X_4 + c_{34} X_3 X_4 + c_{123} X_1 X_2 X_3 + c_{124} X_1 X_2 X_4 + c_{234} X_2 X_3 X_4 + c_{134} X_1 X_3 X_4 \end{aligned} \quad (4.23)$$

Revenind la prima metodă de calcul, cu ajutorul unui osciloscop cu memorie legat în paralel cu microampermetrul (aflat pe panoul de comandă al generatorului) de pe circuitul de descărcare, s-a determinat variația curentului în timpul procesului de străpungere a spațiului de lichid, în scopul găsirii coeficienților din relațiile (4.6), (4.7), (4.8). Experimentele au fost efectuate folosind electrozi cu vârf conic, din Cu, cu diametrul de 8 mm, aria porțiunii neizolate a electrodului fiind de 2,56 mm², la o inductivitate a circuitului de descărcare de 3,2 μH.

Astfel, pentru un set de 50 de valori (Anexa 2), prelucrat cu ajutorul programului MATHCAD, s-au obținut următoarele expresii:

$$x_1 = 1 - 0,2 \cdot \eta_1 + 1,2 \cdot \eta_1^2 \quad (4.24)$$

$$x_m = 0,5 - 0,1 \cdot \eta_1 + 0,75 \cdot \eta_1^2 \quad (4.25)$$

$$i_m = 1 - 0,1 \cdot \eta_1 + 0,61 \cdot \eta_1^2 \quad (4.26)$$

Pentru coeficienții ce intră în expresiile (4.12), (4.13), (4.14) se obțin:

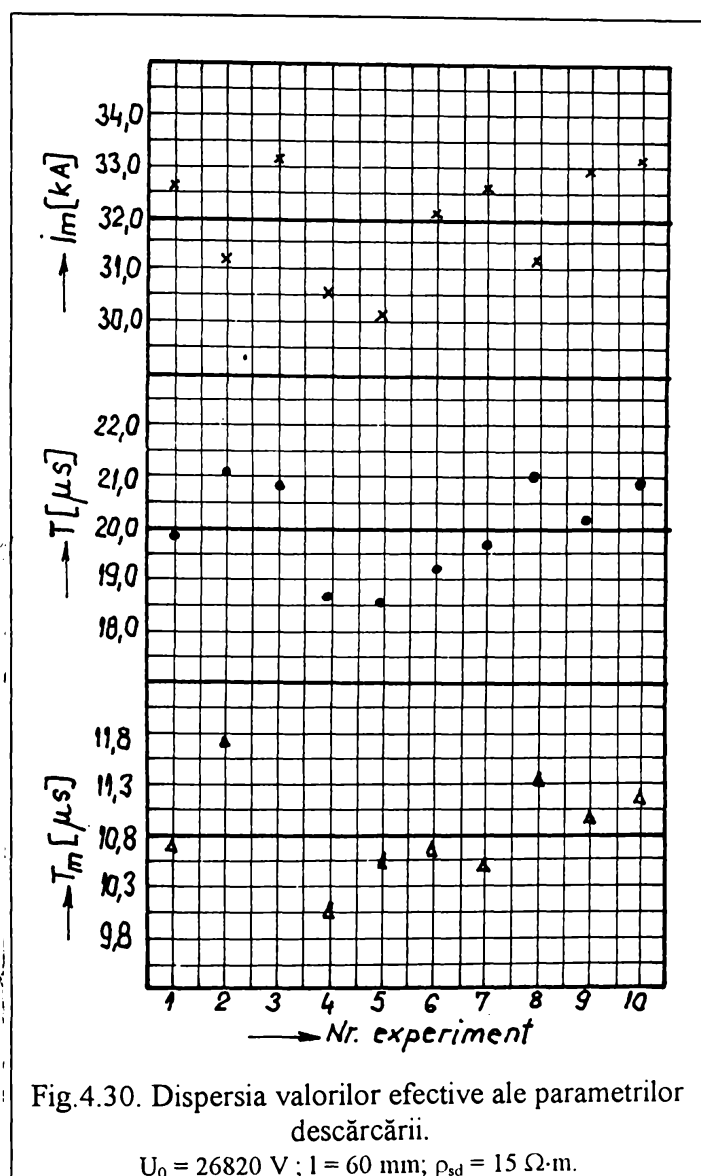
$$b_1 = -13,233 + 20,668 \cdot \eta_1 - 3,015 \cdot \eta_1^2 - 4,815 \cdot \eta_1^3 \quad (4.27)$$

$$b_2 = 42,434 - 110,324 \cdot \eta_1 + 88,858 \cdot \eta_1^2 - 20,912 \cdot \eta_1^3 \quad (4.28)$$

$$b_3 = -30,855 + 93,569 \cdot \eta_1 - 93,158 \cdot \eta_1^2 + 30,407 \cdot \eta_1^3 \quad (4.29)$$

Pentru valorile lui T (durata primei semiperioade de descărcare), T_m (durata după care intensitatea curentului atinge valoarea maximă I_m) și I_m s-au folosit valorile medii aritmetice rezultate după un număr de minim 10 experimente. Oricum, dispersia rezultatelor obținute pentru fiecare experiment în parte este destul de mare, de unde rezultă că procesul descărcării cu străpungerea directă a spațiului de apă este un proces instabil, cu variații relativ mari ale parametrilor descărcării. Un astfel de exemplu de dispersie este prezentată în figura 4.30. Această instabilitate se datorează modului de dezvoltare a sistemului de amorse în timpul formării canalului descărcării, orice

modificare a condițiilor de mediu având o influență destul de importantă. Astfel, se poate trage



coordonate adimensionale, pentru câteva combinații ale parametrilor descărcării, corespunzătoare deasemenea, primei semiperioade de descărcare ($i(x) \equiv sI_i$).

Cazurile prezentate în figurile (4.31.e) și (4.32.e), cu tensiune de descărcare mare și distanță mică între electrozi, corespund unei descărcări aproape de regimul de scurtcircuit, cu efecte acustice și luminoase de intensitate ridicată. Din punct de vedere tehnologic însă, astfel de regimuri de descărcare au efect nul.

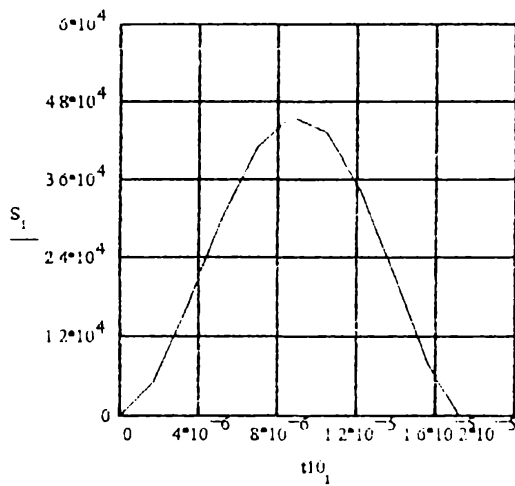
Modelul matematic dezvoltat mai sus permite determinarea, cu precizie suficientă pentru scopuri practice, a principalilor parametrii electrici ce definesc procesul de transformare a energiei electrice în energie a undei de șoc, pentru descărcarea cu străpungerea directă a spațiului de lichid.

concluzia că acest proces poate avea un grad de reproductibilitate și predictibilitate ridicat doar în cazul în care, de la o descărcare la alta, se păstrează în limite foarte strânse proprietățile fizico - chimice ale mediului de descărcare și geometria spațiului de descărcare, aceasta din urmă fiind influențată de uzura electrozilor.

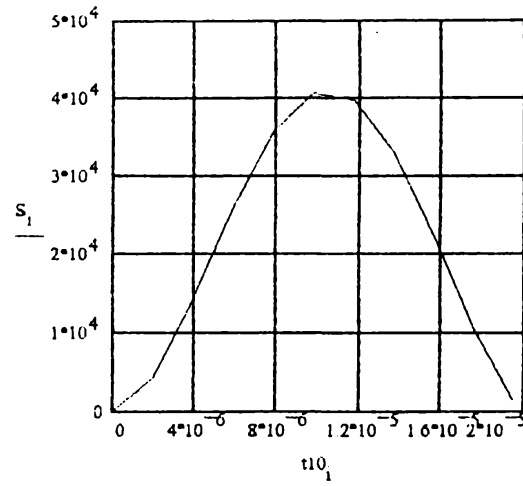
În figura 4.31 sunt prezentate diagramele teoretice de dependență în timp real a curentului de descărcare pentru diferite combinații ale parametrilor descărcării, în prima semiperioadă de descărcare, diagrame trasate cu ajutorul programului MATHCAD. În diagrame S_i reprezintă curentul în amperi iar t/t_0 reprezintă timpul, în secunde.

Figura 4.32 reprezintă aceleași dependențe, dar în coordonate adimensionale ale curentului sI_i și timpului x_i .

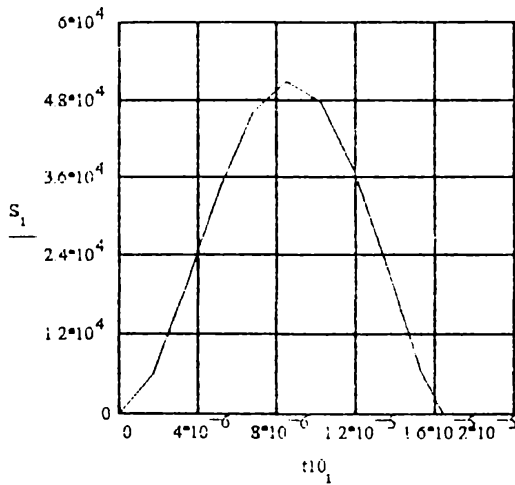
Figura 4.33 prezintă câteva diagrame de variație $U_{rx} = f [i(x)]$, în



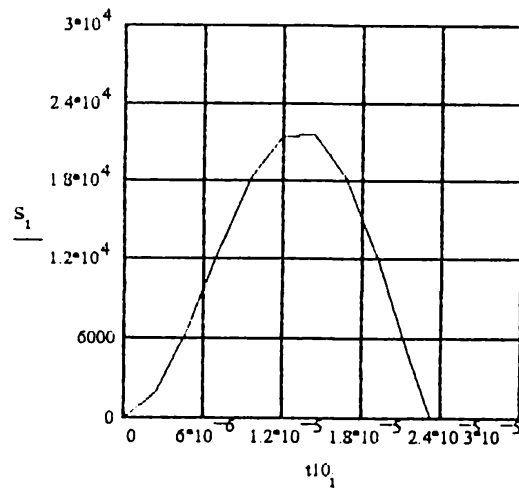
a)
 $U_0 = 33,24 \text{ kV}; l = 50 \text{ mm}; \eta_1 = 0,375$



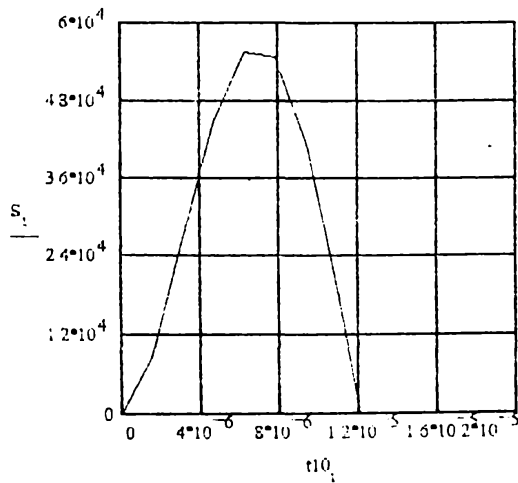
b)
 $U_0 = 33,24 \text{ kV}; l = 70 \text{ mm}; \eta_1 = 0,525$



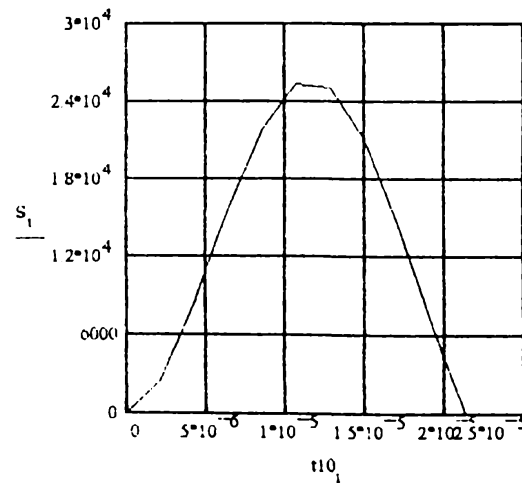
c)
 $U_0 = 36,46 \text{ kV}; l = 50 \text{ mm}; \eta_1 = 0,342$



d)
 $U_0 = 23,61 \text{ kV}; l = 70 \text{ mm}; \eta_1 = 0,739$

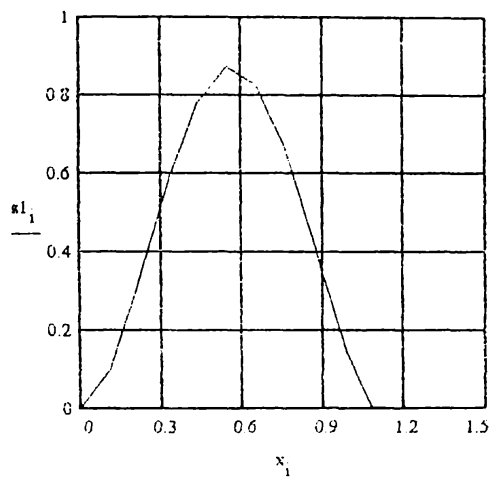


e)
 $U_0 = 39,67 \text{ kV}; l = 20 \text{ mm}; \eta_1 = 0,126$



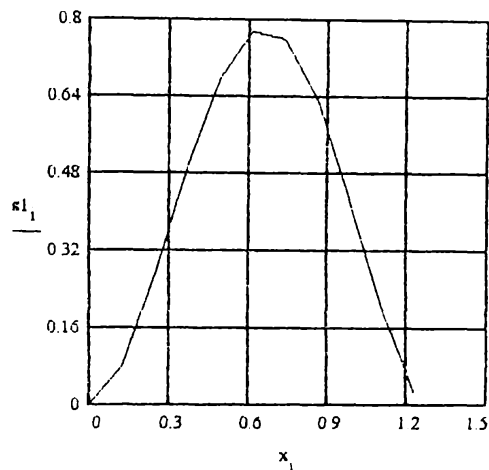
f)
 $U_0 = 23,61 \text{ kV}; l = 60 \text{ mm}; \eta_1 = 0,633$

Fig.4.31. Diagrame de variație în timp real ale curentului de descărcare.



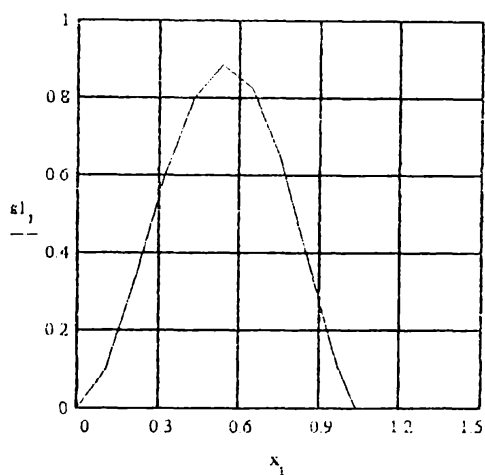
a)

$U_0 = 33,24 \text{ kV}; l = 50 \text{ mm}; \eta_1 = 0,375$



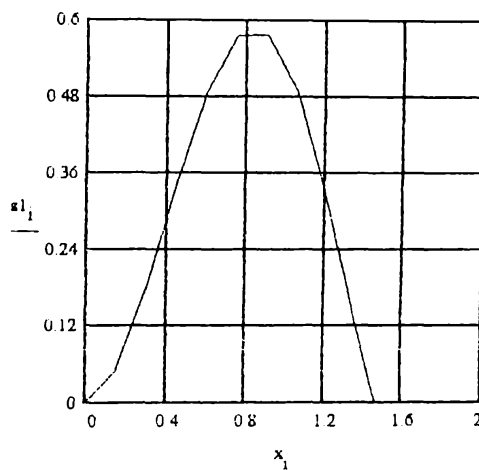
b)

$U_0 = 33,24 \text{ kV}; l = 70 \text{ mm}; \eta_1 = 0,525$



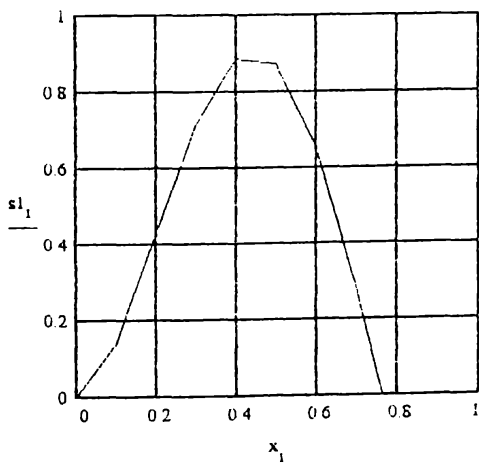
c)

$U_0 = 36,46 \text{ kV}; l = 50 \text{ mm}; \eta_1 = 0,342$



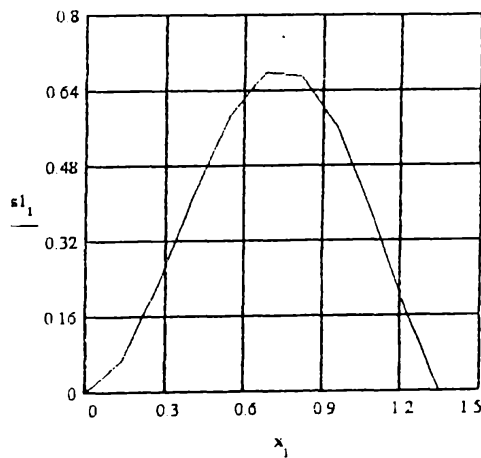
d)

$U_0 = 23,61 \text{ kV}; l = 70 \text{ mm}; \eta_1 = 0,739$



e)

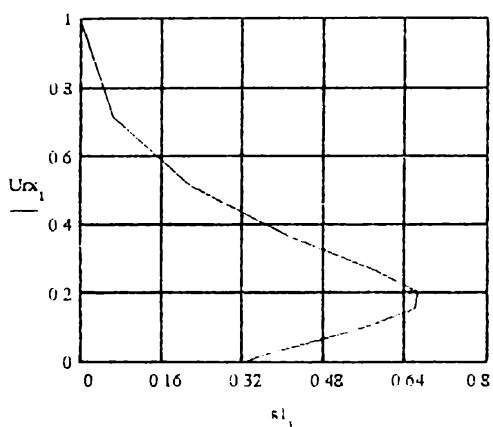
$U_0 = 39,67 \text{ kV}; l = 20 \text{ mm}; \eta_1 = 0,126$



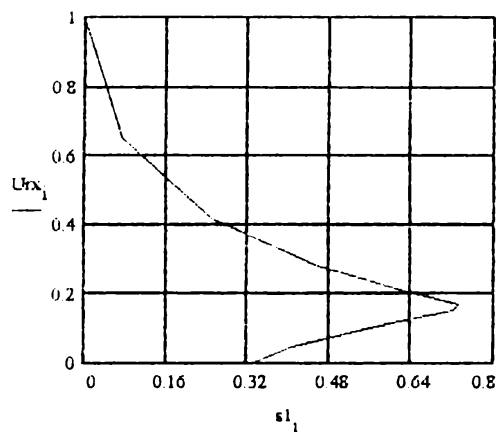
f)

$U_0 = 23,61 \text{ kV}; l = 60 \text{ mm}; \eta_1 = 0,633$

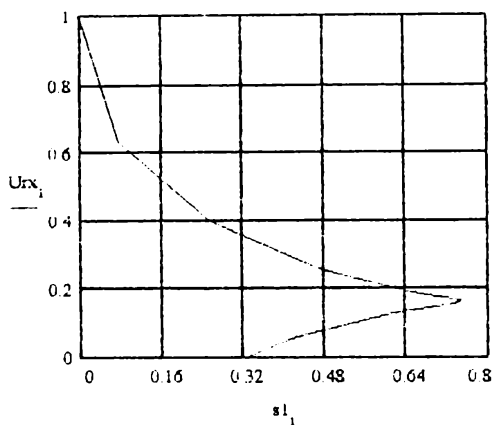
Fig.4.32. Diagrame de variație în coordonate adimensionale ale curentului de descărcare.



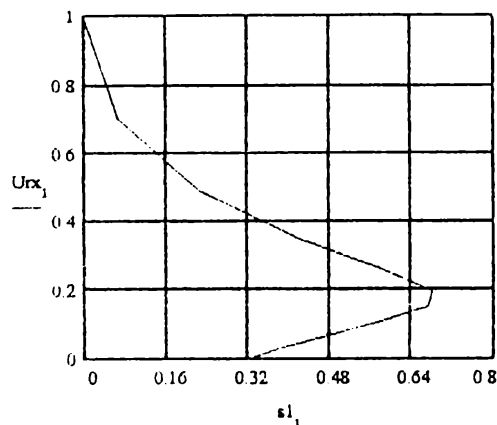
a)
 $U_0 = 23,00 \text{ kV}; l = 60 \text{ mm}; \eta_1 = 0,650$



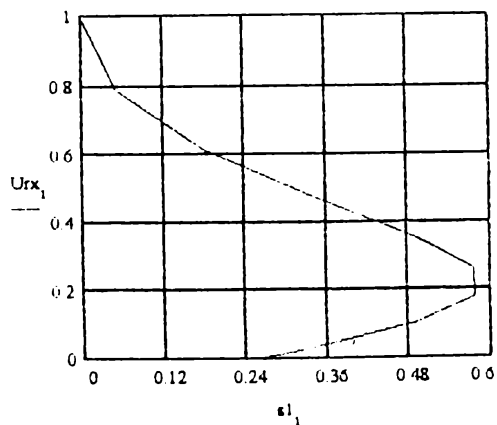
b)
 $U_0 = 26,00 \text{ kV}; l = 60 \text{ mm}; \eta_1 = 0,575$



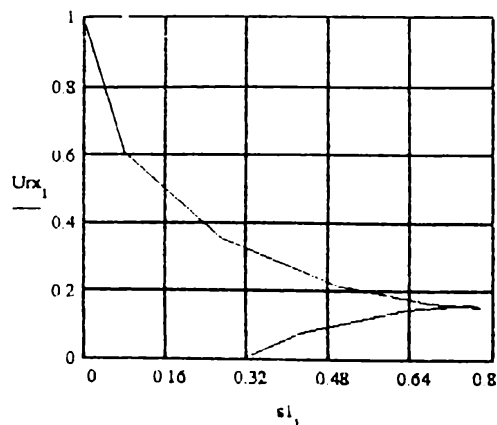
c)
 $U_0 = 26,82 \text{ kV}; l = 60 \text{ mm}; \eta_1 = 0,557$



d)
 $U_0 = 23,61 \text{ kV}; l = 60 \text{ mm}; \eta_1 = 0,633$



e)
 $U_0 = 23,61 \text{ kV}; l = 70 \text{ mm}; \eta_1 = 0,739$



f)
 $U_0 = 33,24 \text{ kV}; l = 70 \text{ mm}; \eta_1 = 0,525$

Fig. 4.33. Diagrame de variație în coordonate adimensionale $U_{rx} = f[i(x)]$.

4.2.2. Determinarea presiunii în camera de descărcare

Pentru determinarea relațiilor de calcul ale presiunii în camera de descărcare (cameră cilindrică), se pornește de la relația de calcul a vitezei de degajare a energiei în canalul de descărcare, bazată pe ecuația bilanțului energetic, în ipoteza procesului adiabatic de dilatare a canalului și a neglijării pierderilor.

În general, se poate scrie că [41]:

$$N(t) = i^2(t) \cdot R(t) \quad (4.30)$$

unde $N(t)$ reprezintă viteza de degajare a energiei în canalul de descărcare iar $R(t)$ reprezintă rezistența activă.

Așa cum rezultă din curbele de variație ale curentului prezentate în subcapitolul anterior și după cum indică și alte date experimentale [56,71], toate curbele puterii electrice au valoarea maximă spre mijlocul primei semiperioade a oscilațiilor proprii circuitului de descărcare. Această localizare spre mijlocul semiperioadei este cu atât mai evidentă cu cât descărcarea se apropie mai mult de aperiodic ($\eta \Rightarrow 1$). Totodată, pentru toate tipurile de descărcări, puterea dezvoltată în canal va atinge valoarea maximă înainte ca și curentul să atingă valoarea sa maximă. Acest lucru permite aproximarea creșterii curentului (în perioada de creștere a puterii, pe intervalul de timp $0 < t < T_m$) printr-o lege de variație liniară.

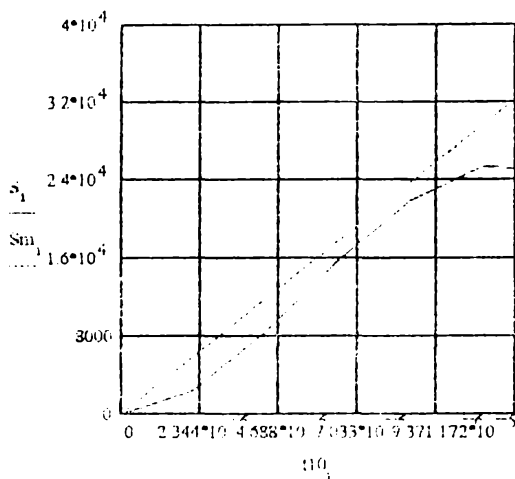
Având în vedere că panta de creștere a curentului se micșorează odată cu creșterea valorii lui η , variația liniară se poate scrie sub forma:

$$i = t \cdot \frac{U_0}{L} \cdot (1 - 0,85 \cdot \eta) \quad (4.31)$$

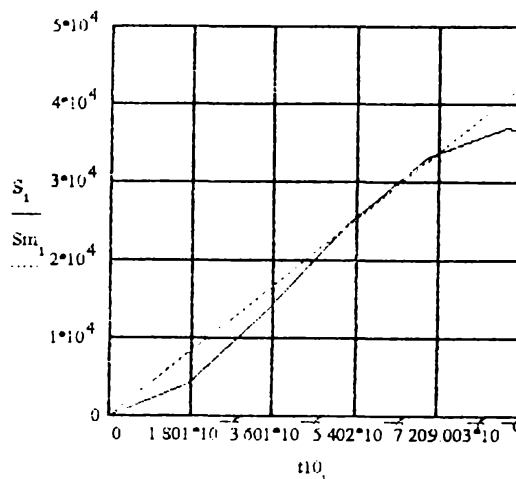
în care U_0 / L - panta inițială de creștere a curentului de descărcare pentru circuitul scurtcircuitat; t - timpul, în perioada de creștere a puterii. În figura 4.34 sunt prezentate diagramele de variație ale curentului funcție de timp, în intervalul $t \in [0, T_m]$, pentru patru cazuri de combinații ale parametrilor descărcării. Cu linie continuă a fost reprezentată variația curentului dată de relația (4.4) iar cu linie întreruptă cea calculată cu relația (4.31).

Dacă din ecuația bilanțului energetic dată de relația (1.17) se adoptă valoarea rezultantă a lui R atunci, prin înlocuirea expresiei (4.31) în expresia determinată a lui R și considerând valoarea indicelui adiabatei plasmei canalului $\gamma = 1,25$ [41], se poate scrie:

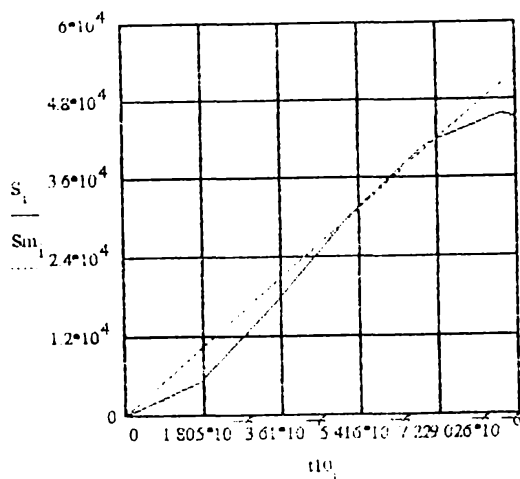
$$R(t) = \frac{\sqrt{2 \cdot A \cdot I}}{\frac{U_0}{L} \cdot (1 - 0,85 \cdot \eta) \cdot t^{3/2}} \quad (4.32)$$



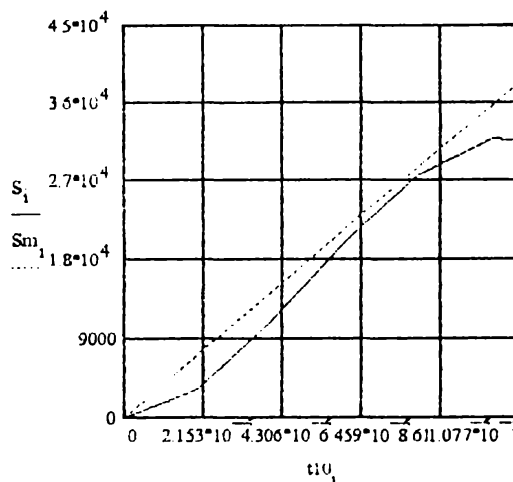
a)
 $U_0 = 23,61 \text{ kV}; l = 60 \text{ mm}; \eta_1 = 0,633;$
 $\eta = 0,737; T_m = 11,7 \mu\text{s}; T = 21,5 \mu\text{s}.$



b)
 $U_0 = 26,82 \text{ kV}; l = 40 \text{ mm}; \eta_1 = 0,372;$
 $\eta = 0,517; T_m = 9,0 \mu\text{s}; T = 17,3 \mu\text{s}.$



c)
 $U_0 = 33,24 \text{ kV}; l = 50 \text{ mm}; \eta_1 = 0,375;$
 $\eta = 0,520; T_m = 9,0 \mu\text{s}; T = 17,4 \mu\text{s}.$



d)
 $U_0 = 26,82 \text{ kV}; l = 60 \text{ mm}; \eta_1 = 0,557;$
 $\eta = 0,677; T_m = 10,8 \mu\text{s}; T = 20,0 \mu\text{s}.$

Fig.4.34. Diagrame comparative de variație în timp real ale curentului de descărcare.

În figura 4.35 sunt prezentate două diagrame de variație ale rezistenței $R = f(t)$, trasate cu ajutorul relației (4.32).

Introducând expresiile (4.32) și (4.31) în relația de calcul a puterii (4.30) se obține:

$$N(t) = \sqrt{2 \cdot A \cdot t} \cdot I \cdot \frac{U_0}{L} \cdot (1 - 0,85 \cdot \eta) \tag{4.33}$$

Așadar, legea de variație a puterii electrice include criteriul η , criteriu care se calculează ușor în funcție de parametrii circuitului de descărcare, prin utilizarea relației (1.20).

În aceste condiții, timpul în care puterea atinge valoarea sa maximă este determinat și el de

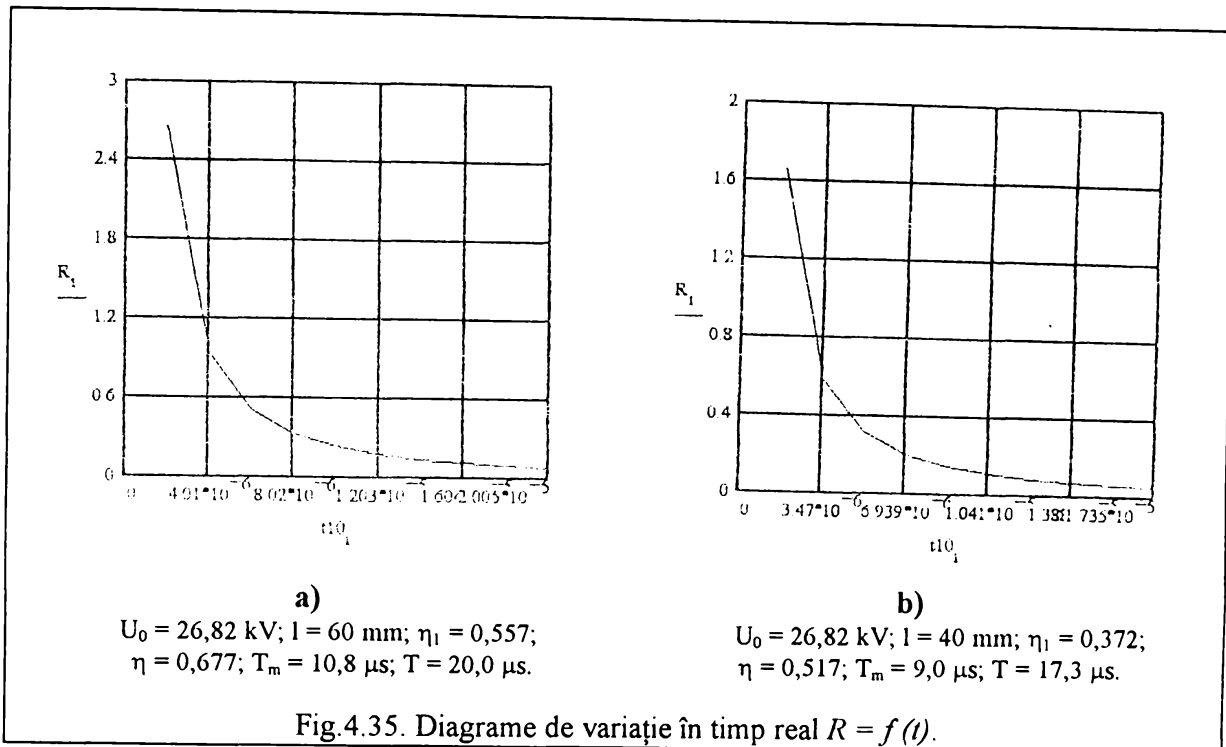


Fig.4.35. Diagrame de variație în timp real $R = f(t)$.

valoarea criteriului η , putând fi aproximat tot printr-o lege de variație liniară [56]:

$$T_{max} = 1,8 \cdot \eta \cdot \sqrt{L \cdot C} \tag{4.34}$$

Astfel, înlocuind relația (4.34) în expresia (4.33), puterea maximă se poate calcula cu relația aproximativă:

$$N_{max} = 1,9 \cdot \sqrt{A \cdot \eta} \cdot \frac{U_0 \cdot l}{L} \cdot (1 - 0,85 \cdot \eta) \cdot (L \cdot C)^{1/4} \tag{4.35}$$

În tabelul 4.3 sunt prezentate câteva rezultate teoretice obținute după metodologia prezentată mai sus, pentru diferite combinații ale parametrilor descărcării.

TABELUL 4.3.

U_0 [V]	C [μF]	l [mm]	L [μH]	η	$N_{max} \cdot 10^8$ [W]	T_m [μsec]	T_{max} [μsec]
26824	8	40	3,2	0,517	1,83	9,0	4,7
26824	8	50	3,2	0,600	2,15	9,8	5,5
26824	8	60	3,2	0,677	2,37	10,8	6,2
28430	8	30	3,2	0,410	1,50	8,3	3,7
28430	8	40	3,2	0,497	1,95	8,9	4,5
28430	8	60	3,2	0,652	2,59	10,4	5,9
28430	8	70	3,2	0,722	2,76	11,5	6,6
30840	4	60	3,2	0,693	2,25	7,8	4,5
31640	8	60	1,6	0,681	4,69	7,6	4,4
33250	8	60	1,6	0,659	5,06	7,4	4,2
34050	8	70	3,2	0,640	3,67	10,3	5,8
36460	8	70	3,2	0,612	4,05	9,9	5,6
38870	8	70	4,3	0,558	3,62	10,5	5,9
40475	8	70	4,3	0,543	3,80	10,7	5,7

Importanța acestei expresii constă în aceea că, fără a se efectua un experiment, se poate calcula mărimea puterii maxime și timpul în care se atinge aceasta, având ca elemente de calcul doar parametrii inițiali ai circuitului de descărcare și distanța dintre electrozi.

Prin integrarea sau diferențierea relației (4.33) se pot obține expresii de apreciere pentru energie și panta puterii în perioada creșterii acesteia.

În continuare, vom aborda canalul de descărcare ca pe un cilindru de plasmă, omogen în volum. Neglijând pierderile prin conductibilitate termică și radiație luminoasă, ecuația bilanțului energetic în canal poate fi exprimată prin:

$$N(t) = \frac{d(P_a \cdot v)}{(\gamma - 1)dt} + P_a \cdot \frac{dv}{dt} \quad (4.37)$$

în care s-a ținut cont de identitatea relațiilor (1.11) și (4.30).

Deoarece curbele puterii au, după cum s-a arătat mai sus, un maxim la prima pulsație a impulsului de curent, este logic să se considere că și funcția presiunii în canal va avea un maxim în momentul $t = T_{max}$ sau în apropierea acestuia. În aceste condiții, ecuația (4.37) pentru momentul $t = T_{max}$, după unele transformări elementare, se poate scrie sub forma:

$$P_{a_{max}} = \frac{\gamma - 1}{2\pi \cdot \gamma \cdot l} \cdot \frac{N_{max}}{r_{max} \cdot r'_{max}} \quad (4.38)$$

unde r'_{max} reprezintă viteza de dilatare a canalului la momentul $t = T_{max}$. Trebuie remarcat faptul că expresia obținută pentru presiunea maximă în canal va fi aplicabilă și în cazul unei deviații mai mari a momentului de calcul t față de T_{max} . Aceasta datorită variației cvasiliniare a puterii și razei canalului în intervalul temporal de deviație.

Ținând cont de relațiile (1.19) și (1.20), caracteristica scânteii A se poate scrie sub forma:

$$A = \frac{\eta^3 \cdot U_0^2 \cdot \sqrt{L \cdot C}}{\pi \cdot l^2} \quad (4.39)$$

Înlocuind expresia obținută a lui A (4.39) în expresia lui N_{max} (4.35) și recalculând constantele, se obține:

$$N_{max} = 1,07 \cdot U_0^2 \cdot \eta^2 \cdot (1 - 0,85 \cdot \eta) \cdot \sqrt{\frac{C}{L}} \quad (4.40)$$

Substituind relația (4.40) în (4.38), după recalcularea constantelor și unele transformări în care se ține seama de legătura dintre η și B_k dată de relațiile (1.19) și (1.20) se obține următoarea expresie aproximativă pentru presiunea maximă în canal:

$$P_{a_{max}} = \frac{0,034}{r_{max} \cdot T_{max}^{-1}} \cdot (4,6 \cdot B_k^{2/3} - 8,4 \cdot B_k) \cdot \frac{U_0^2}{l} \cdot \sqrt{\frac{C}{L}} \quad (4.41)$$

În lucrarea [52], adoptând pentru raza r a canalului o dependență de forma:

$$r = r_0 \cdot t^\alpha \quad (4.42)$$

este studiată pe larg o funcție de tipul:

$$B_0 = f(B_k) = \frac{K_1}{r \cdot r'} \cdot (K_2 \cdot B_k^{2/3} - K_3 \cdot B_k) \cdot \sqrt{\frac{U_0^2 \cdot C}{l \cdot \rho_0}} \quad (4.43)$$

Calculul valorilor lui B_0 a dovedit că, la schimbarea lui B_k și η într-o gamă destul de largă ($B_k = 0,0016 \dots 0,048$; $\eta = 0,2 \dots 0,9$), acesta mai întâi crește puțin, apoi scade, după care se menține aproximativ constant (fig.4.36).

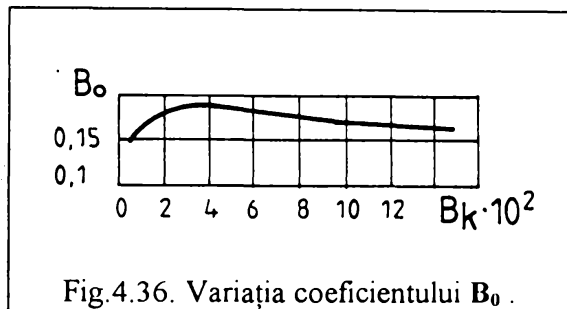


Fig.4.36. Variația coeficientului B_0 .

În aceste condiții, relația (4.41) poate fi scrisă sub forma prescurtată:

$$P_{a_{max}} = B_0 \cdot \left(\frac{\rho_0 \cdot U_0^2}{L \cdot l} \right)^{1/2} \quad (4.44)$$

Se poate deci trage concluzia că mărimea presiunii în canal nu depinde în mod esențial de regimul de descărcare, determinat prin mărimea B_k . Ca urmare, în relația (4.44), $B_0 (B_k)$ poate fi mediat după argumentul lui B_k și anume luat egal cu o valoare medie rezultată din diagramă, adică 0,17. Astfel, relația (4.44) devine:

$$P_{a_{max}} = 0,17 \cdot \left(\frac{\rho_0 \cdot U_0^2}{L \cdot l} \right)^{1/2} \quad (4.45)$$

O expresie similară pentru presiunea maximă în canal a fost obținută de Singerman [41] sub forma:

$$P_{a_{max}} = 0,26 \cdot \left(\frac{\rho_0 \cdot U_0^2}{L \cdot l} \right)^{1/2} \quad (4.46)$$

Valoarea mai mare a coeficientului numeric din relația (4.46) se datorează utilizării unor valori diminuate pentru T și T_{max} , precum și a unei valori mai mari a cotei de energie care se degajă în canalul de descărcare.

Sub acțiunea presiunii ridicate, în zona apropiată de canalul descărcării se formează un domeniu de compresie, al cărui front, în momentul inițial al descărcării, coincide cu granița canalului. Însă zona foarte rapid comprimată (unda de șoc), care are o viteză mai mare decât viteza de dilatare a canalului, se desprinde de acesta, valoarea presiunii scăzând pe măsură ce frontul undei de șoc se îndepărtează de axa descărcării.

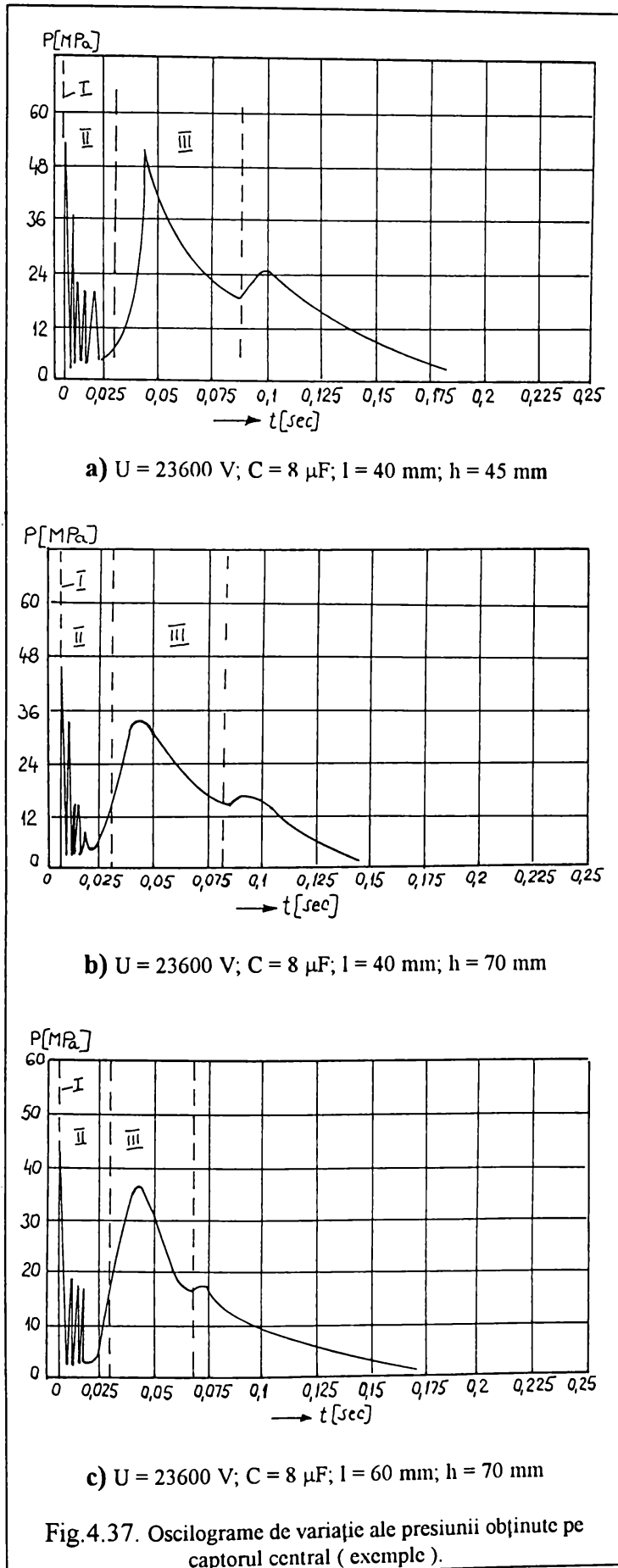
În consecință, unda de șoc inițială, datorită formei canalului de descărcare, poate fi considerată cilindrică. Pe măsura îndepărtării de axa descărcării, frontul undei de șoc se transformă din cilindric în sferic trecând, evident, printr-o formă tranzitivă. Întinderea acestor trei zone de simetrie este de așteptat să depindă de lungimea canalului de descărcare.

În regim monoimpuls, oscilogramele obținute în urma experimentelor efectuate după metodologia prezentată în capitolul 3, atât pe placă fixă (considerată astfel datorită rigidității mult mai mari a membranei elastice a captorului față de semifabricatul considerat simplul rezemat pe contur) cât și simulând placa mobilă, au evidențiat atât caracterul oscilatoriu al presiunii cât și prezența, pe un timp relativ mai îndelungat, a unui tren de impulsuri de diferite amplitudini, rezultat al acțiunilor undelor de șoc reflectate de la capacul și de la pereții camerei de descărcare, al bulei de gaz precum și al interacțiunii dintre undele reflectate și bula de gaz.

Referitor la acest din urmă aspect, al interacțiunii dintre undele reflectate și bula de gaz, trebuie subliniat că ea poate duce la o modificare substanțială a caracterului câmpului de presiune rezultat, fie ca urmare a "spargerii" bulei de gaz și apariției unui jet de lichid în aceasta (când presiunea în unda de șoc reflectată este mai mare decât presiunea bulei de gaz), fie ca urmare a reflexiilor și refracțiilor multiple pe granița bulei a undelor de șoc reflectate atât de la pereții camerei de descărcare cât și de la semifabricat. Din păcate, modelarea matematică a tuturor acestor fenomene este foarte greoaie și poate avea doar caracter particular, specific fenomenului fizic în sine, fără a contribui la o modelare globală, cu grad relativ mare de universalitate din punct de vedere practic, a descărcării prin electrohidroimpulsuri.

Din acest motiv, expunerea care urmează are ca scop nu atât studiul unor fenomene particulare (fenomene care pot constitui ele însele teme separate de studiu), cât elaborarea unui model global și simplu, cantitativ și calitativ, al acțiunilor principalelor impulsuri de presiune, chiar dacă aceasta se face prin eliminarea unor componente. Oricum, după cum se va vedea, erorile nu depășesc 20%, valoare acceptabilă pentru calculele estimative, ele putând fi ulterior adaptate condițiilor concrete de execuție ale camerei de descărcare și sistemului de electrozi.

Astfel, oscilogramele obținute pe captorul central imobil, deci la o incidență normală a undelor de șoc (ca și exemplu, în figura 4.37 au fost trasate, după prelucrare, trei dintre ele) au relevat existența a trei zone temporale, fiecare fiind caracterizată de acțiuni specifice. Zona **I** este definită de acțiunea undei de șoc directe, zona **II** de acțiunea undelor de șoc reflectate de la pereții camerei de descărcare (amplitudinea cea mai mare fiind cea a undelor reflectate de la capacul camerei) și de acțiunea undelor de șoc multiplu reflectate între semifabricat și granița bulei de gaz iar zona a **III** este definită de acțiunea presiunii dezvoltate de bula de gaz. Trebuie remarcat însă faptul că fenomenele din zonele **II** și **III** se intercondiționează reciproc.



Astfel, la distanțe mici între electrozi, bula de gaz are dimensiuni mici, undele reflectate de la pereți neîntâlnind obstacolul format de granița bulei. La creșterea distanței între electrozi, bula dobândește dimensiuni relativ mari, chiar dacă are o presiune scăzută, ceea ce poate duce la estomparea acțiunilor undelor reflectate. Pe de altă parte, poate apare, așa cum am specificat mai înainte, spargerea bulei de gaz de către undele reflectate de amplitudine mare, caz în care pe zona **III** nu se mai dezvoltă o presiune aproape cvasistatică ci apare și aici o succesiune de impulsuri cu o durată mai mare.

Durata de acțiune a undelor de șoc variază între 200 și 1000 μsec iar cea a bulei de gaz este cuprinsă în limite mult mai largi, de 0,02 până la 0,2 sec.

O parte dintre experimentele efectuate au avut ca scop determinarea zonelor de variație ale formei frontului undei de șoc, în funcție de raportul h/l . Această determinare s-a făcut prin încercări succesive, prin modificarea caracteristicilor geometrice ce definesc poziția reciprocă a captoarelor (prezentate în figura 4.38), astfel încât pe captoarele laterale să fie prins maximul valorii presiunii, considerat a fi cel înregistrat pe captorul central.

În figura 4.39 sunt redată două

dintre diagramele liniilor de egală presiune, obținute la diferite combinații de valori ale parametrilor descărcării.

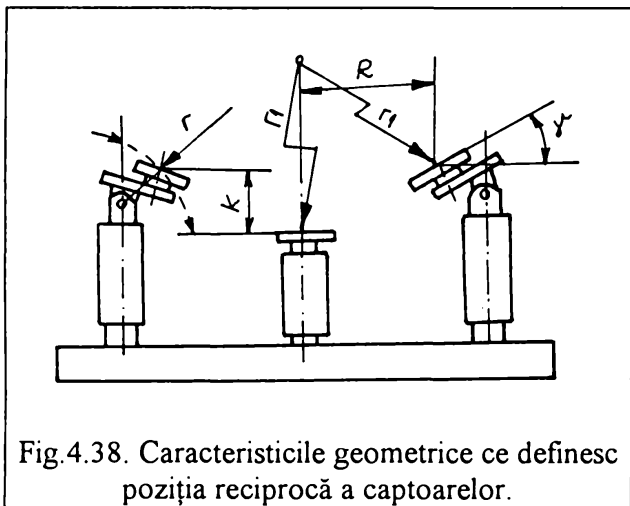


Fig.4.38. Caracteristicile geometrice ce definesc poziția reciprocă a captoarelor.

Trebuie menționat faptul că valorile respective se referă la presiunile maxime în unda de șoc directă, corespunzătoare zonei temporale I. Abaterile înregistrate față de valoarea considerată maximală nu au depășit 10%, scăzând pe măsura creșterii raportului h/l , ele datorându-se ramificării sistemului de amorse, precum și abaterilor de la forma liniară a canalului de descărcare.

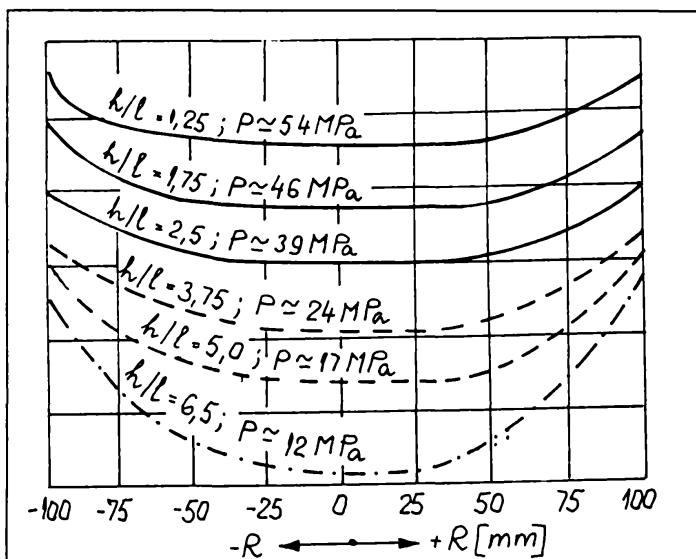
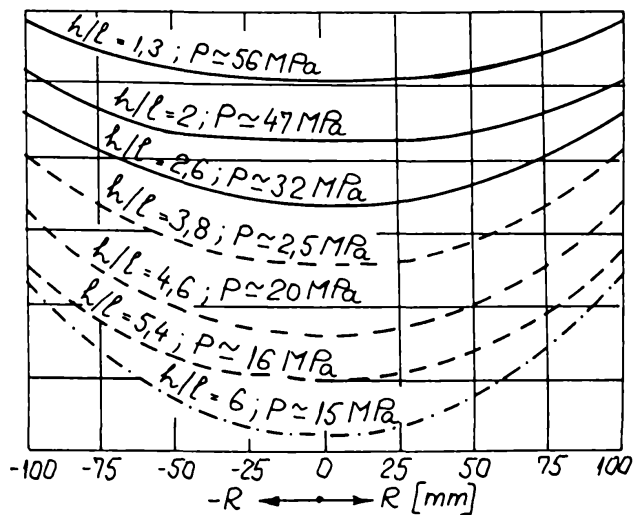


Fig.4.39. a) $U = 23600 \text{ V}$; $l = 40 \text{ mm}$; $C = 8 \mu\text{F}$

Analiza acestor diagrame conduce la concluzia că pentru rapoarte $h/l \leq 2,5$, frontul undei de șoc poate fi considerat cilindric (în figura 4.39., trasat cu linie continuă, axa captoarelor fiind paralelă cu axa descărcării), pentru rapoarte $2,5 < h/l \leq 5,5$ frontul are o formă tranzitivă tinzând din ce în ce mai mult spre forma sferică (trasat cu linie întreruptă) iar pentru rapoarte $h/l > 5,5$, frontul undei de șoc poate fi considerat sferic (trasat cu linie-punct în figura 4.39). În aceste condiții, relațiile de calcul ale presiunii vor trebui determinate pentru fiecare zonă de variație a formei frontului de undă în parte.



b) $U = 30840 \text{ V}$; $l = 50 \text{ mm}$; $C = 8 \mu\text{F}$

În ipoteza simetriei cilindrice, Okuni [71] consideră că presiunea în unda de șoc, după ce aceasta se desprinde de granița canalului de descărcare este dată de relația,

$$P_{u\dot{s}} \cong P_{a_{\max}} \cdot \sqrt{\frac{r_{\max}}{h}} \quad (4.47)$$

iar raza maximă a canalului de descărcare

r_{max} se poate calcula cu :

$$r_{max} = 0,89 \cdot \frac{A^{1/2} \cdot l^{3/4} \cdot C^{1/4}}{\rho_0^{1/4} \cdot U_0^{1/2}} \quad (4.48)$$

În aceste condiții, substituind în relația (4.47) relațiile (4.45) și (4.48) se obține expresia de calcul a presiunii pe frontul undei de șoc în zona de simetrie cilindrică ($r_{max} < h \leq 2,5 \cdot l$) :

$$P_{u\check{s}} = \frac{0,16 \cdot A^{1/4} \cdot \rho_0^{3/8} \cdot U_0^{3/4} \cdot C^{1/8}}{h^{1/2} \cdot l^{1/8} \cdot L^{1/2}} \quad (4.49)$$

Pentru zona de tranziție cilindric-sferic a frontului undei de șoc, gradientul de atenuare a presiunii este mai mare, ceea ce duce la necesitatea reconsiderării valorii constantei numerice din relația (4.49). Pentru simplificarea calculelor, se poate considera în locul acesteia o funcție cu variație liniară de forma ($a + bx$), unde $x = h/l$, în condițiile în care restul relației își păstrează forma și se menține dependența exponențială invers proporțională de parametrul $h^{1/2}$. Pentru asigurarea continuității funcției presiunii se impune respectarea următoarei egalități, pentru raportul $h/l = 2,5$:

$$a + 2,5 \cdot b = 0,16 \quad (4.50)$$

Considerând un număr de 50 de perechi de date prelucrate cu ajutorul programului MATHCAD, se obțin valorile $a = 0,2$ și $b = -0,016$. Astfel, relația (4.49), valabilă pentru zona de tranziție a formei frontului undei de șoc poate fi scrisă sub forma:

$$P_{u\check{s}} = \frac{0,2 \cdot \left(1 - 0,08 \cdot \frac{h}{l}\right) \cdot A^{1/4} \cdot \rho_0^{3/8} \cdot U_0^{3/4} \cdot C^{1/8}}{h^{1/2} \cdot l^{1/8} \cdot L^{1/2}} \quad (4.51)$$

Pentru zona de simetrie sferică, tot în lucrarea [71] se consideră că amplitudinea presiunii este invers proporțională cu parametrul $h^{1,13}$, relația (4.47) luând forma particulară:

$$P_{u\check{s}} \cong 1,64 \cdot P_{a_{max}} \cdot \sqrt{r_{max} \cdot \frac{l^{5/4}}{h^{9/4}}} \quad (4.52)$$

Astfel, substituind expresiile (4.48) și (4.45) în relația (4.52) se obține:

$$P_{u\check{s}} = \frac{0,26 \cdot A^{1/4} \cdot \rho_0^{3/8} \cdot U_0^{3/4} \cdot C^{1/8} \cdot l^{1/2}}{h^{9/8} \cdot L^{1/2}} \quad (4.53)$$

Pentru presiunea maximă dezvoltată de bula de gaz se poate utiliza relația (1.81) scrisă sub forma:

$$P_g = \frac{314,48}{h} \cdot \left(\eta_l \cdot \frac{C \cdot U_0^2}{2 \cdot T} \right)^{1/2} \quad (4.54)$$

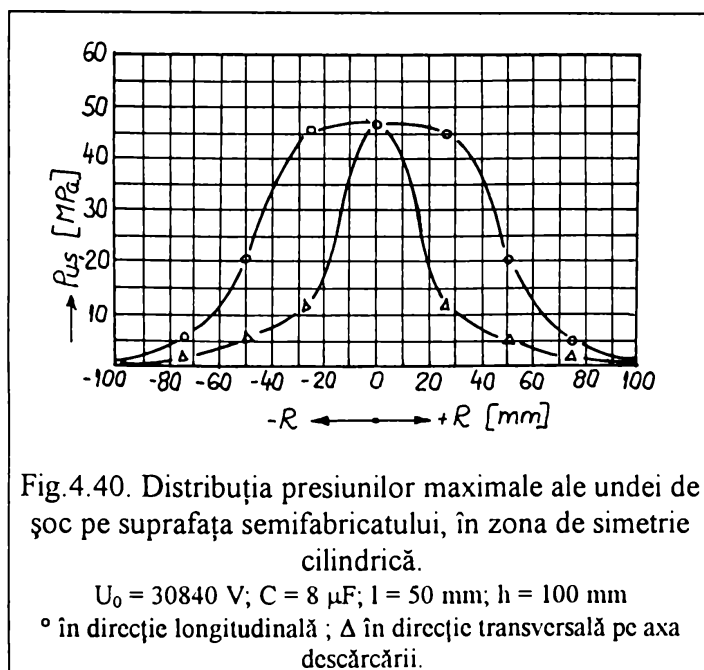
considerându-se că cea mai mare parte a energiei înmagazinate în bateria de condensatoare se degajă în timpul primei semiperioade de variație a curentului.

4.3. Studii teoretice și cercetări experimentale privind distribuția de presiune pe suprafața semifabricatului

Având în vedere existența zonelor de variație ale formei frontului undei de șoc este normal ca studiul repartiției de presiune pe suprafața semifabricatului să se facă în funcție de aceste zone. Determinarea experimentală a distribuției de presiune pe placă fixă sau simulând placa mobilă a demonstrat faptul că între cele două tipuri de determinări nu există diferențe semnificative în ceea ce privește valorile maxime de presiune înregistrate. Studiul pe placă mobilă se recomandă a se utiliza pentru determinarea variației în timp a distribuției de presiune datorate frontului undei de șoc, în scopul "prinderii" momentului apariției cavitației și oferă informații privind legea de mișcare a semifabricatului în această foarte scurtă perioadă. Pe de altă parte, datorită elasticității sale, însăși membrana captorului de presiune se poate comporta ca o placă mobilă, analogia fiind cu atât mai apropiată de realitate cu cât scade grosimea membranei.

În aceste condiții, studiul se bazează pe media distribuțiilor maxime de presiune, chiar dacă acestea, pentru diferite componente, se ating în timpi diferiți, fiind făcute și precizări suplimentare acolo unde acestea sunt necesare. Această modalitate de abordare a problemei este dictată de necesitatea considerării efectului global al impulsurilor de presiune asupra semifabricatului.

Pentru zona de simetrie cilindrică este evident faptul că distribuția de presiune datorată undelor de șoc, la un moment dat, depinde de direcția de măsurare a captoarelor în raport cu axa



descărcării, datorită formei specifice a frontului undei de șoc. În figura 4.40 este prezentat un astfel de exemplu de distribuție a presiunilor maxime pe suprafața semifabricatului.

În ceea ce privește distribuția de presiune măsurată în lungul axei descărcării, se remarcă că pe o zonă cu lungimea aproximativ egală cu distanța între electrozi, gradientul de scădere a presiunii pe rază este relativ mic. Însă, odată cu creșterea distanței dintre axa descărcării și semifabricat, gradientul de

scădere al presiunii se mărește, porțiunea respectivă căpătând o curbură din ce în ce mai mare. Pentru

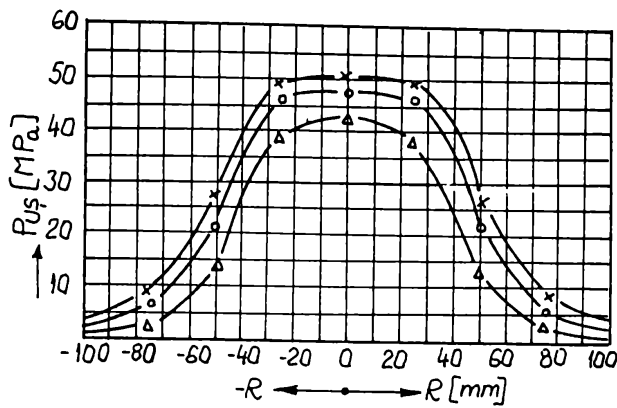


Fig. 4.41. Distribuțiile de presiune pe suprafața semifabricatului, în direcție longitudinală, pentru diferite rapoarte h/l .
 $U_0 = 30840 \text{ V}$; $C = 8 \mu\text{F}$; $l = 50 \text{ mm}$.
 $x - h/l = 1,6$; $^\circ - h/l = 2$; $\Delta - h/l = 2,4$.

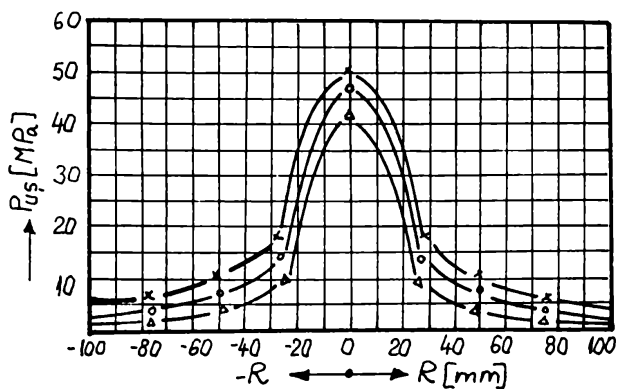


Fig. 4.42. Distribuțiile de presiune pe suprafața semifabricatului, în direcție transversală pe axa descărcării, pentru diferite rapoarte h/l .
 $U_0 = 30840 \text{ V}$; $C = 8 \mu\text{F}$; $l = 50 \text{ mm}$.
 $x - h/l = 1,6$; $^\circ - h/l = 2$; $\Delta - h/l = 2,4$.

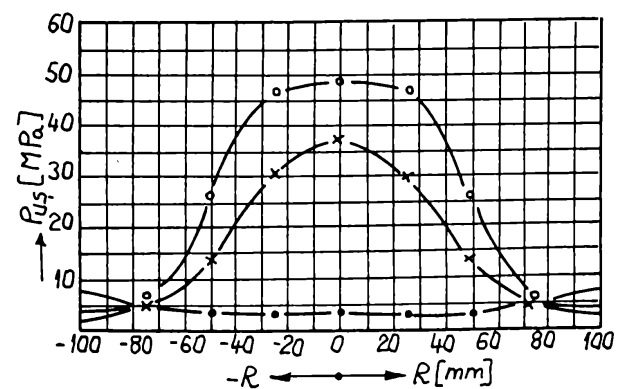


Fig. 4.43. Variația în timp a distribuției de presiune.
 $^\circ - t = 40 \mu\text{s}$; $x - 80 \mu\text{s}$; $\bullet - 190 \mu\text{s}$.

exemplificare, în figura 4.41 sunt prezentate distribuțiile obținute pentru diferite rapoarte h/l . Corespunzător, în figura 4.42 sunt trasate diagramele variației de presiune în direcție perpendiculară pe axa descărcării.

Pentru o imagine mai clară asupra fenomenului, în figurile 4.43 și 4.44 au fost reprezentate niște exemple de variații în timp ale distribuției de presiune dezvoltată de unda de șoc, pentru cele două direcții considerate, obținute prin mărirea vitezei de înregistrare. Ele corespund cazului prezentat în figura 4.40.

Experiențele efectuate pe semifabricate reale au dovedit că această distribuție diferențiată de presiune nu duce la modificări semnificative ale adâncimii de ambutisare după cele două direcții. Ca urmare, din punctul de vedere al efectului fizic produs, această distribuție diferențiată se poate înlocui cu o distribuție cu lege de variație constantă pe întreaga suprafață a semifabricatului, egală cu media valorilor maxime ale presiunii, pentru orice rază r_i considerată după cele două direcții.

Utilizându-se seturi de câte 50 de valori ale presiunii măsurate după cele două direcții, cu valori ale parametrilor circuitului de descărcare cuprinse între $U_0 = 20 \div 40 \text{ kV}$, $1 \leq h/l \leq 2,5$, $C = 4 \div 8 \mu\text{F}$, $L = 3,2 \mu\text{H}$, s-au determinat funcțiile de aproximație ale distribuției de presiune pe raza semifabricatului, sub forma unor

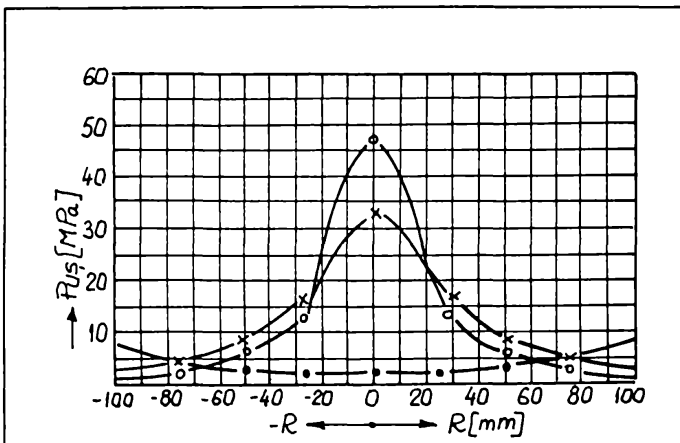


Fig. 4.44. Variația în timp a distribuției de presiune.
 ° - t = 40 μs; x - 80 μs; • - 190 μs.

polinoame de gradul 4, de forma:

$$y = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 + a_3 \cdot x^3 + a_4 \cdot x^4 \tag{4.55}$$

în care: $y = \frac{P}{P_{max}}$ și $x = \frac{r_i}{R}$ iar P și P_{max}

reprezintă presiunea corespunzătoare razei curente considerate r_i și respectiv presiunea maximă în centrul semifabricatului, ambele fiind determinate pe cale experimentală.

Pentru domeniile de valori amintite

mai sus, au rezultat următoarele relații:

- pentru presiunea în direcție longitudinală:

$$\frac{P_{li}}{P_{max}} = 1,037 - 0,359 \cdot \frac{r_i}{R} - 0,601 \cdot \frac{r_i^2}{R^2} - 2,765 \cdot \frac{r_i^3}{R^3} + 2,803 \cdot \frac{r_i^4}{R^4} \tag{4.56}$$

- pentru presiunea în direcție transversală pe axa descărcării:

$$\frac{P_{ti}}{P_{max}} = 1,089 - 3,171 \cdot \frac{r_i}{R} + 2,385 \cdot \frac{r_i^2}{R^2} + 1,292 \cdot \frac{r_i^3}{R^3} - 1,495 \cdot \frac{r_i^4}{R^4} \tag{4.57}$$

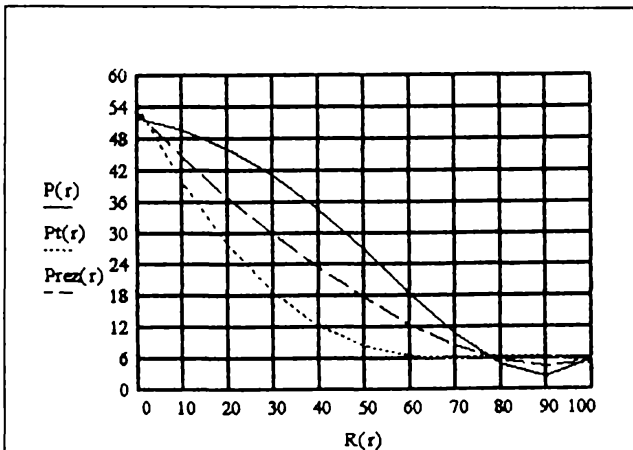


Fig.4.45. Diagramă de aproximare a distribuției de presiune pe raza semifabricatului.

$U_0 = 30840 \text{ V}$; $C = 8 \mu\text{F}$; $l = 50 \text{ mm}$; $h = 80 \text{ mm}$.

- pentru presiunea rezultantă:

$$P_{rezi} = \frac{P_{li} + P_{ti}}{2} \tag{4.58}$$

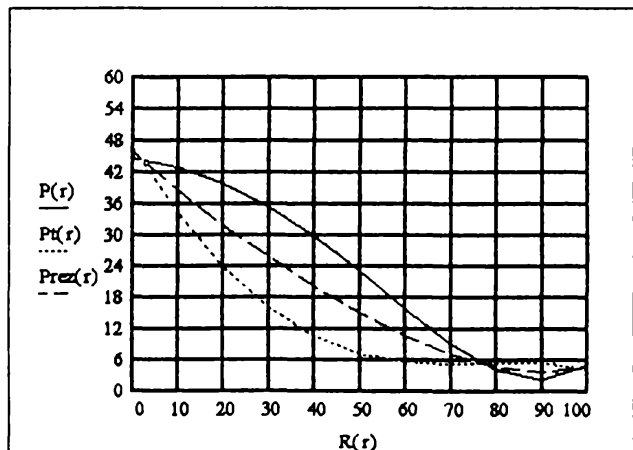
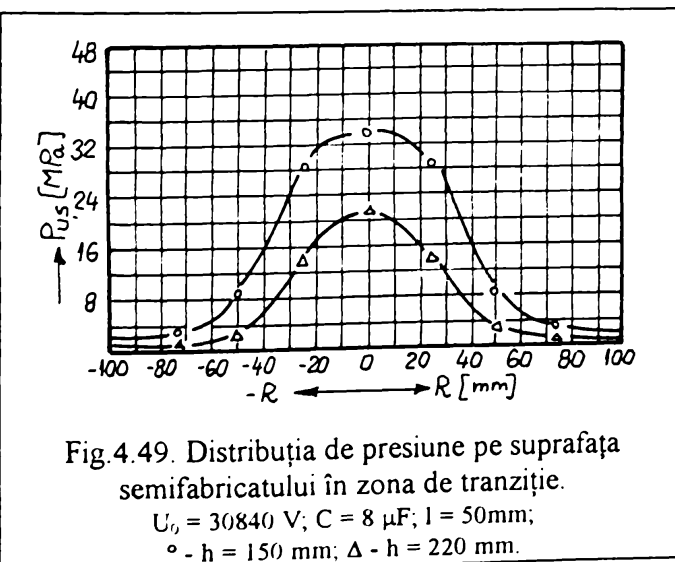
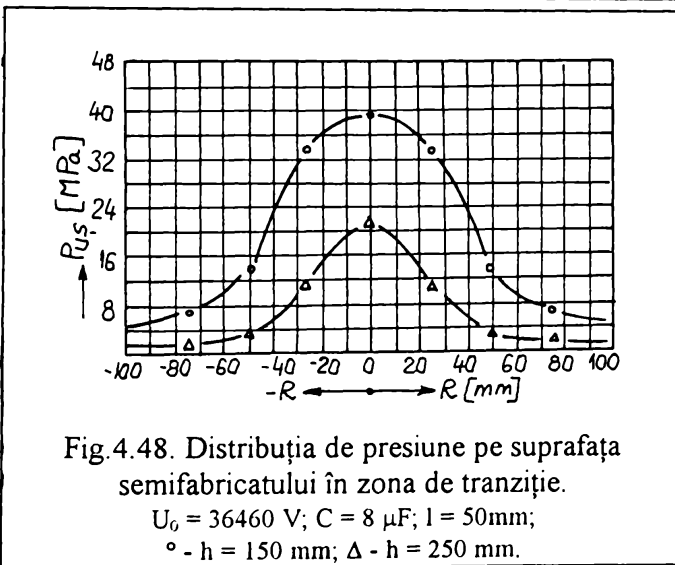
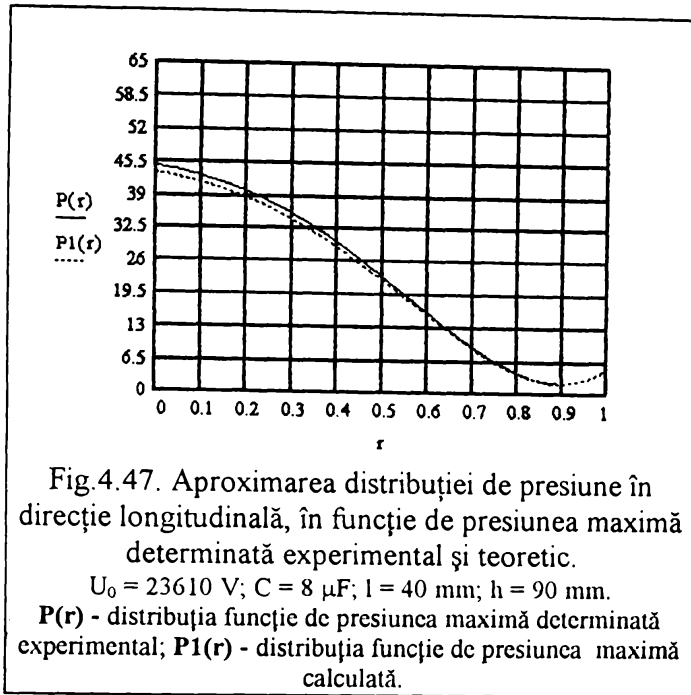


Fig.4.46. Diagramă de aproximare a distribuției de presiune pe raza semifabricatului.

$U_0 = 23610 \text{ V}$; $C = 8 \mu\text{F}$; $l = 40 \text{ mm}$; $h = 90 \text{ mm}$.



Două distribuții de presiune approximate pe baza relațiilor (4.56), (4.57) și (4.58), obținute la diverse combinații ale parametrilor circuitului de descărcare sunt prezentate în figurile 4.45 și 4.46. În aceste diagrame s-au făcut următoarele notații: **P(r)** - presiunea în direcție longitudinală; **Pt(r)** - presiunea în direcție transversală; **Prez(r)** - presiunea rezultantă, toate trei fiind exprimate în MPa; **R(r)** - raza semifabricatului, în mm.

Pentru estimarea distribuției de presiune, în locul lui P_{max} determinat experimental se poate utiliza valoarea presiunii determinată cu relația (4.49), caz în care se va utiliza o corelație de forma:

$$P_{max} = k \cdot P_{u\phi} \quad (4.59)$$

în care $k = 0,8...0,9$ este un coeficient de corecție determinat pe cale experimentală, prin el ținându-se cont de pierderile de presiune datorate undelor reflectate de la semifabricat. Un exemplu de aproximare a distribuției de presiune în direcție longitudinală, în funcție de presiunea maximă determinată experimental și teoretic este prezentat în figura 4.47, abaterile încadrându-se în limitele admise.

Pentru zona de tranziție cilindric-sferic a frontului undei de șoc, se poate considera că are loc o uniformizare a distribuției de presiune pe întreaga suprafață a semifabricatului. Figurile 4.48 și 4.49 reprezintă distribuțiile de presiune pentru două combinații ale parametrilor

circuitului de descărcare, pentru diferite rapoarte h/l , situate spre capetele intervalului de variație a formei frontului undei de șoc. În aceleași condiții de experimentare și de prelucrare a datelor, dar pentru valori ale raportului h/l cuprinse între 2,5 și 5,5, s-a obținut următoarea relație de legătură, pentru aceasta folosindu-se tot ipoteza unui polinom de gradul 4:

$$\frac{P_i}{P_{max}} = 1,027 - 0,128 \cdot \frac{r_i}{R} - 7,067 \cdot \frac{r_i^2}{R^2} + 11,155 \cdot \frac{r_i^3}{R^3} - 4,873 \cdot \frac{r_i^4}{R^4} \quad (4.60)$$

Pentru exemplificare, în figurile 4.50 și 4.51 sunt reprezentate curbele de variație ale presiunii pe raza semifabricatului, trasate pe baza relației (4.60), atât pentru presiunea maximă determinată experimental, cât și pentru cea determinată teoretic cu ajutorul relației (4.51) și corectată cu coeficientul k .

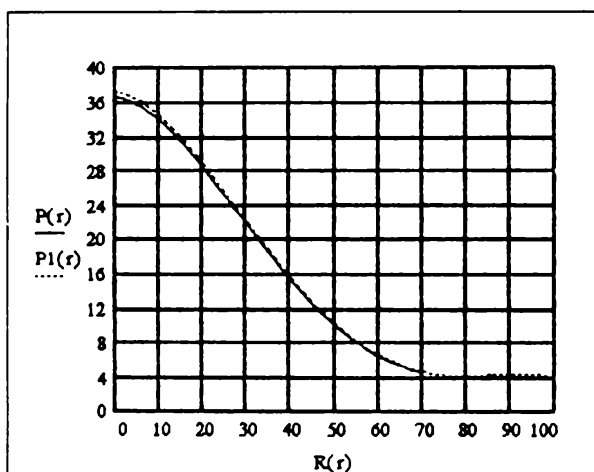


Fig.4.50. Variația teoretică de presiune pe rază, în zona de tranziție.

$P_{max\ real} = 35,7$ MPa; $P_{max\ calc} = 40,3$ MPa
 $U_0 = 39670$ V; $C = 8$ μ F; $l = 60$ mm; $h = 180$ mm.

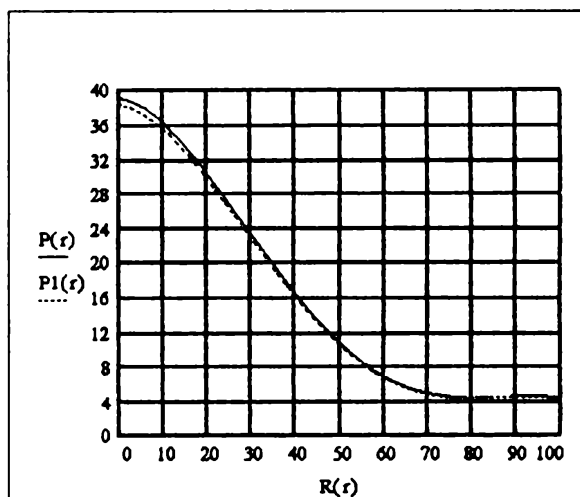


Fig.4.51. Variația teoretică de presiune pe rază, în zona de tranziție.

$U_0 = 36460$ V; $C = 8$ μ F; $l = 50$ mm; $h = 150$ mm.

Pentru zona de simetrie sferică nu s-au constatat diferențe semnificative ale distribuției de presiune față de cea determinată pentru zona de simetrie cilindrică, în direcție transversală pe axa descărcării. În aceste condiții, relația (4.57) se poate utiliza și pentru această zonă, abaterile încadrându-se în limitele admise. În figurile 4.52 și 4.53 sunt trasate diagramele teoretice pentru două combinații ale parametrilor circuitului de descărcare, cu $h/l > 5,5$.

În baza rezultatelor experimentale obținute, se poate spune că, pentru prelucrarea multiimpuls în regim automat nu există diferențe semnificative ale valorilor maxime de presiune și nici ale distribuției acestora pe suprafața semifabricatului (pentru fiecare impuls luat separat) față de prelucrarea monoimpuls, cu excepția cazurilor în care timpul între două descărcări succesive este foarte mic. Explicația acestor abateri (abateri legate, mai ales, de valoarea presiunii maxime) de la

regulile generale constă în modificarea condițiilor de realizare a străpungerii. Astfel, după străpungerea inițială, este nevoie de un anumit timp pentru ca spațiul de apă dintre electrozi să se

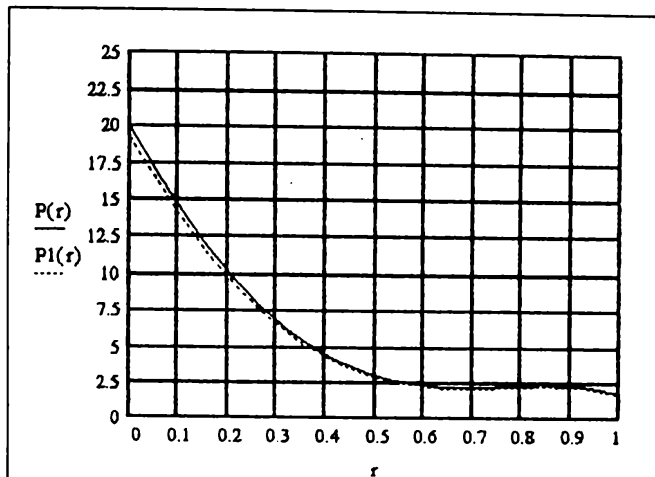


Fig.4.52. Distribuția teoretică de presiune pe rază, în zona de simetrie sferică.

$P_{\max \text{ real}} = 18,5 \text{ MPa}$; $P_{\max \text{ calc}} = 21,98 \text{ MPa}$;
 $U_0 = 39670 \text{ V}$; $C = 8 \mu\text{F}$; $l = 40 \text{ mm}$; $h = 240 \text{ mm}$.

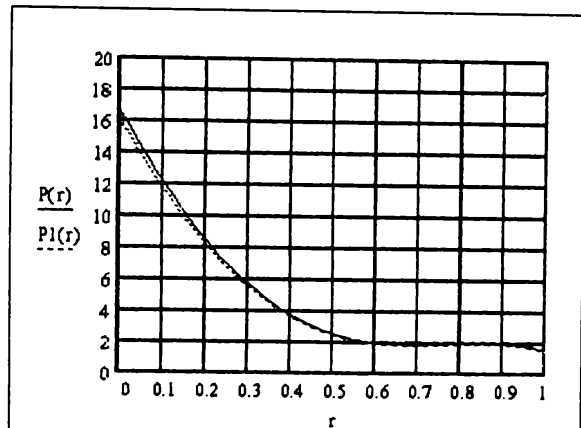


Fig.4.53. Distribuția teoretică de presiune pe rază, în zona de simetrie sferică.

$P_{\max \text{ real}} = 15,3 \text{ MPa}$; $P_{\max \text{ calc}} = 17,4 \text{ MPa}$;
 $U_0 = 30840 \text{ V}$; $C = 8 \mu\text{F}$; $l = 40 \text{ mm}$; $h = 240 \text{ mm}$.

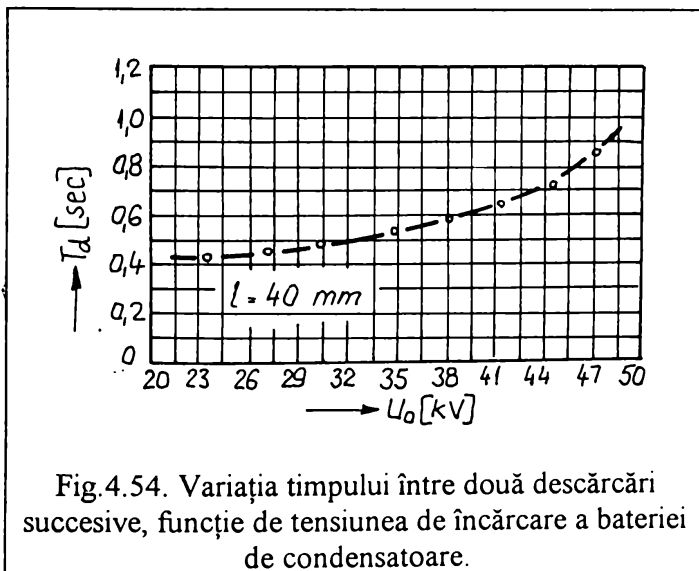


Fig.4.54. Variația timpului între două descărcări succesive, funcție de tensiunea de încărcare a bateriei de condensatoare.

refacă. Dacă timpul între două descărcări succesive (care depinde de durata de încărcare a condensatoarelor) este mai mic decât acest timp de refacere a spațiului dintre electrozi, atunci descărcarea ulterioară se amorsează nu pe un spațiu de apă, ci pe un amestec neomogen de apă și bule de gaz, practic incontrollabil, ceea ce modifică complet condițiile descărcării inițiale. În figura 4.54 este prezentată diagrama de variație a timpilor de

descărcare în funcție de tensiunea de încărcare a bateriei de condensatoare, pentru $l = 40 \text{ mm}$, dar experimentele au demonstrat că, pentru intervalul $l = 20 \dots 80 \text{ mm}$, diferențele sunt nesemnificative (chiar în condițiile în care durata stadiului "preamorsă" este diferită, deoarece aceasta are o pondere foarte mică în intervalul relativ mare de timp considerat).

De remarcat că în timpul experimentelor efectuate în regim multiimpuls nu au fost remarcate condiții preferențiale la care apar aceste devieri de la modul normal de realizare a străpungerii. Ele pot apare atât la distanțe mici între electrozi (regim de scurtcircuit), datorită gradului mare de vaporizare locală a lichidului, cât și la distanțe mari, ca urmare a volumului mare de spațiu de lichid ce trebuie să se refacă.

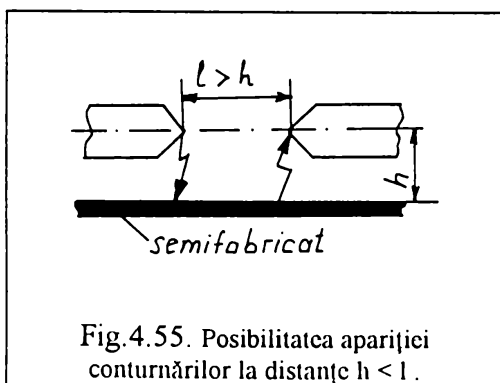
Întrucât la regimul automat multiimpuls nu apar creșteri de presiune de la un impuls la altul, rezultă deci că gradul mai mare de deformare obținut (în raport cu regimul neautomat) se datorează unui alt mecanism, cel mai probabil fiind cel care apare și la ambutisarea succesivă pe prese multipoziționale cu transfer, cu timpi mici între operații.

4.4. Determinarea legăturii dintre presiune și adâncimea de ambutisare.

Determinarea profilului pieselor ambutisate.

Experimentele efectuate pe semifabricate au arătat că, pentru orice combinație a parametrilor electrici ai circuitului de descărcare, efectele maxime asupra adâncimii de ambutisare se obțin la valori ale raportului $1 \leq h/l \leq 2$. Întrucât, din punct de vedere tehnologic, acesta este aspectul de cea mai mare importanță, considerațiile care urmează se limitează la domeniul pe care se respectă inegalitatea de mai înainte. Deasemenea, în alegerea acestui interval s-a ținut cont și de faptul că, la rapoarte $h/l < 1$ apare pericolul conturnării, descărcarea între cei doi electrozi putându-se realiza pe un traseu ce include o porțiune de semifabricat (fig. 4.55). În acest caz, pe suprafața acestuia se pot distinge două urme circulare de arsură, situate la o distanță aproximativ egală cu distanța dintre electrozi.

Pe de altă parte, în acest domeniu de valori a raportului h/l , valoarea raportului P_{max}/P_g se păstrează aproximativ constantă, ceea ce înseamnă că studiul cantitativ al lui s_{max} poate fi făcut considerând doar una dintre componente.



Pe baza diagramelor $s_{max} = f(h)$ se poate trage concluzia conform căreia, pe porțiunile pe care se respectă inegalitatea considerată, variația funcției obiectiv s_{max} poate fi asimilată unei variații liniare, alegându-se ca variabilă de decizie, presiunea maximă P_{max} . Astfel, variația $s_{max} = f(P_{max})$ poate fi exprimată sub forma unei regresii liniare de forma:

$$s_{max} = a_0 + a_1 \cdot P_{max} \quad (4.61)$$

$$\text{sau} \quad s_{max} = a_0 + a_1 \cdot (0,8 \dots 0,9) \cdot P_{uq} \quad (4.62)$$

unde s_{max} în mm, iar P_{max} în MPa.

Astfel, considerând seturi de câte 20 de date experimentale, au fost determinate valorile coeficienților a_0 și a_1 pentru toate cele șase tipuri de materiale utilizate, aceste valori fiind prezentate în tabelul 4.4. Domeniile de variație ale parametrilor descărcării la care se limitează folosirea funcțiilor de regresie liniare determinate sunt : $U_0 = 20 \dots 45 \text{ kV}$, $C = 4 \dots 8 \text{ } \mu\text{F}$, $l = 30 \dots 80 \text{ mm}$, $h =$

30...160 mm , la combinații ale parametrilor geometrici care respectă inegalitatea $1 \leq h/l \leq 2$.

TABELUL 4.4.

Tipul materialului	a_0	a_1
Tablă zincată, $g = 0,5$ mm	- 5,56	0,626
Tablă pentru ambutisare A3 n 02, $g = 0,5$ mm	-12,12	0,727
Tablă zincată, $g = 0,7$ mm	-15,00	0,751
Tablă neagră, $g = 1$ mm	-16,19	0,686
Tablă OL 37, $g = 1,2$ mm	-17,18	0,647
Tablă OL 37, $g = 1,5$ mm	-15,99	0,570

caracterul descărcării fiind modificat substanțial față de regulile stabilite până acum. Fenomenul este cu atât mai evident cu cât crește tensiunea și se micșorează distanța dintre electrozi.

În figura 4.56 a fost trasată dreapta de regresie, împreună cu valorile utilizate pentru trasarea ei, corespunzătoare semifabricatelor din tablă pentru ambutisare A3 n 02. În figurile 4.57 și 4.58 s-au

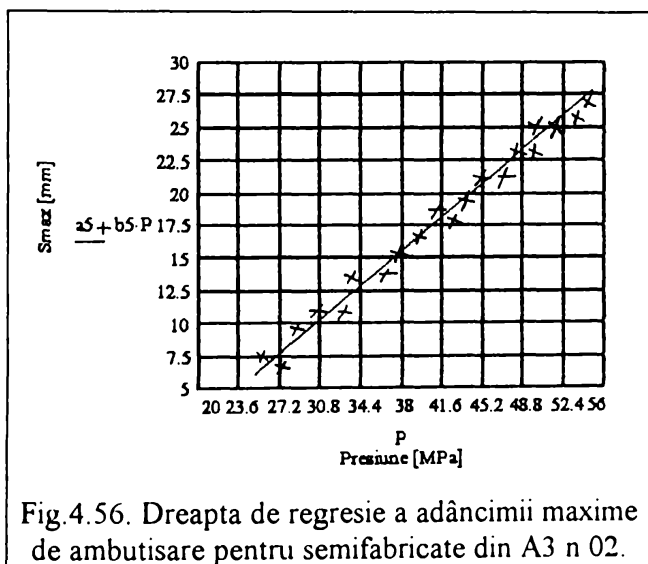


Fig.4.56. Dreapta de regresie a adâncimii maxime de ambutisare pentru semifabricate din A3 n 02.

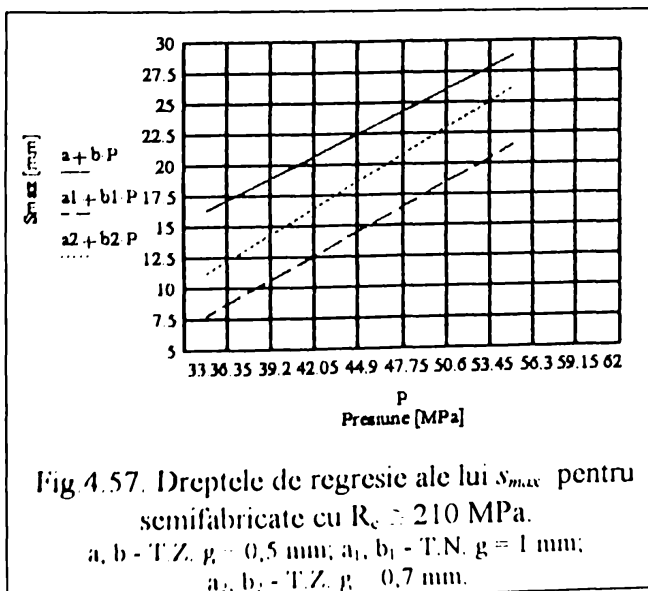
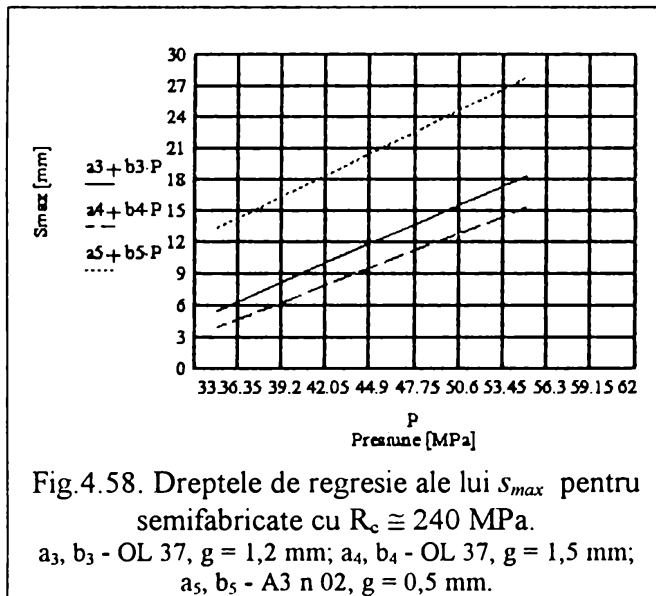


Fig.4.57. Dreptele de regresie ale lui S_{max} pentru semifabricate cu $R_c \geq 210$ MPa.
 a_1, b_1 - T.Z. $g = 0,5$ mm; a_2, b_2 - T.N. $g = 1$ mm;
 a_3, b_3 - T.Z. $g = 0,7$ mm.

Domeniul distanței dintre electrozi ce conține valorile situate sub 30 mm a fost eliminat din studiu, deoarece, așa cum s-a mai precizat, la valori ale tensiunii de peste 30 kV, regimul de descărcare este apropiat de cel de scurtcircuit, cu efecte luminoase și acustice mari, dar aproape nule din punct de vedere tehnologic,

reprezentat dreptele de regresie pentru toate cele 6 tipuri de materiale, grupate trei câte trei, fiecare grupă având aproximativ aceeași limită de curgere, dar grosimi de semifabricat diferite.

Pentru determinarea adâncimilor de ambutisare în lungul razei semifabricatului (profilul piesei) s-a optat tot pentru folosirea datelor experimentale, în scopul găsirii unor funcții polinomiale care să descrie cât mai fidel profilul piesei. Determinarea profilului se poate face fie în funcție de distribuția de presiune pe semifabricat, fie în funcție de S_{max} , ținându-se cont că aceasta este un indicator al distribuției de presiune. Pe de altă parte, relația de legătură dintre profilul piesei și distribuția de presiune (pe semifabricatul plan) ar fi valabilă doar în cazul prelucrării monoimpuls deoarece, după primul impuls, distribuția de presiune se schimbă de la un impuls la altul datorită modificării formei piesei și, evident, a



incidenței unei de șoc. Din acest motiv s-a preferat determinarea profilului în funcție de s_{max} , piesele aflându-se oricum în aceeași zonă de variație a formei frontului unei de șoc.

Astfel, pentru fiecare material s-a căutat o dependență polinomială de gradul trei, sub forma:

$$\frac{s_{max} - s_i}{s_{max}} = a_0 + a_1 \cdot \frac{r_i}{R} + a_2 \cdot \frac{r_i^2}{R^2} + a_3 \cdot \frac{r_i^3}{R^3} \quad (4.63)$$

unde s_i reprezintă adâncimea de ambutisare corespunzătoare razei curente r_i . Astfel,

folosind seturi de câte 80 de valori, prelucrate cu ajutorul programului MATHCAD, au fost determinate următoarele expresii:

- pentru tablă din OL 37 cu $g = 1,5$ mm:

$$\frac{s_{max} - s_i}{s_{max}} = 0,309 \cdot \frac{r_i}{R} - 0,55 \cdot \frac{r_i^2}{R^2} + 1,185 \cdot \frac{r_i^3}{R^3} \quad (4.64)$$

- pentru tablă din OL 37 cu $g = 1,2$ mm și tablă neagră cu $g = 1$ mm:

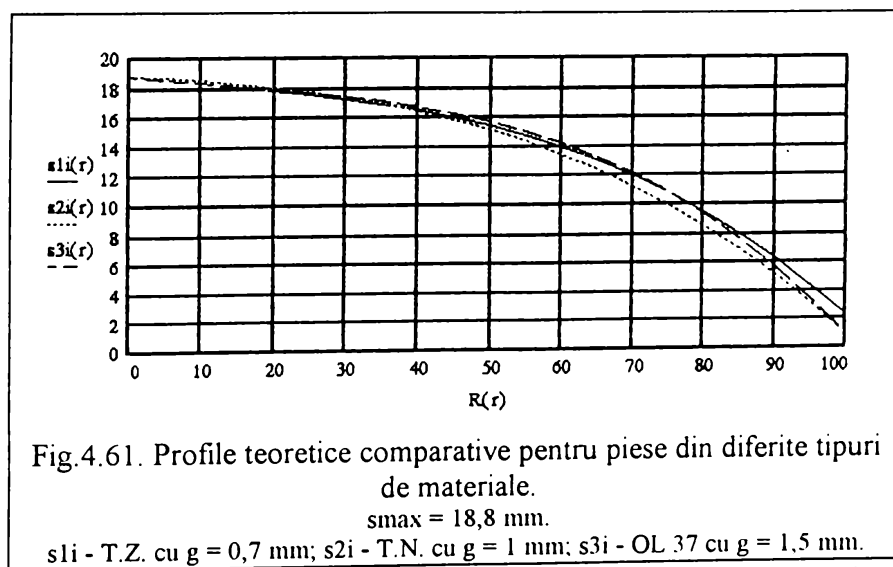
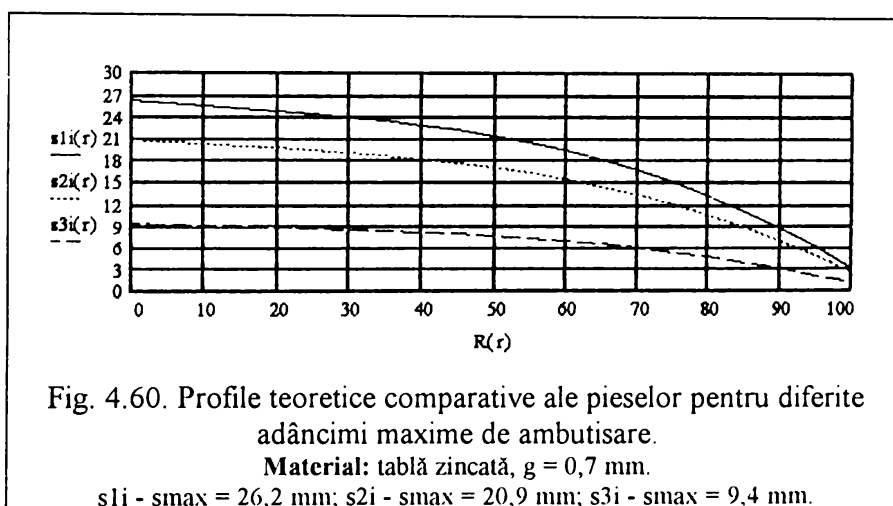
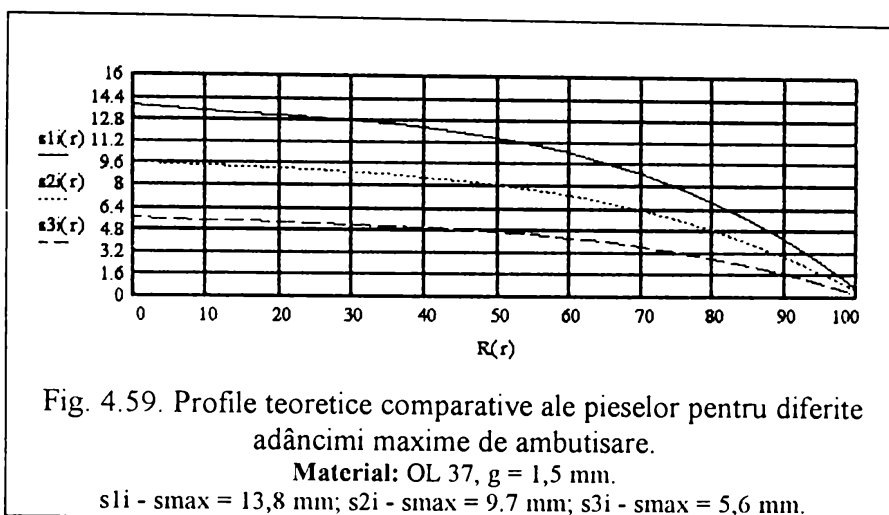
$$\frac{s_{max} - s_i}{s_{max}} = 0,157 \cdot \frac{r_i}{R} + 0,145 \cdot \frac{r_i^2}{R^2} + 0,64 \cdot \frac{r_i^3}{R^3} \quad (4.65)$$

- pentru tablă zincată cu $g = 0,7; 0,5$ mm și tablă pentru ambutisare A3 n 02 cu $g = 0,5$ mm:

$$\frac{s_{max} - s_i}{s_{max}} = 0,29 \cdot \frac{r_i}{R} - 0,298 \cdot \frac{r_i^2}{R^2} + 0,884 \cdot \frac{r_i^3}{R^3} \quad (4.66)$$

În anexa 1 sunt prezentate, pe lângă unele valori ale adâncimii de ambutisare determinate experimental și valorile corespunzătoare calculate cu ajutorul relațiilor de mai sus. Abaterile între valorile măsurate și cele calculate nu depășesc 5 %.

În figurile 4.59 și 4.60 sunt prezentate, comparativ, profilele unor piese cu diferite adâncimi de ambutisare, pentru două tipuri de materiale, profile rezultate din aplicarea dependențelor date mai sus. Se observă modificarea formei piesei ca urmare a creșterii adâncimii maxime de ambutisare, fenomen confirmat și de rezultatele experimentale. Deasemenea, se observă existența zonei cu tendință de aplatizare, mai pregnantă la semifabricate subțiri și la adâncimi mici de ambutisare. În figura 4.61 este trasată dependența teoretică comparativă a profilului pentru piese din trei tipuri de materiale, piesele având aceeași adâncime maximă de ambutisare.



În ceea ce privește prelucrarea multiimpuls, adâncimea maximă de ambutisare este influențată atât de presiunea exercitată pe semifabricat (presiune descrescătoare, datorită creșterii lui h), cât și de fenomenul de formare a cutelor, acest fenomen având ca urmare frânarea deplasării porțiunii de flanșă a semifabricatului.

Pentru fiecare tip de semifabricat s-a determinat domeniul de apariție a blocajului deformării, în cazul în care nici unul dintre parametrii inițiali ai descărcării nu se modifică (binențeles, cu excepția lui h , care suferă o mărire cu valoarea s_{max}). Se consideră domeniu de blocaj, limitele intervalului maxim al numerelor de impulsuri pentru care, oricare ar fi s_{max} al impulsului primar, este îndeplinită inegalitatea:

$$\Delta s_{max\ j+1} - \Delta s_{max\ j} < 1\text{ mm} \quad (4.67)$$

unde $\Delta s_{max\ j+1}$ reprezintă variația adâncimii maxime de ambutisare rezultată în urma impulsului $j+1$, iar $\Delta s_{max\ j}$ reprezintă aceeași variație, dar în urma impulsului j .

Domeniile de blocaj pentru un interval $s_{max} = 5...35\text{ mm}$ sunt prezentate în tabelul 4.5. Pentru fiecare domeniu a fost aleasă o valoare de referință acoperitoare, spre marginea inferioară a acestuia, de la care este posibilă apariția blocajului, valoare de asemenea prezentată în tabelul 4.5 și care reprezintă limita pentru care s-au determinat funcțiile de variație ale adâncimii maxime de ambutisare la prelucrarea multiimpuls.

TABELUL 4.5.

Tip material	Domeniu de blocaj	Valoare de referință
Tablă A3 n 02 cu $g = 0,5\text{ mm}$ și tablă zincată cu $g = 0,5\text{ mm}$	20...27	22
Tablă zincată cu $g = 0,7\text{ mm}$	17...25	18
Tablă neagră cu $g = 1\text{ mm}$	11...20	13
Tablă OL 37 cu $g = 1,2\text{ mm}$	8...13	9
Tablă OL 37 cu $g = 1,5\text{ mm}$	4...9	5

Considerarea acestor domenii de blocaj conduce la economii de energie prin evitarea aplicării impulsurilor cu efect tehnologic mic, chiar dacă, din punctul de vedere al capacității de deformare, mai există mici rezerve neutilizate.

Exprimarea adâncimii de ambutisare în funcție de numărul de impulsuri s-a făcut sub forma unei funcții polinomiale de gradul trei, de forma:

$$\frac{s_{max\ i} - s_{max\ i-1}}{s_{max}} = a_0 + a_1 \cdot i + a_2 \cdot i^2 + a_3 \cdot i^3 \quad (4.68)$$

în care $s_{max\ i}$ reprezintă adâncimea maximă de ambutisare la impulsul i , $s_{max\ i-1}$ reprezintă adâncimea la impulsul $i-1$, iar s_{max} este adâncimea maximă rezultată în urma impulsului primar. Pentru primul impuls, diferențele dintre valorile s_{max} calculate cu relația (4.61) și $s_{max\ 1}$ calculate cu o relație de forma (4.68), pentru $i = 1$ și $\Delta s_{max} = 0$, nu depășesc 4%.

Astfel, au fost determinate următoarele relații de calcul pentru adâncimea maximă de ambutisare în regim multiimpuls, până în momentul apariției blocajului:

- pentru tablă A3 n 02 și tablă zincată cu grosimea de 0,5 mm :

$$\frac{s_{max\ i} - s_{max\ i-1}}{s_{max}} = -0,214 + 0,207 \cdot i - 0,007 \cdot i^2 + 7 \cdot 10^{-5} \cdot i^3 \quad (4.69)$$

- pentru tablă zincată cu grosimea de 0,7 mm:

$$\frac{s_{max\ i} - s_{max\ i-1}}{s_{max}} = -0,2 + 0,185 \cdot i - 0,007 \cdot i^2 + 7 \cdot 10^{-5} \cdot i^3 \quad (4.70)$$

- pentru tablă neagră cu grosimea de 1mm:

$$\frac{s_{max\ i} - s_{max\ i-1}}{s_{max}} = -0,19 + 0,17 \cdot i - 0,008 \cdot i^2 + 8 \cdot 10^{-5} \cdot i^3 \quad (4.71)$$

- pentru tablă din OL 37 cu grosimea de 1,2 mm:

$$\frac{s_{max\ i} - s_{max\ i-1}}{s_{max}} = -0,15 + 0,154 \cdot i - 0,009 \cdot i^2 + 5,9 \cdot 10^{-5} \cdot i^3 \quad (4.72)$$

- pentru tablă din OL 37 cu grosimea de 1,5 mm:

$$\frac{s_{max\ i} - s_{max\ i-1}}{s_{max}} = -0,12 + 0,13 \cdot i - 0,014 \cdot i^2 + 26 \cdot 10^{-5} \cdot i^3 \quad (4.73)$$

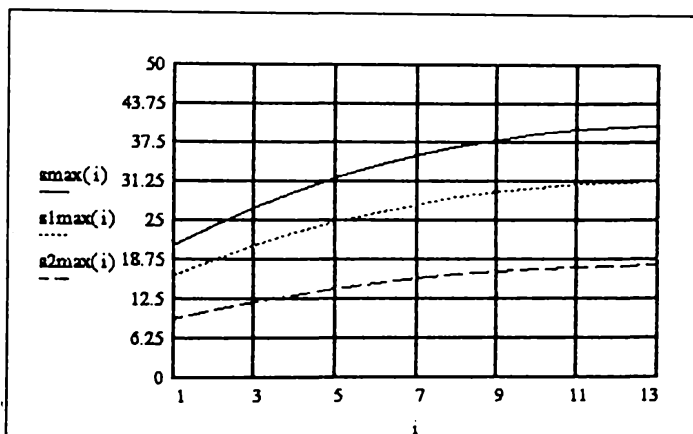


Fig.4.62. Variația adâncimii maxime de ambutisare până la apariția blocajului, la prelucrarea multiimpuls. T.N. $g = 1 \text{ mm}$; $s_{max} = 21,6 \text{ mm}$; $s1_{max} = 16,8 \text{ mm}$; $s2_{max} = 9,6 \text{ mm}$.

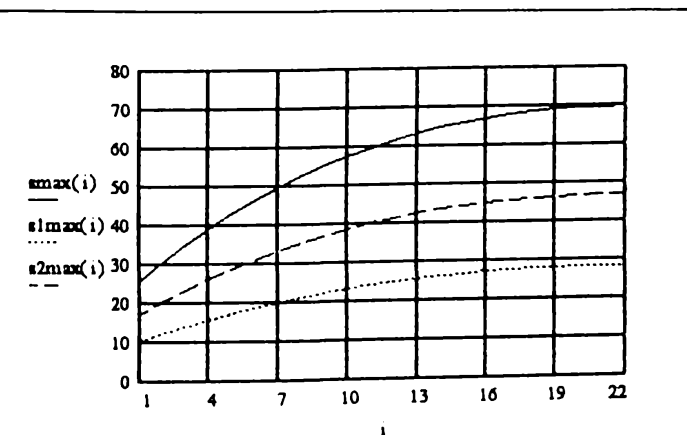


Fig. 4.63. Variația adâncimii maxime de ambutisare până la apariția blocajului, la prelucrarea multiimpuls. A3 n 02, $g = 1 \text{ mm}$; $s_{max} = 25,9 \text{ mm}$; $s1_{max} = 10,5 \text{ mm}$; $s2_{max} = 17,4 \text{ mm}$.

În figurile 4.62 și 4.63 sunt prezentate variațiile adâncimii maxime de ambutisare la prelucrarea multiimpuls, pentru două tipuri de materiale, pornind de la diferite valori ale lui s_{max} primar. Figura 4.64 reprezintă aceeași dependență, dar se compară trei materiale diferite, pornind de la aceeași valoare a lui s_{max} . În figura 4.65 au fost evidențiate și unele valori experimentale, corespunzătoare curbelor teoretice reprezentate.

Pentru prelucrarea multiimpuls în regim automat, datele experimentale indică că, față de regimul neautomat pentru care au fost determinate relațiile de mai sus, se poate conta pe o creștere procentuală a lui $s_{max\ i}$ cu valori cuprinse între 10% și 25%.

Determinarea profilului piesei ambutisate în regim multiimpuls se poate face cu relațiile prezentate la regimul monoimpuls, întrucât diferențele sunt neesențiale.

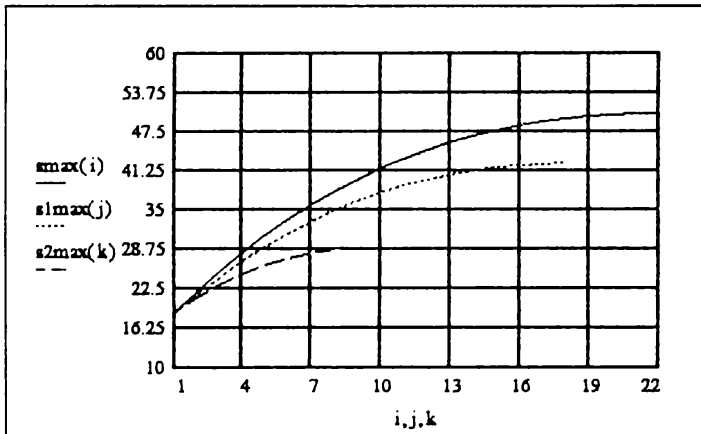


Fig.4.64. Variația adâncimii maxime de ambutisare până la apariția blocajului, la prelucrarea multiimpuls. $S_{max} = 18,7 \text{ mm}$; $s_{max} - A3 \text{ n } 02, g = 0,5 \text{ mm}$; $s_{1max} - T.Z., g = 0,7 \text{ mm}$; $s_{2max} - OL 37, g = 1,2 \text{ mm}$.

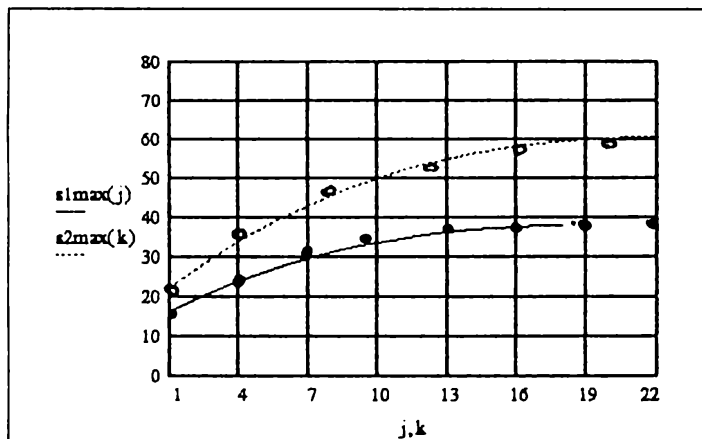


Fig.4.65. Variația adâncimii maxime de ambutisare până la apariția blocajului, la prelucrarea multiimpuls. $s_{1max} - T.Z., g = 0,7 \text{ mm}$, cu $s_{max} = 16,7 \text{ mm}$; $s_{2max} - T.Z., g = 0,5 \text{ mm}$, $s_{max} = 22,5 \text{ mm}$.

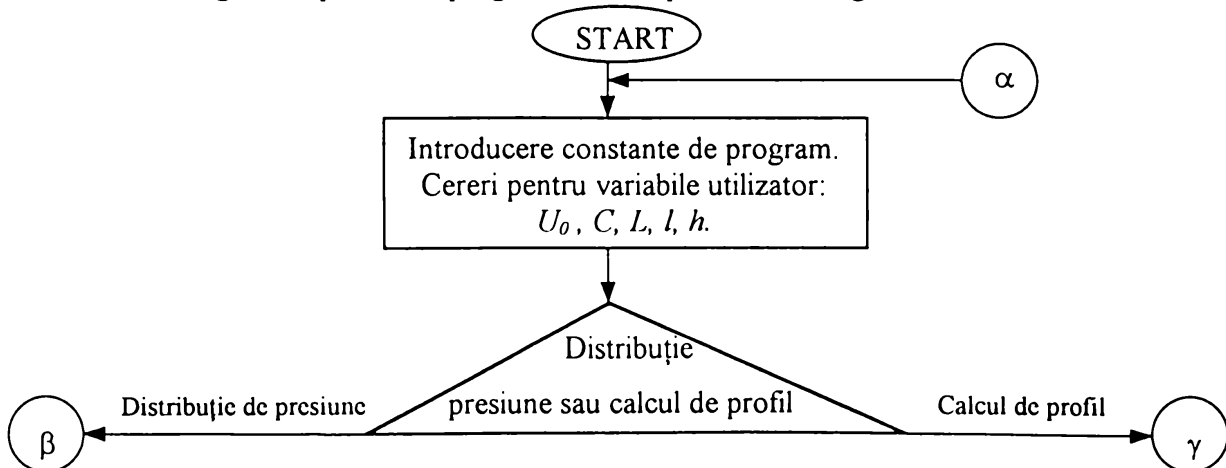
4.5. Schema logică a programului de simulare a desfășurării procesului de ambutisare

Pe baza relațiilor de calcul ale variației parametrilor electrici ai canalului de descărcare, presiunii dezvoltate în camera de descărcare, distribuției de presiune pe semifabricat, adâncimii maxime de ambutisare în regim mono și multiimpuls și ale profilului piesei rezultate în urma operației de ambutisare s-a realizat un program de simulare a modului de desfășurare a procesului de ambutisare, pentru toate cele șase tipuri de materiale utilizate. Acest program, scris în limbaj Borland PASCAL 7.0 este prezentat în anexe, el putându-se constitui într-un model incipient pentru ulterioare abordări ale temei prezentei teze.

Restricțiunile la adâncimea maximă de ambutisare și la profilul piesei sunt date de punctele de profil s_i corespunzătoare

razelor curente r_i ale formei matriței folosite. Piesele cu forme de revoluție cărora le este destinat programul de calcul și reprezentare grafică sunt redată în figura 4.67.

Schema logică simplificată a programului este prezentată în figura 4.66.



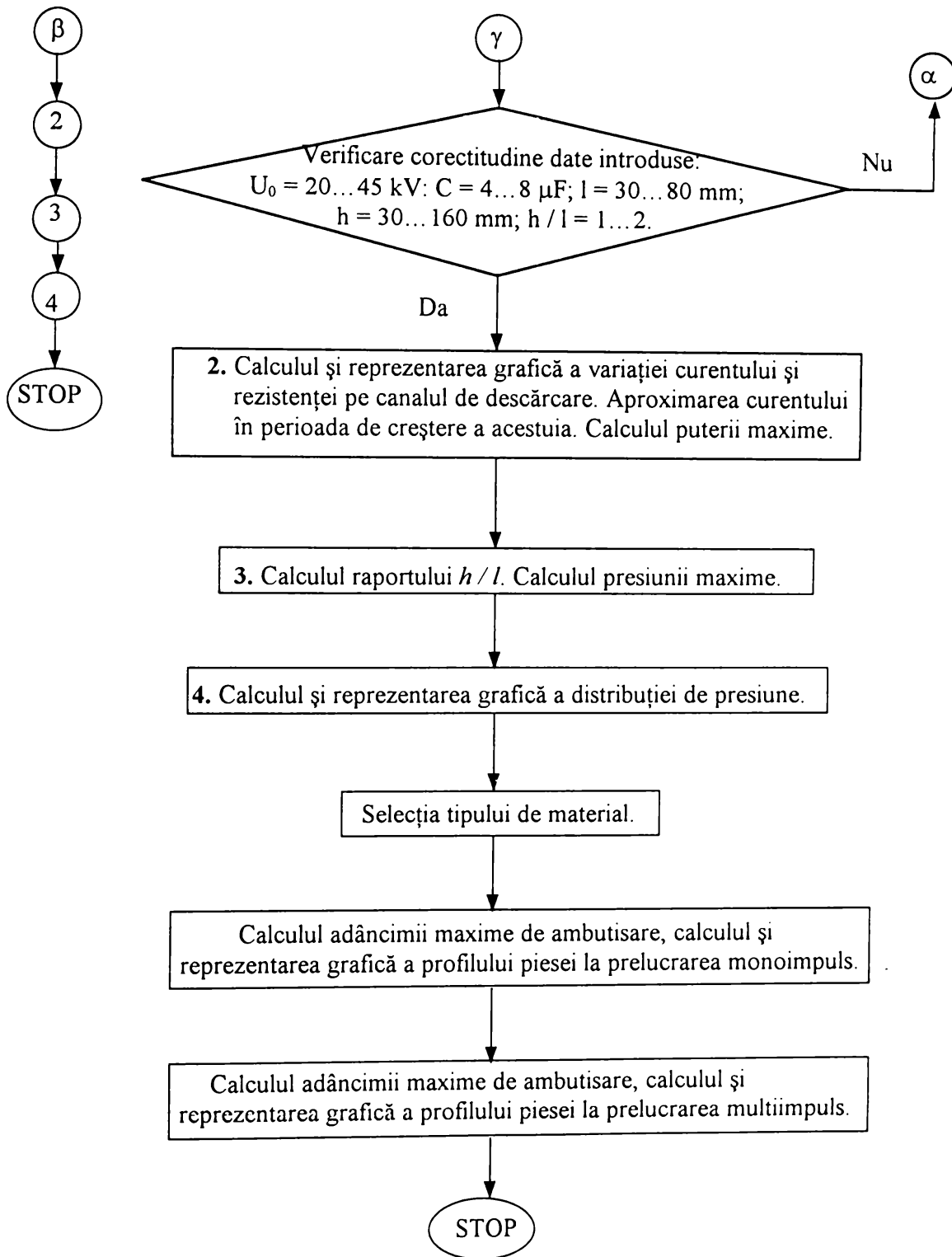


Fig. 4.66. Schema logică simplificată a programului de simulare a desfășurării procesului de ambutisare prin electrohidroimpulsuri.

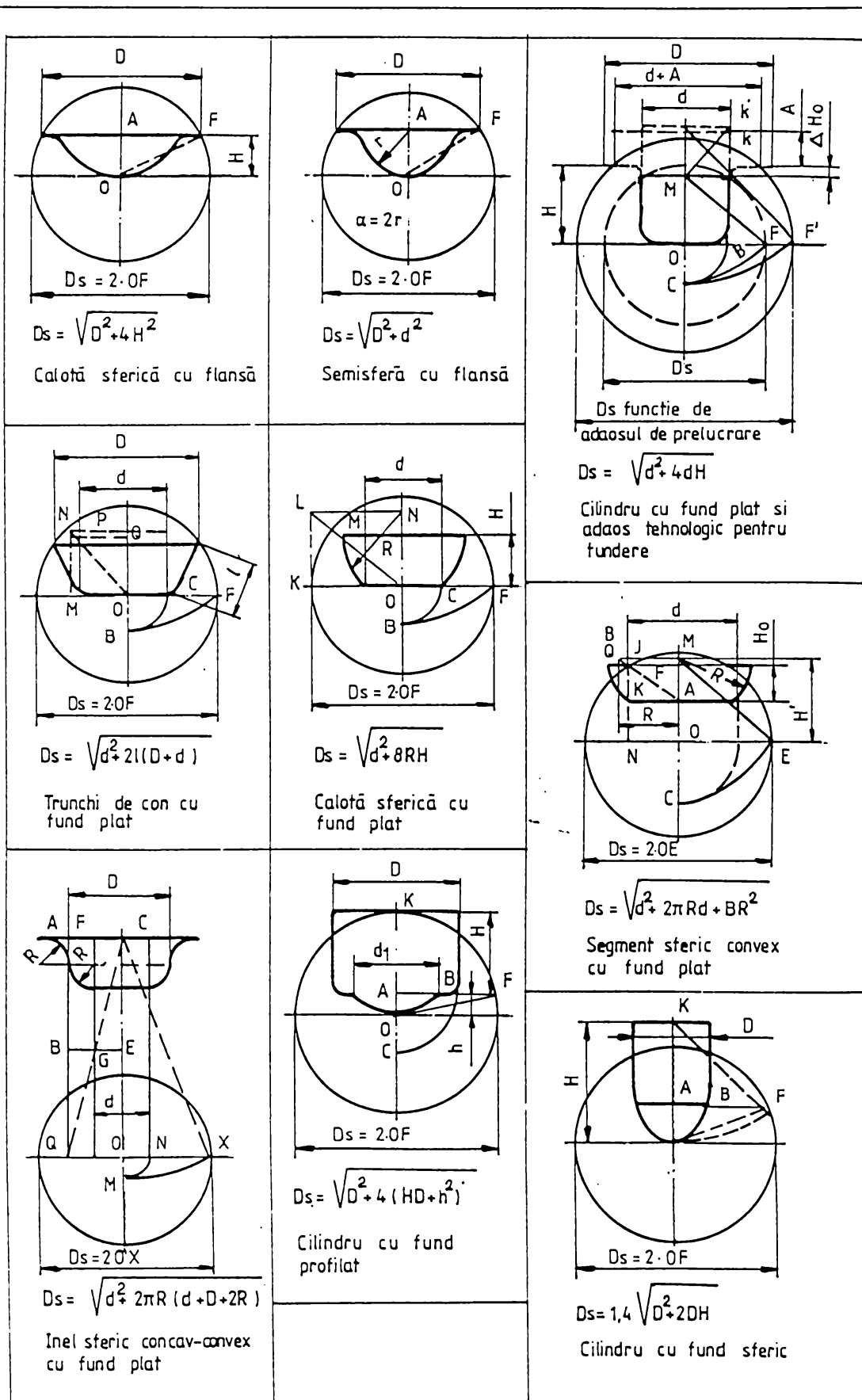


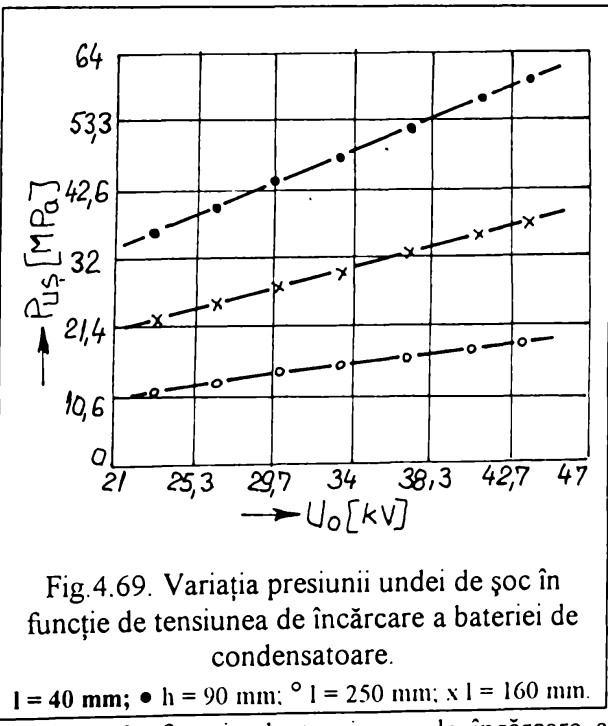
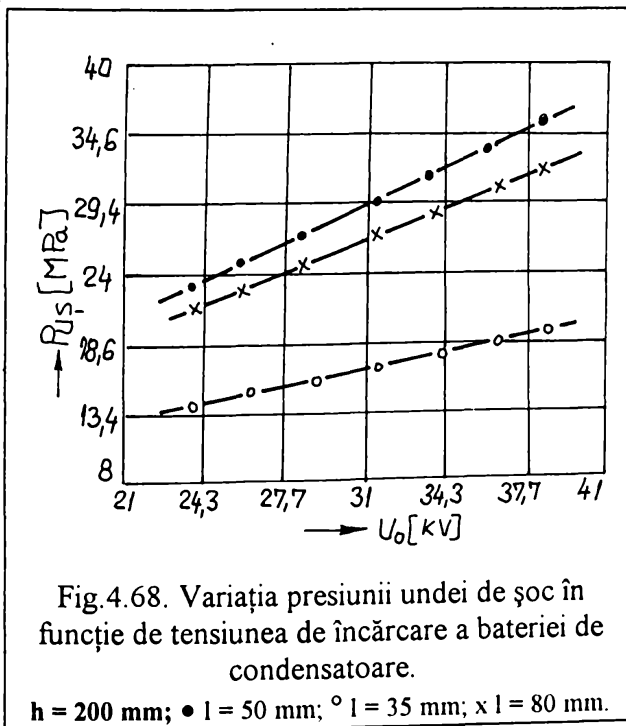
Fig.4.67. Tipuri de piese ambutisate cu forme de revoluție, realizabile prin deformare plastică cu ajutorul electrohidroimpulsurilor.

4.6. Influența diferiților factori asupra presiunii dezvoltate în camera de descărcare cilindrică

Sunt cunoscute studiile efectuate asupra parametrilor care influențează mărimea și distribuția presiunii în camera de descărcare, pentru tensiuni de descărcare sub 15 kV, dintre care cele mai importante au fost prezentate în capitolul 1. Pentru tensiuni înalte însă, studiile sunt în număr foarte mic și, în mare măsură, incomplete sau contradictorii.

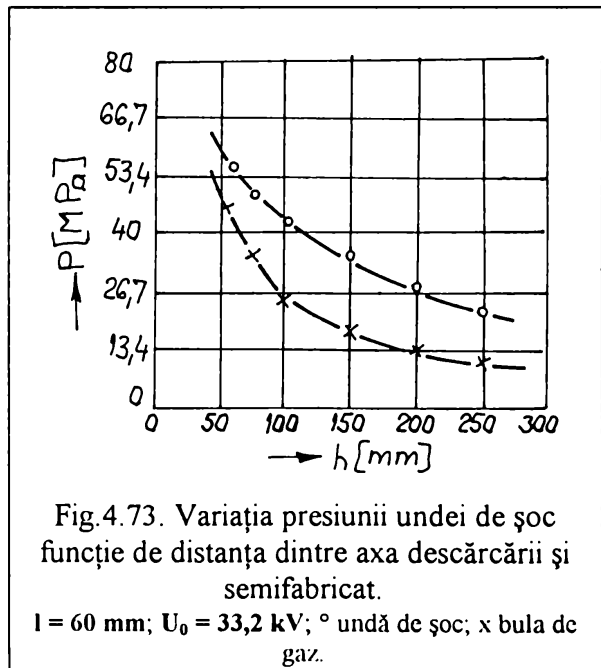
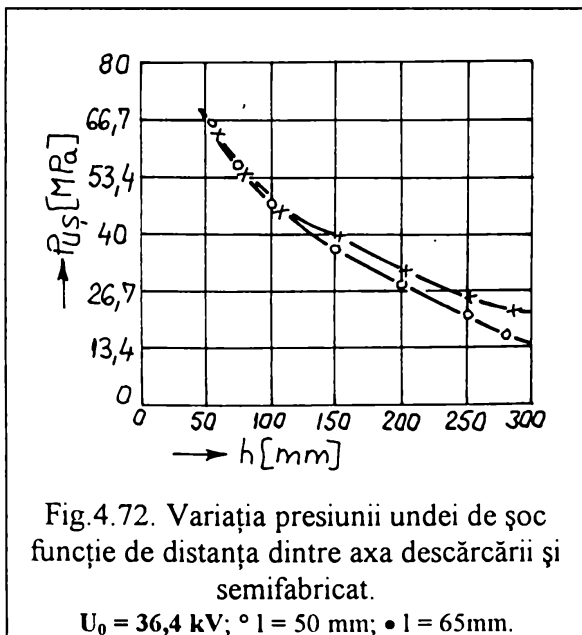
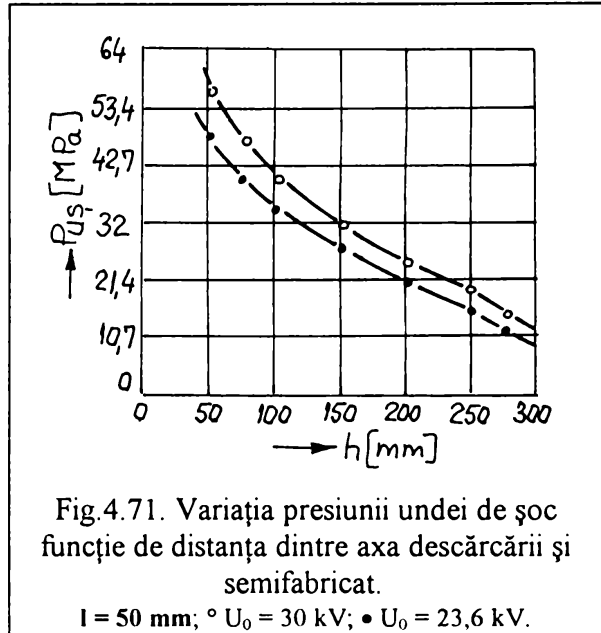
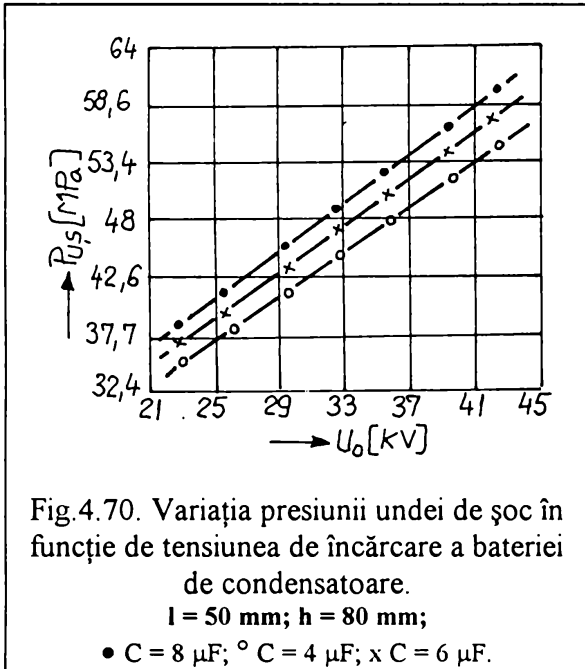
Din acest motiv, pentru tensiuni de descărcare cuprinse între 20÷50 kV, au fost supuși unui studiu de influență acei parametri care, din punct de vedere tehnologic, prezintă cea mai mare importanță și care, prin construcția utilajului de deformare, se pot regla în anumite limite. Acești parametri sunt:

- tensiunea de încărcare a bateriei de condensatoare;
- capacitatea bateriei de condensatoare;
- distanța dintre electrozi și distanța dintre axa descărcării și semifabricat;
- diametrul, lungimea și configurația plană sau spațială a firului de amorsare, pentru conductoare din cupru;
- materialul, forma și diametrul electrozilor utilizați la descărcarea cu străpungerea directă a spațiului de descărcare.

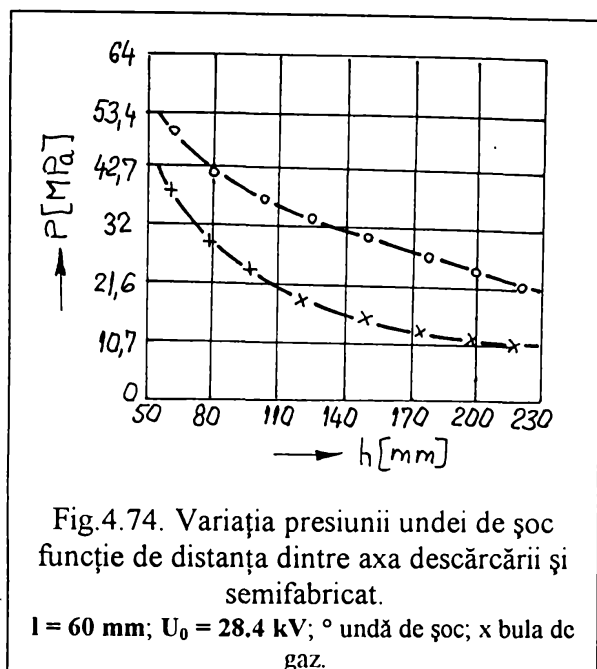


În ceea ce privește variația presiunii undei de șoc în funcție de tensiunea de încărcare a bateriei de condensatoare, aceasta a fost reprezentată în figurile 4.68 și 4.69, pentru diferite

combinații ale parametrilor circuitului de descărcare, la o capacitate de $8 \mu\text{F}$. După cum se observă, variația este aproximativ liniară pentru domeniul de tensiuni considerat deși, în anumite condiții, ea se poate abate de la această regulă. Astfel, aceste abateri apar pentru distanțe mici între electrozi și tensiuni mari ($l < 30 \text{ mm}$ și $U_0 > 30 \text{ kV}$), deoarece descărcarea se apropie de regimul de scurtcircuit, precum și în domeniul distanțelor mari între electrozi și tensiunilor mici ($l > 80 \text{ mm}$ și $U_0 < 25 \text{ kV}$),



datorită pierderilor mari de energie din perioada stadiului "preamorsă". Din acest motiv, aplicarea relațiilor de calcul ale presiunii trebuie făcută cu atenție, identificând cauzele eventualelor diferențe mai mari decât cele date de coeficientul $k = 0,8 \dots 0,9$.



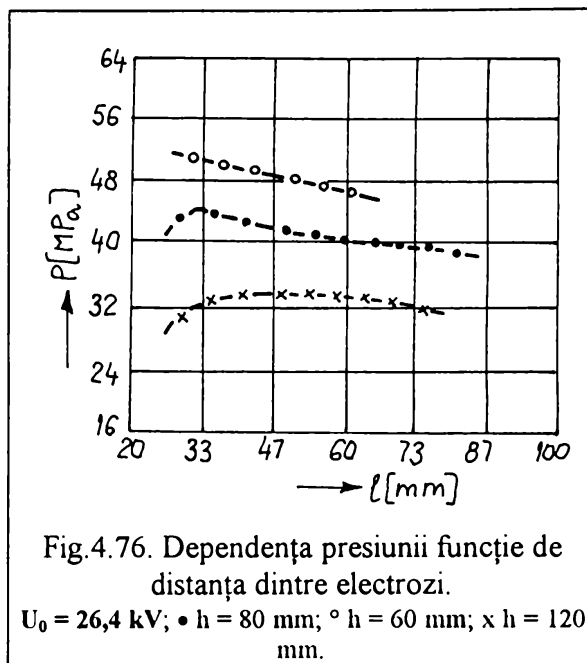
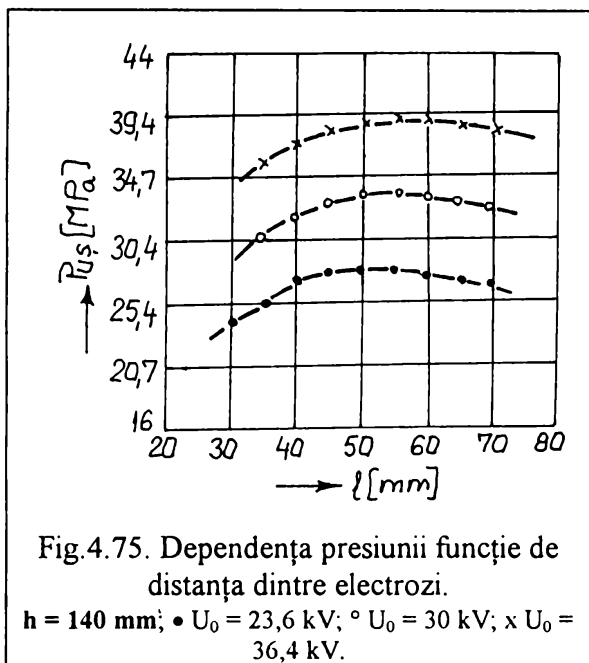
În figura 4.70 sunt prezentate graficele de variație ale presiunii funcție de tensiune, pentru trei valori ale capacității bateriei de condensatoare. Varierea capacității s-a făcut prin conectarea sau deconectarea unor grupuri de câte două condensatoare din componența generatoarelor. De remarcat faptul că, o dată cu modificarea capacității are loc, implicit, și o modificare a inductanței circuitului de descărcare, datorită modificării componenteii acesteia corespunzătoare inductanțelor proprii ale condensatoarelor. Oricum, pentru plaja de valori considerate a lui C , pierderea de presiune datorată scăderii capacității are efect predominant

față de câștigul de presiune datorat scăderii inductanței totale a circuitului de descărcare.

Variația presiunii funcție de distanța h dintre axa descărcării și semifabricat este prezentată în figurile 4.71 și 4.72, la diferite valori ale tensiunii și distanței dintre electrozi. Se observă astfel influența mult mai puternică a modificării tensiunii, față de cea a distanței dintre electrozi, asupra presiunii în unda de șoc. Influența acestei distanțe este mai pregnantă la distanțe h mari, datorită modificării formei frontului undei de șoc și a atenuării mai rapide a presiunii la distanțe l mai mici. În legătură cu acest din urmă aspect, este de remarcat modificarea caracterului influenței distanței dintre electrozi la tensiuni înalte, față de caracterul manifestat la tensiuni relativ joase, unde presiunea urmărește mult mai rapid modificarea acestui parametru. Deasemenea, se observă variația cvasiliniară a P_{us} pentru rapoarte $h/l = 1 \dots 2$, justificând astfel considerațiile făcute la calculul adâncimii maxime de ambutisare.

În figurile 4.73 și 4.74 au fost reprezentate comparativ presiunile în unda de șoc și bula de gaz, pentru două valori ale tensiunii de încărcare a bateriei de condensatoare. Odată cu creșterea tensiunii, la aceleași valori ale distanței dintre electrozi, presiunea bulei de gaz tinde să devină comparabilă cu cea a undei de șoc. Aceasta explică creșterea puternică a valorilor lui s_{max} pentru distanțe $h \approx (1 \dots 1,3) \cdot l$.

Referitor la dependența presiunii de distanța dintre electrozi l , se remarcă și pentru acest domeniu al tensiunilor înalte existența unor valori optime ale lui l , pentru care presiunea are valori maxime. Dar, datorită dependenței lente a presiunii de distanța l , se poate trage concluzia că, din punct de vedere tehnologic, este mai corect să se vorbească de un domeniu al valorilor optime, decât de o valoare unic determinată.



Pentru a se estima, într-o primă aproximație, valoarea optimă a distanței între electrozi, se poate studia la extrem relația de calcul a presiunii corespunzătoare zonei de tranziție cilindric-sferic a frontului undei de șoc, obținându-se astfel:

$$l_{opt} = 0,28 \cdot \sqrt{\frac{U_0 \cdot h}{A^{1/2}}} \cdot (L \cdot C)^{1/8} \quad (4.74)$$

Experiențele au arătat însă că, față de această valoare calculată, diferențele de presiune care apar pentru intervalul,

$$l_{opt} = (0,26 \div 0,31) \cdot \sqrt{\frac{U_0 \cdot h}{A^{1/2}}} \cdot (L \cdot C)^{1/8} \quad (4.75)$$

sunt relativ mici, nedepășind 6%. Astfel, relația (4.74) se poate utiliza cu suficientă precizie la calculul estimativ al distanței optime între electrozi, pentru care se obține amplitudinea maximă a presiunii pe frontul undei de șoc. Pentru instalațiile industriale ce lucrează în regim multiimpuls automat, existența plajei de valori dată de relația (4.75) este benefică, întrucât ea oferă o rezervă de uzură destul de mare electrozilor până când, datorită depășirii limitei superioare a distanței dintre electrozi va fi necesară fie schimbarea electrozilor, fie reajustarea acestei distanțe.

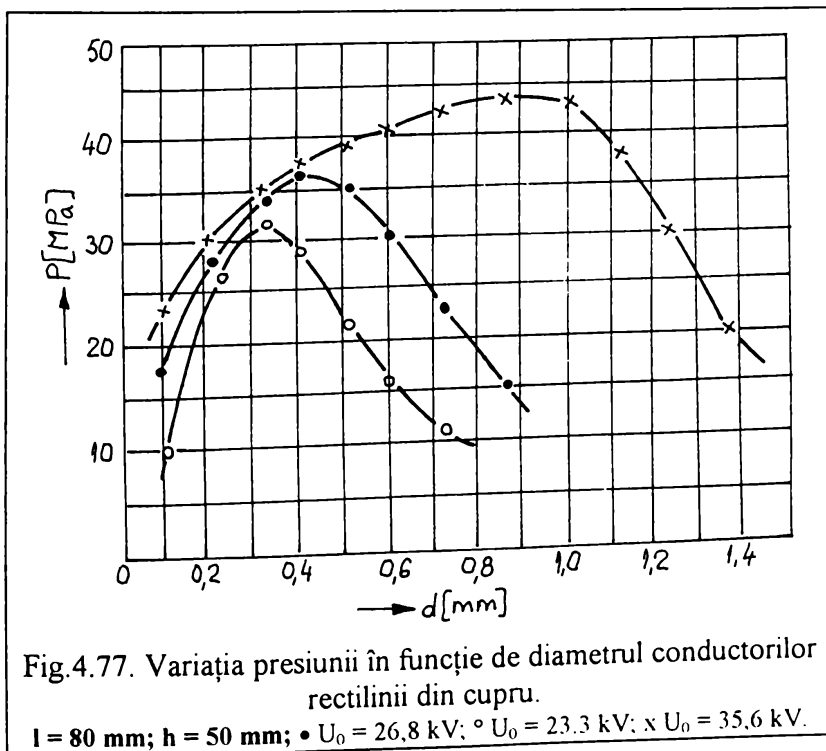
În figurile 4.75 și 4.76 sunt prezentate dependențele presiunii de distanța dintre electrozi, la diferite combinații ale parametrilor circuitului de descărcare. În condițiile păstrării la valori constante ale celorlalți parametri, atât creșterea tensiunii, cât și creșterea distanței dintre axa descărcării și semifabricat duc la creșterea distanței optime între electrozi. Este de menționat însă că această valoare optimă poate fi atinsă destul de greu datorită interdependențelor dintre cei trei parametri: tensiune - distanță între electrozi - distanța semifabricatului față de axa descărcării și a unei duble impuneri de condiții restrictive asupra distanței dintre electrozi. Astfel, lucrul cu tensiuni mari impune

alegerea unor distanțe relativ mari între electrozi, pentru evitarea descărcării în regim de scurtcircuit, pe când distanțele mici dintre axa descărcării și semifabricat impun distanțe și mai mici între electrozi, pentru evitarea conturnărilor.

Pe de altă parte, existența celui de-al doilea impuls de presiune asupra semifabricatului, datorat bulei de gaz, duce la necesitatea adoptării unor corecții care să ia în considerare faptul că valoarea impulsului secundar de presiune are valori maxime la distanțe minime de axa descărcării (aceste distanțe minime neputând fi mai mici decât distanța dintre electrozi, din cauza pericolului de conturare), precum și de faptul că presiunea bulei de gaz crește cu creșterea tensiunii. Astfel, în urma experimentelor efectuate în domeniul $U_0 = 20 \dots 45 \text{ kV}$, $l = 30 \dots 80 \text{ mm}$, $h = 30 \dots 160 \text{ mm}$, cu $h/l = 1 \dots 2$, se recomandă, pentru valoarea obținută cu relația (4.47), înmulțirea cu un coeficient de corecție $k_l = (1,4 \dots 1,7)$. Limita inferioară se adoptă pentru tensiuni scăzute și valori ale raportului h/l apropiate de 2, iar limita superioară pentru tensiuni mari și valori ale raportului apropiate de 1. Deasemenea, dacă rezistența specifică a apei este sub $15 \Omega \cdot \text{m}$, atunci este indicat ca lungimea spațiului de descărcare să fie aleasă spre limita inferioară a intervalelor care, din punct de vedere

TABELUL 4.6.

Tensiune [kV] ⇒ Distanța față de axa descărcării [mm] ↓	22,6...28,4	28,5...34,8	34,9...44,4
30...70	1,47...1,51	1,52...1,62	1,62...1,7
70...110	1,45...1,48	1,48...1,51	1,57...1,61
110...160	1,41...1,44	1,43...1,47	1,52...1,57



tehnologic, duc la aceleași rezultate. Valoarea cea mai apropiată de realitate se determină prin încercări, în funcție de construcția camerei de descărcare și a sistemului de electrozi.

Pentru camera de descărcare cilindrică se recomandă valorile din tabelul 4.6.

În ceea ce privește descărcarea prin inițiere cu fir exploziv, este de menționat de la început faptul că, în raport cu descărcarea prin străpungere directă, aceasta nu duce în mod implicit și la o creștere a presiunii unde de șoc, ci mai mult la o stabilizare a descărcării, ceea ce mărește

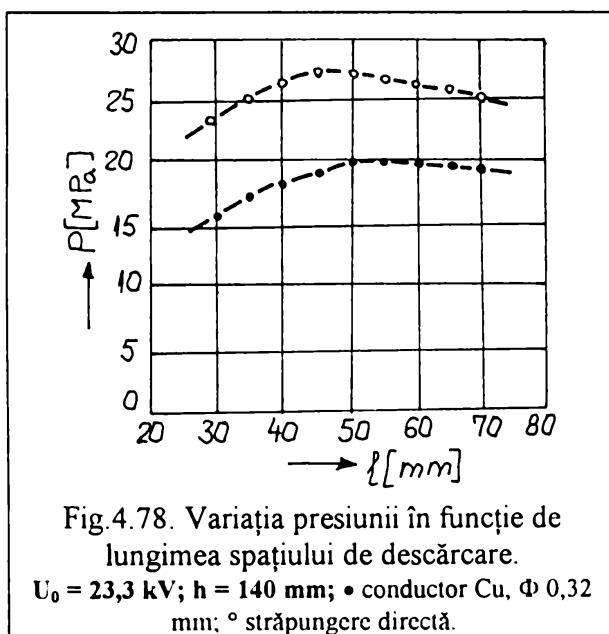
atât capacitatea de reproductibilitate, cât și gradul de predictibilitate al procesului. Pe lângă aceasta, existența punții conductoare între electrozi elimină pericolul conturnării, ceea ce are ca rezultat posibilitatea coborârii valorii raportului h/l sub valoarea unitară ($h/l < 1$). Acest aspect este de mare importanță, întrucât este singurul mod în care se pot obține presiuni comparabile cu cele de la descărcările cu străpungerea directă a spațiului dintre electrozi. În general, la aceleași condiții de experimentare, presiunea obținută prin inițiere reprezintă aproximativ 70% din cea obținută prin străpungere directă. Explicația constă în consumul mai mare de energie în perioada de dinaintea formării canalului de descărcare, atât pentru topirea cât și pentru vaporizarea firului (sublimare). În figura 4.77 este prezentată variația presiunii funcție de diametrul unor conductoare rectilinii din Cu, pentru diferite tensiuni de încărcare a bateriei de condensatoare.

Din diagrama prezentată rezultă că principiul cunoscut al diametrului optim al fuzibilului se păstrează și în domeniul tensiunilor înalte, valoarea optimă a diametrului crescând odată cu creșterea tensiunii sau a energiei descărcării. Estimarea valorii maxime a presiunii se poate face în mod similar cu străpungerea directă, ținând cont de schimbarea valorii caracteristicii scânteii.

În ceea ce privește lungimea optimă a firului, experiențele efectuate cu valori ale parametrilor descărcării în aceleași domenii utilizate la străpungerea directă au demonstrat că aceasta crește cu

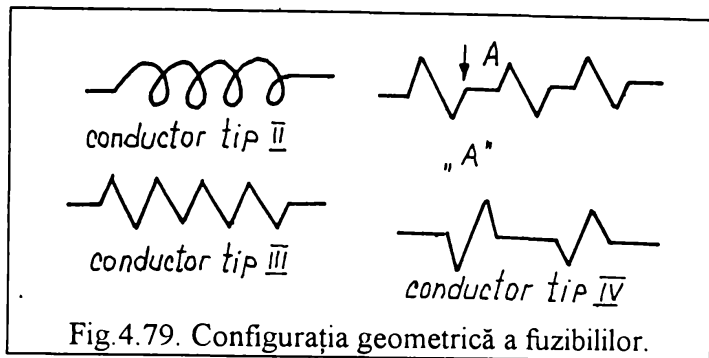
TABELUL 4.7.

Tensiune [kV] ⇒	22,6...25,0	25,1...28,4	28,5...31,6	31,7...34,8	34,9...38,0	38,1...41,2
Diametrul optim [mm]	0,25...0,35	0,4...0,5	0,5...0,6	0,75...0,85	0,9...1	1...1,2
Creșterea procentuală a lungimii optime [%]	12...13	14...15	15...16	16...17	17...18	18...19



aproximativ 10 ... 20 % (față de distanța optimă între electrozi la descărcarea liberă). Pentru exemplificare se prezintă diagrama din figura 4.78. Procentul de creștere este mai mare la tensiuni mai mari. În tabelul 4.7 sunt indicate intervalele diametrelor optime ale fuzibililor și creșterea procentuală a lungimii optime a acestora față de cele ale descărcării cu străpungere directă.

Deși din punct de vedere al utilizării industriale nu prezintă prea mare interes, întrucât construcția unor sisteme de avans automat adaptate acestor configurații de fuzibili este foarte



greoaie, s-au studiat totuși, comparativ, trei tipuri de configurații plane sau spațiale ale firului inițiator din Cu. Acestea sunt prezentate în figura 4.79 (conductorul de tip I este considerat a fi cel liniar). Fiecare dintre ele sunt definite de anumiți parametri geometrici (lungimea desfășurată a firului, pasul dintre spire sau zig-zag-uri, diametrul spirei sau înălțimea zig-zag-ului, numărul de spire sau zig-zag-uri , etc.).

Pentru aceleași domenii de valori ale parametrilor circuitului de descărcare, compararea efectelor s-a făcut pentru următoarea condiție: lungime desfășurată egală a conductoarelor, ceea ce, în condițiile păstrării caracteristicilor geometrice ale formei, duce la micșorarea distanței dintre electrozii suport la firul cu configurație oarecare față de cel liniar.

Studiul a fost efectuat pentru două variante dimensionale de configurații, prezentate în figura 4.80. Pentru conductorul de tip IV s-au utilizat aceleași dimensiuni ca și la conductorul de tip III.

Experimentele efectuate cu respectarea condiției precizate, în gama de valori ale lungimilor

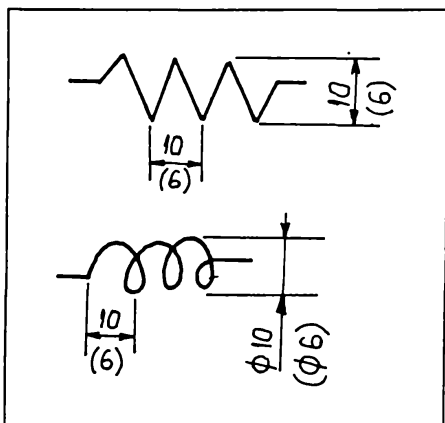


Fig.4.80. Variante dimensionale ale configurației geometrice.

desfășurate $l_d = 55 \dots 165 \text{ mm}$, au arătat că posibilele creșteri de presiune sunt mici și nu ar justifica costurile necesare introducerii acestor variante în

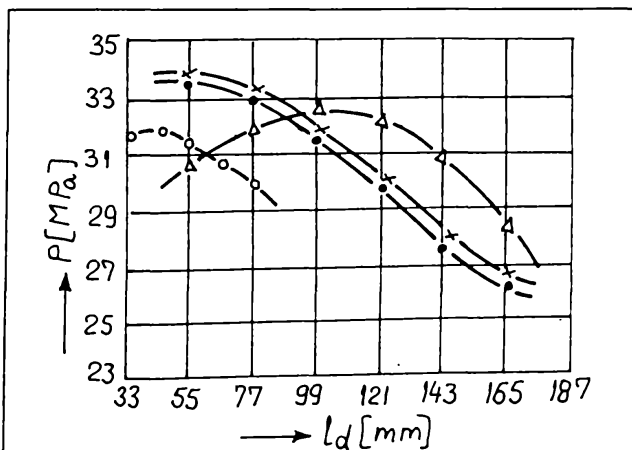
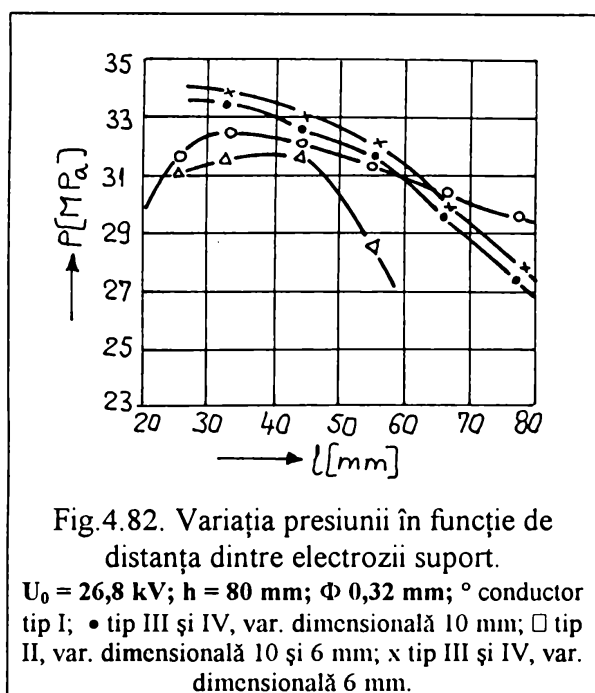


Fig.4.81. Variația presiunii în funcție de lungimea desfășurată a fuzibilului.

$U_0 = 26,8 \text{ kV}$; $h = 80 \text{ mm}$; $\Phi 0,32 \text{ mm}$; ° conductor tip I; • tip III și IV, var. dimensională 10 mm; □ tip II, var. dimensională 10 și 6 mm; x tip III și IV, var. dimensională 6 mm.

exploatarea industrială. În figura 4.81 sunt prezentate variațiile presiunii în funcție de lungimea desfășurată a fuzibilului, pentru cele 7 variante tipodimensionale utilizate, iar în figura 4.82 este reprezentată variația presiunii funcție de distanța între electrozi. Modul de variație al presiunii poate fi explicat dacă se acceptă ipoteza influenței cumulate a lungimii fuzibilului și a distanței dintre electrozii suport. Astfel, o anumită lungime de fuzibil degajă, prin explozia sa, o anumită cantitate de



fuzibilului. Astfel, în gama de valori studiată a l_d , pentru curbele notate pe diagrama din figura 4.81 cu (•) și (x) lungimile desfășurate se află la valori peste valoarea optimă, ceea ce duce la descreșterea presiunii. Valorile sunt superioare celor corespunzătoare conductorului tip I deoarece, la aceeași lungime desfășurată, spațiul dintre electrozii suport este mai mic. Pentru curba notată cu (□), porțiunea crescătoare este rezultatul cumulat al distanțelor foarte mici între electrozi, ceea ce duce la un regim apropiat de cel de scurtcircuit și al creșterii lungimii firului (chiar peste valoare optimă), odată cu creșterea distanței corespunzătoare dintre electrozii suport. Se atinge apoi un optim, dat de realizarea unui raport favorabil între cele două lungimi, după care începe porțiunea descrescătoare. Aceasta se menține deasupra primelor două curbe menționate anterior, întrucât distanța dintre electrozii suport este mai mică decât a celor două (la aceeași l_d).

În concluzie, pentru astfel de configurații ale firelor de amorsare este necesar un control permanent atât al distanței dintre electrozi, cât și al lungimii firului, cele două influențându-se reciproc. Această dificultate constituie încă un motiv pentru care astfel de metode de inițiere nu s-au impus în exploatarea industrială.

Așa după cum s-a precizat în primul capitol, la descărcarea cu străpungerea directă a spațiului de lichid procesele care se desfășoară în perioada stadiului "preamorsă" influențează puternic modul în care va decurge ulterior procesul de dezvoltare al descărcării și, implicit, mărimea presiunii dezvoltate în camera de descărcare. Ele determină timpul de întârziere al străpungerii, pierderile de energie, lungimea canalului de descărcare, diametrul inițial al canalului și rezistența acestuia. Unul

energie. Pentru aceeași parametri electrici ai circuitului de descărcare (tensiune, capacitate, inductanță) și același diametru, la lungimi egale ale fuzibilului, indiferent de configurația sa, cantitatea de energie degajată este aceeași, deoarece curentul de vaporizare este identic. Ca și regulă generală se poate stabili că, în același spațiu (distanță dintre electrozii suport), un fir mai lung duce la creșterea energiei radiate în spațiul respectiv. Această regulă prezintă un anumit grad de similitudine cu efectul detonării unor cantități crescătoare de exploziv într-un spațiu de volum constant.

Cu toate acestea, regula nu este universal valabilă, datorită existenței valorii optime a lungimii

din factorii importanți care își exercită influența în acest stadiu îl reprezintă geometria sistemului de electrozi.

În scopul determinării acestei influențe, pentru domenii identice de variație ale parametrilor descărcării s-au utilizat electrozi cu caracteristici de material, formă și dimensiuni diferite. Principalele caracteristici ale electrozilor folosiți sunt evidențiate în tabelul 4.8. Aspectul general al câtorva dintre aceștia este prezentat în figura 4.83.

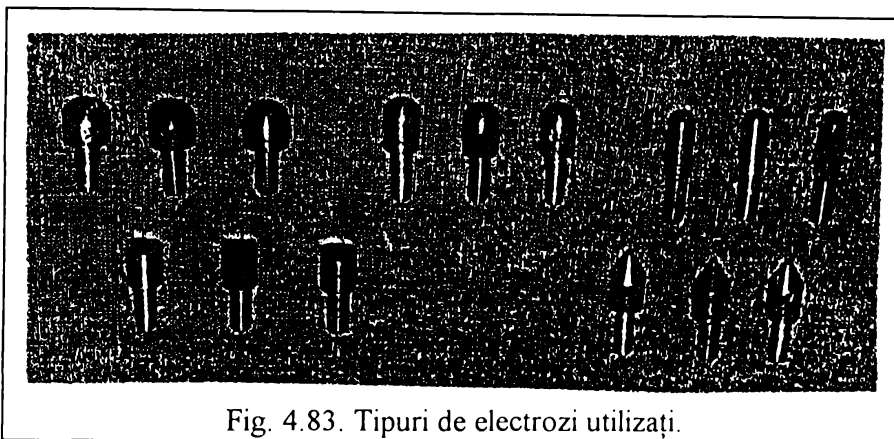


Fig. 4.83. Tipuri de electrozi utilizați.

TABELUL 4.8.

Material	Formă vârf	Diametru [mm]	Suprafață [cm ²]
Cupru	conic	φ 6; φ 8; φ 10	2,6
	sferic	φ 6; φ 8; φ 10	
	plan	φ 6; φ 8; φ 10	
	plan	φ 8	
Aluminiu	conic	φ 6; φ 8; φ 10	2,6
	sferic	φ 6; φ 8; φ 10	
	plan	φ 6; φ 8; φ 10	
Oțel	conic	φ 6; φ 8; φ 10	2,6
	sferic	φ 6; φ 8; φ 10	
	plan	φ 6; φ 8; φ 10	

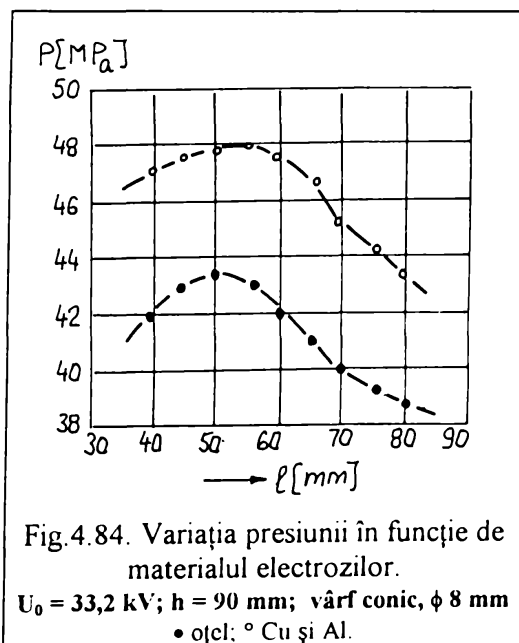


Fig.4.84. Variația presiunii în funcție de materialul electrozilor.

$U_0 = 33,2 \text{ kV}$; $h = 90 \text{ mm}$; vârf conic, φ 8 mm
 • oțel; ° Cu și Al.

Diagrama variației de presiune, în funcție de distanța dintre electrozi, pentru Cu și oțel este redată în figura 4.84. Întrucât diferențele față de valorile obținute la Cu nu sunt semnificative, curba corespunzătoare aluminiului nu a mai fost reprezentată. Explicația diferenței dintre cele două curbe trasate constă atât în valorile diferite ale conductibilității electrice ale celor două materiale, cât și în manifestarea efectului pelicular, pe de o parte datorită frecvenței curentului de descărcare în sistemele de electrozi care, practic, se află în limitele 10...200 kHz [41] datorită vibrațiilor talerelor eclatorului iar pe de altă parte, datorită modificării densităților de curent corespunzătoare.

Astfel, pentru o bară de Cu având diametrul ϕ 12 mm, la o frecvență a curentului $f = 200$ kHz, valoarea calculată a raportului R/l este $R/l = 310 \cdot 10^{-5} \Omega/m$. Rezistența aceluiași conductor în curent continuu este:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} = 15,5 \cdot 10^{-5} \quad [\Omega] \quad (4.76)$$

în care ρ - rezistivitatea, $\rho = 0,0175 \Omega \cdot mm/m$; l - lungimea conductorului $l = 1 m$; S - aria secțiunii transversale a conductorului.

Așadar, rezistența la frecvența de 200 kHz a crescut de 20 ori. Pentru o bară de oțel cu ϕ 12 mm, se obține valoarea $R/l = 0,105 \Omega/m$, iar rezistența la c.c. este $R = 0,867 \cdot 10^{-3} \Omega$. Prin urmare, pentru oțel, la $f = 200$ kHz, rezistența crește de 121 ori. Totodată, la $f = 200$ kHz, rezistența barei de oțel crește de aproximativ 34 ori față de cea a barei de Cu, iar pentru c.c. crește de 5,6 ori. Aceleași considerații se pot face și pentru materialele folosite la construcția tijelor conductoare cu rol de suport pentru vârfuri. Oricum, părțile care transmit direct energia spațiului de descărcare este recomandat să se realizeze din materiale bune conducătoare.

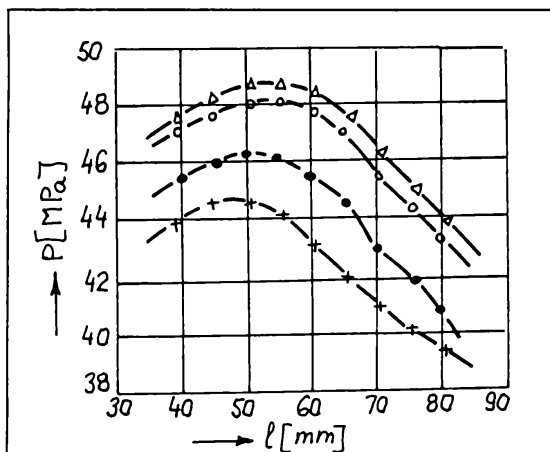


Fig.4.85. Influența geometriei spațiului de descărcare asupra variației de presiune. $U_0 = 33,2$ kV; $h = 90$ mm; electrozi Cu, ϕ 8 mm; \circ vârfuri conice; \bullet semisferice; \times plane; \square corespunde cazului din figura 4.86.

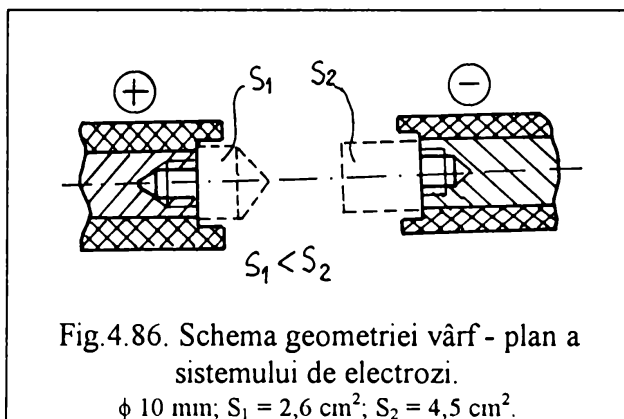


Fig.4.86. Schema geometriei vârf - plan a sistemului de electrozi. ϕ 10 mm; $S_1 = 2,6$ cm²; $S_2 = 4,5$ cm².

În figura 4.85 au fost trasate curbele de variație ale presiunii în funcție de distanța dintre electrozi, pentru trei geometrii simetrice și una asimetrică, aceasta din urmă corespunzătoare cazului prezentat în figura 4.86. Scăderea presiunii obținute se datorează mării razei de curbură a vârfului electrodului (pentru cele trei configurații simetrice considerate), aceasta conducând la micșorarea intensității câmpului electric al anodului și deci la pierderi energetice în perioada stadiului "preamorsă" mai mari. Rezultatele au fost obținute folosind electrozi noi la fiecare experiment.

De remarcat este comportarea în cazul configurației asimetrice, de tipul celei prezentate în figura 4.86 prin care, folosind un electrod tip vârf și unul plan, de același diametru dar cu suprafață umezită mai mare, s-a obținut o ușoară creștere de presiune. Nu același lucru s-a obținut la inversarea polarității electrozilor, ceea ce poate conduce la concluzia că, la descărcarea cu străpungerea directă a spațiului dintre electrozi la tensiuni înalte, o influență deosebită o are suprafața electrodului negativ.

Creșterea suprafeței catodului în raport cu cea a anodului poate duce la creșteri de presiune. Pentru anod însă, creșterea suprafeței umezite a acestuia peste 5 cm² a dus la pierderi importante de presiune.

Deși la utilizarea electrozilor noi cu vârf conic sau semisferic apar diferențe privind valorile de presiune, odată cu creșterea uzurii valorile înregistrate la vârfurile conice se apropie de cele obținute cu vârfuri semisferice (fig. 4.88). Aceasta deoarece prin uzură vârful conic tinde să ia formă semisferică (fig.4.87).

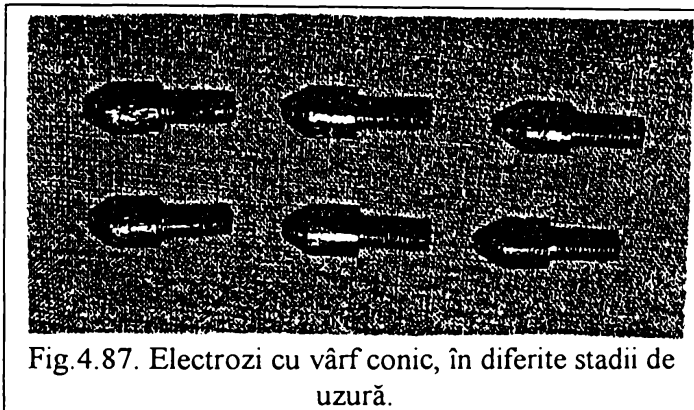


Fig.4.87. Electrozi cu vârf conic, în diferite stadii de uzură.

În ceea ce privește uzura este evident faptul că, la același număr de impulsuri, uzura cea mai mare apare la electrozii din Al (pe aceștia apărând cratere de smulgere foarte mari chiar după primul impuls) urmați de cei din Cu și apoi de cei din oțel.

Masa metalului expulzat de pe electrod în timpul unei descărcări de putere dată se poate estima cu relația [41]:

$$m_p = \frac{K_d \cdot U_p \cdot \alpha}{\frac{3 \cdot c_1 \cdot (T_t - T_0) + c_2}{K_a} + c_3} \quad (4.77)$$

în care K_d - coeficient ce ține seama de influența diametrului electrodului asupra eroziunii; U_p - potențialul energetic echivalent; α - integrala funcției de variație a curentului; c_1 - căldura specifică a materialului tijei suport a electrodului; c_2, c_3 - căldura specifică de topire și de vaporizare a materialului electrodului; T_t, T_0 - temperatura de topire și temperatura inițială a materialului tijei suport a electrodului; K_a - coeficient de aruncare al materialului la o descărcare.

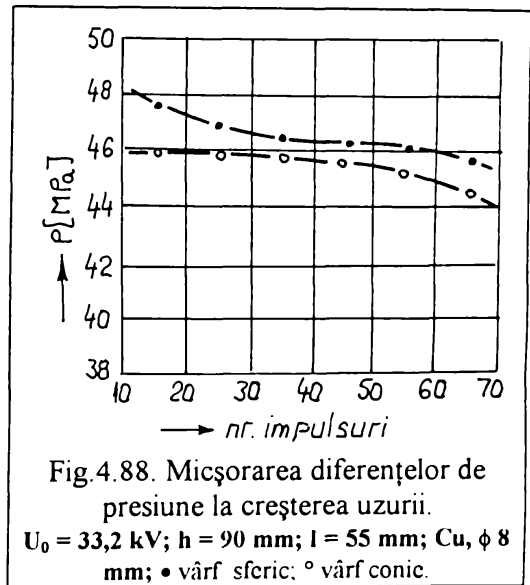


Fig.4.88. Micșorarea diferențelor de presiune la creșterea uzurii.
 $U_0 = 33,2 \text{ kV}$; $h = 90 \text{ mm}$; $l = 55 \text{ mm}$; Cu, $\phi 8 \text{ mm}$; \bullet vârf sferic; \circ vârf conic.

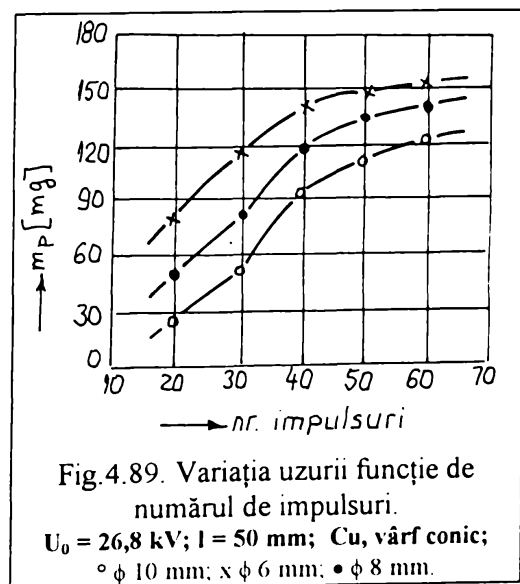


Fig.4.89. Variația uzurii funcție de numărul de impulsuri.
 $U_0 = 26,8 \text{ kV}$; $l = 50 \text{ mm}$; Cu, vârf conic;
 $\circ \phi 10 \text{ mm}$; $\times \phi 6 \text{ mm}$; $\bullet \phi 8 \text{ mm}$.

La descărcarea de putere medie în apă, potențialul energetic echivalent al particulelor de plasmă care acționează asupra electrozilor poate fi ales pentru anod $U_p = 12 V$ iar pentru catod, $U_p = 20 V$. La descărcarea oscilantă cu decrement mic de amortizare se poate adopta, fără a introduce erori mari, atât pentru catod cât și pentru anod, $U_p = 18,5 V$. Influența diametrului electrodului asupra masei de metal expulzat la o descărcare se ia în considerare prin coeficientul K_d , a cărui valoare nu depinde de materialul electrodului. Valorile lui K_d pentru descărcări de putere medie sunt date în tabelul 4.9 [41].

TABELUL 4.9.

Diametrul [mm]	4	5	6	7	8	9	10
K_d	2,50	2,00	1,66	1,43	1,25	1,11	1,00

Coeficientul K_d are valorile determinate experimental [41]: pentru oțel - 0,055; pentru Cu - 0,065; pentru alamă - 0,06; pentru Al - 0,2.

Pentru aflarea integralei funcției de variație a curentului de descărcare se poate utiliza următoarea expresie:

$$\int_0^{t_p} i(t) dt = 2,5 \cdot C \cdot U_0 \cdot \exp\left(-6,9 \cdot B_k^{1/3}\right) \quad (4.78)$$

în care B_k reprezintă criteriul de similitudine al caracteristicilor electrice ale descărcării cu străpungerea directă a spațiului de lichid.

În figura 4.89 este prezentată evoluția uzurii funcție de numărul de impulsuri (m_p - masa de metal expulzat, în miligrame) pentru electrozi conici din Cu. Uzura crește odată cu scăderea diametrului, fiind mai puternică la primele impulsuri datorită rezistenței mecanice mai scăzute a vârfului conic al electrodului. Pe măsură ce uzura progresează, vârful tinzând spre forma sferică, masa de metal expulzat scade. Diferențele mai mari dintre uzurile celor trei variante dimensionale, corespunzătoare primelor impulsuri se datorează înălțimii conului de la vârful electrodului. Cu cât conul este mai ascuțit, cu atât rezistența mecanică este mai scăzută.

În concluzie, la alegerea configurației spațiului de descărcare la străpungerea directă este nevoie să se ia în considerare atât elemente legate de efectul tehnologic maxim sau de rezistența la uzură cât și de siguranța în exploatare sau de costul sistemelor de electrozi.

4.7. Principii de bază privind modelarea procesului de ambutisare a pieselor cu forme de revoluție prin electrohidroimpulsuri

Deși condițiile sub care poate fi aplicată legea similitudinii în deformarea plastică la rece a metalelor sunt relativ greu de satisfăcut, totuși, pe această cale, tehnologia de aplicat în scopul obținerii unei deformări reușite a unei piese poate fi determinată rapid și ieftin, la scară mică. Apoi, regulile de modelare vor descrie condițiile pentru o deformare reușită la scară reală, nu numai pentru piesa însăși, ci și pentru anumite nivele asociate ale parametrilor tehnici și tehnologici ce intervin în timpul procesului.

Este de presupus deci că și experimentele la scară mică cu electrohidroimpulsuri, în special cu inițiator (datorită stabilității mult mai mari a descărcării), pot avea aplicații practice la studiile pilot în domeniul operațiilor de formare prin explozie, fie electrohidraulică, fie cu explozivi. Având în vedere că deformarea prin electrohidroimpulsuri include atât fenomene electrice, explozie, cât și probleme legate de propagarea undelor de șoc într-un mediu fluid și deformații plastice mari ale unei structuri, fiind deci un proces complex, este nevoie de investigații experimentale pentru corectarea eventualelor erori de modelare sau pentru adaptarea la condițiile concrete de prelucrare.

Elaborarea unui model de predicție trebuie să aibă la bază atât un sistem teoretic (ce trebuie să ia în considerare cât mai mulți parametri semnificativi ai procesului modelat), cât și un număr cât mai mare de experimente care să valideze predicția.

Astfel, pe lângă cele prezentate până acum, au mai fost luate în considerare și lucrările lui Schmidt și Fyfe [90], care au folosit firele explozive în studiul ruperilor sub sarcini dinamice, Rose și Chou [87] care au utilizat firele explozive în experimente de fotoelasticitate dinamică, Noland [70] care a studiat deformarea prin electrohidroimpulsuri, comparând-o cu alte procese de deformare plastică la rece cu puteri și viteze mari precum și a lui Zernow [104] care încearcă găsirea unui factor de echivalență între nivelul de energie stocat în bateria de condensatoare și cel dezvoltat de o încărcătură explozivă.

Având în vedere toate cele de mai sus, au fost selectate variabilele considerate ca fiind semnificative în descrierea procesului de deformare prin electrohidroimpulsuri, acestea fiind prezentate în tabelul 4.10.

Prima categorie este cea a variabilelor dependente sau de decizie, reprezentând grupa parametrilor de urmărit. Din punct de vedere tehnologic, de interes rămân parametru s și P . Efortul critic σ_{cr} poate fi privit ca o constantă de material, asimilabil fie limitei de curgere fie rezistenței la rupere a materialului, depinzând în special de viteza de deformație și, implicit, de viteza de impact.

TABELUL 4.10.

VARIABLE	UNITATEA SI			
	Simbol și denumire	Denumire	Simbol	Expresia în alte unități SI (derivate)
DEPENDENTE				
s_{max} - adâncimea maximă de ambutisare	metru	m	----	m
t - durata impulsului	secundă	s	----	s
W - enrgia	joule	J	----	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
P - presiunea	pascal	Pa	N / m^2	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
σ_{cr} - efortul critic	pascal	Pa	N / m^2	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
INDEPENDENTE				
h - distanța dintre axa descărcării și semifabricat referitoare la semifabricat	metru	m	----	m
g - grosimea semifabricatului	metru	m	----	m
D - diametrul piesei finite	metru	m	----	m
E - modulul lui Young (modulul de elasticitate longitudinal)	pascal	Pa	N / m^2	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
ρ - densitatea materialului (masă volumică)	kilogram pe metru cub	kg / m^3	----	kg / m^3
ϵ_1 - gradul de deformare (deformația specifică)	----	----	----	----
σ_1 - rezistența la deformare corespunzătoare deformației ϵ_1 .	pascal	Pa	N / m^2	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
referitoare la mediul fluid				
v - modulul volumetric (factor de comprcsibilitate)	pascal	Pa	N / m^2	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
ρ_0 - densitatea fluidului	kilogram pe metru cub	kg / m^3	----	kg / m^3
v - vâscozitatea dinamică	pascal - secundă	Pa · s	$N \cdot s / m^2$	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-1}$
variabile suplimentare la descărcarea liberă, fără fir de amorsare				
ρ_{sd} - rczistivitatea mediului fluid	ohm - metru	$\Omega \cdot m$	V / A	$m^3 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$
σ_{sd} -conductibilitatea electrică specifică a mediului fluid	unu pe ohm - metru	$\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$	A / V	$m^{-3} \cdot kg^{-1} \cdot s^3 \cdot A^2$
ϵ_{sd} - permitivitatea mediului fluid	farad pe metru	F / m	----	$m^{-3} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
l_{sd} - lungimea reală a spațiului de descărcare	metru	m	----	m
referitoare la firul exploziv				
l - lungimea firului	metru	m	----	m
d - diametrul firului	metru	m	----	m

j - impulsul specific la vaporizare (impuls / unitatea de suprafață)	newton pe secundă și metru pătrat	$N \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$	$N \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$	$A^2 \cdot s \cdot m^{-4}$ ($kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-3}$)
e - energia specifică de vaporizare (energie / unitatea de volum)	joule pe metru cub	$J / m^3 = Pa$	N / m^2	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
referitoare la circuitul electric				
U₀ - tensiunea	volt	V	W / A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
C - capacitatea	farad	F	C / V	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
R - rezistența electrică	ohm	Ω	V / A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$
L - inductanța	henry	H	Wb / A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$

Durata impulsului este de interes la distanțe **h** mici, atunci când se poate adăuga și un al doilea impuls de presiune, cel datorat expansiunii bulei de gaz.

Energia **W** poate fi privită fie ca energie înmagazinată în condensatoare (ceea ce este ușor de calculat), fie ca energie efectivă a descărcării (ceea ce implică și calculul pierderilor de energie).

Cea de-a doua categorie este cea a variabilelor independente. Dacă fiecărei variabile de acest tip I se atribuie o valoare numerică specifică, atunci fiecare variabilă dependentă este unic determinată. Prima grupă se referă la geometria piesei și proprietățile fizico - mecanice ale materialului acesteia. O mențiune specială trebuie făcută asupra variabilelor σ_1 și ϵ_1 , care sunt privite ca perechi de valori efort - deformație de pe curba caracteristică a materialului, din zona de variație neliniară.

A doua grupă include proprietățile mediului de transmitere a undei de șoc, cea de-a doua subgrupă fiind luată în considerare doar atunci când descărcarea electrică se face fără amorsare. Ultimele două grupuri de variabile independente descriu firul de amorsare și circuitul electric.

De remarcat că nu au fost incluse variabilele referitoare la efectul gravitației, vitezei de deformație sau al duratei încărcării asupra rezistenței la deformare a materialului. În consecință, acest tip de analiză nu se aplică sistemelor foarte mari, unde greutatea piesei poate introduce tensiuni suplimentare importante sau la materialele a căror curbă caracteristică efort - deformație își schimbă semnificativ forma, datorită vitezelor de deformație diferite la model și piesa reală, sau la care rezistența la rupere variază mult cu durata încărcării. În multe situații practice, aceste efecte nu sunt foarte importante.

În urma analizei variabilelor din tabelul 4.10, pentru descărcarea cu folosirea firului de amorsare au fost selectați următorii 15 parametri adimensionali:

$$\Pi_1 = s / D \text{ sau } (t/D) \cdot (E/\rho)^{1/2} \text{ sau } W / (CU_0^2) \text{ sau } P/E \text{ sau } \sigma_{cr} / E;$$

$$\Pi_2 = h / D \quad \Pi_3 = g / D \quad \Pi_4 = \rho / \rho_0 \quad \Pi_5 = \epsilon_1 \quad \Pi_6 = \sigma_1 / E \quad \Pi_7 = v / E$$

$$\Pi_8 = \frac{v}{D \cdot E^{1/2} \cdot \rho_0^{1/2}} \quad \Pi_9 = l / D \quad \Pi_{10} = d / D \quad \Pi_{11} = e / E$$

$$\Pi_{12} = \frac{U_0 \cdot j^{1/2} \cdot \rho_0^{1/4}}{E^{5/4} \cdot D^{1/2}} \quad \Pi_{13} = \frac{C \cdot E^{3/2}}{j \cdot \rho_0 \cdot D^2} \quad \Pi_{14} = (R \cdot j \cdot D) / E \quad \Pi_{15} = \frac{L \cdot j}{\rho_0^{1/2} \cdot E^{1/2}}$$

Criteriile de similitudine sau, altfel spus, "legile de scalare", pot fi obținute din considerentul că, dacă fiecare parametru adimensional independent (notați cu $\Pi_2 \dots \Pi_{15}$) are aceeași valoare numerică la model și la sistemul real, atunci și parametrii adimensionali dependenți (notați cu Π_1) vor avea aceeași valoare numerică la model și la sistemul real.

Astfel, criteriile ce trebuie satisfăcute sunt rezumate mai jos, cu indicele m notându-se parametrii corespunzători sistemului model iar lipsa acestuia indicând parametrii corespunzători sistemului real:

Criterii satisfăcute de o geometrie similară a piesei sau a spațiului de descărcare:

$$h / D = (h / D)_m \quad l / D = (l / D)_m \quad g / D = (g / D)_m \quad d / D = (d / D)_m \quad \varepsilon_l = (\varepsilon_l)_m$$

$$\text{raportul lungimilor: } n = D / D_m = h / h_m = g / g_m = l / l_m = d / d_m$$

Criterii satisfăcute de materiale identice la model și sistemul real (fluid, piesă și fir):

$$\rho / \rho_0 = (\rho / \rho_0)_m \quad v / E = (v / E)_m \quad \sigma_l / E = (\sigma_l / E)_m \quad e / E = (e / E)_m$$

Criterii satisfăcute de parametrii electrici:

$$\frac{U_0 \cdot j^{1/2} \cdot \rho_0^{1/4}}{E^{5/4} \cdot D^{1/2}} = \left[\frac{U_0 \cdot j^{1/2} \cdot \rho_0^{1/4}}{E^{5/4} \cdot D^{1/2}} \right]_m \xrightarrow{\text{cu materiale identice}} \frac{U}{U_m} = \sqrt{\frac{D}{D_m}} = \sqrt{n}$$

$$\frac{C \cdot E^{3/2}}{j \cdot \rho_0 \cdot D^2} = \left[\frac{C \cdot E^{3/2}}{j \cdot \rho_0 \cdot D^2} \right]_m \xrightarrow{\text{cu materiale identice}} \frac{C}{C_m} = \left(\frac{D}{D_m} \right)^2 = n^2$$

$$\frac{R \cdot j \cdot D}{E} = \left[\frac{R \cdot j \cdot D}{E} \right]_m \xrightarrow{\text{cu materiale identice}} \frac{R}{R_m} = \frac{D_m}{D} = n^{-1}$$

$$\frac{L \cdot j}{\rho_0^{1/2} \cdot E^{1/2}} = \left[\frac{L \cdot j}{\rho_0^{1/2} \cdot E^{1/2}} \right]_m \xrightarrow{\text{cu materiale identice}} \frac{L}{L_m} = 1 = n$$

Criteriu paradox

$$\frac{v}{D \cdot E^{1/2} \cdot \rho_0^{1/2}} = \left[\frac{v}{D \cdot E^{1/2} \cdot \rho_0^{1/2}} \right]_m \xrightarrow{\text{cu materiale identice}} \frac{D}{D_m} = 1 = n \quad (!)$$

Materialele identice presupun respectarea următoarelor egalități:

$$\rho_0 = (\rho_0)_m \quad ; \quad j = j_m \quad ; \quad E = E_m \quad ; \quad v = v_m$$

Primul grup de criterii, incluzând 5 parametri adimensionali, poate fi satisfăcut printr-o geometrie similară a sistemului model și a celui real. Cel de-al doilea grup de criterii, cuprinzând 4 parametri adimensionali, poate fi ușor satisfăcut prin utilizarea aceluiași materiale la sistemul model și la cel real, cu toate că, teoretic, aceste criterii pot fi satisfăcute și pe alte căi. Cel de-al treilea grup de criterii include tot 4 parametri adimensionali, cuprinzând toate variabilele de natură electrică. În cazul utilizării unor materiale identice (la mediul de transmitere a energiei, la semifabricate și la firele de amorsare de la sistemul model și cel real), satisfacerea acestor criterii conduce la următoarele patru reguli:

1. Raportul tensiunilor este egal cu rădăcina pătrată a raportului dimensiunilor echivalente;

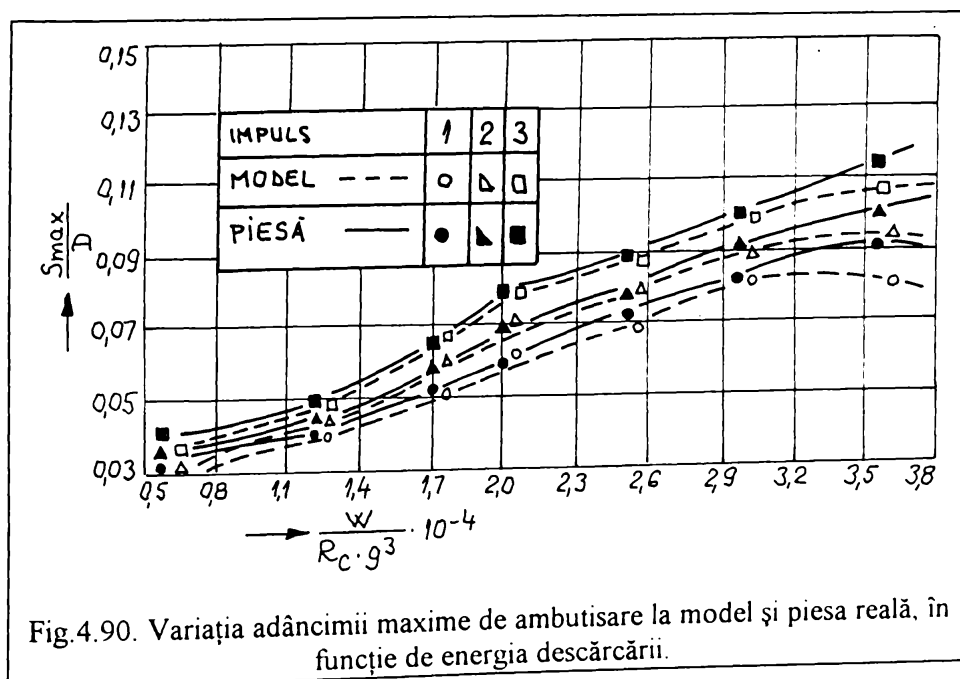
2. Raportul capacităților este egal cu pătratul raportului dimensiunilor echivalente;

3. Raportul rezistențelor este egal cu inversul raportului dimensiunilor echivalente;

4. Inductanțele sunt aceleași în ambele sisteme.

Toate condițiile enunțate mai sus pot fi îndeplinite, practic, la costuri rezonabile și cu o precizie satisfăcătoare. Ultimul criteriu enunțat (care implică vâscozitatea mediului de transmitere), conduce, având aceleași materiale la cele două sisteme, la un paradox. Astfel, el cere ca raportul dimensiunilor echivalente să fie egal cu 1, adică modelul să aibă aceleași dimensiuni ca și piesa, ceea ce, evident, contrazice chiar scopul aplicării teoriei similitudinii. Deși teoretic este posibilă utilizarea unor materiale diferite la model și la sistemul real pentru a satisface această condiție ca și pe toate celelalte, în practică este destul de dificil de realizat.

Pentru descărcarea cu străpungere directă a spațiului dintre electrozi se poate ține seama și de criteriul de similitudine al mărimilor electrice B_k .



Ecuțiile de predicție se rezumă la egalitățile parametrilor dependenți Π_1 , aceștia având aceeași valoare la model și la sistemul real. Se ajunge la următoarele concluzii:

- geometria trebuie să fie similară după deformare;
- duratele impulsurilor trebuie să respecte raportul dimensiunilor echivalente, adică $t / t_m = D/D_m$;
- raportul energiilor trebuie să fie egal cu cubul raportului dimensiunilor echivalente, adică $W/W_m = (D / D_m)^3$;
- amplitudinea presiunilor frontului undei de șoc sau eforturilor din material trebuie să fie aceeași în ambele sisteme.

În figura 4.90 este prezentat un exemplu de variație a raportului adimensional ce definește adâncimea maximă de ambutisare s_{max} , pentru model și piesa reală, în funcție de raportul adimensional al energiei descărcării. Materialul folosit a fost tabla neagră cu grosimea $g = 1$ mm la piesă și, prin prelucrare, 0,5 mm la model, diametrul $D = 200$ mm la piesă și $D_m = 100$ mm la model, folosindu-se pentru amorsare un fir de Cu cu diametrul de 0,34 mm la piesă și 0,17 mm la model. Modificarea energiei descărcării s-a făcut prin schimbarea capacității și a tensiunii, la parametrii constanți $h = 60$ mm și $l = 60$ mm la piesă și respectiv $h_m = 30$ mm și $l_m = 30$ mm la model.

După cum se observă, rezultatele sunt destul de apropiate, cu excepția capetelor domeniului de variație a energiei. Explicația poate consta în aceea că, la deformații mici și grosime mai redusă a modelului, revenirea elastică a acestuia este mai mare. Deasemenea, la tensiuni mai mici, în jurul a 16,8 kV, și la energii mici ($\approx 0,3$ kJ) pierderile de energie la vaporizarea firului de 0,17 mm sunt mai mari. Pentru celălalt capăt al domeniului, care presupune tensiuni înalte (≈ 31 kV) la model, lungimea prea mică a firului duce la o descărcare în regim de scurtcircuit cu reducerea corespunzătoare a presiunii și, implicit, a deformației.

Este de remarcat faptul că, deși limitele de reglare ale diverselor mărimi electrice au fost destul de restrânse la instalația utilizată (reglaje necesare respectării tuturor condițiilor specificate), gradul de predictibilitate este de circa 87%. Este de presupus că, la instalații prevăzute cu posibilități mult mai largi de reglare, gradul de predictibilitate va crește.

În concluzie, criteriile de similitudine adoptate oferă un aparat destul de precis pentru predicția gradului de deformare la ambutisarea prin electrohidroimpulsuri, fiind însă necesare instalații experimentale cu limite largi de reglaj a parametrilor electrici, precum și intense verificări experimentale, pentru evidențierea eventualelor limite ale predicției.

CAPITOLUL 5

CONCLUZII FINALE. CONTRIBUȚII PERSONALE

Prezenta teză de doctorat se înscrie pe linia preocupărilor legate de deformarea plastică la rece prin electrohidroimpulsuri, ea constituindu-se într-un studiu particular al utilizării tensiunilor înalte la ambutisarea pieselor cu forme de revoluție, în regim mono și multiimpuls.

Pornind de la considerațiile făcute în primul capitol, s-a încercat elaborarea unei teorii unitare de descriere a procesului, începând cu parametrii canalului de descărcare și terminând cu adâncimea maximă și profilul piesei ambutisate, fie în regim mono, fie în regim multiimpuls precum și transpunerea acestei teorii într-un program de simulare cu ajutorul calculatorului.

În final, alături de concluziile enunțate la abordarea fiecărui studiu specific din cuprinsul tezei se mai poate spune că, în general, legitățile care guvernează descărcarea în domeniul tensiunilor până la 15 kV se păstrează și la tensiuni cuprinse între 15 și 45 kV. O particularitate a folosirii tensiunilor înalte o constituie necesitatea utilizării distanțelor foarte mari între electrozi, ceea ce impune condiții restrictive la construcția camerei de descărcare și la distanța dintre axa descărcării și semifabricat. Pe de altă parte, necesitatea străpungerii spațiilor de descărcare lungi duce la o mare instabilitate a descărcării și la o dispersie relativ mare a rezultatelor obținute.

Studiile efectuate în scopul determinării influenței diferiților parametri ai descărcării cu străpungerea directă a spațiului dintre electrozi asupra presiunii și, implicit, asupra adâncimii maxime de ambutisare au demonstrat existența unei triplete optime de valori tensiune - distanță între electrozi - distanță axă - semifabricat pentru care efectele tehnologice obținute sunt maxime. Deasemenea, pentru cazul amorsării cu fir este necesară găsirea unei combinații optime între energia descărcării, diametrul și lungimea firului, distanța dintre electrozii suport.

Modelele matematice elaborate pe baze analitice sau experimentale pentru fiecare etapă de desfășurare a procesului, precum și criteriile de similitudine stabilite permit o predicție cu o precizie suficientă a efectelor tehnologice ce pot fi obținute pentru diferite combinații ale parametrilor circuitului de descărcare și materiale supuse deformării.

În continuare sunt prezentate principalele contribuții personale legate de domeniul abordat de prezenta teză de doctorat, din ele putându-se desprinde și alte concluzii cu caracter general:

A. În domeniul teoretic și aplicativ:

1. *A fost întocmită o analiză cuprinzătoare a stadiului actual în domeniul studiilor teoretice și cercetărilor experimentale privind ambutisarea prin electrohidroimpulsuri, remarcându-se pe*

această cale insuficiența datelor referitoare la utilizarea tensiunilor înalte, cuprinse între 15 și 45 kV, precum și lipsa unei teorii de predicție globală, chiar și cu caracter limitat;

2. A fost proiectată, realizată și îmbunătățită în urma experimentelor efectuate, o cameră universală de descărcare pentru operații de ambutisare și fasonare, prevăzută cu posibilități largi de variere a parametrilor geometrici ai descărcării și a gabariturii matriței utilizate;

3. A fost proiectat și realizat un sistem de măsurare a presiunii și de determinare a formei frontului undei de șoc, pe placă fixă sau mobilă, bazat pe captoare de presiune cu traductoare tensometrice, demonstrându-se astfel și posibilitatea utilizării, cu un minim de măsuri de siguranță, a acestor tipuri de traductoare la măsurarea presiunilor dinamice;

4. S-a demonstrat că generatoarele de tensiune înaltă ale instalațiilor de curățare electrohidraulică a pieselor turnate pot fi ușor adaptate unor camere de descărcare corect concepute și destinate deformării prin electrohidroimpulsuri;

5. La descărcarea cu străpungerea directă a spațiului de lichid, în urma studiilor teoretice și a cercetărilor experimentale efectuate pe un set de 6 tipodimensiuni de semifabricate, în condițiile ambutisării cu flanșă mobilă s-au stabilit următoarele:

5.1. Schema generală de deformație și variația gradelor de deformare în regim monoimpuls, evidențiindu-se faptul că, la prelucrarea multiimpuls cu modificarea intenționată a distanței dintre axa descărcării și semifabricat, modul de deformare se reia ciclic;

5.2. Pentru domeniul tensiunilor de încărcare a bateriei de condensatoare 15...45 kV, s-au determinat influențele tensiunii, distanței între electrozi și distanței dintre axa descărcării și semifabricat asupra adâncimii maxime de ambutisare, indicându-se combinațiile optime ale acestora la prelucrarea monoimpuls;

5.3. Pentru prelucrarea multiimpuls s-au determinat domeniile de blocaj ale deformării la cele 6 tipodimensiuni de semifabricate, arătându-se că modul de deformare la impulsul primar este hotărâtor în ceea ce privește deformarea ulterioară a semifabricatului;

5.4. S-a arătat că, în condițiile prelucrării multiimpuls în regim automat se poate obține o creștere a gradului de deformare în raport cu regimul multiimpuls neautomat;

5.5. Pe baza datelor experimentale au fost stabilite relațiile de calcul ale adâncimii maxime de ambutisare și ale profilului piesei ambutisate, în funcție de presiunea exercitată pe semifabricat, în regim mono și multiimpuls;

6. Tot pentru descărcarea cu străpungerea directă a spațiului de lichid, în urma studiilor teoretice și a cercetărilor experimentale efectuate, s-au stabilit:

6.1. Variația parametrilor electrici ai canalului de descărcare în timp;

6.2. *Zonele de variație ale formei frontului undei de șoc, în funcție de raportul dintre distanța axă - semifabricat și distanța între electrozi, precum și relațiile de calcul ale presiunii corespunzătoare acestor zone;*

6.3. *Distribuțiile de presiune pe semifabricat corespunzătoare zonelor de variație ale formei frontului undei de șoc, precum și relațiile de estimare ale acestor distribuții;*

6.4. *Influențele parametrilor electrici și geometrici ai descărcării, precum și a materialului și geometriei electrozilor asupra valorii presiunii maxime exercitate pe semifabricat;*

7. *Pentru descărcarea cu folosirea firului exploziv din Cu, tot pe baza cercetărilor experimentale efectuate în domeniul de tensiuni 15...45 kV s-au determinat :*

7.1. *Influențele diametrului, lungimii și configurației spațiale a firului exploziv asupra presiunii maxime, evidențiindu-se faptul că, pentru gama de tensiuni considerată, folosirea acestuia nu duce neapărat la creșterea presiunii dezvoltate în camera de descărcare ci contribuie mai mult la stabilizarea descărcării, micșorarea dispersiei rezultatelor și creșterea gradului de predictibilitate;*

7.2. *Limitele de variație ale parametrilor geometrici optimi ai descărcării în raport cu cei determinați la descărcarea cu străpungerea directă a spațiului dintre electrozi;*

8. *În vederea aplicării legii similitudinii la experimentări, pentru descărcarea inițiată cu fir exploziv a fost stabilit un număr de 15 parametrii adimensionali, cu rol de criterii de similitudine, a căror respectare permite predicția presiunii și a adâncimii maxime de ambutisare;*

9. *Pe baza studiilor teoretice și a cercetărilor experimentale cuprinse în prezenta teză s-a realizat în limbajul Borland Pascal 7.0 un program de calcul al principalilor parametrii definatorii ai procesului și de simulare atât a distribuției de presiune pe semifabricat, cât și a modului de deformare la ambutisarea prin electrohidroimpulsuri a pieselor cu forme de revoluție;*

10. *Experiențele au demonstrat că, în ceea ce privește respectarea regulilor de protecția muncii nu sunt necesare măsuri speciale, în afara celor generale prevăzute de normele de reglementare în vigoare pentru lucrul la tensiuni înalte și a celor specifice instalațiilor de acest tip, prevăzute în caietele de sarcini și documentațiile tehnice de exploatare.*

B. Aplicabilitatea industrială a tezei:

În cele enunțate mai sus au fost deja amintite câteva posibile domenii de aplicabilitate industrială. Pe scurt studiile teoretice și cercetările experimentale din teză pot fi utilizate la:

- realizarea adaptării generatoarelor de tensiune înaltă ale instalației de curățire electrohidraulică, în scopul utilizării lor la operații de deformare plastică;

- la calcule estimative de predicție ale adâncimii maxime de ambutisare și ale profilului piesei ambutisate, prelucrate atât în regim mono cât și regim multiimpuls;

-
- *la calcule estimative ale parametrilor electrici ai canalului de descărcare;*
 - *alegerea combinațiilor optime ale parametrilor electrici ai circuitului de descărcare, în scopul obținerii unor efecte tehnologice maxime, atât la străpungerea liberă cât și la străpungerea inițiată a spațiului de lichid.*

C. Direcții ulterioare de cercetare

Fiecare aspect particular tratat în prezenta teză se poate constitui el însuși într-un punct de plecare pentru studii ulterioare, mult mai aprofundate, privind aspectul respectiv. Câteva dintre aceste posibile dezvoltări ulterioare sunt precizate mai jos:

- *studiul parametrilor electrici și hidrodinamici la diverse grade de impurificare ale mediului de transmitere;*
- *studiul parametrilor electrici și hidrodinamici pentru diverse medii de transmitere;*
- *aprofundarea studiilor privind timpul efectiv de acțiune al undelor de șoc;*
- *particularizarea teoriei dezvoltate în teză, considerând diverse forme de camere de descărcare sau reflectoare de undă;*
- *posibilitățile tehnologice în ceea ce privește realizarea pieselor cu forme asimetrice;*
- *verificarea experimentală mai intensă a criteriilor de similitudine enunțate;*
- *extinderea studiilor teoretice și cercetărilor experimentale și la deformarea altor tipodimensiuni de semifabricate, conform metodologiei prezentate în teză;*
- *aprofundarea studiilor privind contribuția fiecărui fenomen impulsiv la creșterea gradului de deformare a piesei;*
- *dezvoltarea unor noi metode de măsurare a distribuției de presiune în camera de descărcare;*
- *studiul parametrilor electrici și hidrodinamici în cazul utilizării unei geometrii asimetrice a spațiului de descărcare;*
- *extinderea cercetărilor privind regimul multiimpuls de prelucrare, pentru diferite condiții de realizare a reținerii și etanșării semifabricatului;*
- *studiul realizării pieselor ambutisate sau fasonate de dimensiuni mari, prin modificarea poziției axei descărcării față de centrul semifabricatului;*
- *studii consacrate îmbunătățirii echipamentului tehnologic.*

BIBLIOGRAFIE

1. Acopian, A.A., Butkevici, G.V., ș.a., **Tehnica tensiunilor înalte**, traducere din limba rusă, Ed. Energetică de Stat, 1954;
2. Allen, W.A., Mapes, J.M., Wilson, W.G., **An effect produced by oblique impact of a cylinder on a thin target**, în Journal of Applied Physics, p. 675 - 676, vol. 25, 1954;
3. Altjulev, L.V., **Primenenie udarih voli v fizike visokih davlenii**, r. Uslehi fiziceskih nauk, vol. 2. p. 197 -258, 1965;
4. Amini, E., **Highenergy - rate sheet metal forming**, în Sheet metal forming, nr. 480, april 1967;
5. Andrei, N., Ciocârdia, C., **Cercetări privind determinarea presiunii de lucru obținută prin efectul de descărcare electrică în apă**, a 3-a Conferință națională de tehnologii și utilaje pentru prelucrarea metalelor prin deformare plastică la rece, p. 9 - 14, vol. 1, mai 1991, Timișoara;
6. Andrei, N., Ciocârdia, C., **Cercetări privind deformarea electrohidraulică a semifabricatelor tubulare din cupru**, a 3-a Conferință națională de tehnologii și utilaje pentru prelucrarea metalelor prin deformare plastică la rece, p. 15 - 19, vol. 1, mai 1991, Timișoara;
7. Baltac, V., Davidoviciu, A., **Cercetarea și proiectarea asistată de calculator în industria construcțiilor de mașini, electrotehnică și electronică**, Ed. Academiei, 1987;
8. Baranovskii, M.A., **Haracter teceniia metalla privîsokoskorostim asajivanii**, în Kuznecino stampovocinoe proizvodstvo, nr.9/1970;
9. Bauer, D., **Dimensionarea optimă a sculelor și instalațiilor pentru deformarea în câmpuri magnetice**, în B.I.T., Prelucrarea metalelor prin tehnologii neconvenționale, nr. 1/1973;
10. Bocek, S.A., Volcenkov, R.A., **Vlinie materiala elektroda na predproboinio stadio electriceskogo razrda v provodjii jidkosti**, r. Elektronna obrabotka materialov, nr. 4/1971;
11. Blumenfeld, M., **Introducere în metoda elementelor finite**, Ed. Tehnică, București, 1995;
12. Buzdugan, Gh., Blumenfeld, M., **Tensometria electrică rezistivă**, Ed. Tehnică, București, 1966;
13. Carlson, G.A., **Generation of maximum shock waves pressure by exploding wires**, Journal of Applied Physics, 42, p. 2155 - 2156, nr.4/1971;
14. Cazimirovici, E., **Calculul și realizarea captoarelor de forță cu traductoare tensorezistive pentru măsurarea forțelor de deformare plastică**, O.D.P.T. - Mașini - unelte și prelucrarea metalelor prin deformare plastică, nr. 12/1971;

15. Ciocârdia, C., Ungureanu, I., **Bazele cercetării experimentale în tehnologia construcțiilor de mașini**, București, Ed. Didactică și Pedagogică, 1979;
16. Ciocârdia, C., Drăgănescu, Fl., ș.a., **Tehnologia presării la rece**, Ed. Didactică și Pedagogică, București, 1991;
17. Chacin, V.N., **Sostoianie I puti razvilia nehotoriĥ impulsnih, metodov obrabotki davleniem**, în Kuznecino stampovocinoe proizvodstvo, nr.6/1980;
18. Chacin, V.N., **Electrohidrauliceskaya obrabotka mașinostroitel'nyh materialov**, Minsk, Nauka I Tehnika, 1978;
19. Chacin, V.N., ș.a., **Electrohidroimpulsnuia obrabotka materialov v mașinostroieni**, Nauka I Tehnika Minsk, 1987;
20. Cole, R.H., **Underwater explosions**, Princeton University Press, 1948;
21. Coman, L., **Calculul presiunii undei de șoc la deformarea prin explozie electrohidraulică**, în Gazeta tehnico - științifică a U.C.M. Reșița S.A. și a F.I.Reșița, nr. 1/1992;
22. Coman, L., **Considerații asupra ambutisării prin electrohidroimpulsuri**, Sesiunea de comunicări tehnico - științifice, Reșița, octombrie 1992;
23. Coman, L., **Utilizarea reflectoarelor de undă în instalațiile de deformare prin electrohidroimpulsuri sau prin explozie**, Sesiunea de comunicări tehnico - științifice a Univ. "Eftimie Murgu", Reșița, octombrie 1993;
24. Coman, L., Popovici, V., **Instalație pentru cercetări experimentale privind ambutisarea prin electrohidroimpulsuri**, Sesiunea de comunicări "Zilele academice timișene", Timișoara, 25-26 mai 1995;
25. Coman, L., Popovici, V., **Principii de bază privind modelarea și simularea deformării plastice la rece prin electrohidroimpulsuri**, Sesiunea de comunicări "Zilele academice timișene", Timișoara, 25-26 mai 1995;
26. Cnare, E.C., **Exploding wire detonators**, în Exploding Wires, 3, Plenum Press, New-York, 1964;
27. Cramariuc, R., Petrescu, V., **Măsurări electrice industriale. Măsurări în înaltă tensiune**, Ed. Tehnică, București, 1971;
28. Cristescu, N., **Probleme dinamice în teoria plasticității**, Ed. Tehnică, București, 1958;
Deutsch, I., **Rezistența materialelor**, Ed. Didactică și Pedagogică, București, 1976;
29. Drăgan, I., **Tehnologia deformărilor plastice**, Ed. Didactică și Pedagogică, București, 1976;
30. Drăgan, I., Iancu, C., **Deformarea plastică cu viteză mare**, Ed. Tehnică, București, 1984;
31. Drăghici, Gh., Merfea, B., **Cercetări teoretice privind prelucrarea cu impulsuri electrohidraulice cu transmiterea prin piston**, Lucrările celei de-a 2 - a conferințe de tehnologii și utilaje pentru prelucrarea materialelor prin deformare plastică la rece, Cluj, 1989;
32. Drobotă, V., **Rezistența materialelor**, Ed. Didactică și Pedagogică, București, 1982;
33. Edington, W., **Behaviour of metals under dynamic loads**, Ed. U.S. Lindholm, Springer - Verlag, New-York, 1968;
34. Ezra, A.A., **Principles and practices of explosion forming**, Martin Marietta Internal Report, R-64-5, April 1964;
35. Florescu, I., **Progrese în tehnologia procedeelor nconvenționale de prelucrare a metalelor**, I.N.I.D. București, 1978;
36. Gamanovici, V.I., **Isledovanie uprugih deformații pregrad bod destiem impulsov visokovoltного v jidkosti**, r. Elektronna obrabotka materialov, nr. 4/1973;
37. Georgescu, Al., Năsui, V., **Îndrumar pentru utilizarea unsoilor în industrie**, Ed. Tehnică, București, 1987;
38. Ghizdav, V., **Prelucrarea metalelor cu puteri și viteze mari**, Ed. Tehnică, București, 1967;
39. Gorohovici, A.I., **Oborudovanie electrohidrauliceskoi ștampovki**, r. Kuznecino ștampovocinoe proizvodstvo, nr. 3/1974;

40. Grave, H., F., **Măsurarea electrică a mărimilor neelectrice**, traducere din limba germană, Ed. Tehnică, București, 1966;
41. Gulii, G.A., Malojevski, P.P., **Oborudovanie I tehnologiceskie proțesii s islodovaniem elektrogidrauliceskogo efekta**, Mașinostroenie, Moscova, 1977;
42. Gulii, G.A., Malojevski, P.P., **Visocovoltnii electriceski razriad v silovih impulsnih sistemah**, Naukova Dumka, Kiev, 1977;
43. Gulii, G.A., Tkacenko, A.K., Petrușenko, A.C., **Primenenie electrogidrauliceskogo efekta v mașinostroenii, în Vestnik mașinostroeni**, p. 61- 63, nr. 6/1973;
44. Hangan, S., Iordănescu, M., Ghermănescu - Kunst, M., **Mecanica construcțiilor**, Ed. Didactică și Pedagogică, București, 1975;
45. Heler, A., **Electrotehnică și mașini electrice**, Litografia I.P.T.V.Timoșoara, 1981;
46. Hristev, A., **Mecanică și acustică**, Ed. Didactică și Pedagogică, București, 1982;
47. Ifrim, A., Noșingher, P., **Materiale electrotehnice**, Ed. Didactică și Pedagogică, București, 1979;
48. Iotkin, L.A., **Electrogidrauliceski efect**, M.L., Mașghiz, 1955;
49. Iotkin, L.A., **Electrogidrauliceska obrabotka materialov**, r. Electrorazrdna obrabotka materialov, M.L. 1971, p. 202 - 225;
50. Iotkin, L.A., **Electrogidrauliceski efect I ego primenenie v pramislenoati**, Mașinostroenie, 1986;
51. Jager, H., Seydel, U., **Coatings of metallic surfaces by electrical explosions of wires**, în Journal of Applied Physics, p. 345 - 347, vol. 2, nr. 6/1973;
52. Jamko, V.V., **O trotilovom echivalente mojnogo podvodnogo iskrovogo razrdna**, în Elektronna obrabotka materialov, p.16 -19, nr. 5/1972;
53. Kraus, P., **The design and application of the modern percussionpress**, în Sheet Metal Industries, p.137 -143, nr.172/1970;
54. Krivițki, E.V., **Isledovanie soprotivleni kanala podvodnogo iskrovogo razrdna**, în Jurnal tehnicesso fiziki, p. 2362 - 2365, t. XLII, 1972;
55. Krivițki, E.V., **O soprotivlenii rasvirhegost kanala podvodnogo iskrovogo razrdna**, în Elektronna obrabotka materialov, p. 69 - 71, nr. 3/1972;
56. Krivițki, E.V., Jamko, P.P., Apostoli, V.L., **Otenka energeticeskih parametrov kanala podvodnogo iskrovogo razrdna**, în Elektronna obrabotka materialov, p. 48 - 52, nr. 5/1971;
57. Lindholm, U.S., **Experiments in dynamic plasticity, mechanical behaviour of materials under dynamic loads**, Lindholm U. S. ed., Springer - Verlag, New - York, 1968;
58. Malojevski, P.P., **Primenenie I perspectivii uveliceni efektnosti electrogidrauliceskogo effecta**, r. Elektronna obrabotka materialov, nr. 6/1977;
59. Masami, O., Tomoichi, I., **Calculation of Pressure produced by hydro - spark - bull**, r. Japan Soc. of Prec. Engng., vol. 5, p. 79 - 80, nr. 3/1971;
60. Mazurovski, B., **Sostoianie I persprctivi razvitia electrogidroimpulsnoi obrabotka metallov dorleniem**, în Kuznecino stampovocinoe proizvodstvo, nr. 1/1986;
61. Mazurovski, B., Ivanov, A., **Electrogidrauliceska ustanovka ștampovki I razvadțovki**, r. Tehnologi sudostroeni, p. 44 - 45, nr. 2/1972;
62. Mazurovski, B., Nikonov, N., **Razvalțiovka trus electrozrțivnim sposobom**, în Kuznecino stampovocinoe proizvodstvo, nr. 8/1974;
63. McGrath, J.R., **Scaling laws for underwater exploding wires**, J. Acous. Soc. Amer., 50(3), Part 2, p. 1050 -1053, nr. 9/1971;
64. Melnikov, N.P., **K teorii razviti electriceskogo razrda v jidkosti na prelproboinoi stadi**, în Elektronna obrabotka materialov, p. 3 -13, nr. 3/1968;
65. Merfea, B., **Contribuții la aplicarea în tehnologia construcțiilor de mașini a procedului de prelucrare cu impulsuri electrohidraulice**, Teză de Doctorat, Brașov, 1993;
66. Micu, C., Dodoc, P., ș.a., **Aparate și sisteme de măsurare în construcții de mașini**, Ed. Tehnică, București, 1980

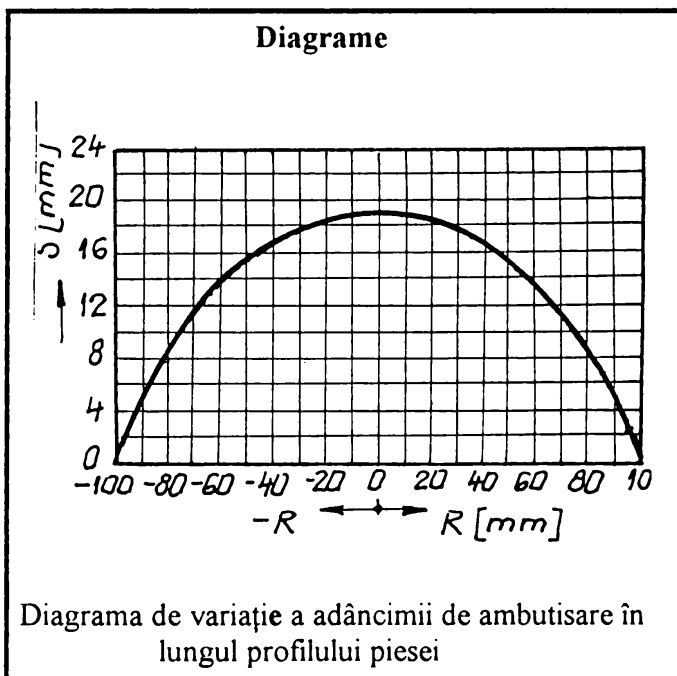
67. Mișu, C., Iambor, I.P., **Curbe plane**, Ed. Tehnică, București, 1989;
68. Moldoveanu, F., Racoviță, Z., Petrescu, Ș., **Grafica pe calculator**, Ed. Teora, București, 1996;
69. Nanu, A., **Tehnologia materialelor**, Ed. Didactică și Pedagogică, București, 1972;
70. Noland, M.C., **Designing for the high velocity metalworking processes**, Machine Design, p. 164 -182, nr. 8/1967;
71. Okuni, I.Z., **Izledovanie votn sjati, voznicaiosih pri impulsnom razrde v vode**, în Jurnal tehnesko fiziki, nr.2, 1971, p.292 - 307;
72. Okuni, I.Z., **Izledovanie electriceskih harakteristik impulsnogo razrdna v jidkosti**, în Jurnal tehnesko fiziki, nr.5, 1969, p.850 - 861;
73. Olariu, V., Sima, P., Achiriloaie, V., **Mecanica tehnică**, Ed. Tehnică, 1982;
74. Olszak, W., Perzyna, P., Sawczuk, A., **Teoria plasticității**, Ed. Tehnică, București, 1970;
75. Orava, R.N., Otto, H.E., **The effect of high energy rate forming on the terminal characteristic of metals**, în Journal of metals, nr. 2/1970;
76. Pearson, J., **Explosive working of metals**, Pergamon Press, Oxford, 1963;
77. Pearson, J., **Metal working with explosives**, în Journal of metals, p.673 - 681, nr. 9/1960;
78. Petricenko, V.N., **Izmenenie soprotivleni razrdnogo promejutka v lidernoi stadii razviti razrda v vode**, în Elektronna obrabotka materialov, p. 59 - 61, nr. 5/1973;
79. Pihovnikov, R.V., **Razvitie listovoi șampovki verivom, r. Kuznecino șampovocinoe proizvodstvo**, nr.1/1972;
80. Popescu, I., Merfea, B., **Cercetări teoretice și experimentale privind fretarea profilată prin explozie electrohidraulică a inelelor de rulmenți**, Buletinul Universității din Brașov, seria A, vol. XXVIII, 1986;
81. Popilov, L.J., **Electrofiziceska I electrohimiceska obrabotka materialov**, Mașinostroenie, 1969;
82. Popov, E.A., Dubinin, V.V., **Impulvsna șampovka tonkostenih koniceskidetalei, r. Kuznecino șampovocinoe proizvodstvo**, nr.12/1974;
83. Pridvornic, M., **Matrișarea electroimpulsivă**, Sinteză documentară, nr. 87 - 93, București, 1986;
84. Raih, D.B., Sancov, P.J., **Primenenie otrajatele voln v gidroimpusivih ustanovkah, r. Kuznecino șampovocinoe proizvodstvo**, nr. 5/1972;
85. Rinehart, J.S., Pearson I., **Explosive working of metals**, Pergamon Press, 1963;
86. Romanovski, V.P., **Ștanșarea și matrișarea la rece**, Ed. Tehnică, București, 1970;
87. Rose, J.L., Chou, P.C., **Study of cylindrical stress waves generated by exploding wires**, Experimental Mechanics, 12(2), p. 104 -106, 1972;
88. Rosinger, Șt., Iclânzan, T., **Tehnologia presării la rece**, litografia I.P.T.V.Timișoara, 1990;
89. Sanokoev, G.K., **Isledovanie smazok visokoskorostnoi șampovki, r. Kuznecino șampovocinoe proizvodstvo**, nr. 8/1971;
90. Schmidt, R.M., Fyfe, I.M., **An examination of dynamic fracture under biaxial strain conditions**, Experimental Mechanics, 13(4), p.163 -167, 1973;
91. Sinișin, V.I., Troișki, O.A., **Electroplasticeska deformații metala pered hrupkim razrujeniem, r. DAN U.S.S.R**, vol 199, p. 810 - 813, nr. 4/1971;
92. Sofman, L.A., **Teoria rascioti protessov holodoi șampovki**, Mașinostroenie, Moskva, I, 1964;
93. Sorohan, M., **Proprietățile fizice ale metalelor sub presiune hidrostatică**, Ed. Tehnică, București, 1988;
94. Spișin, G.I., Troișchi O.A., **O radiationno mehaniceskom efekte, r. Fiziki I himi obrabotki materialov**, nr. 4/1978;
95. Staicu, Șt., **Aplicații ale calculului matriceal în mecanica solidelor**, Ed. Academiei, București, 1986;
96. Stone, R.G., Bleakney, W., **The attenuation of spherical shock waves in air**, în Journal of Applied Physics, p. 670 - 678, vol.19, 1948;

-
97. Teodorescu, M., Zgură, Gh., Ciocârdia, C., **Prelucrări prin deformare plastică la rece**, Ed. Tehnică, București, vol. 1 și 2, 1987;
98. Trahtenberg, J.B., **Impulsna ștampovka detalei**, în Kuznecino ștampovocinoe proizvodstvo, p. 4- 6, nr. 1/1974;
99. Timoshenko, S.P., Woinowsky, S., Krieger, S., **Teoria plăcilor plane și curbe**, Ed. Tehnică, București, 1968;
100. Tureac, I., **Presarea la rece prin electrohidroimpulsuri**, r. Construcția de Mașini nr.10, 1984;
101. Vaghin, V.A., **Electrohidroimpulsnaia vitajka cilindriceski detalei**, în Kuznecino ștampovocinoe proizvodstvo, nr. 4/1990;
102. Voronin, A.A., **Rascet zazemlitatei podstații po dolistimomu soprotivlenio rastekania**, r. Elektriceske stanții, nr. 2/1970;
103. Zavarihin, V.A., Pavlenko, A.K., **Malogabaritii generator impulsniș tokov electrohidrauliceski ustanovok**, r. Electrotehniceska promîjlenosti, nr. 308/1968;
104. Zernow, L., **High velocity forming**, Machine Design, 44, p. 142 - 143, nr. 2/1972;
105. Zgură, Gh., Ciocârdia, C., Bude, G., **Prelucrarea metalelor prin deformare la rece**, Ed. Tehnică, București, 1977;
106. Zgură, Gh., Teodorescu, M., **Tehnologia presării la rece**, Ed. Didactică și Pedagogică, București, 1980;
107. * * * *, **Prescripții tehnologice privind vitezele optime de deformare pentru metalele și aliajele neferoase**, Sinteză documentară, Prelucrarea metalelor prin deformare plastică, B.I.T., nr.4/1973;
108. * * * *, **Privire asupra utilajelor și tehnologiilor moderne de deformare din punctul de vedere al vitezelor de deformare**, Sinteză documentară, Prelucrarea metalelor prin deformare plastică, B.I.T., nr.9/1972;
109. * * * *, **Procedee de prelucrare utilizând energia radiantă**, în Industrial Diamond Review, vol. 28/1968, nr.335;
110. * * * *, **Hutte. Manualul inginerului. Fundamente.**, traducere din limba germană, Ed. Tehnică, București, 1995.

U.E.M. Reșița	<i>Determinarea funcțiilor obiectiv</i>	Fișă de rezultate nr. <u>1</u>
---------------	---	--------------------------------

Parametrii circuitului electric		Mediul lichid	Fire explozive	Cu străpungere directă	Observații
Tensiunea de încărcare a bateriei de condensatoare	23300V	apă		distanța între electrozi : 40 mm	aria porțiunii dezgolite a electrozilor : 2,56 cm ²
Capacitatea bateriei de condensatoare	8 μF	rezistivitate 12,5 Ω·m		electrozi Cu, vârf, φ 8 mm	regim monoimpuls
Inductanța	3,2 μH			dist.axă - SF: 60 mm	

MATERIAL: tablă OL 37, grosime 1,2 mm
 $R_r = 390 \text{ MPa}$; $R_c = 240 \text{ MPa}$; $\delta_r = 28 \%$



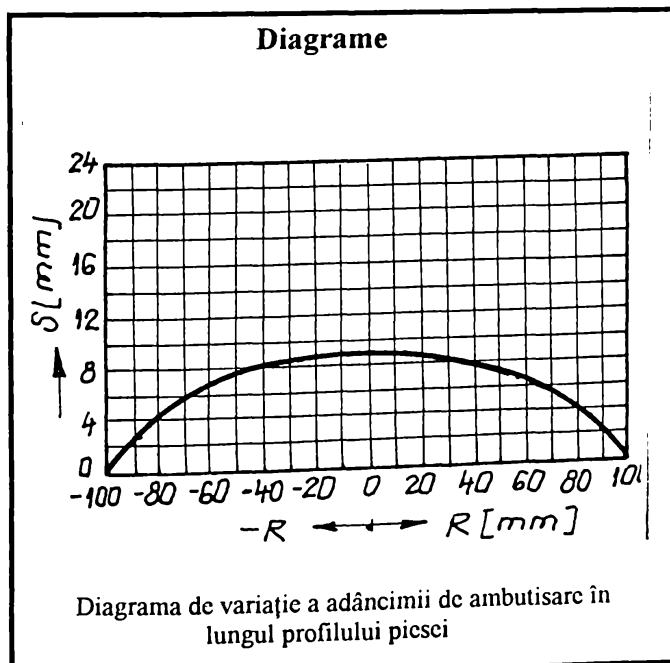
Nr. pct. prof	Raza de pe semifabr. plan [mm]	Adâncimea de ambutisare [mm]	
		Măsurată	Calculată
0	0	18,8	18,7
1	5	18,7	18,6
2	10	18,6	18,4
3	15	18,5	18,2
4	20	18,3	18,0
5	25	18,1	17,7
6	30	17,8	17,3
7	35	17,4	16,9
8	40	16,7	16,4
9	45	16,2	15,8
10	50	15,5	15,1

11	55	14,6	14,3
12	60	13,7	13,4
13	65	12,7	12,4
14	70	11,6	11,2
15	75	10,4	9,9
16	80	8,6	8,5
17	85	6,7	6,9
18	90	4,9	5,1
19	95	3,1	3,2
20	100	1,0	1,1

U.E.M. Reșița	Anexa 1. <i>Determinarea funcțiilor obiectiv</i>	Fișă de rezultate nr. <u>2</u>
---------------	--	--------------------------------

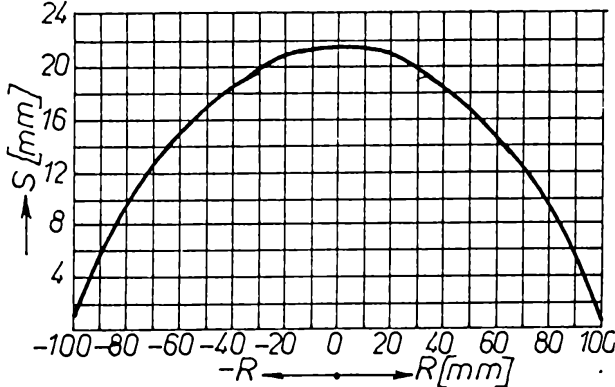
Parametrii circuitului electric		Mediul lichid	Fire explozive	Cu străpungere directă	Observații
Tensiunea de încărcare a bateriei de condensatoare	23300 V	apă		distanța între electrozi : 60 mm	aria porțiunii dezgolite a electrozilor : 2,56 cm ²
Capacitatea bateriei de condensatoare	8 μF	rezistivitate 12,5 Ω·m		electrozi Cu, vârf, φ 8 mm	regim monoimpuls
Inductanța	3,2 μH			dist.axă - SF: 80 mm	

MATERIAL: tablă OL 37, grosime 1,2 mm
 $R_r = 390 \text{ MPa}$; $R_c = 240 \text{ MPa}$; $\delta_r = 28 \%$



Nr. pct. prof	Raza de pc scmfabr. plan [mm]	Adâncimea de ambutisare [mm]	
		Măsurată	Calculată
0	0	9,3	9,8
1	5	9,2	9,7
2	10	9,0	9,6
3	15	8,9	9,5
4	20	8,7	9,4
5	25	8,5	9,2
6	30	8,3	9,1
7	35	8,1	8,8
8	40	7,8	8,6
9	45	7,5	8,3
10	50	7,2	7,9

11	55	6,9	7,5
12	60	6,4	7,0
13	65	5,8	6,5
14	70	5,3	5,9
15	75	4,7	5,2
16	80	4,2	4,5
17	85	3,3	3,6
18	90	2,5	2,7
19	95	1,4	1,7
20	100	0,5	0,6

U.E.M. Reșița		Anexa 1. Determinarea funcțiilor obiectiv		Fișă de rezultate nr. <u>3</u>	
Parametrii circuitului electric		Mediul lichid	Fire explozive	Cu străpungere directă	Observații
Tensiunea de încărcare a bateriei de condensatoare	30000 V	apă		distanța între electrozi :	aria porțiunii dezgolite a electrozilor :
Capacitatea bateriei de condensatoare	8 μ F	rezistivitate 12,5 $\Omega \cdot$ m		60 mm	2,56 cm ²
Inductanța	3,2 μ H			electrozi Cu, vârf, ϕ 8 mm dist.axă - SF: 60 mm	regim monoimpuls
MATERIAL: tablă neagră, grosime 1 mm $R_t = 320$ MPa ; $R_c = 180$ MPa ; $\delta_r = 33$ %					
Diagrame					
 <p style="text-align: center;">Diagrama de variație a adâncimii de ambutisare în lungul profilului piesei</p>					
Nr. pct. prof	Raza de pe semifabr. plan [mm]	Adâncimea de ambutisare [mm]			
		Măsurată	Calculată		
0	0	21,6	21,5		
1	5	21,5	21,4		
2	10	21,4	21,2		
3	15	21,1	20,9		
4	20	20,7	20,6		
5	25	20,2	20,3		
6	30	19,7	19,9		
7	35	19,2	19,4		
8	40	18,3	18,8		
9	45	17,5	18,1		
10	50	16,7	17,3		
11	55	15,8	16,4		
12	60	14,7	15,4		
13	65	13,5	14,2		
14	70	12,3	12,9		
15	75	10,8	11,4		
16	80	9,4	9,8		
17	85	7,4	7,9		
18	90	5,4	5,9		
19	95	3,0	3,7		
20	100	0,9	1,2		

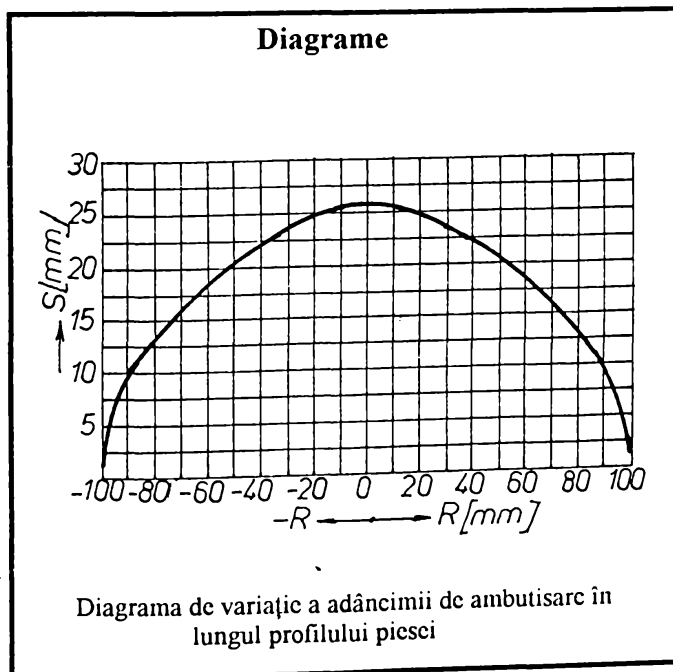
U.E.M. Reșița		Anexa 1. Determinarea funcțiilor obiectiv		Fișă de rezultate nr. 4	
Parametrii circuitului electric		Mediul lichid	Fire explozive	Cu străpungere directă	Observații
Tensiunea de încărcare a bateriei de condensatoare	26800 V	apă		distanța între electrozi :	aria porțiunii dezgolite a electrozilor :
Capacitatea bateriei de condensatoare	8 μ F	rezistivitate 12,5 $\Omega \cdot$ m		50 mm	2,56 cm ²
Inductanța	3,2 mH			electrozi Cu, vârf, ϕ 8 mm	regim monoimpuls
				dist.axă - SF: 60 mm	
MATERIAL: tablă OL 37, grosime 1,5 mm					
$R_r = 390$ MPa ; $R_c = 240$ MPa ; $\delta_r = 28$ %					
Diagrame					
<p style="text-align: center;">- R ← → R [mm]</p> <p>Diagrama de variație a adâncimii de ambutisare în lungul profilului piesei</p>					
Nr. pct. prof	Raza de pe semifabr. plan [mm]	Adâncimea de ambutisare [mm]			
		Măsurată	Calculată		
0	0	14,8	15,2		
1	5	14,6	15,0		
2	10	14,4	14,8		
3	15	14,3	14,6		
4	20	14,2	14,4		
5	25	13,9	14,3		
6	30	13,6	14,1		
7	35	13,2	13,8		
8	40	13,8	13,5		
9	45	12,4	13,1		
10	50	11,9	12,7		
11	55	11,4	12,1		
12	60	10,6	11,5		
13	65	9,8	10,7		
14	70	9,2	9,8		
15	75	8,1	8,8		
16	80	7,0	7,7		
17	85	5,5	6,2		
18	90	4,0	4,6		
19	95	2,8	2,8		
20	100	0,7	0,8		

U.E.M. Reșița		Anexa 1. Determinarea funcțiilor obiectiv		Fișă de rezultate nr. <u>5</u>																																																			
Parametrii circuitului electric		Mediul lichid	Fire explozive	Cu străpungere directă	Observații																																																		
Tensiunea de încărcare a bateriei de condensatoare	26800 V	apă rezistivitate 12,5 Ω·m		distanța între electrozi : 50 mm	aria porțiunii dezgolite a electrozilor : 2,56 cm ² regim monoimpuls																																																		
Capacitatea bateriei de condensatoare	8 μF			electrozi Cu, vârf, φ 8 mm																																																			
Inductanța	3,2 μH			dist.axă - SF: 80 mm																																																			
<p>MATERIAL: tablă OL 37, grosime 1,5 mm $R_r = 390 \text{ MPa}$; $R_c = 240 \text{ MPa}$; $\delta_r = 28 \%$</p>																																																							
Diagrame																																																							
<p style="text-align: center;">- R ← → R [mm]</p>			<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Nr. pct. prof</th> <th rowspan="2">Raza de pe semifabr. plan [mm]</th> <th colspan="2">Adâncimea de ambutisare [mm]</th> </tr> <tr> <th>Măsurată</th> <th>Calculată</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>0</td><td>12,9</td><td>11,0</td></tr> <tr><td>1</td><td>5</td><td>12,7</td><td>10,9</td></tr> <tr><td>2</td><td>10</td><td>12,4</td><td>10,7</td></tr> <tr><td>3</td><td>15</td><td>12,1</td><td>10,6</td></tr> <tr><td>4</td><td>20</td><td>11,8</td><td>10,5</td></tr> <tr><td>5</td><td>25</td><td>11,4</td><td>10,3</td></tr> <tr><td>6</td><td>30</td><td>11</td><td>10,2</td></tr> <tr><td>7</td><td>35</td><td>10,5</td><td>10,0</td></tr> <tr><td>8</td><td>40</td><td>9,9</td><td>9,8</td></tr> <tr><td>9</td><td>45</td><td>9,5</td><td>9,5</td></tr> <tr><td>10</td><td>50</td><td>9,1</td><td>9,2</td></tr> </tbody> </table>			Nr. pct. prof	Raza de pe semifabr. plan [mm]	Adâncimea de ambutisare [mm]		Măsurată	Calculată	0	0	12,9	11,0	1	5	12,7	10,9	2	10	12,4	10,7	3	15	12,1	10,6	4	20	11,8	10,5	5	25	11,4	10,3	6	30	11	10,2	7	35	10,5	10,0	8	40	9,9	9,8	9	45	9,5	9,5	10	50	9,1	9,2
Nr. pct. prof	Raza de pe semifabr. plan [mm]	Adâncimea de ambutisare [mm]																																																					
		Măsurată	Calculată																																																				
0	0	12,9	11,0																																																				
1	5	12,7	10,9																																																				
2	10	12,4	10,7																																																				
3	15	12,1	10,6																																																				
4	20	11,8	10,5																																																				
5	25	11,4	10,3																																																				
6	30	11	10,2																																																				
7	35	10,5	10,0																																																				
8	40	9,9	9,8																																																				
9	45	9,5	9,5																																																				
10	50	9,1	9,2																																																				
<p>Diagrama de variație a adâncimii de ambutisare în lungul profilului piesei</p>			<table border="1"> <tbody> <tr><td>11</td><td>55</td><td>8,4</td><td>8,8</td></tr> <tr><td>12</td><td>60</td><td>7,8</td><td>8,3</td></tr> <tr><td>13</td><td>65</td><td>7,1</td><td>7,8</td></tr> <tr><td>14</td><td>70</td><td>6,4</td><td>7,1</td></tr> <tr><td>15</td><td>75</td><td>5,6</td><td>6,4</td></tr> <tr><td>16</td><td>80</td><td>4,7</td><td>5,5</td></tr> <tr><td>17</td><td>85</td><td>3,8</td><td>4,5</td></tr> <tr><td>18</td><td>90</td><td>2,6</td><td>3,3</td></tr> <tr><td>19</td><td>95</td><td>1,5</td><td>2,0</td></tr> <tr><td>20</td><td>100</td><td>0,5</td><td>0,6</td></tr> </tbody> </table>			11	55	8,4	8,8	12	60	7,8	8,3	13	65	7,1	7,8	14	70	6,4	7,1	15	75	5,6	6,4	16	80	4,7	5,5	17	85	3,8	4,5	18	90	2,6	3,3	19	95	1,5	2,0	20	100	0,5	0,6										
11	55	8,4	8,8																																																				
12	60	7,8	8,3																																																				
13	65	7,1	7,8																																																				
14	70	6,4	7,1																																																				
15	75	5,6	6,4																																																				
16	80	4,7	5,5																																																				
17	85	3,8	4,5																																																				
18	90	2,6	3,3																																																				
19	95	1,5	2,0																																																				
20	100	0,5	0,6																																																				

U.E.M. Reșița	Anexa 1. Determinarea funcțiilor obiectiv	Fișă de rezultate nr. <u>6</u>
----------------------	--	--------------------------------

Parametrii circuitului electric		Mediul lichid	Fire explozive	Cu străpungere directă	Observații
Tensiunea de încărcare a bateriei de condensatoare	23300V	apă		distanța între electrozi : 30 mm	aria porțiunii dezgolite a electrozilor : 2,56 cm ²
Capacitatea bateriei de condensatoare	8 μF	rezistivitate 12,5 Ω · m		electrozi Cu, vârf, φ 8 mm	regim monoimpuls
Inductanța	3,2 μH			dist.axă - SF: 60 mm	

MATERIAL: tablă zincată, grosime 0,7 mm
 $R_r = 320 \text{ MPa}$; $R_c = 180 \text{ MPa}$; $\delta_r = 33 \%$



Nr. pct. prof.	Raza de pe semifabr. plan [mm]	Adâncimea de ambutisare [mm]	
		Măsurată	Calculată
0	0	25,9	24,5
1	5	25,8	24,1
2	10	25,7	23,8
3	15	25,2	23,5
4	20	24,6	23,2
5	25	24,1	22,8
6	30	23,5	22,4
7	35	22,8	21,9
8	40	22,1	21,4
9	45	21,4	20,8
10	50	20,6	20,0

11	55	19,6	19,2
12	60	18,5	18,2
13	65	17,5	17,0
14	70	16,4	15,6
15	75	15,0	14,1
16	80	13,5	12,4
17	85	11,7	10,4
18	90	9,8	8,2
19	95	6,9	5,8
20	100	1,4	3,0

U.E.M. Reșița		Anexa 1. Determinarea funcțiilor obiectiv		Fișă de rezultate nr. <u>7</u>	
Parametrii circuitului electric		Mediul lichid		Fire explozive	Cu străpungere directă
Tensiunea de încărcare a bateriei de condensatoare	26800 V	apă			distanța între electrozi : 60 mm electrozi Cu, vârf, ϕ 8 mm dist.axă - SF: 80 mm
Capacitatea bateriei de condensatoare	8 μ F	rezistivitate 12,5 $\Omega \cdot$ m			
Inductanța	3,2 μ H				
Observații					
aria porțiunii dezgolite a electrozilor : 2,56 cm ² regim monoimpuls					
MATERIAL: tablă zincată, grosime 0,7 mm $R_r = 320$ MPa ; $R_c = 180$ MPa ; $\delta_r = 33$ %					
Diagrame					
<p style="text-align: center;">Diagrama de variație a adâncimii de ambutisare în lungul profilului piesei</p>					
<i>Nr. pct. prof</i>	Raza de pe semifabr. plan [mm]	Adâncimea de ambutisare [mm]			
		<i>Măsurată</i>	<i>Calculată</i>		
0	0	20,9	19,8		
1	5	20,8	19,5		
2	10	20,6	19,3		
3	15	20,3	19,0		
4	20	20,0	18,8		
5	25	19,3	18,5		
6	30	18,5	18,1		
7	35	17,9	17,8		
8	40	17,3	17,3		
9	45	16,8	16,8		
10	50	16,3	16,2		
11	55	15,5	15,5		
12	60	14,6	14,7		
13	65	13,3	13,7		
14	70	12,9	12,7		
15	75	11,9	11,4		
16	80	10,6	10,0		
17	85	9,3	8,4		
18	90	7,8	6,6		
19	95	5,3	4,7		
20	100	1,9	2,4		

U.E.M. Reșița

Anexa 1. Determinarea funcțiilor obiectiv

Fișă de rezultate nr. 8

Parametrii circuitului electric		Mediul lichid	Fire explozive	Cu străpungeră directă	Observații
Tensiunea de încărcare a bateriei de condensatoare	26800 V	apă		distanța între electrozi :	aria porțiunii dezgolite a electrozilor : 2,56 cm ² regim monoimpuls
Capacitatea bateriei de condensatoare	8 μF	rezistivitate 12,5 Ω·m		60 mm	
Inductanța	3,2 mH			electrozi Cu, vârf, φ 8 mm dist.axă - SF: 60 mm	

MATERIAL: tablă A3 grupa 02, grosime 0,5 mm

 $R_r = 370 \text{ MPa}$; $R_c = 240 \text{ MPa}$; $\delta_r = 34 \%$

Diagrame

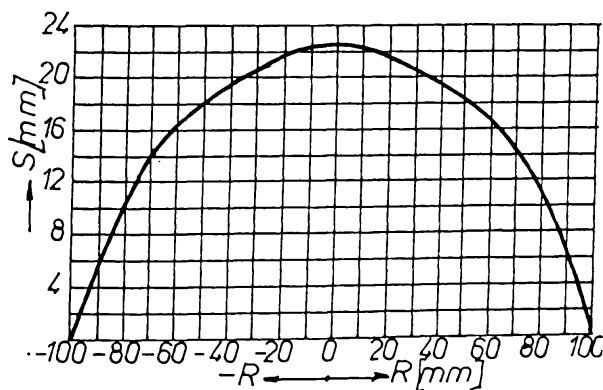


Diagrama de variație a adâncimii de ambutisare în lungul profilului piesei

Nr. pct. prof	Raza de pe semifabr. plan [mm]	Adâncimea de ambutisare [mm]	
		Măsurată	Calculată
0	0	22,5	22,4
1	5	22,4	22,1
2	10	22,3	21,8
3	15	22,1	21,6
4	20	21,8	21,3
5	25	21,3	20,9
6	30	20,7	20,6
7	35	20,1	20,1
8	40	19,4	19,6
9	45	18,7	19,0
10	50	18,0	18,4

11	55	17,3	17,6
12	60	16,6	16,7
13	65	15,4	15,6
14	70	14,2	14,4
15	75	12,4	12,9
16	80	10,7	11,4
17	85	8,6	9,6
18	90	6,7	7,5
19	95	4,2	5,3
20	100	1,5	2,8

U.E.M. Reșița		ANEXA 2. Parametrii circuitului electric				Fișă de rezultate nr. <u> 1 </u>	
Nr. crt.	U ₀ [kV]	l [mm]	C [μF]	T [μscc]	T _m [μscc]	I _m [kA]	η ₁
1	26,82	60	8	20,0	10,8	32,0	0,557
2	39,67	20	8	15,8	7,9	61,3	0,126
3	23,61	60	8	21,5	11,7	25,8	0,633
4	23,61	70	8	23,0	13,3	22,1	0,739
5	36,46	50	8	17,0	8,8	51,6	0,342
6	33,24	50	8	17,4	9,0	46,1	0,375
7	33,24	70	8	19,5	10,4	41,0	0,525
8	36,46	20	8	15,7	7,9	56,2	0,137
9	33,24	20	8	15,9	8,0	51,	0,150
10	30,03	20	8	16,0	8,	45,9	0,166
11	26,82	20	8	15,8	8,1	40,7	0,186
12	23,61	20	8	16,1	8,2	35,5	0,211
13	23,61	30	8	16,8	8,6	33,9	0,317
14	26,82	30	8	16,5	8,4	39,2	0,279
15	30,03	30	8	16,3	8,3	44,5	0,249
16	33,24	30	8	16,1	8,2	49,8	0,225
17	36,46	30	8	16,1	8,1	55,0	0,205
18	39,67	30	8	16,0	8,0	60,2	0,188
19	39,67	40	8	16,3	8,3	58,7	0,251
20	38,87	40	8	16,3	8,3	57,4	0,256
21	38,07	40	8	16,4	8,3	56,1	0,262
22	36,46	40	8	16,4	8,4	53,4	0,273
23	35,66	40	8	16,5	8,4	52,1	0,280
24	34,85	40	8	16,5	8,5	50,8	0,286
25	33,24	40	8	16,7	8,5	48,1	0,300
26	31,64	40	8	16,8	8,6	45,4	0,315
27	39,67	50	8	16,8	8,6	57,0	0,314
28	23,61	50	8	19,5	10,4	29,8	0,528
29	24,41	50	8	19,2	10,2	30,5	0,510
30	26,02	50	8	18,8	9,9	33,4	0,479
31	27,62	50	8	18,3	9,7	36,3	0,451
32	29,23	50	8	18,0	9,4	39,1	0,426
33	28,43	60	8	19,4	10,4	35,0	0,526
34	30,03	60	8	19,0	10,1	37,9	0,498
35	34,05	60	8	18,18	9,5	45,1	0,439
36	36,46	60	8	17,2	9,3	49,4	0,410
37	38,87	60	8	17,53	9,1	53,6	0,385
38	40,47	60	8	17,3	9,0	56,3	0,369
39	24,41	70	8	23,4	12,9	23,9	0,714
40	26,02	70	8	22,3	12,2	27,1	0,670
41	27,63	70	8	21,5	11,7	30,0	0,631
42	29,23	70	8	20,8	11,2	33,4	0,597
43	30,84	70	8	20,2	10,9	36,5	0,566
44	33,24	70	8	19,5	10,4	41,0	0,525
45	37,26	70	8	18,6	9,8	48,3	0,468
46	30,84	80	8	21,8	11,9	33,1	0,646
47	32,44	80	8	21,1	11,5	36,3	0,614

**PROGRAMUL DE SIMULARE A OPERAȚIEI DE AMBUTISARE PRIN
ELECTROHIDROIMPULSURI A PIESELOR CU FORME DE REVOLUȚIE**

```

program tpr;
{(c) sept. 1996 by ing.Liviu Coman}
uses graph,crt;
label start,exit,new;
const C=8e-6;      {capacitatea bateriei de condensatoare}
      Lh=3.2e-6;   {inductanta circuitului de descarcare}
      A=1e5;      {constanta scântei}
      ro=1000;    {densitatea apei}
      R=100;
var  U0,l,h,f,nr:real;
     eta,psi:real;
     incx,incy,min,max,mx,mn,scal:real;
     nmax,pmax,imax,smax,pus,pres:real;
     pl,pt,prez,y:array[1..100] of real;
     s,sm,ri,si:array[1..150] of real;
     confirm:char;
     T,Tm,im:real;
     b1,b2,b3,x,x0,x1,a0,a1:real;
     i,j,k,n,dx,dy:integer;
     grafic,mat:string[5];
{*****}
procedure calcul_randamente;
begin
  l:=l*1e-3;
  h:=h*1e-3;
  eta:=sqrt((A*pi*sqr(l))/(sqr(U0)*sqr(Lh*C)));
  psi:=exp(1/3*((ln(A*pi*sqr(l))/(sqr(U0)*sqr(Lh*C)))));
end;
{*****}
procedure calcul_ct_imax;
begin
  x0:=1-0.2*eta+1.2*sqr(eta);
  x1:=0.5-0.1*eta+0.75*sqr(eta);
  im:=1-0.1*eta-0.61*sqr(eta);
  imax:=im*U0*sqr(C/Lh);
  T:=x0*pi*sqr(Lh*C);
  Tm:=x1*pi*sqr(Lh*C)
end;
{*****}
procedure calcul_b1_b2_b3;
begin
  b1:= -13.2335+20.6678*eta-3.01500*sqr(eta)-4.81500*sqr(eta)*eta;
  b2:= 42.4338-110.3236*eta+88.8580*sqr(eta)-20.9125*sqr(eta)*eta;
  b3:= -30.8551+93.5694*eta-93.1583*sqr(eta)+30.4075*sqr(eta)*eta
end;
procedure calcul_parametri;
var u,v:real;
     t10,xi:real;
begin
  for i:=1 to 150 do
  begin
    t10:=T/150;
    xi:=t10*i/(pi*sqr(Lh*C));
    u:=(sqr(pi)*b1*(cos(pi*xi)-1)+2*pi*b2*(sin(pi*xi)-pi*xi))/(sqr(pi)*pi);
    v:=6*b3*(1-cos(pi*xi)-(sqr(pi*xi)/2))/(sqr(pi)*pi);
    s[i]:=(u+v)*U0*sqr(C/Lh);
  end;
end;

```

```

    ri[i]:=(1*sqrt(2*A))/(U0*(1-0.85*psi)*exp(1.5*ln(t10*i))/Lh);
  end;
  t10:=Tm/150;
  for i:=1 to 150 do
  sm[i]:=t10*i*U0*(1-0.85*psi)/Lh;
  nmax:=(1.9*sqrt(A*psi)*U0*(1-0.85*psi)*exp(1/4*ln(Lh*C)))/Lh;
  if f<=2.5 then
  begin
    grafic:='multi';
    u:=0.16*exp(1/4*ln(A))*exp(3/8*ln(ro))*exp(3/4*ln(U0))*exp(1/8*ln(C));
    v:=sqrt(h)*exp(1/8*ln(l))*sqrt(Lh);
    pus:=u/v;
    pmax:=0.8*pus/1e6;
    for i:=1 to 100 do
    begin
      pl[i]:=pmax*(1.037-0.359*i/R-0.601*sqrt(i)/sqrt(R)-2.765*exp(3*ln(i/R))+2.803*exp(4*ln(i/R)));
      pt[i]:=pmax*(1.089-3.171*i/R+2.385*sqrt(i)/sqrt(R)+1.292*exp(3*ln(i/R))-1.495*exp(4*ln(i/R)));
      prez[i:=(pl[i]+pt[i])/2
    end
  end;
  if (f>2.5) and (f<=5.5) then
  begin
    grafic:='pl';
    u:=0.2*(1-0.08*f)*exp(1/4*ln(A))*exp(3/8*ln(ro))*exp(3/4*ln(U0))*exp(1/8*ln(C));
    v:=sqrt(h)*exp(1/8*ln(l))*sqrt(Lh);
    pus:=u/v;
    pmax:=0.8*pus/1e6;
    for i:=1 to 100 do
    pl[i]:=pmax*(1.027-0.128*i/R-7.067*sqrt(i)/sqrt(R)+11.155*exp(3*ln(i/R))-4.873*exp(4*ln(i/R)))
  end;
  if f>5.5 then
  begin
    grafic:='pl';
    u:=0.26*exp(1/4*ln(A))*exp(3/8*ln(ro))*exp(3/4*ln(U0))*exp(1/8*ln(C))*sqrt(l);
    v:=exp(3/8*ln(h))*sqrt(Lh);
    pus:=u/v;
    pmax:=0.8*pus/1e6;
    for i:=1 to 100 do
    pl[i]:=pmax*(1.089-3.171*i/R+2.385*sqrt(i)/sqrt(R)+1.292*exp(3*ln(i/R))-1.495*exp(4*ln(i/R)))
  end
end;
{*****}
procedure hires_on;
var driver,mdgrafic:integer;
begin
  driver:=detect;
  mdgrafic:=0;
  initgraph(driver,mdgrafic,'c:\bp\bgi');
  cleardevice;
  sctcolor(blue);
  rectangle(0,0,639,479)
end;
{*****}
procedure cadru;
var top,down:string[10];
begin
  setcolor(blue);
  setfillstyle(solidfill,darkgray);
  bar(50+dx,275-dy,200+dx,425-dy);
  for i:=1 to 9 do
  begin
    moveto(50+dx+i*15,275-dy);    {vertical}

```

```

    linerel(0,150);
    moveto(50+dx,275+i*15-dy);    {orizontal}
    linerel(150,0);
    j:=round(i/2);
    rectangle(50+dx-j,275-j-dy,200+dx+j,425+j-dy)
end;
setcolor(yellow);
settextstyle(2,0,4);
scale:=150/(max-min);
incy:=(max-min)/5;
mx:=max;mn:=-incx;
mx:=mx+incy;
for i:=1 to 6 do
begin
    mx:=mx-incy;
    mn:=mn+incx;
    str(mx:0:0,top);
    str(mn:0:1,down);
    settextstyle(2,1,4);
    outtextxy(15+dx+i*30,435-dy,down);
    settextstyle(2,0,4);
    outtextxy(dx+15,240+i*30-dy,top);
end
end;
{*****}
procedure grafic_1;
begin
    dx:=0;dy:=0;
    min:=0;max:=0;    {initializare extreme}
    for i:=1 to 150 do
    begin    {determina valorile extreme ale lui s[i]}
        if s[i]<min then min:=s[i];
        if s[i]>max then max:=s[i]
    end;
    incx:=T/5*1e6;
    cadru;
    outtextxy(60+dx,247,'Reprezentarea grafica');
    outtextxy(60+dx,255,'a variatiei de curent');
    settextstyle(2,1,4);
    outtextxy(50,295,'amperi');
    settextstyle(2,0,4);
    outtextxy(150+dx,410,'T [Šs]');
    setviewport(50,275,200,425,true);
    setcolor(white);
    for i:=1 to 149 do
    line(i,round(150+(min-s[i])*scale),i+1,round(150+(min-s[i+1])*scale));
    graphdefaults
end;
{*****}
procedure grafic_2;
begin
    dx:=200;dy:=0;
    min:=0;max:=0;    {initializare extreme}
    for i:=1 to 150 do
    begin    {determina valorile extreme ale lui sm[i]}
        if sm[i]<min then min:=sm[i];
        if sm[i]>max then max:=sm[i]
    end;
    incx:=min+Tm/5*1e6;
    cadru;
    settextstyle(2,0,4);
    outtextxy(50+dx,247,'Aproximarea curentului in');

```

```

    outtextxy(55+dx,255,'perioada sa de crestere');
    settextstyle(2,1,4);
    outtextxy(250,295,'amperi');
    settextstyle(2,0,4);
    outtextxy(150+dx,410,'Tm [Šs]');
    setviewport(250,275,400,425,truc);
    setcolor(white);
    for i:=1 to 149 do
    line(i,round(150-sm[i]*scale),i+1,round(150-sm[i+1]*scale));
    graphdefaults
end;
{*****}
procedure grafic_3;
begin
    dx:=400;dy:=0;
    min:=0;max:=0;          {initializare extreme}
    for i:=1 to 150 do
    begin
        {determina valorile extreme ale lui Ri[i]}
        if ri[i]<min then min:=ri[i];
        if ri[i]>max then max:=ri[i]
    end;
    incx:=min+T/5*1c6;
    cadru;
    settextstyle(2,0,4);
    outtextxy(65+dx,247,'Variatia rezistentei');
    outtextxy(55+dx,255,'canalului de descarcare');
    settextstyle(2,1,4);
    outtextxy(450,295,'ohmi');
    settextstyle(2,0,4);
    outtextxy(150+dx,410,'T [Šs]');
    setviewport(450,275,600,425,truc);
    setcolor(white);
    for i:=1 to 149 do
    line(i,round(150-ri[i]*scale),i+1,round(150-ri[i+1]*scale));
    graphdefaults
end;
{*****}
procedure grafic_4;
label exit;
begin
    dx:=0;dy:=230;
    min:=0;max:=0;
    for i:=1 to 100 do
    begin
        {determina valorile extreme ale lui Pl}
        if pl[i]<min then min:=pl[i];
        if pl[i]>max then max:=pl[i]
    end;
    incx:=min+100/5;
    cadru;
    settextstyle(2,0,4);
    outtextxy(65+dx,247-dy,'Reprezentarea grafica');
    outtextxy(90+dx,255-dy,'a presiunilor');
    settextstyle(2,1,4);
    outtextxy(50,295-dy,'MPa');
    settextstyle(2,0,4);
    outtextxy(100+dx,180,'raza [mm]');
    setviewport(50,45,200,195,truc);
    setcolor(white);
    for i:=1 to 99 do
    line(150-round((i*1.5),round(pl[i]*scale),150-round((i+1)*1.5),round(pl[i+1]*scale));
    if grafic='pl' then goto exit;
    min:=0;max:=0;

```



```

for i:=1 to 100 do
begin
    {determina valorile extreme ale lui Pt}
    if pt[i]<min then min:=pt[i];
    if pt[i]>max then max:=pt[i]
end;
scale:=150/(max-min);
setcolor(yellow);
for i:=1 to 99 do
line(150-round(i*1.5),round(pt[i]*scale),150-round((i+1)*1.5),round(pt[i+1]*scale));
for i:=1 to 100 do
begin
    {determina valorile extreme ale lui Pt}
    if prez[i]<min then min:=prez[i];
    if prez[i]>max then max:=prez[i]
end;
scale:=150/(max-min);
setcolor(black);
for i:=1 to 99 do
line(150-round(i*1.5),round(prez[i]*scale),150-round((i+1)*1.5),round(prez[i+1]*scale));
exit:graphdefaults
end;
{*****}
procedure init;
begin
    dx:=0;dy:=230;
    incx:=min+100/5;
    cadru;
    settxtstyle(2,0,4);
    outtextxy(72+dx,247-dy,'Calculul profilului');
    outtextxy(70+dx,255-dy,'in regim multiimpuls');
    settxtstyle(2,1,4);
    outtextxy(50,295-dy,'mm');
    settxtstyle(2,0,4);
    outtextxy(100+dx,180,'raza [mm]');
end;
{*****}
procedure grafic_5;
begin
    setcolor(black);
    for i:=1 to 99 do
line(200-round(i*1.5),round(195-si[i]*scale),200-round((i+1)*1.5),195-round(si[i+1]*scale));
graphdefaults
end;
{*****}
procedure dialog(mesaj:string;textpy:integer);
var sir:string[30];
    c:char;
    code:integer;
begin
    setcolor(yellow);
    settxtstyle(2,0,4);
    outtextxy(50,textpy,mesaj);
    sir:="";
    i:=length(mesaj)+4;
    repeat
        c:=readkey;
        if (c<>chr(13)) and (c>chr(45)) and (c<chr(58)) then
        begin
            sound(5000);delay(50);nosound;
            i:=i+1;
            sir:=sir+c;
            setcolor(green);
            outtextxy(i*6,textpy,c)
        end
    until c=chr(13);
end;

```

```

    end;
    until c=chr(13);
    val(sir,nr,code)
end;
{*****}
procedure alegere_material;
label back;
var tasta:'1'..'6';
    u,v:real;
begin
    settextstyle(2,0,4);
    setcolor(yellow);
    outtextxy(10,300,'Alegeti tipul tablei prin tastarea numarului corespunzator tipului tablei:');
    setcolor(green);
    outtextxy(50,320,'1. Tabla zincata cu grosimea de 0.5 mm ');
    outtextxy(50,330,'2. Tabla zincata cu grosimea de 0.7 mm ');
    outtextxy(50,340,'3. Tabla neagra cu grosimea de 1.0 mm ');
    outtextxy(50,350,'4. Tabla pentru ambutisare cu grosimea de 0.5 mm ');
    outtextxy(50,360,'5. Tabla OL 37 cu grosimea de 1.2 mm ');
    outtextxy(50,370,'6. Tabla OL 37 cu grosimea de 1.5 mm ');
back:tasta:=readkey;
    case tasta of
        '1':begin a0:=-5.56;a1:=0.626;mat:='mat1' end;
        '2':begin a0:=-15;a1:=0.751;mat:='mat2' end;
        '3':begin a0:=-16.19;a1:=0.686;mat:='mat3' end;
        '4':begin a0:=-12.12;a1:=0.727;mat:='mat4' end;
        '5':begin a0:=-17.18;a1:=0.647;mat:='mat5' end;
        '6':begin a0:=-15.99;a1:=0.570;mat:='mat6' end
    end;
    if tasta=' ' then goto back;    {space key aborted}
    u:=0.16*exp(1/4*ln(A))*exp(3/8*ln(ro))*exp(3/4*ln(U0))*exp(1/8*ln(C));
    v:=sqrt(h*1e-3)*exp(1/8*ln(1*1e-3))*sqrt(Lh);
    pus:=u/v;
    smax:=a0+a1*0.8*pus/1e6;
    pres:=smax;
    setcolor(white);
    outtextxy(220,450,'Press space to continuc');
    repeat until keypressed;
    cleardevice
end;
{*****}
procedure alegere_forma_piesa;
label back;
var tasta:'1'..'6';
    rm,r,h,l:real;
begin
    setcolor(bluc);
    rectangle(0,0,639,479);
    setcolor(yellow);
    outtextxy(10,50,'Alegeti tipul piesei prin tastarea numarului corespunzator tipului piesei:');
    setcolor(green);
    outtextxy(50,70,'1. Calota sferica cu flansa ');
    outtextxy(50,80,'2. Semisfera cu flansa ');
    outtextxy(50,90,'3. Trunchi de con cu fund plat ');
    outtextxy(50,100,'4. Calota sferica cu fund plat ');
    outtextxy(50,110,'5. Segment sferic convex cu fund plat ');
    outtextxy(50,120,'6. Inel sferic concav-convex cu fund plat ');
back:tasta:=readkey;
    case tasta of
        '1':begin                {calota sferica cu flansa}
            r:=130;h:=100;
            for i:=1 to 100 do

```

```

begin
  y[i]:=sqrt(sqrt(r)-sqrt(i))-r+h;
end
end;
'2':begin          {semisfera cu flansa}
  r:=100;
  for i:=1 to 100 do
    y[i]:=sqrt(sqrt(r)-sqrt(i));
  end;
'3':begin          {trunchi de con cu fund plat}
  rm:=100;r:=75;l:=90;h:=86.4;
  for i:=1 to 75 do
    y[i]:=h;
  for i:=76 to 100 do
    y[i]:=(100-i)*sin(73.8723*pi/180)/cos(73.8723*pi/180);
  end;
'4':begin          {calota sferica cu fund plat}
  rm:=200;r:=40;h:=15;
  for i:=1 to 67 do
    y[i]:=h;
  for i:=68 to 100 do
    y[i]:=15-(188-sqrt(sqrt(rm)-sqrt(i)));
  end;
'5':begin          {segment sferic convex cu fund plat}
  rm:=200;r:=40;h:=15;
  for i:=1 to 67 do
    y[i]:=h;
  for i:=68 to 100 do
    y[i]:=15-(188-sqrt(sqrt(rm)-sqrt(i)));
  end;
'6':begin          {inel sferic concav-convex cu fund plat}
  r:=20;h:=40;
  for i:=1 to 60 do
    y[i]:=h;
  for i:=61 to 80 do
    y[i]:=h-sqrt(sqrt(r)-sqrt(80-i));
  for i:=81 to 100 do
    y[i]:=h-20-sqrt(sqrt(r)-sqrt(100-i));
  end;
end;
if tasta=' ' then goto back;    {space key aborted}
cleardevice
end;
{*****}
procedure calcul_profil;
begin
  for i:=1 to 100 do
  begin
    if mat='mat6' then
    begin
      si[i]:=pres*(1-(0.309*i/R-0.55*sqrt(i/R)+1.185*exp(3*ln(i/R))));
      if si[i]>=y[i] then s[i]:=y[i];
      if si[i]<=min then min:=si[i];
      if si[i]>=max then max:=si[i];
      sound(8000);nosound
    end;
    if (mat='mat5') or (mat='mat3') then
    begin
      si[i]:=pres*(1-(0.157*i/R+0.145*sqrt(i/R)+0.64*exp(3*ln(i/R))));
      if si[i]>=y[i] then s[i]:=y[i];
      if si[i]<=min then min:=si[i];
      if si[i]>=max then max:=si[i];
    end;
  end;
end;

```

```

    sound(8000);nosound
end;
if (mat='mat1') or (mat='mat2') or (mat='mat4') then
begin
    si[i]:=pres*(1-(0.29*i/R-0.298*sqr(i/R)+0.884*exp(3*ln(i/R))));
    if si[i]>=y[i] then si[i]:=y[i];
    if si[i]<=min then min:=si[i];
    if si[i]>=max then max:=si[i];
    sound(8000);nosound
end
end
end;
procedure multiimpuls;
label exit,back,new,multi;
var tasta:char;
    text:string[80];
begin
new: setcolor(blue);
    rectangle(0,0,639,479);
    setcolor(yellow);
    settxtstyle(2,0.4);
    outtextxy(50,300,'Doriti regim multiimpuls (d/n)');
back:tasta:=readkey;
    case tasta of
        'n':goto exit;
        'd':goto multi
    else goto back
    end;
multi:if mat='mat1'then n:=22;
    if mat='mat2'then n:=18;
    if mat='mat3'then n:=13;
    if mat='mat4'then n:=22;
    if mat='mat5'then n:=9;
    if mat='mat6'then n:=5;
    str(n:0,text);text:='Câtc impulsuri doriti sa vizualizati in regim multiimpuls (1 - '+text+')';
    max:=0;min:=0;
    dialog(text,315);
    n:=round(nr);
    if (mat='mat1') or (mat='mat4') then
begin
        {TZ05 si A305}
        if n>22 then
begin
            outtextxy(50,400,'Depasire de numar maxim de impulsuri');
            dclay(1000);
            cleardevice;
            goto new
        end;
        for j:=1 to n do
begin
            pres:=smax*(1+(-0.214+0.207*j-0.007*sqr(j)+7e-5*exp(3*ln(j))));
            calcul_profil;
        end;
        init;
        for j:=1 to n do
begin
            pres:=smax*(1+(-0.214+0.207*j-0.007*sqr(j)+7e-5*exp(3*ln(j))));
            scale:=150/(max-min);
            calcul_profil;
            grafic_5
        end;
    end;
end;
if mat='mat2' then

```

```

begin                                {TZ07}
  if n>18 then
    begin
      outtextxy(50,400,'Depasire de numar maxim de impulsuri');
      dclay(1000);
      cleardevice;
      goto new
    end;
  for j:=1 to n do
    begin
      pres:=smax*(1+(-0.2+0.185*j-0.007*sqr(j)+7e-5*exp(3*ln(j))));
      calcul_profil;
    end;
  init;
  for j:=1 to n do
    begin
      pres:=smax*(1+(-0.2+0.185*j-0.007*sqr(j)+7e-5*exp(3*ln(j))));
      scale:=150/(max-min);
      calcul_profil;
      grafic_5
    end
  end;
  if mat='mat3' then
    begin                                {TN01}
      if n>13 then
        begin
          outtextxy(50,400,'Depasire de numar maxim de impulsuri');
          dclay(1000);
          cleardevice;
          goto new
        end;
      for j:=1 to n do
        begin
          pres:=smax*(1+(-0.19+0.171*j-0.008*sqr(j)+8e-5*exp(3*ln(j))));
          calcul_profil;
        end;
      init;
      for j:=1 to n do
        begin
          pres:=smax*(1+(-0.19+0.171*j-0.008*sqr(j)+8e-5*exp(3*ln(j))));
          scale:=150/(max-min);
          calcul_profil;
          grafic_5
        end
      end;
    if mat='mat5' then
      begin                                {OL37/1.2}
        if n>9 then
          begin
            outtextxy(50,400,'Depasire de numar maxim de impulsuri');
            delay(1000);
            cleardevice;
            goto new
          end;
        for j:=1 to n do
          begin
            prcs:=smax*(1+(-0.15+0.154*j-0.009*sqr(j)+5.9e-5*exp(3*ln(j))));
            calcul_profil;
          end;
        init;
        for j:=1 to n do
          begin

```

```

        pres:=smax*(1+(-0.15+0.154*j-0.009*sqr(j)+5.9e-5*exp(3*ln(j))));
        scale:=150/(max-min);
        calcul_profil;
        grafic_5
    end;
end;
if mat='mat6' then
begin
    {OL37/1.5}
    if n>5 then
    begin
        outtextxy(50,400,'Depasire de numar maxim de impulsuri');
        delay(1000);
        cleardevice;
        goto new
    end;
    for j:=1 to 5 do
    begin
        pres:=smax*(1+(-0.12+0.13*j-0.014*sqr(j)+26e-5*exp(3*ln(j))));
        calcul_profil;
    end;
    init;
    for j:=1 to 5 do
    begin
        pres:=smax*(1+(-0.12+0.13*j-0.014*sqr(j)+26e-5*exp(3*ln(j))));
        scale:=150/(max-min);
        calcul_profil;
        grafic_5
    end
end;
exit:cnd;
procedure introducere_date;
label new,1,2,3;
var valoare:string[10];
begin
new: dialog('Introduceti distanta [in mm] intre axa descarcarii si semifabricat h= ',100);
    h:=nr;
    dialog('Introduceti distanta [in mm] dintre electrozi l= ',120);
    l:=nr;
    dialog('Introduceti tensiunea de lucru [in volti] U0= ',140);
    U0:=nr;
    f:=h/l;
    setcolor(yellow);
    outtextxy(10,200,'Doriti:');
    setcolor(green);
    outtextxy(50,220,'determinarea distributiei de presiune pe semifabricat - apasati tasta P');
    outtextxy(50,240,'calculul adâncimii de ambutisare - apasati tasta A');
    if readkey='p' then goto 2;
    if (l>29) and (l<81) and (h>29) and (h<161) and (f>=1) and (f<=2) then
    goto 1
    else
    begin
        setfillstyle(solidfill,8);
        bar(40,300,600,400);
        setcolor(yellow);
        outtextxy(90,300,'Reintroduceti datele initiale in limita precisa de restrictiile de mai jos !');
        setcolor(lightgreen);
        outtextxy(240,320,'h = 30 ... 160 mm');
        outtextxy(240,332,'l = 30 ... 80 mm');
        outtextxy(240,344,'1 >= (h/l) <= 2');
        outtextxy(240,356,'U0 = 20000 ... 45000 V');
        setcolor(white);
        outtextxy(230,380,'Press any key to continue');
    end;
end;

```

```

        repeat until keypressed;
        cleardevice;
        goto new
    end;
1:  alegere_material;
    alegere_forma_piesa;
    calcul_profil;
    j:=0;
    multiimpuls;
    goto 3;
2:  cleardevice;
    setcolor(blue);
    rectangle(0,0,639,479);
    calcul_randamente;
    calcul_ct_imax;
    calcul_b1_b2_b3;
    calcul_parametri;
    grafic_1;
    grafic_2;
    grafic_3;
    grafic_4;
    setfillstyle(solidfill,8);
    bar(230,50,610,190);
    settextstyle(2,0,4);setcolor(lightgreen);
    str(l*1000:0:2,valoare);valoare:=valoare+' mm';
    outtextxy(250,60,'distanța dintre electrozi l =');
    outtextxy(420,60,valoare);
    str(h*1000:0:2,valoare);valoare:=valoare+' mm';
    outtextxy(250,80,'distanța dintre axa descărcării și semifabricat h =');
    outtextxy(550,80,valoare);
    str(u0:0:0,valoare);valoare:=valoare+' V';
    outtextxy(250,100,'tensiunea aplicată U0 =');
    outtextxy(390,100,valoare);
    str(T*1e6:0:2,valoare);valoare:=valoare+' Șs';
    outtextxy(250,120,'durata primei semiperioade T = ');
    outtextxy(430,120,valoare);
    str(imax:0:0,valoare);valoare:=valoare+' A';
    outtextxy(250,140,'maximul curentului Im =');
    outtextxy(390,140,valoare);
    str(Tm*1e6:0:2,valoare);valoare:=valoare+' Șs';
    outtextxy(250,160,'durata de atingere a curentului maxim Tm = ');
    outtextxy(500,160,valoare);
3: end;
begin
start: hires_on;
    introducere_date;
    setcolor(white); settextstyle(11,0,1);
    outtextxy(200,465,'Press any key to exit');
    repeat until keypressed;
    cleardevice;
    setcolor(blue);
    rectangle(0,0,639,479);
    settextstyle(10,0,1); setcolor(green);
    outtextxy(130,240,'Doriti valori noi ? (d/n)');
new: confirm:=readkey;
    case confirm of
        'd': goto start;
        'n': goto exit;
    else goto new
    end;
exit: closegraph
end.

```