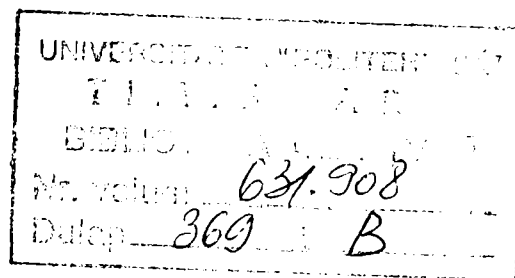


CONTRIBUȚII LA SUDAREA MIG ÎN IMPULSURI DE CURENT A ALIAJULUI AlMgSi0.5

- teză de doctorat -

BIBLIOTECA CENTRALĂ
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"
TIMIȘOARA



Autor: ș.l.ing. Voicu Ioan Safta

Conducător științific: Prof.Dr.doc.șt.d.h.c. ing. Aurel Nanu

2001

CUPRINSUL

Introducerea	pag. 7
Capitolul I: Fenomenele specifice în arcul electric la sudarea MIG-MAG în impulsuri de curent	pag. 9
Capitolul II: Parametrii sudării MIG în impulsuri de curent și sursele de sudare	pag. 35
Capitolul III: Evaluarea problemelor specifice sudării aluminiului și aliajelor sale	pag. 65
Capitolul IV: Programul și mijloacele experimentale	pag. 97
Capitolul V: Analiza statistică a influenței parametrilor de sudare	pag. 113
Capitolul VI: Investigarea factorilor de calitate a îmbinărilor și depunerilor prin sudare	pag. 165
Relevarea contribuțiilor personale și concluziile	pag. 181
Bibliografie	pag. 185

INTRODUCEREA

Tehnologia sudării în impulsuri de curent în medii de gaze protectoare inerte s-a impus pe plan internațional în ultimii zece ani datorită avantajelor tehnico-economice și de calitate, asigurate mai ales la realizarea confecțiilor din aluminiu și aliaje din aluminiu. Reconsiderarea construcției și structurii de rezistență a caroseriilor de automobile, prin trecerea recenta la utilizarea caroseriilor din aluminiu, constituie un nou și deosebit de important suport pentru aplicarea și dezvoltarea procedului. Se au în vedere mai ales criteriile de mare rigurozitate în ce privește forma, precizia dimensională și aspectul îmbinării.

Prezenta lucrare învederează studierea și aprofundarea multiplelor aspecte ale aplicării procedului în vederea satisfacerii depline a criteriilor enunțate, la asamblarea caroseriei de automobil Audi A4, lansat recent pe piața internațională ca prim automobil cu caroseria din aluminiu. Autorul a avut prilejul de a lucra nemijlocit la un contract axat pe acest obiectiv în cadrul stagiului efectuat la SLV Fellbach.

Teza conține șase capitole structurate astfel încât suportul teoretic dezvoltat în prima parte să servească analizei și interpretării rezultatelor obținute în cadrul programului experimental.

Astfel, în capitolul I se tratează fenomenele care au loc în arcul electric la sudarea MIG în impulsuri de curent, de polaritate DC⁺, punând în valoare contribuțiile proprii cu privire la dezvoltarea relației forței de desprindere a picăturii topite prin efect Pinch, în funcție de deformația-oscilația axială a acesteia. Fenomenul transferului masic prin arcul electric a fost evaluat cantitativ prin filmare ultrarapidă și prin analiza oscilogramelor $U=f(t)$ și $I=f(t)$ înregistrate în timp real.

Capitolul II este consacrat relevării multitudinii factorilor de influență a procesului de sudare cum sunt: polaritatea curentului, intensitatea curentului de bază și de puls, durata pulsului, tensiunea, frecvența pulsului, viteza de avans a sârmei electrod și lungimea liberă. De asemenea, capitolul cuprinde prezentarea tipurilor și performanțelor surselor de sudare moderne, oferite de cele mai renumite firme constructoare.

Având în vedere domeniul de aplicație, capitolul III se referă la tratarea problemelor specifice sudării aluminiului și aliajelor acestuia, probleme de natură metalurgică, corelate cu analiza sudabilității și a compatibilității principalelor procedee. Un accent deosebit se pune pe investigarea fenomenelor care determină apariția și dezvoltarea imperfecțiunilor și defectelor.

Capitolul IV conține prezentarea programelor experimentale concepute de autor, care sunt direcționate, pe de o parte spre aprofundarea procedului MIG în impulsuri de curent la aliaje de aluminiu, iar pe de altă parte spre elucidarea criteriilor calimetrice. În cadrul capitolului se descrie celula experimentală concepută și realizată de autor în laboratoarele SLV Fellbach, performanțele echipamentelor folosite, tehnica de filmare și de înregistrare ultrarapidă.

Capitolul V cuprinde o amplă analiză statistică a rezultatelor experimentale, pe baza unui program de calcul automat conceput de autor în acest scop. Baza de date și programul de prelucrare au permis stabilirea unui număr de 50 de noi relații monoparametrice liniare și parabolice între combinații de 5x5 variabile și parametri studiați. Programul a permis de asemenea stabilirea unui număr de 10 dependențe multiparametrice, câte două pentru fiecare variabilă analizată. Relațiile stabilite de autor permit aprofundarea cunoașterii legăturii dintre parametrii de sudare reglabili cu ajutorul echipamentelor folosite și caracteristicile principale ale procedurii de sudare MIG în impulsuri de curent.

În capitolul VI sunt prezentate modalitățile de măsurare a parametrilor geometrici a cordoanelor depuse, accentuându-se influența lungimii libere asupra curbelor de variație funcție de timp a curentului și tensiunii medii. Se prezintă analiza metalografică efectuată, procedeele aplicate pentru încercările de duritate, precum și controlul nedistructiv radiografic.

Teza conține un număr de 191 pagini propriu-zise și 50 de pagini de anexe în care se regăsesc 116 de figuri, 37 de tabele, 40 de oscilograme și 20 de fotografii rapide. Bibliografia cuprinde 157 de titluri, dintre care 13 sunt lucrări ale autorului publicate în domeniul tezei.

Autorul tezei ține să mulțumească în mod deosebit conducătorului științific Prof.Dr.doc.șt.d.h.c.ing. Aurel Nanu, pentru îndrumarea competentă, extrem de eficientă și plină de înțelegere acordată de-a lungul perioadei de pregătire a doctoratului.

Autorul mulțumește de asemenea colegilor din cadrul Institutului de Școlarizare și Cercetare în Domeniul Sudurii – SLV-Fellbach, precum și celor de la Institutul de Încercări de Materiale - MPA Stuttgart.

CAPITOLUL I

FENOMENELE SPECIFICE ÎN ARCUL ELECTRIC LA SUDAREA MIG/MAG ÎN IMPULSURI DE CURENT

Cuprinsul:

1. Proprietățile arcului și tipuri de arce
2. Topirea sârmei electrod
 - 2.1 Rezistența de scurgere a curentului;
 - 2.2 Puterea necesară
 - 2.3 Debitul de masă
 - 2.4 Coeficienți tehnologici
3. Sistemul de forțe în arcul electric
 - Forța gravitațională
 - Forța electromagnetică – efectul Pinch
 - Forța tensiunii superficiale
 - Forța electrostatică de portanță
 - Forța de vaporizare
 - Forța jetului de plasmă
4. Variația forțelor din arc în funcție de curentul de sudare
5. Viteza de topire a electrodului
6. Influența parametrilor curentului asupra vitezei de topire
7. Fazele desprinderii picăturii
8. Clasificarea modului de transfer masic în arcul electric
9. Evaluarea transferului de picături prin filmare rapidă
10. Concluziile

1. Proprietățile arcului și tipuri de arce

Una din multiplele forme de descărcare în gaze o reprezintă arcul electric. Arcul electric face posibilă o transformare relativ ușoară a energiei electrice în căldură, pe o zonă strict determinată și la temperaturi înalte. Randamentul arcului electric la sudarea MIG/MAG este cuprins între 0,4 și 0,6. Datorită faptului că majoritatea arcurilor electrice pentru sudare nu necesită introducerea de energie suplimentară pe lângă curentul de sudare, acestea se numesc descărcări independente.

Ca sistem fizic complex, arcul electric prezintă următoarele proprietăți:

- bun conductor electric
- stare gazoasă
- rezistență ohmică specifică
- temperatura $> 10.000^{\circ}\text{C}$
- exercită o presiune asupra băii metalice topite
- este înconjurat de un câmp magnetic
- datorită stării gazoase, poate fi influențat de alte câmpuri magnetice.

Din suprafața încălzită a polului negativ (de regula piesa) se desprind electroni care se mișcă cu viteză foarte mare spre polul pozitiv (de regulă sârma electrod). În traiectoria lor, electronii mai ciocnesc atomi din gazul protector sau din vaporii metalici și provoacă desprinderea altor electroni. Prin aceste fenomene se compensează pierderea de electroni. În final, electronii se ciocnesc de polul pozitiv și îl încălzesc prin energia de impact ridicată. În acest timp ionii din arcul electric sunt atrași de către polul pozitiv și la ciocnirea cu acesta emană căldură. Rezistența electrică este mai mare în focare decât în coloana arcului. Astfel căderea de tensiune în zona anodică este de 2-8 V, iar în zona catodică de 8-20 V, determinând un potențial mai ridicat de ionizare.

Temperatura din zonele specifice arcului electric este mult diferită și depinde de mai mulți factori: temperatura de fierbere a metalului electrozilor, puterea arcului electric, forma arcului electric, precum și compoziția gazului protector. În funcție de temperatura de fierbere a materialului electrodului și de gradul de disipare a căldurii, temperatura în punctele de cuplare a arcului electric este de $2000\div 3000^{\circ}\text{C}$. În funcție de temperatura de fierbere a sârmei electrod și temperatura picăturii este, de regulă, sub 3000°C . În zona nucleului arcului electric se pot înregistra temperaturi de $4000\div 12000^{\circ}\text{C}$.

Ca și în cazul oricărui conductor străbătut de curent electric, și în jurul arcului electric se formează un câmp magnetic. Câmpul magnetic generează o forță orientată spre axa arcului electric (efectul Pinch). În cazul unor curenți mari de sudare și densități mari de curent corelată cu utilizarea unor amestecuri de gaze protectoare bogate în argon capătul sârmei electrod care a devenit fluid datorită

energiei generate de rezistența de contact și energiei arcului electric, se va strangula (efectul de magnetostricțiune).

Daca asupra arcului electric acționează un câmp magnetic, arcul electric va fi deviat în funcție de direcția câmpului. De asemenea, cu ajutorul unor bobine a căror polaritate se poate inversa, se poate realiza o pendulare a arcului electric.

Un efect nedorit în arderea constantă a arcului electric este suflajul. Acesta apare datorită câmpurilor magnetice asimetrice din jurul arcului electric. Arcul este "suflat" în direcția în care câmpul magnetic are o intensitate mai mică. Limita negativă a acestui efect este căderea picăturii pe lângă baia metalică și rezultarea unor îmbinări subțiri și cu o supraînălțare foarte mare. Acest efect se poate evita prin reglarea mai scurtă a lungimii arcului, utilizarea tablelor auxiliare la capetele îmbinării, utilizarea dispozitivelor de fixare din materiale nemagnetice, reducerea puterii arcului electric, etc.

Cu toate că electronii și ionii din arcul electric provin cu precădere de la metale, compoziția chimică a gazelor protectoare are o puternică influență asupra arcului electric, asupra forțelor care apar la transferul picăturii și asupra profilului cusăturii. Repartiția densității de curent la electrozi și în arcul electric depinde, în cazul aceleiași intensități a curentului, pe lângă diametrul sârmei-electrod, cantitatea de vapori metalici, tensiunea de lucru, și de conductivitatea termică a gazului protector.

Cu cât densitatea de curent este mai mare, cu atât mai mult crește efectul de strangulare.

Bioxidul de carbon și heliul prezintă o conductivitate termică mai bună decât argonul, așa încât, în cazul utilizării ca gaz protector a CO_2 se formează un nucleu mai îngust conductor de curent în arcul electric decât în cazul utilizării argonului sau a amestecurilor de gaze protectoare bogate în argon. Strangularea coloanei arcului provoacă o creștere a rezistenței electrice și o cădere de tensiune mai mare între electrozi pentru aceeași intensitate a curentului.

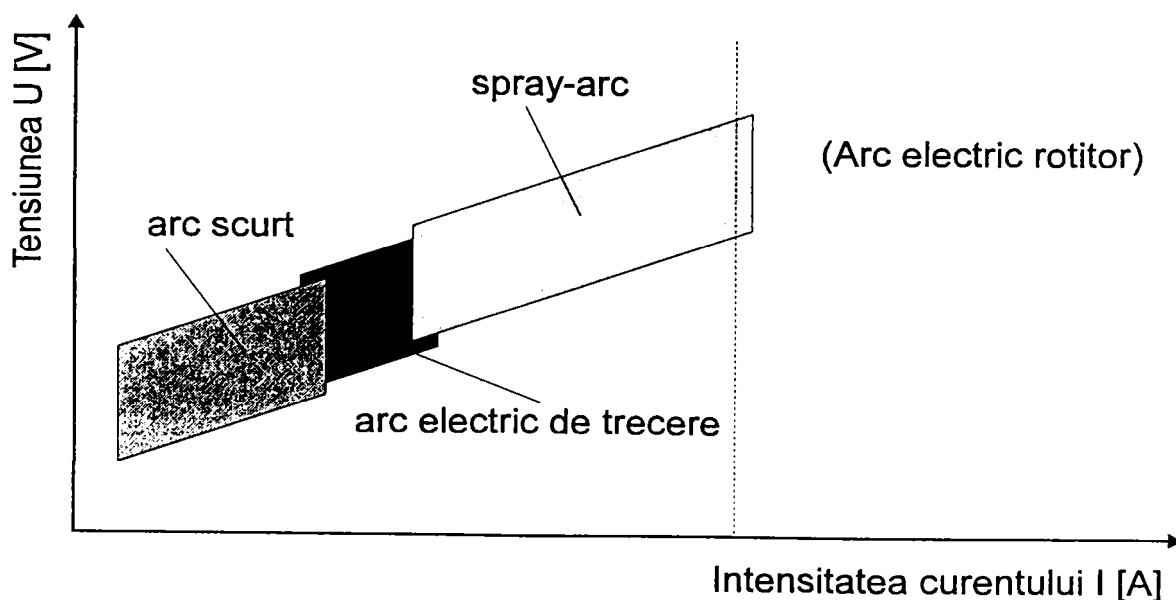


Figura 1. Tipurile de arce electrice

Arcul electric MIG realizează un transfer în picături a materialului de adaos spre materialul de bază. Așa cum rezultă din figura 1, în funcție de curentul și tensiunea de sudare, se deosebesc următoarele tipuri de arce electrice:

- Arc scurt (short-arc), aplicabil la sudarea aluminiului pentru grosimi <math><1,5\text{ mm}</math>, cantitatea de căldură introdusă în piesa fiind redusă. Sudarea aluminiului cu arc scurt presupune existența unei surse de sudare cu caracteristică externă și inductanță corespunzătoare în vederea limitării creșterii curentului (pentru evitarea stropirilor); este rar utilizat
- Arc de trecere – provoacă o răcire rapidă a băii metalice, degazarea băii metalice topite este împiedicată, iar îmbinarea rezultă cu suprafața rugoasă. Transferul de material se realizează în scurtcircuit, ceea ce mărește tendința de formare a porilor și stropilor: impropriu pentru sudarea aluminiului.
- Spray-arc - în funcție de diametrul sârmei se pot suda aliaje de aluminiu și aluminiu cu grosimi > 5 - 6 mm.
- Arc electric în impulsuri - se realizează prin introducerea controlată de căldură în piesă. Se utilizează la sudarea pieselor cu grosime > 1,2 mm (până la 20 mm și peste). Datorită faptului că transferul de material se realizează fără scurtcircuitări, se favorizează degazarea băii metalice, chiar și la puteri mici ale arcului.

2. Topirea sârmei electrod

2.1. Rezistența de scurgere a curentului

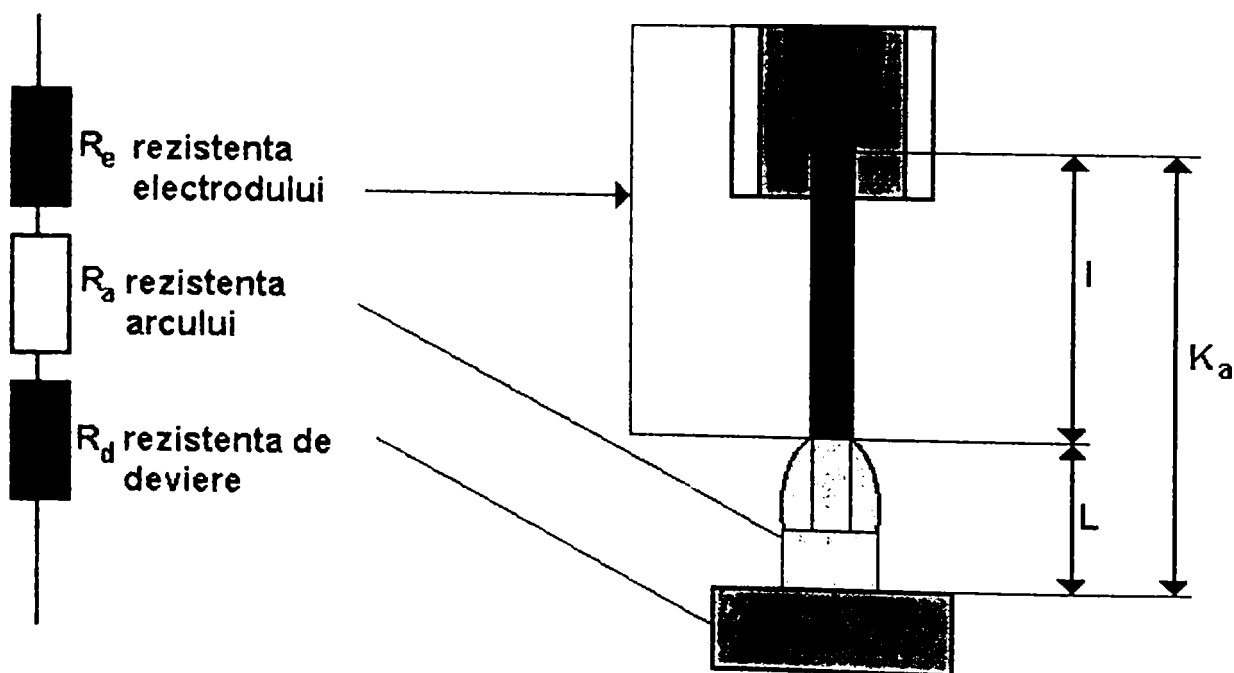


Figura 2.

Rezistența de scurgere a curentului constă dintr-o rezistență constantă a conductorului (sârmă, electrod) până în zona de contact, rezistențele produse de lungimea zonei de contact K_a , lungimea arcului electric L și lungimea liberă. Ca element tranzitoriu se poate adăuga rezistența zonei de decalibrare a electrodului la suprafața de contact. O ultimă componentă o reprezintă rezistența de deviere în piesă.

Fiind legate în serie (figura 2), rezistențele se însumează.

Rezistența conductorului constă dintr-o componentă constantă până în zona de contact și rezistența zonei de contact având drept componente rezistența coloanei arcului R_L și rezistența capătului liber al electrodului R_I :

$$R_e = R_L + R_I \quad (1)$$

unde

$$R_I = R_{I(20)} \cdot \left[1 + \alpha \cdot \left(\int T(s) \cdot ds - 20 \right) \right] \quad (2)$$

$T(s)$ – distribuția temperaturii ($^{\circ}\text{C}$)

α - coeficientul de temperatură ($10^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$)

$R_{I(20)}$ – rezistența capătului liber de lungime convențională – 20mm.

Rezistența arcului depinde de lungimea coloanei arcului L , precum și de gradul de ionizare a gazului de protecție în volumul cuprins în arc. Lungimea coloanei arcului la același curent depinde de valoarea tensiunii. Dacă în primă aproximație se admite dependența gradului de ionizare a arcului de dimensiunile sale geometrice, comportarea acestuia poate fi exprimată ca și a unui conductor metalic cu rezistența

$$R_L = \frac{x}{A} \rho_e \quad (3)$$

unde $x \approx L(\text{m})$, A – secțiunea coloanei arcului (m^2), ρ_e – rezistivitatea ($\Omega \cdot \text{m}$).

Rezistența de deviere în piesă, se calculează ca și rezistența conductorului, fiind însă mult inferioară acesteia. Aceasta se explică prin mărirea suprafeței de contact a arcului în raport cu secțiunea electrodului. În cel mai defavorabil caz, suprafața de contact poate fi echivalată cu suprafața băii topite. Rezultă că această componentă de rezistență este neglijabilă față de celelalte componente.

2.2. Puterea necesară

Curentul electric transportă căldura prin arcul electric. Prin trecerea curentului în piesă și apoi în sârma electrod se produce topirea capătului sârmei. Neglijându-se într-o primă aproximație gradientii radiali și tangențiali ai câmpului termic, conducția din electrod este considerată monodimensională, conform figurii

3. În această situație, pe baza relației lui Fourier, densitatea de putere se exprimă sub forma:

$$j_{qx} = -\lambda \frac{dT}{dx} = \frac{\lambda}{x} (T_1 - T_2) \quad (\text{W/m}^2) \quad (4)$$

unde λ este coeficientul de conducție ($\text{W/m}^\circ\text{K}$).

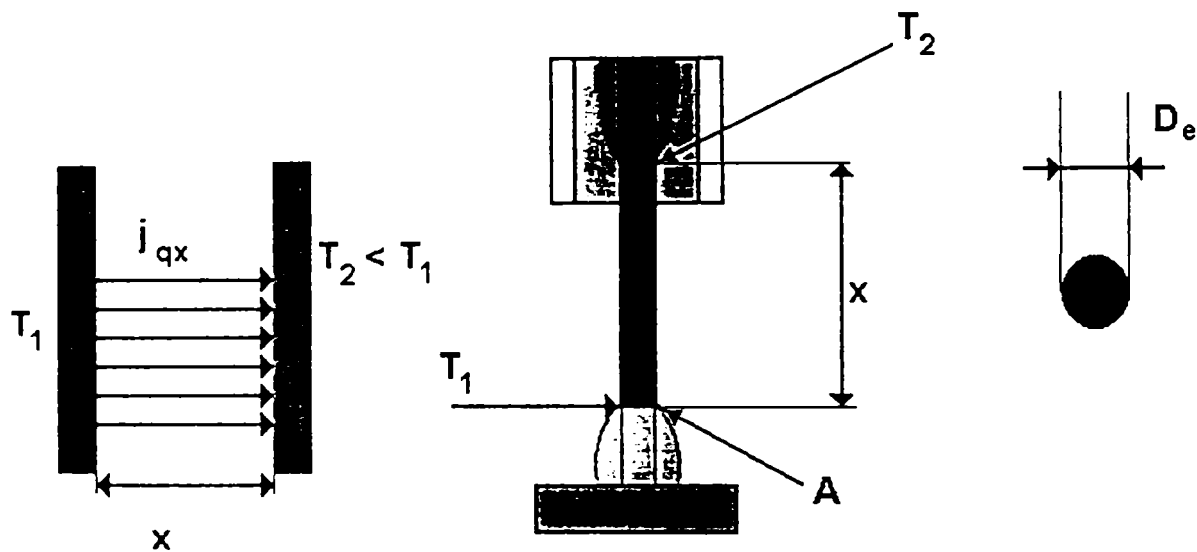


Figura 3.

Rezultă că puterea poate fi exprimată sub forma:

$$P = \frac{\lambda}{x} (T_1 - T_2) \frac{\pi \cdot D_e^2}{4} = 0,24\eta \cdot U \cdot I \quad (5)$$

unde $\eta \approx 0,1$ este randamentul de transformare calorică a arcului. Această putere se consumă pentru a ridica temperatura capătului sârmei electrod, care se deplasează (topește) cu viteza $v_D = v_T = v$, la temperatura formării picăturii $T_T > T_0$, unde T_0 este temperatura de topire a materialului sârmei.

Se obține:

$$0,24\eta \cdot U \cdot I = v_D \cdot \frac{\pi \cdot D_e^2}{4} \cdot \rho \cdot c \cdot (T_T - T_0) \quad (\text{W}) \quad (6)$$

de unde expresia vitezei de topire va fi:

$$v_T = \frac{\eta \cdot U \cdot I}{\rho \cdot c \cdot \pi D_e^2} \cdot \frac{1}{(T_T - T_0)} \quad (\text{m/s}) \quad (7)$$

În relațiile (6) și (7) ρ - masa specifică, c - căldura specifică. Temperatura T_0 nu este constantă, ea este dependentă de timp și de valoarea vitezei de avans a sârmei (v_D).

2.3 Debitul de masă

Debitul de masă transferată este produsul dintre viteza v_D , secțiunea sârmei $\frac{\pi \cdot D_e^2}{4}$ și densitatea acesteia ρ :

$$q = v \cdot A \cdot \rho \quad (\text{g/s}) \quad (8)$$

Pentru fuziunea unui debit masic constant este necesar un aport energetic de asemenea constant. Puterea necesară comportă componentele puterii debitului de masă și puterea de transformare în căldură a rezistenței circuitului. Puterea debitului de masă se exprimă prin:

$$P_q = q \cdot [C_T + c(T_T - T_0)] \quad (\text{w}) \quad (9)$$

unde C_T este căldura specifică de topire (J/g), la aluminiu fiind de 390kJ/kg, c - căldura specifică $\left(\frac{\text{J}}{\text{g} \cdot ^\circ\text{K}}\right)$, la aluminiu fiind de aproximativ 1,0 kJ/(kg·°K).

Căldura necesară încălzirii sârmei electrod este dată de relația:

$$\rho \cdot c \frac{dT}{dt} = 0,3 \cdot \left(\frac{I}{D_e}\right)^2 \cdot \rho_0 \cdot (1 + \alpha T) - 4 \cdot \lambda_c \cdot \frac{T - T_0}{D_e} \quad (10)$$

în care ρ_0 este rezistivitatea electrică la temperatura inițială T_0 , iar λ_c - coeficientul de transmisie prin convecție, iar α - coeficientul de dilatare termică liniară. Cum termenul al doilea, reprezentând pierderile prin convecție, este foarte mic, în spațiul în care diferența $T - T_0$ este la rândul ei mică, el se neglijează.

Transferul energiei arcului electric către sârma electrod și piesă se realizează pe petele (spoturile) luminoase ale arcului. Datorită densității mari de energie, în aceste puncte se atinge foarte repede temperatura de fierbere a metalelor. Prin vaporizarea metalului și/sau erupții de gaze iau naștere niște forțe care influențează arcul electric. Dacă pata luminoasă a arcului se găsește mai aproape de capătul sârmei electrod, aceste forțe vor frâna desprinderea picăturii; dacă se găsesc undeva pe învelișul sârmei electrod, forțele vaporilor metalici vor accelera desprinderea picăturii.

2.4. Coeficienții tehnologici

Tehnologic, comportarea sârmei electrod se analizează cu ajutorul a trei coeficienți:

- coeficientul de topire $\alpha_T \left(\frac{g}{A \cdot h} \right)$
- coeficientul de depunere $\alpha_D \left(\frac{g}{A \cdot h} \right)$
- coeficientul de pierdere ϕ , definit prin relația:

$$\phi = 1 - \frac{\alpha_D}{\alpha_T} \quad (11)$$

Folosind relația vitezei de topire rezultă:

$$\alpha_T = \frac{0,24 \cdot \eta \cdot U}{c \cdot (T_T - T_0)} \cdot 3600 \quad \left(\frac{g}{A \cdot h} \right) \quad (12)$$

Calculând după literatură [112], rezultă pentru aluminiu $\alpha_T \cong 0,66 \frac{g}{A \cdot h}$.

3. Sistemul de forțe în arcul electric

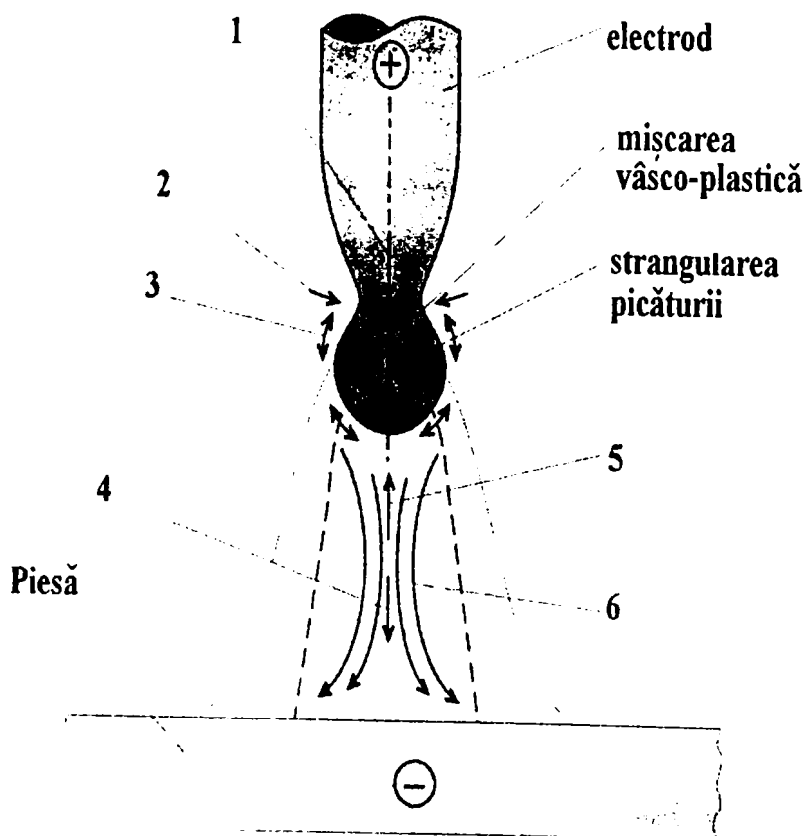


Figura 4.

Forțele care acționează în arcul electric DC⁺ (figura 4) contribuind la transferul masic prin desprinderea picăturilor la suprafața liberă a electrodului sunt:

1. forța gravitațională F_g
2. forța electromagnetică (efectul Pinch) F_p
3. forța tensiunii superficiale F_σ
4. forța electrostatică portantă a arcului F_a
5. forța de vaporizare F_v
6. forța jetului de plasmă F_γ

□ Forța gravitațională

Forța gravitațională acționează în cazul în care vectorul de orientare este îndreptat spre baia metalică. Ea se calculează cu relația:

$$F_g = \pi \cdot \frac{d_T^3}{6} \cdot \rho \cdot g \quad (\text{N}) \quad (13)$$

unde d_T este diametrul picăturii (dm), ρ - densitatea (kg/dm^3), iar g - accelerația gravitațională (m/s^2). Potrivit literaturii de specialitate [134], această forță în cazul aluminiului este de 260 dine.

□ Forța electromagnetică (efectul Pinch sau efectul de stricțiune)

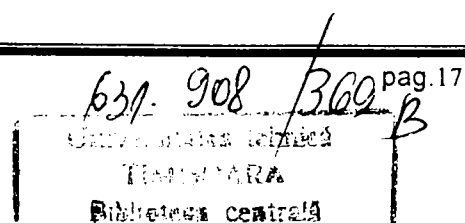
Forța Lorentz la un conductor electric acționează perpendicular pe direcția curentului și este dependentă de densitatea de curent. Cum capătul sârmei ajuns în stare fluidă nu mai dispune de forțe interioare suficiente a se opune efectului Pinch, se produce stricțiunea. Prin producerea stricțiunii se modifică astfel încât forța Lorentz F acționează în această fază ca rezultantă a două componente, una axială F_a , iar alta radială F_r . Componenta radială contribuie mai ales la accelerarea procesului de desprindere a picăturii.

Acest efect demonstrează că trecerea spre formarea picăturii are loc în intervalul ramurii căzătoare a curentului de puls. Componenta radială sau efectul Pinch de contracție determină o presiune radială, care conform relației:

$$p(r) = \frac{\mu_0 \cdot I \cdot j}{4 \cdot \pi} \left(1 - \frac{r^2}{r_e^2} \right) \quad \left(\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right) \quad (14)$$

se amplifică pe măsură ce raza de curbura r a profilului picăturii scade, deci pe măsură ce efectul de stricțiune Pinch se intensifică.

Înlocuind densitatea de curent în funcție de curent și de raza conductorului (electrodului) $r_e = d_e/2$



$$j = \frac{I}{\pi \cdot r_e^2} \quad (15)$$

se obține:

$$p(r) = \frac{\mu_0 \cdot I^2}{4 \cdot \pi^2} \cdot \frac{r_e^2 - r^2}{r_e^4} \quad (16)$$

Dacă se introduce condiția la limită din momentul desprinderii picăturii, $r=0$, se obține valoarea maximă a presiunii:

$$p_{\max} = \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi^2} \cdot \frac{I^2}{r_e^2} \quad \left(\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right) \quad (17)$$

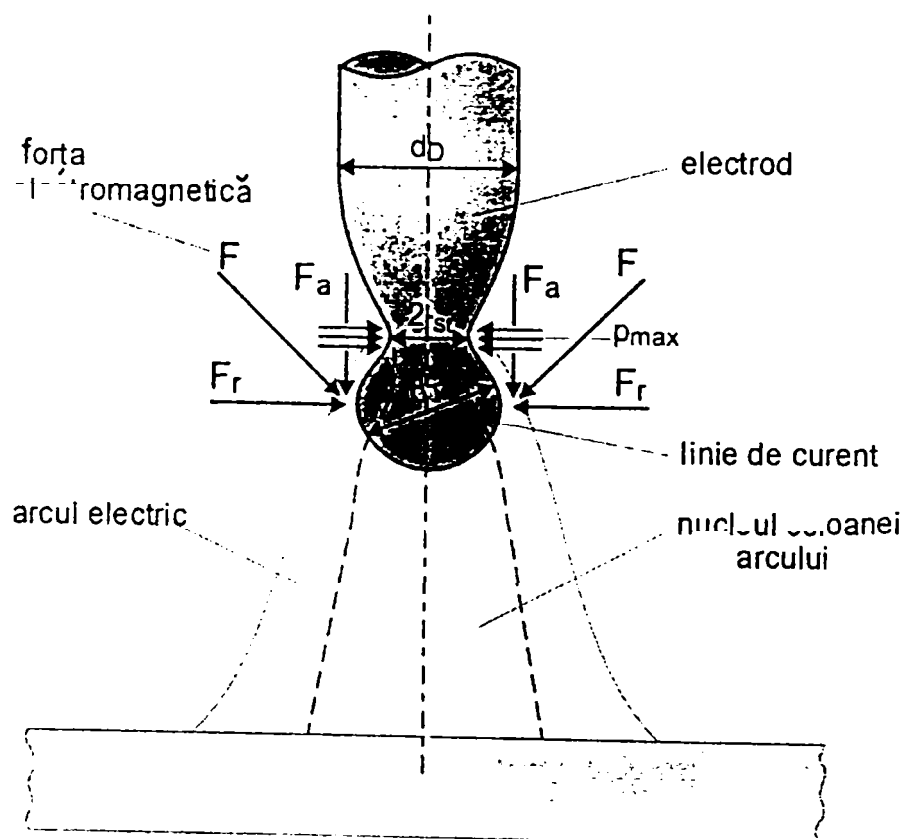


Figura 5.

Înmulțind presiunea cu suprafața pe care acționează, considerată de formă toroidală și aproximând $r=r_{st}$ (figura 5), se obține expresia forței electrodinamice (Pinch):

$$F_P = \frac{\mu_0}{2} \cdot I^2 \cdot \frac{r^2 \cdot (r_e^2 - r^2)}{r_e^4} = \frac{\mu_0}{2} \cdot I^2 \cdot \left[\left(\frac{r}{r_e} \right)^2 - \left(\frac{r}{r_e} \right)^4 \right] \quad (18)$$

și datorită $r \ll r_e$, prin neglijarea termenului la exponent 4, se ajunge la forma simplificată:

$$F_p = \frac{\mu_0}{2} \cdot I^2 \cdot \left(\frac{r}{r_e} \right)^2 \quad (\text{N}) \quad (19)$$

În relație, μ_0 este permeabilitatea magnetică în vid cu valoarea $4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ H/m. Ca urmare, forța Pinch se mărește pe măsura creșterii termenului I^2 și a utilizării unui electrod de diametru relativ mic, și scade pe măsura scăderii lui r , deci a razei de curbura a zonei de strangulare a picăturii ca urmare a micșorării suprafeței pe care acționează presiunea. De îndată ce s-a obținut presiunea maximă a efectului Pinch, procesul de transfer a picăturii prin arc este asigurat.

Pentru un calcul exact $r \neq r_{st}$ se prezintă o variantă proprie bazată pe fenomenele ce au loc la curgerea vâsco-plastică a solidelor. Prin modelarea vâsco-plastică a fenomenului de stricțiune (gâtuire) $r_{st}/r = f(\Psi)$ unde Ψ este stricțiunea produsă în zona de acționare a presiunii Pinch radiale.

Admițând:

$$\Psi = 1 - \left(\frac{d_{st}}{d_e} \right)^2 \quad (20)$$

relația devine:

$$\frac{r_{st}}{r} = c \cdot \ln \left(\frac{r_e}{r_{st}} \right)^2 \quad (21)$$

având valori cuprinse între limitele 0, ceea ce corespunde situației $r_{st} = r_e$ și $r \rightarrow \infty$ și limita ∞ , atunci când $r \rightarrow 0$. Ultima relație poate fi folosită pentru explicitarea termenilor de variabilă r , dificil de determinat chiar și experimental cu termeni facil de urmărit.

Componenta axială a forței electromagnetice F_a în cazul în care scurgerea este divergentă (diametrul picăturii > diametrul anodului) acționează axial conform figurii 5 în sensul desprinderii picăturii. Constrația Pinch mărește efectul de divergență și prin aceasta se mărește și componenta axială.

□ Forța tensiunii superficiale

Tensiunea superficială provoacă presiunea din interiorul picăturii menținând-o compactă și opunându-se desprinderii de capătul sârmei electrod. Ea depinde de material, de tipul gazului plasmagen și de temperatura locală. Dependența de temperatură combinată cu gradientul temperaturii provoacă așa numita convecție Marangoni în picătură, orientată în sensul desprinderii în axa ei și în sens opus la suprafață. Se determină o mișcare vâsco-plastică cu o viteză de circa 0,3 m/s. Dacă diametrul picăturii este d_T atunci forța tensiunii superficiale are expresia:

$$F_{\sigma} = \pi \cdot d_T \cdot \sigma_T \cdot \cos \varphi \quad (22)$$

unde σ_T este tensiunea superficială, iar φ este unghiul format conform figurii 6.

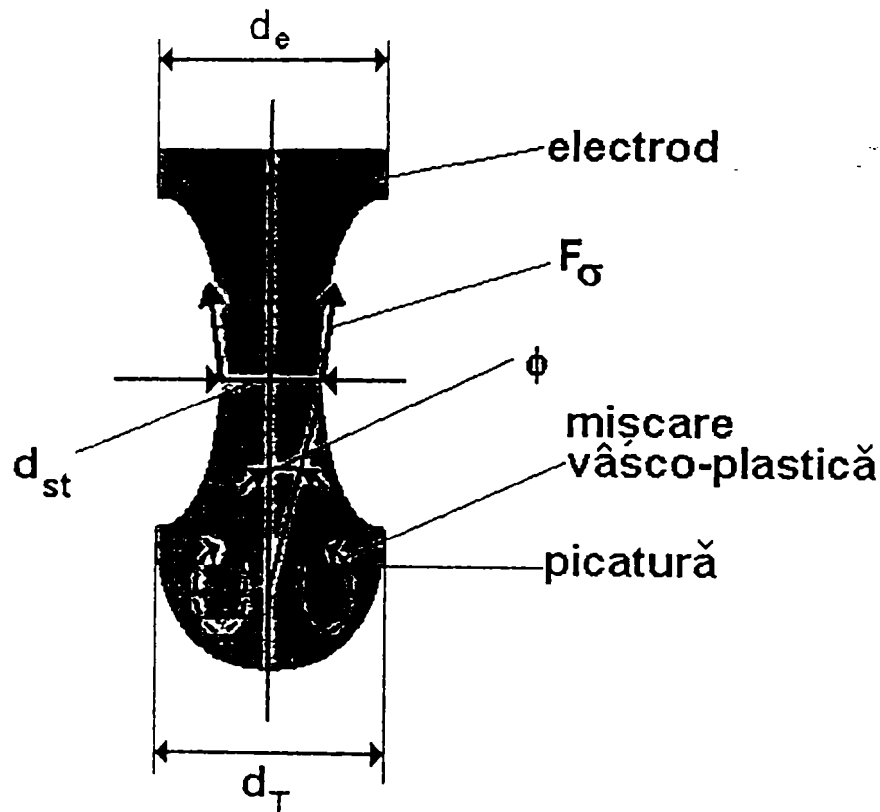


Figura 6.

Tensiunea superficială scade pe măsura creșterii temperaturii după relația:

$$\sigma_T = 2,1 \cdot \frac{\frac{3}{2} \cdot (T_t - T_0)}{M} \cdot \rho \quad \left(\frac{\text{N}}{\text{m}} \right) \quad (23)$$

În relație T_t este temperatura de topire a materialului; T_0 – temperatura la suprafața picăturii; M – greutatea moleculară a gazului (g/mol); iar ρ - densitatea (g/cm^3). Când se atinge limita $T_t = T_0$, σ_T devine nul, deci și forța tensiunii superficiale devine $F_{\sigma} = 0$. Ca urmare, pentru anularea lui σ_T , temperatura picăturii trebuie să fie foarte mare, iar densitatea materialului cât mai mică. Tensiunea superficială a aluminiului la temperatura de 600°C , apropiată a celei de topire este de $0,86 \text{ N/m}$. Forța tensiunii superficiale la aluminiu este de aproximativ 300 dyne .

Căderea bruscă a tensiunii superficiale necesară desprinderii picăturii este în legătură directă cu câmpul termic al petei anodice și în special cu variația axială

a acestuia. Cercetări efectuate cu metoda FEM [87], au demonstrat că pe distanțe axiale echivalente cu d_T se depășește de câteva ori temperatura petei anodice de circa 1800°C . Valoarea maximă a temperaturii se situează în subzona de presiune maximă a picăturii. Câmpul de presiune din zona picăturii este prezentată după [157] în figura 7.

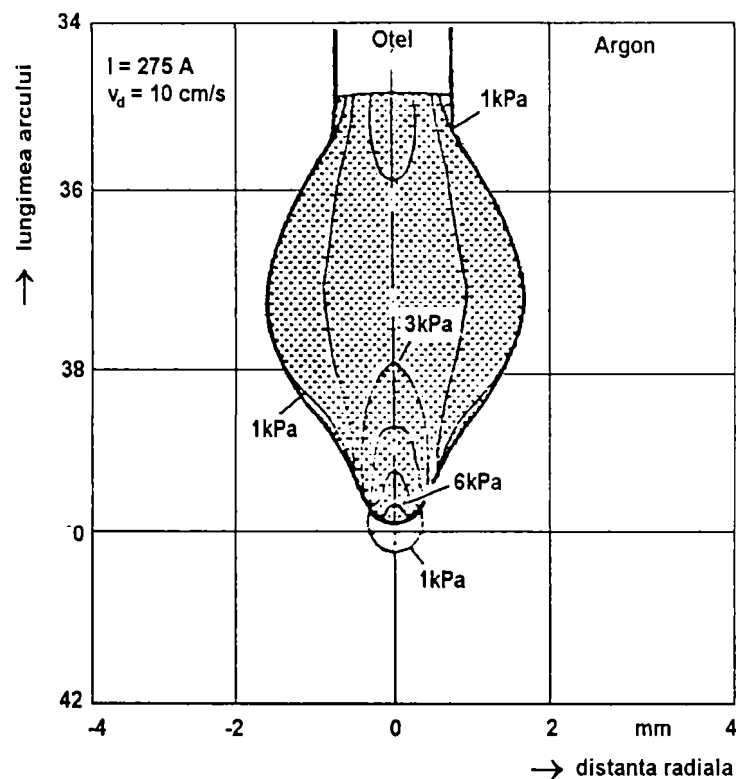


Figura 7.

Între izobare, diferența de presiune este de 1kPa. Presiunea maximă este situată la vârful picăturii și este de circa 6% din presiunea din jurul picăturii, de $10^2\text{kPa}=1\text{ bar}$.

□ **Forța electrostatică** de portanță a arcului influențează mai puțin procesul de desprindere a picăturii și mai mult accelerarea acesteia în arc. Ea ajută la detașarea picăturii în cazul folosirii unei frecvențe mari.

□ **Forța de vaporizare** este o forță care se opune desprinderii picăturii. Expresia ei într-o secțiune plană transversală cu gradient de temperatură cvasi-nul, este de forma:

$$F_V = \frac{m_0}{\rho_v} \cdot I \cdot j \quad (24)$$

unde m_0 este masa totală vaporizată/A.s, ρ_v – densitatea vaporilor la presiune constantă. Această forță este mare când intensitatea și densitatea curentului sunt mari și când elementele din arc se vaporizează la presiuni scăzute.

□ **Forța jetului de plasmă** sau de scurgere a plamei are rolul, în primul rând, de a accelera picătura desprinsă în direcția de curgere. Expresia acestei forțe este:

$$F_p = \frac{C \cdot \pi}{2} \cdot v_g^2 \cdot \rho_g \cdot r^2 \quad (25)$$

ceea ce indică dependența de viteza și densitatea gazului plasmogen v_g și ρ_g , raza particulelor r și coeficientul de scurgere C . Această forță este maximă când v_g și r sunt mari, ceea ce de regulă nu se întâmplă deoarece variațiile celor doi factori este inversă. Picăturile (particulele) mari sunt asociate cu scăderea intensității curentului, pe câtă vreme, vitezele mari cu creșterea intensității curentului.

4. Variația forțelor din arc în funcție de curentul de sudare

Analizând variația forțelor care acționează în arcul electric în funcție de intensitatea curentului, reprezentată în figura 8, se constată următoarele: Forțele active ale procesului de transfer masic trasate cu linie plină, F_g , F_e și F_p prezintă un spectru larg de variație. În ipoteza menținerii constante a dimensiunii picăturii, forța gravitațională scade lent cu creșterea curentului datorită modificării termenului ρ . Forța electromagnetică F_e , depinzând esențial de intensitatea curentului prezintă o creștere exponențială, deși termenul r/r_e variază în sens contrar. Forța jetului de plasmă F_p este determinată mai mult de tendința de modificare a razei particulelor și de produsul $v_g^2 \cdot \rho_g$, al cărui termeni variază însă în sens invers, compensându-se în mare parte.

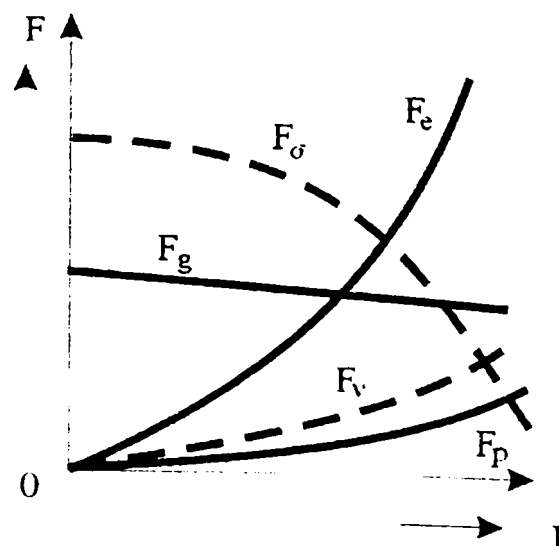


Figura 8.

Forțele care se opun procesului de desprindere a picăturilor, marcate cu linie întreruptă în figura 8, sunt F_{σ} și F_v . Forța tensiunii superficiale F_{σ} se micșorează cu mărirea lui I , pe seama creșterii temperaturii din zona anodică. Când se depășește un anumit prag, scăderea devine foarte bruscă. Forța de vaporizare se mărește exponențial datorită termenului $I \cdot j$.

La limita desprinderii, în faza 3 de puls au loc oscilații în mișcarea picăturii, ceea ce prin efect dinamic contribuie la desprindere. Din diagramă rezultă că pentru desprindere curentul trebuie să se depășească un anumit prag minim. Pe de altă parte intensitatea critică a curentului pentru trecerea de la transferul prin picături la transferul de tip spray se obține din egalarea forței electromagnetice de stricțiune cu tensiunea superficială a picăturii globulare cu diametrul egal cu cel al sârmei electrod, [95]:

$$I_{cr} = 2\pi \sqrt{\frac{\sigma \cdot d_e}{\mu_0}} \quad (26)$$

Relația arată că această limită critică depinde de material și de grosimea electrodului.

5. Viteza de topire a electrodului

S-a demonstrat [143], că pentru a se obține un proces de fuziune cu o rată de o picătură pe puls de curent, în timpul pulsului de curent între principalii parametri, intensitate de puls I_p , durată de puls t_p , există următoarea relație:

$$I_p^n \cdot t_p = C \quad (27)$$

unde C este constanta de rupere a picăturii, iar n este o constantă de material având valori cuprinse în intervalul (1,2; 2,0). În cazul aluminiului s-a determinat în cadrul prezentei lucrări valoarea $n=0,5$.

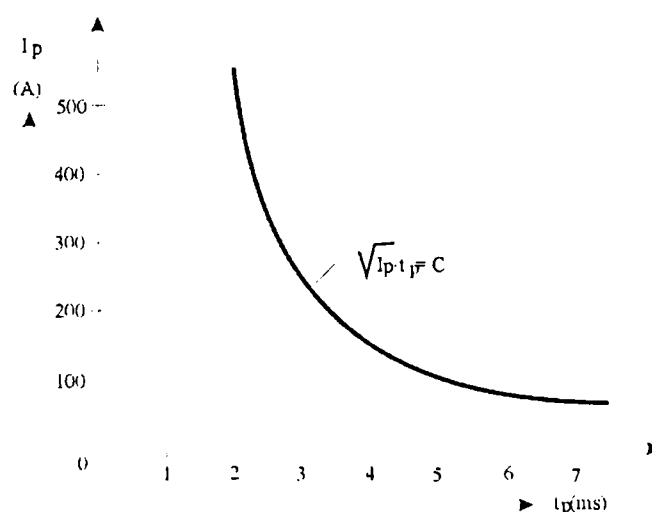


Figura 9.

Reprezentarea grafică a relației permite relevarea unei game largi de reglare a pulsului de curent la durata de desprindere de $2 \div 2,5$ ms, ca și limitarea acesteia la $t_p < 3$ ms (figura 9).

□ Relația dintre frecvență și viteza de topire

Lungimea electrodului consumat pe puls este dependentă de viteza de topire și de frecvența curentului pulsat:

$$l_p = \frac{v_t}{f} \quad (28)$$

6. Influența parametrilor curentului asupra vitezei de topire

După literatura de specialitate [134], relația dintre viteza de topire \approx viteza de avans a sârmei electrod și parametri specifici sudării în impulsuri de curent are forma:

$$v_t = \alpha \cdot I_{ef} + \beta \cdot L \left[I_{ef}^2 + \frac{(I_p - I_b)^2 \cdot t_p \cdot t_b}{t_p + t_b} \right] \quad (29)$$

unde I_{ef} este curentul efectiv care se calculează din:

$$I_{ef} = \frac{I_p \cdot t_p + I_b \cdot t_b}{t_p + t_b} \quad (30)$$

Cum durata de puls este limitată la $3 \div 5$ ms, rezultă că diferența $I_p - I_b$ este hotărâtoare pentru obținerea unei viteze mari de topire; $\alpha \left(\frac{\text{mm}}{\text{A} \cdot \text{s}} \right)$ și $\beta \left(\frac{1}{\text{A}^2 \cdot \text{s}} \right)$ sunt constante de material asociate încălzirii prin rezistență a electrodului respectiv căldurii dezvoltate prin efect Joule, iar L este lungimea capătului liber al electrodului.

Curentul de sudare la vârful pulsului este dat de relația:

$$I(t) = I_b + (I_p - I_b) (1 - e^{-\lambda t}) \quad (31)$$

unde λ este o constantă, $\lambda = 1/t_r$, ce caracterizează timpul necesar ridicării curentului în timpul pulsului la valoarea $(1 - e^{-1})$ din diferența $I_p - I_b$, adică timpul corespunzător ajungerii pe ciclograma pulsului la valoarea de $0,63(I_p - I_b)$. Dacă forma pulsului se apropie de forma exponențială (figura 10), aria de sub puls este descrisă de relația:

$$\int_0^{t_p} I(t) \cdot dt = I_p \cdot t_p - \frac{I_p - I_b}{\lambda} (1 - e^{-\lambda \cdot t_p}) \quad (32)$$

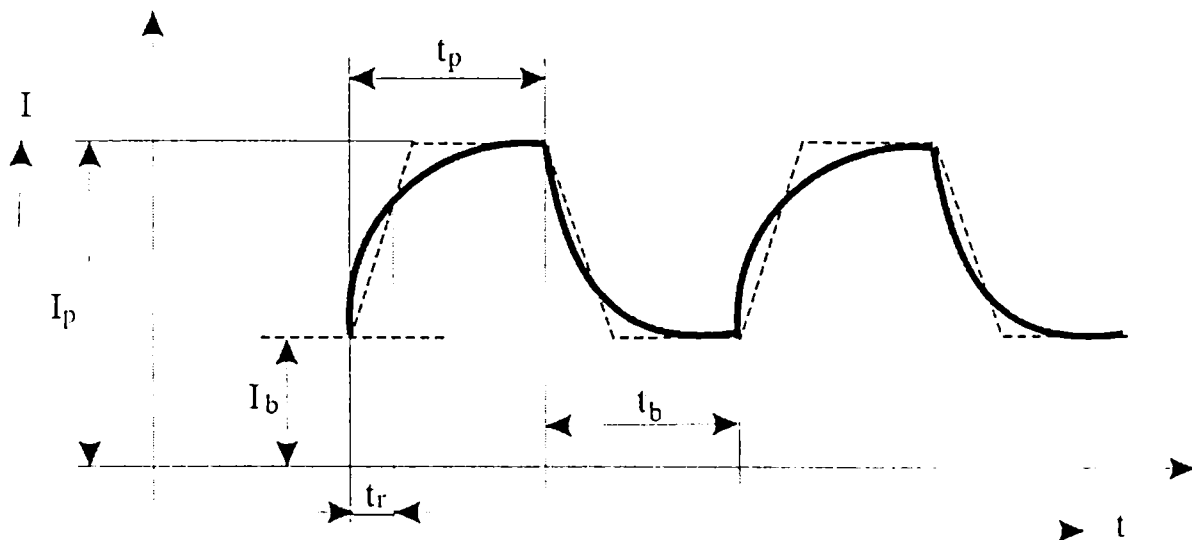


Figura 10.

Se trage concluzia că viteza de topire la sudarea în impulsuri de curent este dependentă de dinamica sursei. O viteză mare de reacție semnifică un $\frac{dI}{dt}$ ridicat, fapt care conservă o durată superioară de puls t_p , obținându-se astfel o dispersie și picături mai fine.

7. Fazele desprinderii picăturii

Fazele desprinderii picăturii pot fi urmărite cu ajutorul figurii 11, în care ciclograma $U=f(t)$ pune în evidență patru faze distincte:

Faza 1 de puls: Pe parcursul acestei faze acționează curentul de bază împreună cu tensiunea de bază corespondentă. Este o fază cu nivel energetic scăzut în care se realizează menținerea arderii arcului electric. Curentul de bază mai are însă și alte funcții.

În faza de puls 2 se amorsează procesul de desprindere a picăturii; curentul de puls are un rol esențial pentru debutul fenomenului Pinch.

În timpul fazei de puls 3 are loc desprinderea picăturii. În curba de variație în timp a tensiunii se poate observa o ușoară creștere de tensiune. Acest vârf de tensiune se explică printr-o aprindere suplimentară a arcului electric de la picătură la sârma aflată în mișcare de avans. Fiind reținută în continuare de tensiunea superficială în această fază s-a pus în evidență o oscilație de ms a picăturii pe direcția coloanei arcului, ceea ce prin efect dinamic mărește suplimentar forțele de

desprindere. Cu ajutorul acestui vârf de tensiune se poate stabili cu exactitate momentul desprinderii picăturii.

Faza de puls 4 este cea pe parcursul căreia are loc pătrunderea picăturii în baia metalică.

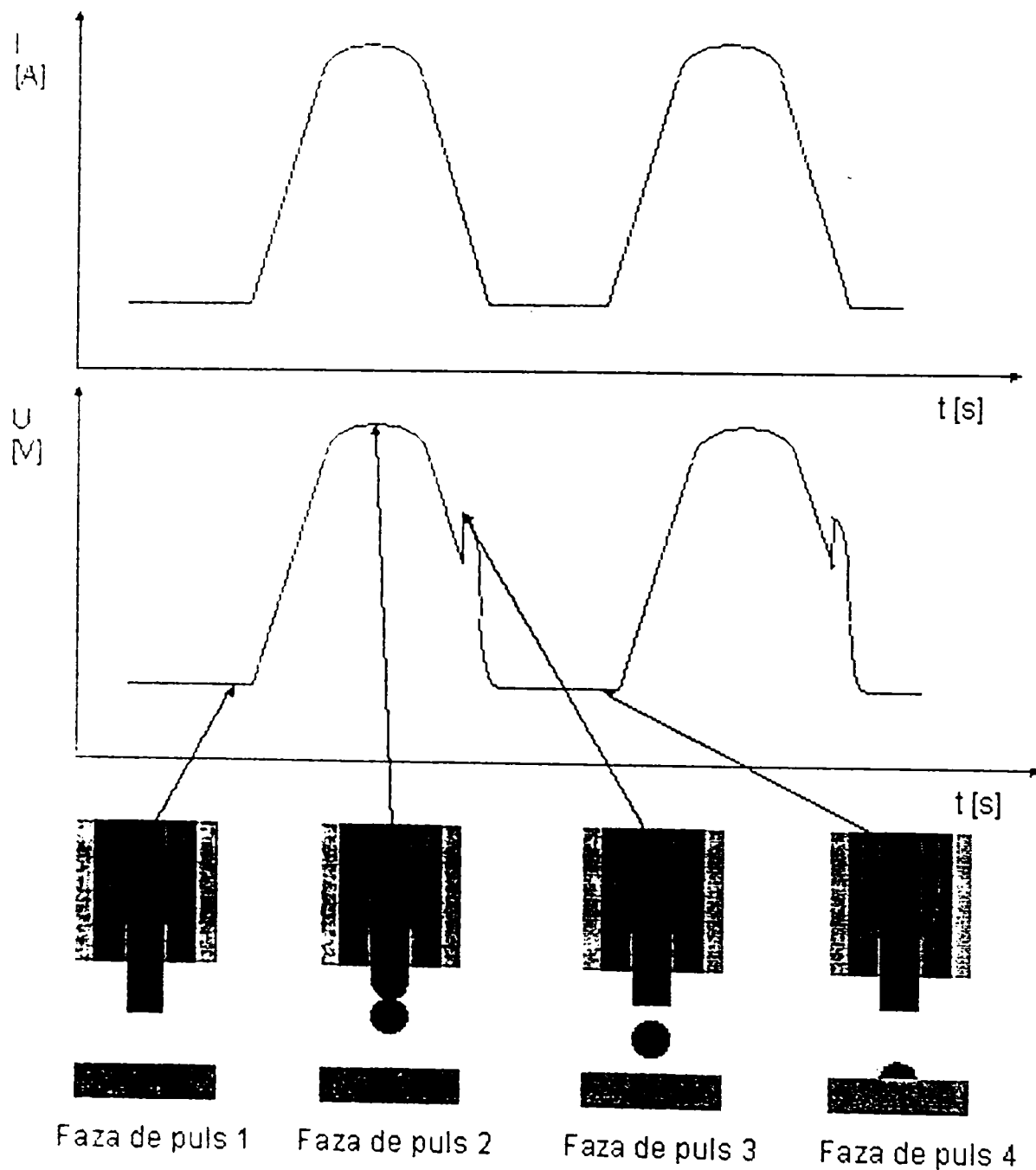


Figura 11. Fazele desprinderii picăturii

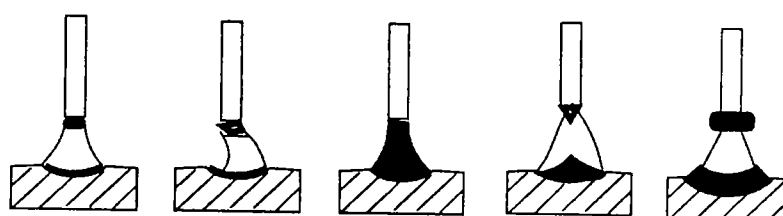
8. Clasificarea modurilor de transfer masic în arcul electric

Clasificarea modului de transfer a picăturii se realizează după două criterii, și anume: funcție de lungimea arcului și respectiv, funcție de mărimea picăturii.

Formele caracteristice de transfer ale picăturii conform DIN 1910/IV sunt:

- **A.1. arc scurt**, în picături fine, însoțit de scurtcircuitări ale arcului la transferul fiecărei picături
- **A.2. spray-arc**, în picături foarte fine, fără scurtcircuitări
- **A.3. arc lung**, în picături mari, cu scurtcircuitări întâmplătoare
- **A.4. arc pulsant**, cu picături fine și fără scurtcircuitate.

A.1. La intensități mici ale curentului de sudare, indiferent de natura gazului protector, se reglează de obicei arcul scurt. Materialul trece prin arc exclusiv prin scurtcircuitate. Datorită alimentării continue cu sârmă electrod și datorită creșterii picăturii, aceasta atinge suprafața băii metalice (figura 12).



Arc scurt

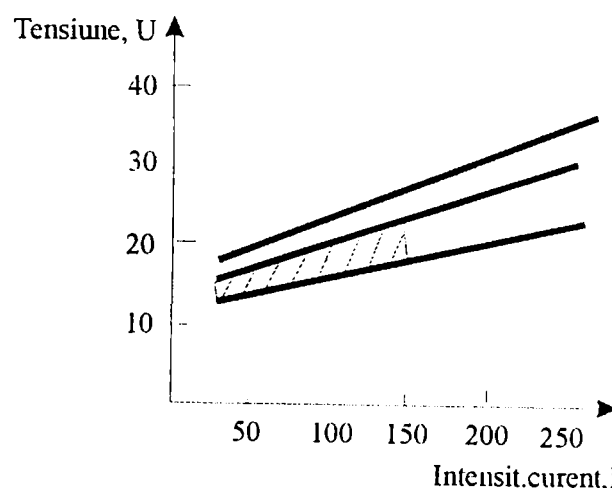


Figura 12. Arc scurt - domeniul de lucru și transferul picăturii

Astfel, arcul electric se strânge și se reamorsează (reaprinde) în atmosfera ionizată de vapori metalici când picătura este strangulată sub influența unui curent mare de scurtcircuit. Mărimea picăturii și frecvența transferului picăturii depind atât de natura metalului și a gazului protector, cât și de densitatea de curent și de tensiunea de lucru. Frecvența este cea mai mică în cazul utilizării argonului ca gaz protector.

La sudarea cu arc scurt baia metalică este mică și vâscoasă datorită unei cantități mici de energie introdusă, astfel încât procedeul se pretează la sudarea tablelor subțiri, la sudarea rădăcinii componentelor groase la care accesul se face dintr-o singură parte, precum și la sudarea în poziție.

Atunci când curentul de sudare depășește o anumită valoare critică (și se folosește ca gaz protector argonul sau amestecul de gaze bogat în argon), se observă o mărire semnificativă a frecvenței picăturilor însoțită de scăderea mărimii acestora. Acest tip de transfer se poate numi arc electric mixt datorită faptului că transferul de metal se produce suplimentar și prin scurtcircuitări. Arcul electric mixt este critic pentru formarea stropilor.

A.2 Mărind intensitatea curentului de sudare, se atinge transferul de metal fără orice scurtcircuitare, în picături foarte fine. Acesta este spray-arcul (figura 13) cu ajutorul căruia se poate regla un proces de sudare foarte uniform în timp în ceea ce privește curentul și tensiunea de lucru.

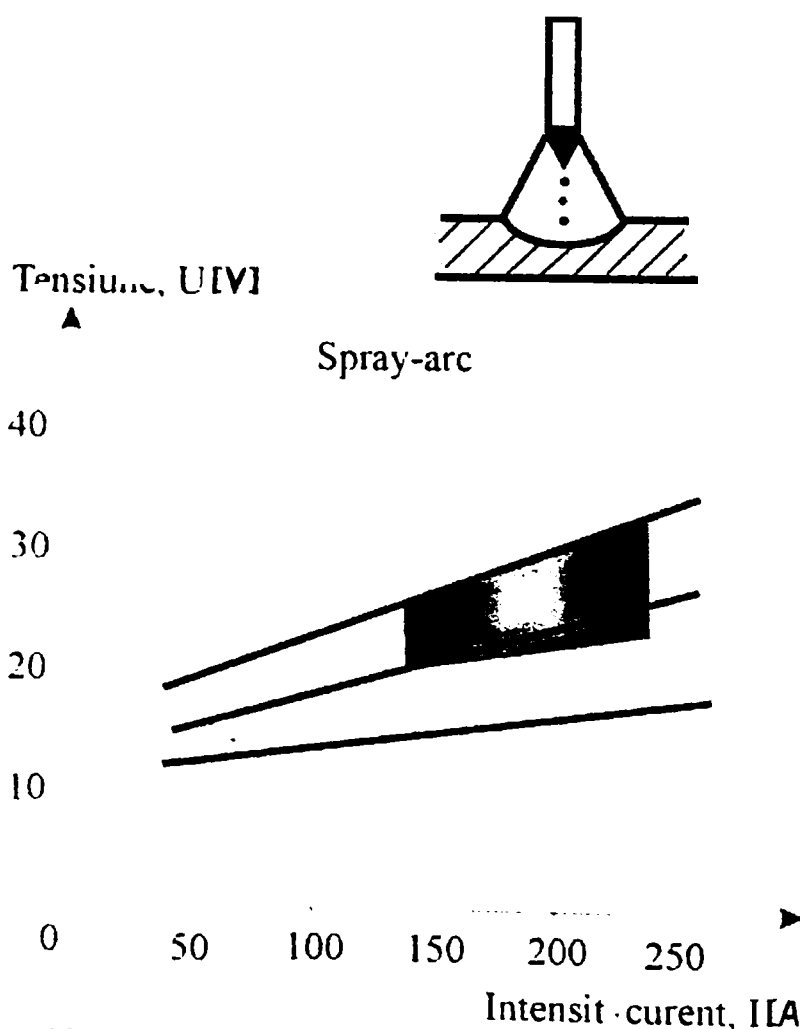


Figura 13. Spray-arc - domeniul de lucru și transferul picăturii

O importanță esențială în desprinderea picăturii la utilizarea acestui mod de transfer o are efectul Pinch. Transferul de material în formă de ploaie (spray) prin

picături foarte fine este condiționat de mărirea tensiunii de lucru și de creșterea componentelor active din gazul protector, cu efect de micșorare a densității critice de curent. Energia introdusă determină formarea unei băi largi, fluide, astfel încât se poate aplica numai la sudarea componentelor groase în poziție jgheab sau în poziție orizontală. Se obțin cusături cu suprafețe netede și plane.

A.3. Dacă se întrebuințează ca gaz protector CO_2 , odată cu mărirea densității de curent se observă o modificare mai lentă a frecvenței picăturii, nepunându-se în evidență o valoare critică a intensității curentului, ca în cazul argonului. Numărul de scurtcircuite se micșorează, dar dimensiunile picăturilor care se transferă prin scurtcircuit sunt foarte mari. Se produce astfel o tendință puternică de formare a stropilor. Procesul de transfer în acest caz este cunoscut sub denumirea de arc lung și este foarte instabil (figura 14).

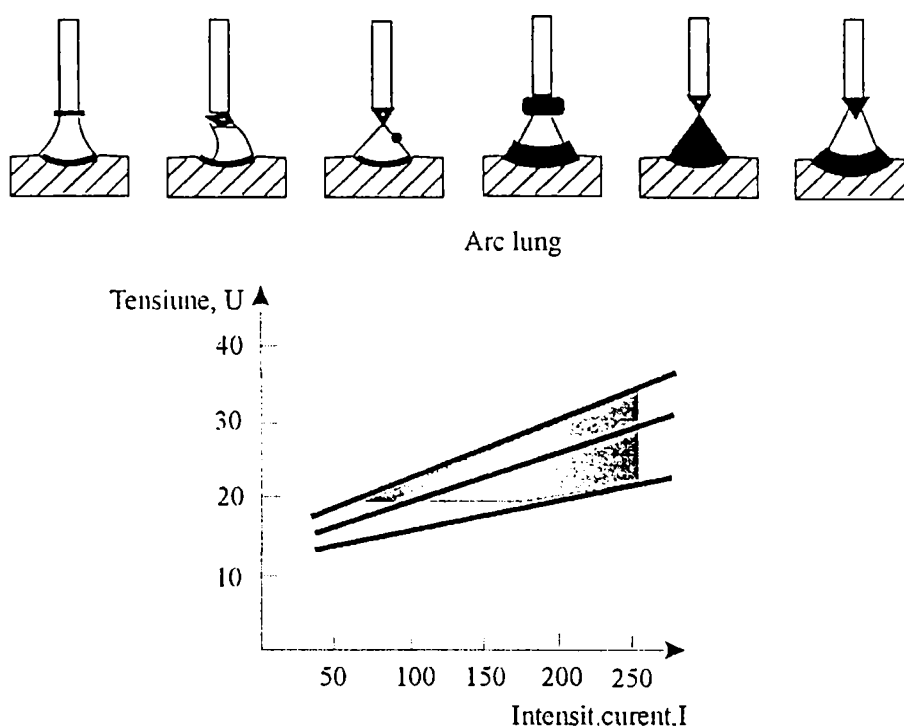


Figura 14. Arc lung - domeniul de lucru și transferul picăturii

Comparativ cu sudarea în spray-arc, în cazul arcului lung, se obțin îmbinări cu solzi mari, cu relief neregulat și supraînălțări foarte mari. Datorită arderii puternice a elementelor de aliere arcul lung în gaz protector de CO_2 se folosește numai la sudarea oțelurilor nealiate, precum și în cazurile în care este necesară obținerea unei pătrunderi foarte mari, fără pretenții asupra aspectului îmbinării.

A.4. Sudarea în impulsuri a adus mari avantaje în ceea ce privește sudarea componentelor subțiri cu grosimea mai mică de 1 mm și la realizarea îmbinărilor de poziție. Aceste avantaje au la bază obținerea unui proces de sudare liniștit, cu stropi foarte puțini sau chiar fără stropi în condițiile introducerii dirijate a unei

cantități mici de căldură. Față de arcul scurt, în acest caz se pot utiliza sârme electrod mai groase pentru că sursa de curent cuplează periodic pe două caracteristici, cu un curent de bază scăzut și cu un curent de impuls ridicat. Pe parcursul fazei curentului de bază se menține ionizarea parcursului arcului electric și se realizează preîncălzirea atât a capătului sârmei electrod, cât și a suprafeței piesei.

Transferul de material lipsit de scurtcircuitări are loc exclusiv în faza curentului de impuls, fază în care se depășește valoarea critică a intensității curentului, specifică spray-arcului. În funcție de modul de alegere a parametrilor caracteristici de sudare, pe parcursul unui impuls pot fi transferate una sau mai multe picături.

După IIS (IIW - Institutul Internațional de Sudură) transferul picăturii prin coloana arcului electric se realizează prin unul din următoarele moduri:

B.1. Transfer în zbor liber, când picăturile "zboară liber" prin coloana arcului, fără scurtcircuitări (eventual întâmplătoare). În cadrul modului de transfer în zbor liber, distingem:

B.1.1. Transferul globular; picăturile au un diametru mai mare decât diametrul electrodului. Ca subvariante se deosebesc:

B.1.1.1. Transfer globular în picături, desprinderea picăturii realizându-se când greutatea acesteia depășește tensiunea superficială care leagă picătura de capătul electrodului (cazul este frecvent întâlnit la procedeul de sudare MIG).

B.1.1.2. Transfer globular în picături mari, caz în care picătura este deviată lateral față de axa electrodului și de acolo în baia metalică. Factorii care influențează devierea laterală a picăturii sunt: greutatea picăturii și forțe de natură electromagnetică. Cazul este specific sudării MAG, utilizând ca gaz protector CO₂.

B.1.2. Transfer în spray. La acest mod de transfer picăturile sunt fine, diametrul picăturilor este mai mic decât cel al sârmei electrod, desprinderea picăturilor realizându-se cu viteză mare. Transferul picăturii este influențat preponderent de forțe electromagnetice. Este specific următoarelor procedee: MIG-I, MAG - cu amestec de gaze protectoare, SE - sudare manuală cu electrozi înveliți cu înveliș acid. Acest mod de transfer prezintă subvariantele:

B.1.2.1. Transfer în picături proiectate, când picăturile fine traversează spațiul arcului cu viteze mari, fiind accelerate de forțele electromagnetice (forța Pinch). Capătul sârmei electrod în acest caz

trebuie să fie conic și ascuțit. Acest mod de transfer este specific procedurii MIG - în impulsuri.

B.1.2.2. Transfer în zona lichidă, caz în care picăturile foarte fine nu mai pot fi distinse cu ochiul liber. Ele parcurg zona arcului cu viteze mari și sunt accelerate de către forța Pinch. Modalitatea este specifică sudării MAG cu amestecuri de gaze protectoare.

B.1.2.3. Transfer turbionar, caz în care sârma electrod se încălzește foarte puternic, devine plastică și se torsionează sub acțiunea forțelor Pinch. Astfel, picăturile sunt aruncate tangențial față de electrod, cu viteze foarte mari. Acest mod de transfer este specific procedurii MAG în amestecuri de gaze protectoare când se operează cu curenți de sudare foarte mari.

B.1.3. Transfer prin explozie, când picătura, în curs de formare, conține o bulă de gaz, care se încălzește repede și explodează. Picătura inițială se dezintegrează în picături mai mici care sunt accelerate puternic și sunt transferate cu viteze atât de ridicate încât fenomenul este aparent exploziv. Transferul prin explozie este specific procedurii MIG la sudarea aluminiului.

B.2 Transfer cu arc în scurtcircuit.

Acest mod de transfer se caracterizează prin producerea scurtcircuitelor ca urmare a formării unor punți metalice lichide între electrod și baia de sudură. Se disting următoarele subgrupări:

B.2.1. Transfer în scurtcircuit care este specific sudării MIG/MAG cu arc scurt.

B.2.2. Transfer cu punte continuă.

B.3. Transfer condus de zgura topită.

În cadrul acestui mod de transfer, picăturile parcurg zona arcului în funcție de caracteristicile peliculei de zgură sau de flux topit.

9. Evaluarea transferului de picături prin filmare rapidă

Procesul de desprindere a picăturii, urmărit și evaluat prin filmare rapidă (vezi cea de a doua parte a capitolului IV), a permis determinarea cantitativă a mărimii picăturii d_T , în funcție de viteza de avans a sârmei electrod și în funcție de frecvență. Experimentul a fost extins la trei mărci de material de adaos și anume sârma electrod cu diametrul $d_D=1,2$ mm din AlSi5, Al99,5 și AlMg5. Rezultatele obținute au fost prelucrate în sistemul mărime relativă a picăturii d_T/d_D , funcție de raportul dintre viteza de avans a sârmei electrod v_D și frecvența f , fiind reprezentate grafic în figura 15 prin linie plină.

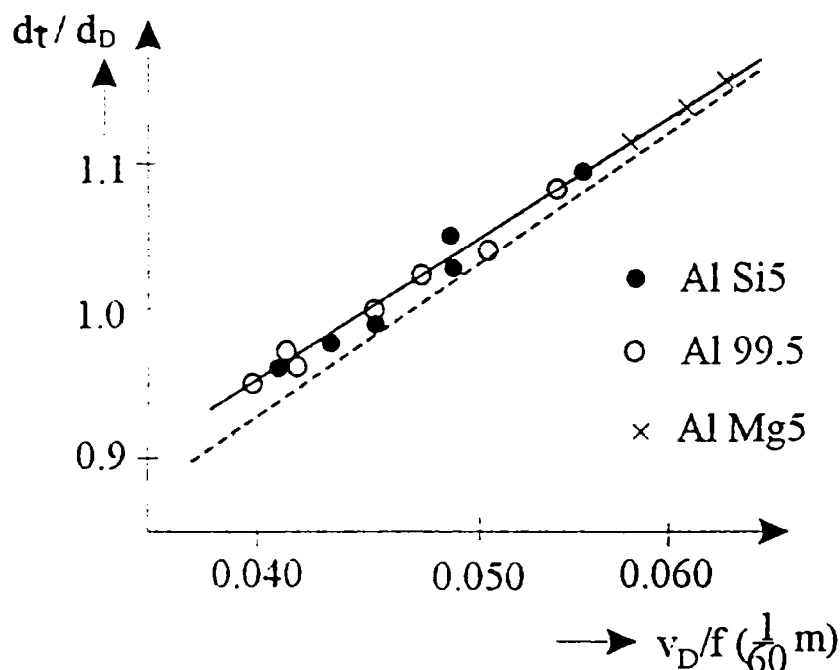


Figura 15.

Se pune în evidență astfel, o foarte bună corelație între parametri menționați, de formă liniară, care în limitele $v_D/f \in 0,040 \div 0,066$ are expresia:

$$\frac{d_T}{d_D} = 6,66 \cdot \frac{v_D}{f} + 0,68 \quad (33)$$

Valoarea $v_D/f=0,050$ ($1/60$ m) împarte câmpul diagramei în două părți distincte: la valori $v_D/f \leq 0,050$ ($1/60$ m) diametrul picăturii se situează sub diametrul sârmei, iar la valori $v_D/f > 0,050$ ($1/60$ m), diametrul picăturii întrece diametrul sârmei electrod.

După cum se observă relația obținută diferă întrucâtva de cea teoretică (relația 6 din capitolul II) trasată cu linie întreruptă, abaterile cele mai mari aflându-se la valori mici ale raportului v_D/f . Faptul își găsește explicația prin prevalarea influenței frecvenței în relația puterii efective consumate în proces, ceea ce determină micșorarea diametrului picăturii pe măsura măririi frecvenței de puls.

10. Concluziile

- Din analiza tipurilor de arce posibile la sudarea MIG, rezultă superioritatea arcului electric în impulsuri de curent, ceea ce conduce la obținerea unor suduri de calitate superioară, începând chiar de la grosimi mici de 1-2 mm.
- Analiza sistemului de forțe care acționează în arcul electric a fost adaptată pentru polaritatea DC⁺, care se aplică prioritar în cazul sudării aluminiului.

- Principala forță de desprindere a picăturii topite de la capătul electrodului, căreia i se opune în special tensiunea superficială este forța electromagnetică de stricțiune sau forța Pinch, care evoluează după o lege exponențială contribuind la accelerarea mecanismului de desprindere.
- Folosind modelarea vâsco-plastică a fenomenului de curgere din momentul desprinderii picăturii de pe suprafața frontală a sârmei electrod, autorul a reușit perfecționarea relației forței de stricțiune, prin exprimarea ei funcție de deplasarea axială a picăturii ceea ce permite măsurarea și evaluarea mai facilă a transferului masic prin arc.
- Viteza de topire depinde esențial de parametri curentului de puls, fiind astfel corelată cu dinamica sursei. O viteză mare de reacție exprimată prin dI/dt , conservă o durată mai mare de puls, obținându-se astfel o dispersie și/sau picături mai fine.
- Momentul desprinderii picăturii de pe suprafața frontală a electrodului se corelează în bună măsură cu momentul înregistrării valorii minime relative în oscilograma $U=f(t)$.
- Investigarea experimentală a transferului de picături prin arcul electric, efectuată de autor prin filmare rapidă, a permis obținerea unei corelații foarte strânse între diametrul relativ al picăturii și parametrul v_D/f , ca element esențial de reglaj.

CAPITOLUL II

PARAMETRII SUDĂRII MIG ÎN IMPULSURI DE CURENT ȘI SURSELE DE SUDARE

Cuprinsul:

1. Principalele tipuri de arce electrice
 - Arcul electric moale
 - Arcul electric dur
2. Factorii de influență asupra calității îmbinării sudate
 - 2.1 Polaritatea curentului
 - 2.2 Curentul de bază I_G
 - 2.3 Curentul de puls I_p și durata impulsului t_p
 - 2.4 Tensiunea de puls U_p
 - 2.5 Viteza de creștere a curentului de puls $\Delta I_p/\Delta t$
 - 2.6 Frecvența pulsurilor f
 - 2.7 Viteza de avans v_D și lungimea liberă L
 - 2.8 Influența tensiunii arcului, a vitezei de sudare și a curentului asupra pătrunderii
 - 2.9 Modul de stingere a arcului
 - 2.10 Tendința de formare a stropilor
 - 2.11 Influența gazelor de protecție asupra formei îmbinării și pătrunderii
 - 2.12 Susceptibilitatea de formare a porilor
3. Sursele de sudare cu arc electric în impulsuri
 - 3.1 Surse analogice
 - 3.2 Surse cu tranzistoare în comutație în primar - invertoare
 - 3.3 Surse cu tranzistoare în comutație în secundar
 - 3.4 Caracteristica tensiune-curent
 - 3.5 Sisteme de modulație la sursele de sudare în impulsuri
4. Parametrii de sudare recomandați de firme producătoare de surse
5. Concluzii

1. Principalele tipuri de arce electrice

Ciclograma variației în timp a curentului la sudarea în medii de gaze protectoare inerte și/sau active, în impulsuri de curent este prezentată în figura 1.

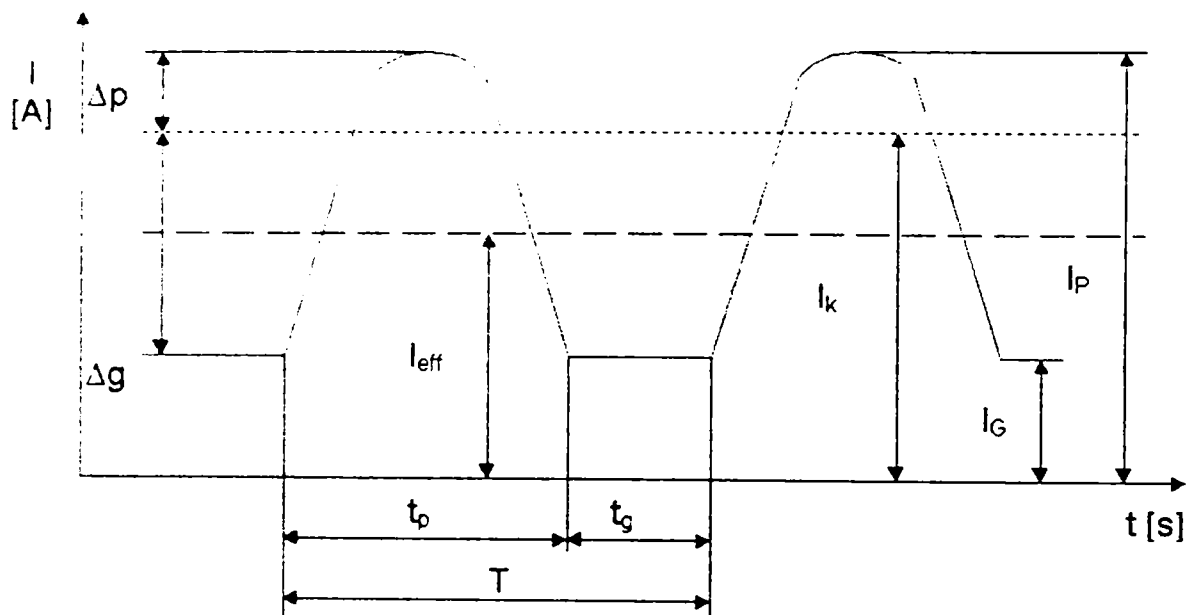


Figura 1.

Cu ajutorul ei se evidențiază următorii parametri de bază: I_G – curentul de bază, I_p – curentul de puls, I_{ef} – valoarea efectivă a curentului, I_k – curentul de bază fără scurtcircuitare, Δ_g – variația de curent la scurtcircuit, Δ_p – supraînălțarea impulsului de curent, t_g – durata de bază, t_p – durata de puls și T – perioada de puls.

Curentul de bază I_G are rolul de ionizare a coloanei arcului, precum și de topire a capătului electrodului, respectiv a suprafeței piesei.

Curentul de puls I_p este parametrul care determină desprinderea picăturii. La sistemele de modulație prezentate, el reprezintă parametrul de reglare.

Tensiunea de puls U_p are rolul de punere în mișcare a curentului de puls. La sistemele de modulare U_p/I_G și U_p/U_G reprezintă parametrul de reglare. Se alege astfel încât să permită scurgerea curentului necesar pentru desprinderea picăturii.

Durata de bază t_g reprezintă timpul de scurgere a curentului. Este dependentă de durata pulsului t_p și de frecvența f a acestuia:

$$t_G = \frac{1}{f} - t_p \quad (1)$$

Durata de puls t_p reprezintă timpul în care are loc scurgerea curentului de puls. Aceasta se impune a fi aleasă cât de mică posibil, suficientă însă pentru

desprinderea unei picături. Durate mari de puls conduc la desprinderi multiple, contactul și chiar explozia picăturilor în arc.

Frecvența pulsului determină din punct de vedere masiv viteza de avans a electrodului, atunci când se dorește obținerea unor dimensiuni constante a picăturilor.

În vederea realizării unui transfer de material fără scurtcircuitări se pot folosi două tipuri de arce electrice distincte: arcul electric moale și arcul electric dur.

□ Arcul electric moale

Folosește curenți de bază relativ ridicați, pentru a se obține o picătura cât mai fluidă. Prin aceasta, tensiunea superficială care se opune desprinderii picăturii este mică. Curentul de puls are doar rolul de desprindere a picăturii, având o valoare relativ redusă. De regulă, se consideră că în situațiile în care $I_p < 3I_G$ arcul electric este moale.

□ Arcul electric dur

Folosește curenți de bază relativ mici. Pe parcursul fazei de bază nu are loc o încălzire atât de puternică a sârmei electrod; din acest motiv picătura ce urmează să se desprindă este mai puțin fluidă. Tensiunea superficială a picăturii este mare. Curentul de puls are rolul, pe de-o parte, de a încălzi picătura pentru a o face capabilă de desprindere, iar pe de altă parte, de a realiza desprinderea efectivă a acesteia. Prin curentul de puls trebuie introdusă în picătura o cantitate de căldură suficientă pentru a provoca scăderea tensiunii superficiale și de a da efectului Pinch posibilitatea de realizare a desprinderii picăturii. Se consideră că în situațiile în care $I_p > 3I_G$ arcul electric este dur.

Alegerea uneia dintre cele două variante se face în special în funcție de grosimea tablelor de sudat și de viteza de sudare. La piesele de grosime mare, respectiv la viteze de sudare mari, se recomandă un arc electric **moale**. La piesele de grosime mică, respectiv la viteze mici de sudare, se impune utilizarea unui arc electric **dur**.

2. Factorii de influență asupra calității îmbinării sudate

Fără a considera epuizată multitudinea de factori tehnologici și netehnologici care au o influență mai mică sau mai mare asupra formei și calității unei îmbinări sudate prin procedeul MIG/MAG în impulsuri de curent, se vor prezenta în continuare o serie de influențe ale unor mărimi - considerate de literatura de specialitate și de autor, ca fiind esențiale - care influențează arcul electric, pătrunderea, capacitatea de topire, tendința de formare a stropilor, geometria îmbinării, etc. S-au analizat de asemenea și alte elemente care pot

influența procesul de sudare MIG/MAG în impulsuri de curent, fără a reprezenta neapărat un parametru în cadrul procedurii.

2.1 Polaritatea electrodului

În cadrul analizei influenței polarității electrodului asupra îmbinărilor realizate cu procedeul MIG/MAG în impulsuri trebuie luată în considerare natura materialul de bază îmbinat prin sudare.

Astfel, oțelul se sudează atât cu polaritate directă DC^- cât și inversă DC^+ . În cazul în care sârma electrod este conectată la polul pozitiv se obține o pătrundere mai mare și o pierdere mai mică de metal, datorita stropilor (figura 2). În consecință aceasta este polaritatea utilizată cel mai frecvent.

Dacă se conectează sârma electrod la polul negativ DC^- , electronii se vor deplasa de la sârma electrod spre arc electric și mai departe spre piesă. Prin aceasta căderea de tensiune între sârma și arc - la capătul topit al sârmei - este mai mare decât la sârma solidă. Fluxul de electroni de la sârma aflată încă în stare solidă este mai intens decât în cazul sârmei aflate în stare topită. Acest fenomen este favorizat de impuritățile aflate pe suprafața sârmei electrod. Datorită suprafeței mari de amorsare a arcului electric pe sârma electrod, capacitatea de topire este mai mare decât în cazul legării electrodului la polul pozitiv, DC^+ .

Pătrunderea scăzută și capacitatea de topire mare poate fi utilizată la suduri de depunere. Polaritatea negativă favorizează formarea unei stropiri intense în cazul utilizării bioxidului de carbon ca gaz protector.

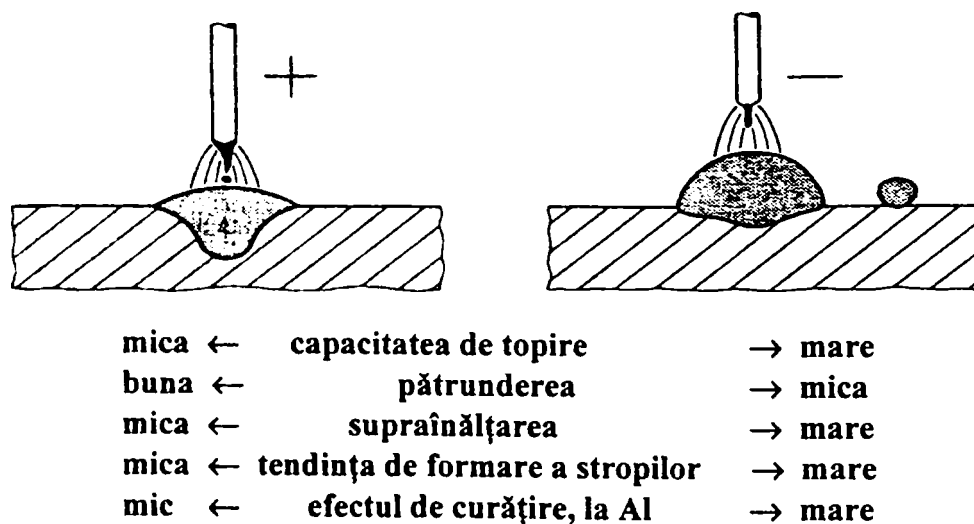


Figura 2. Influența polarității electrodului asupra îmbinării sudate

În cazul sudării aluminiului, sârma electrod se conectează la polul pozitiv, DC^+ . Astfel, în zona polului negativ (pe piesă) are loc un efect de curățare (microsablare), prin care se înlătură stratul de oxizi (cu temperatură de topire

ridicată) de pe suprafață. În cazul legării inverse, apare riscul formării unor incluziuni de oxizi în baia metalică, suprafața îmbinării sudate fiind neuniformă și aspectul neregulat. Se recomandă poziția „împuns” a electrodului și se preferă ca gaz protector argonul.

2.2. Curentul de bază I_G

Pe perioada fazei de bază - a cărei durată rezultă din frecvența și timpul de puls selectate - trebuie să se asigure ionizarea spațiului arcului. Pentru îndeplinirea acestei condiții, în funcție de diametrul sârmei electrod și de material, sunt suficienți curenți de bază cuprinși între 25 și 80 A. Prin modificarea curentului de bază se poate influența atât arcul electric cât și transferul de material. Menținând un raport constant între viteza de avans a sârmei electrod și frecvența de puls, prin varierea curentului de bază și a tensiunii respective, se poate modifica lungimea arcului electric. Prin aceasta, de exemplu, la sudurile de colț sau în cazul vitezelor mari de sudare, se poate elimina inconvenientul apariției fenomenului de deviație a arcului electric.

Prin varierea raportului între curentul de baza și înălțimea pulsului se poate influența momentul desprinderii picăturii. În mod normal, se tinde spre forțarea desprinderii picăturii imediat după încheierea impulsului de curent, în faza curentului de bază. Acest deziderat poate fi obținut, de exemplu, prin creșterea curentului de bază concomitent cu reducerea curentului de puls. Trebuie ținut cont însă de faptul ca în cazul unor curenți de bază prea ridicați are loc o topire prea intensă a capătului liber a sârmei. Prin aceasta se formează picături de volum mare care provoacă stropiri la trecerea lor în baia metalică topită.

Dacă curentul de bază are valori prea ridicate se remarcă o topire pronunțată a capătului sârmei electrod și se produce o întârziere a arcului pe parcursul perioadei de puls (remarcabil în special la amestecurile de gaze protectoare pe baza de CO_2). Dacă curentul de bază prezintă valori prea scăzute pot apare întreruperi între curentul de bază și cel de puls, arcul electric va prezenta neregularități și transferul de material va fi însoțit de scurtcircuitări.

În cazul metalelor cu o conductivitate termică bună și de grosime relativ mare se poate proceda la creșterea curentului de baza (80 - 100 A) în vederea evitării defectelor din îmbinare (lipsa de topire, pori), fără a influența negativ transferul de material prin arcul electric.

2.3 Curentul de puls I_p și durata impulsului t_p

Curentul de puls este parametrul de reglare a arcului la surse cu caracteristică de curent constant în fază de puls. Perechea de valori (I_p, t_p) determină modul de transfer al picăturii în baia metalică.

Utilizând ca gaz protector argonul sau amestecuri bogate în argon, curentul de puls provoacă urcarea arcului electric pe capătul liber al sârmei electrod,

formarea unor forțe puternice de strangulație, forțe care provoacă desprinderea picăturii. Transferul de material fără scurtcircuitări este realizabil numai dacă curentul de puls depășește o anumită valoare critică (depinde de durata de acționare a impulsului, de diametrul sârmei electrod, de natura gazului protector și de material).

Dacă valoarea curentului de puls este prea mare, aceasta conduce la formarea unor stropi, precum și la creșterea presiunii exercitate de arc electric asupra băii metalice. De asemenea, crescând curentul de puls se micșorează durata de viață a diuzei de contact și crește nivelul de zgomot în timpul operației de sudare.

Durata impulsurilor trebuie astfel aleasă încât desprinderea picăturii să se realizeze fără scurtcircuitări, aceasta fiind accelerată în suficientă măsură (uzual între 1 - 3 ms). Dacă durata pulsurilor este prea mare, transferul de metal se face prin mai multe picături pe perioada unui impuls sau se poate trece temporar la spray-arc (figura 3). În cazul în care curentul de puls este prea scăzut, acest lucru se poate compensa printr-o durată mai lungă a pulsului. Având o durată mai lungă a pulsului, deci transfer prin mai multe picături, este necesară o corectare (scădere) a frecvenței pulsurilor sau a duratei curentului de bază (creștere).

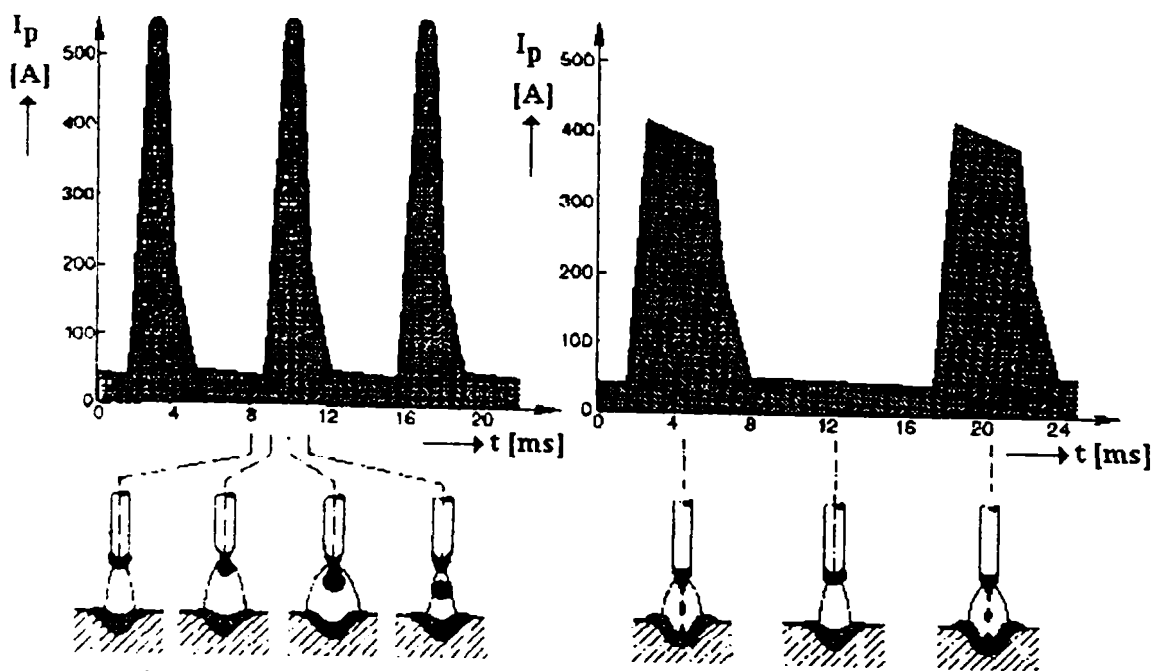


Figura 3. Influența curentului de puls și a duratei impulsului

2.4. Tensiunea de puls, U_p

În cazul surselor cu caracteristici de tensiune constantă în faza de puls, parametrul de reglare este tensiunea de puls, U_p . Acest parametru are o influență semnificativă asupra aspectului arcului electric și asupra îmbinării sudate. Prin intermediul tensiunii de puls se variază conținutul de energie al arcului electric.

Această variație provoacă o modificare a presiunii arcului și a vitezei de transfer a picăturii. Așa cum rezultă și din caracteristica tensiune-curent, mărirea tensiunii de puls generează și o creștere a curentului de puls.

2.5. Viteza de creștere a curentului de puls $\Delta I_p/\Delta t$

Anumite tipuri constructive de surse de sudare MIG/MAG în impulsuri de curent permit modificarea formei impulsurilor. Utilizând argonul ca gaz protector este suficientă o viteză redusă de creștere a curentului de puls în timp ce utilizarea amestecurilor de gaze protectoare pe baza de argon cu conținut ridicat de CO_2 (10 - 18%) impune utilizarea unei viteze ridicate de creștere a curentului de puls.

2.6. Frecvența pulsurilor f

S-a stabilit că transferul optim de material se face când pe parcursul unui impuls se desprinde o singură picătura din sârma electrod. Transferul de material fiind controlat, rezultă ca volumul picăturii de metal nu poate fi oricât de mare. Astfel, frecvența impulsurilor trebuie corelată cu viteza de avans a sârmei, dependența calitativă între cei doi parametri prezentându-se în figura 4.

În cazul mai multor tipuri constructive de surse de sudare MIG/MAG în impulsuri de curent există facilitatea ca în urma stabilirii unei forme de impuls corelarea frecvenței și a vitezei sârmei electrod să se realizeze automat. Nu se recomandă totuși sudarea cu frecvențe de puls prea scăzute deoarece ochiul sudorului va fi solicitat suplimentar iar viteza maximă de sudare este mult diminuată.

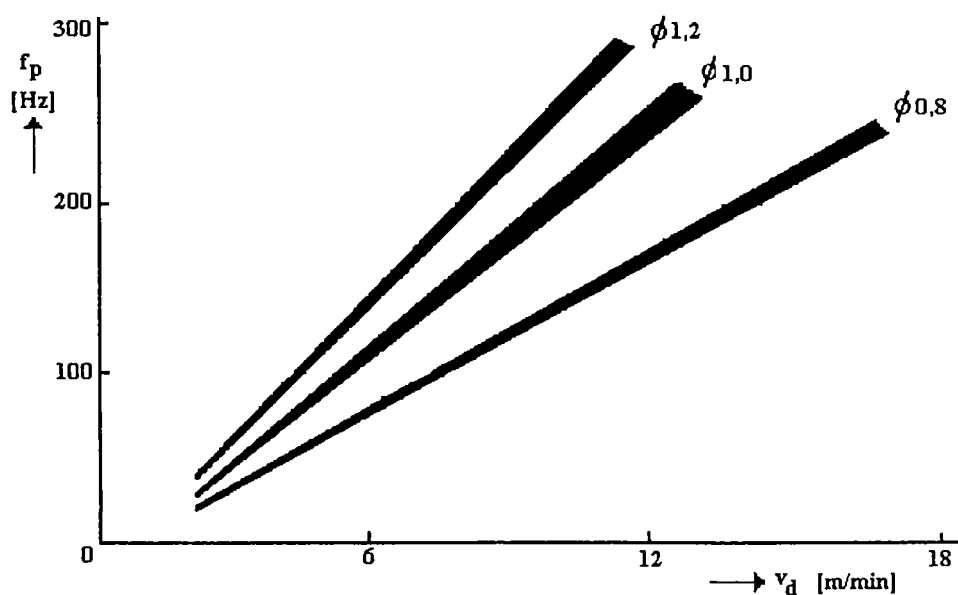


Figura 4. Dependența frecvenței impulsurilor față de viteza de avans a sârmei la diferite diametre ale sârmei electrod

2.7. Viteza de avans a sârmei electrod v_D și lungimea liberă L

O premiză importantă în vederea realizării unui transfer de material comandat - o picătura per impuls - este reglarea unui volum definit a picăturii. Pentru atingerea acestui deziderat trebuie ca volumul picăturii topite să fie egal cu volumul lungimii sârmei electrod introdusă pe perioada unui impuls. Ca urmare se stabilește o corelație între viteza de avans a sârmei electrod și frecvența impulsurilor. Viteza de avans a sârmei electrod V_D , se poate determina ca produs între frecvența impulsurilor f [Hz], și lungimea sârmei care se topește pe parcursul unei perioade L [mm]:

$$v_d = f \cdot L \quad \left[\frac{mm}{s} \right] \quad (1)$$

Volumul de sârmă electrod care se topește, se calculează din diametrul sârmei electrod d_D [mm] și lungimea sârmei electrod care se topește într-o perioadă L [mm]:

$$V_L = \frac{\pi \cdot d_D^2}{4} \cdot L \quad [mm^3] \quad (2)$$

În cazul în care, pentru simplificarea calculelor se presupune că picătura de metal are o formă sferică, volumul picăturii va fi:

$$V_T = \frac{\pi \cdot d_T^3}{6} \quad [mm^3] \quad (3)$$

d_T [mm] fiind diametrul picăturii de metal.

Egalând volumele V_L și V_T rezultă lungimea de sârmă electrod, care trebuie să se topească pe perioada unui impuls pentru un diametru definit al picăturii:

$$L = \frac{2 \cdot d_T^3}{3 \cdot d_D^2} \quad [mm] \quad (4)$$

Înlocuind pe L în relația de determinare a lui v_D rezultă următoarea dependență a vitezei de avans a sârmei electrod față de frecvența impulsurilor, de diametrul sârmei electrod și de diametrul dorit al picăturii de metal:

$$v_D = \frac{2 \cdot d_T^3}{3 \cdot d_D^2} \cdot f \quad \left[\frac{mm}{s} \right] \quad (5)$$

Din analizarea acestei ultime relații se poate concluziona că modificarea vitezei de avans a sârmei electrod impune modificarea liniară, a frecvenței impulsurilor.

Astfel, odată cu creșterea capacității de topire pe baza creșterii vitezei de avans a sârmei electrod, trebuie mărită în mod corespunzător și frecvența impulsurilor.

Pe baza relațiilor stabilite se poate determina diametrul picăturii d_T , pentru o viteză de avans a sârmei electrod și o frecvență de puls dată, cu ajutorul relației:

$$d_T = \sqrt{\frac{3}{2} \cdot \frac{v_D \cdot d_D^2}{f}} \quad [mm] \quad (6)$$

Corelația multiplă între tensiunea efectivă U_{ef} , curentul efectiv I_{ef} , viteza de avans a sârmei v_D , frecvența impulsurilor f și durata curentului de bază t_G este redată în figura 5.

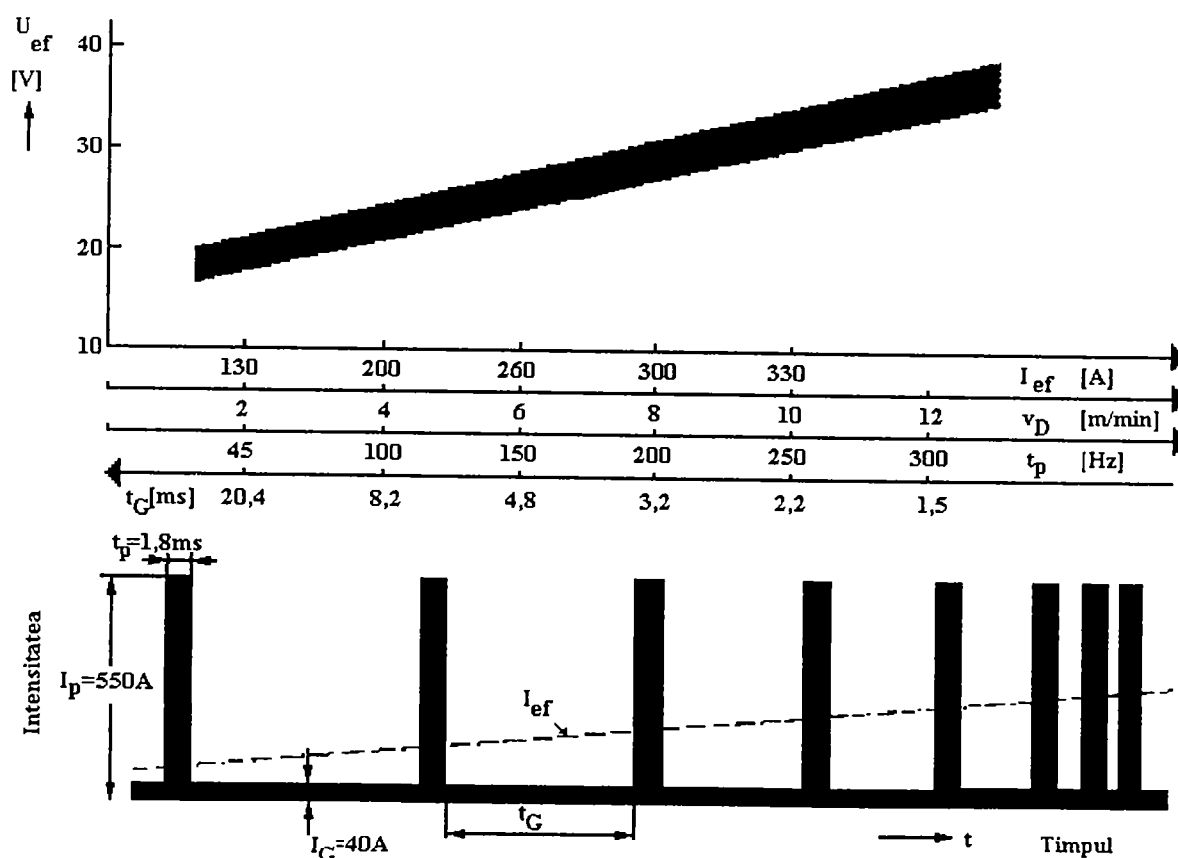


Figura 5. Corelația între tensiunea efectivă și curent, viteza de avans a sârmei, frecvența impulsurilor și durata curentului de bază

Se evidențiază, pe de o parte, că dependențele $U_{ef}=f(I_{ef})$, $U_{ef}=f(v_D)$ și $U_{ef}=f(f)$ sunt liniare, ceea ce simplifică posibilitățile de reglare și de autoreglare, iar pe de altă parte forma exponențială a relației $U_{ef}=f(t_G)$.

Între diuza de curent și arcul electric, sârma electrod se încălzește prin rezistență. Aceasta poate influența modul de desprindere a picăturii de metal. Dacă lungimea liberă este prea mare se reduce considerabil pătrunderea și se provoacă o topire timpurie a picăturii, nerespectându-se ritmul impulsurilor. Folosirea unei lungimi libere insuficiente împiedică preîncălzirea corespunzătoare a piesei și provoacă stropiri și/sau scurtcircuitări.

2.8. Influența tensiunii arcului, a vitezei de sudare și a curentului asupra pătrunderii

În **figura 6** sunt prezentate trei secțiuni efective ale unor îmbinări sudate prin procedeul MIG/MAG în impulsuri de curent. Diferența între cele trei îmbinări o reprezintă tensiunea de lucru aplicată. Îmbinarea din **figura 6a** este realizată cu o tensiune de lucru scăzută. În timpul realizării acestei îmbinări, cu toate că viteza de avans a sârmei electrod a fost menținută constantă, au apărut stropi datorită scurtcircuitelor dintre picături. Lățimea cordonului depus nu este suficientă, iar supraînălțarea exagerată. În **figura 6b** este prezentată secțiunea unei îmbinări realizată prin același procedeu, tensiunea de lucru fiind însă mai mare decât în cazul precedent. Lățimea îmbinării sudate corespunde și s-a constatat că dacă viteza de avans a sârmei electrod se menține constantă nu apar stropi. **Figura 6c** reprezintă secțiunea unei îmbinări realizate cu o tensiune de lucru prea mare. Se constată un puternic efect al suflajului magnetic ca urmare a faptului că s-a încercat evitarea stropilor prin modificarea vitezei de avans a sârmei electrod, ceea ce determină o asimetrizare neadmisă a băii metalice.

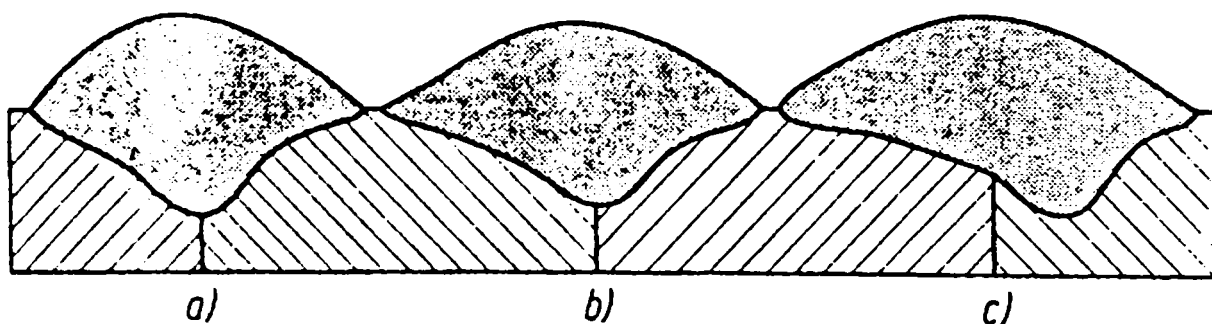


Figura 6. Influența tensiunii arcului asupra formei pătrunderii

În **figura 7** este prezentată comparația între forma pătrunderii obținută prin sudare în impulsuri respectiv cu curent constant, pentru viteze diferite de sudare.

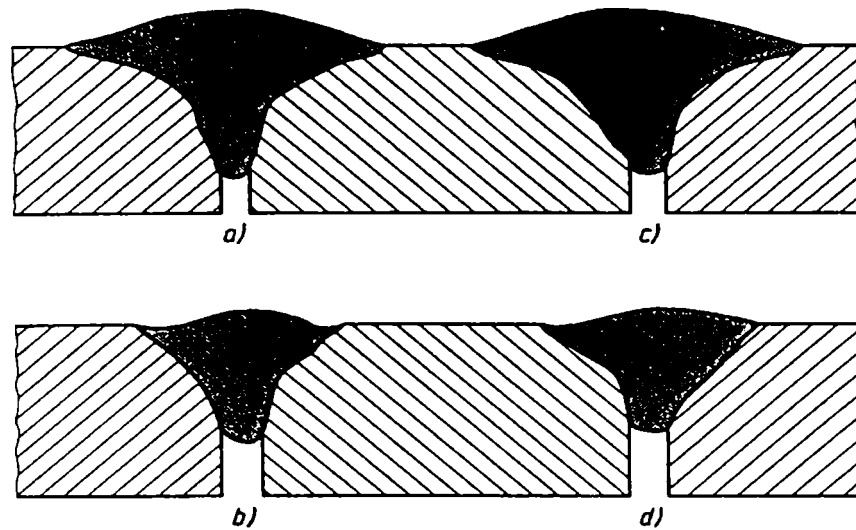


Figura 7. Comparație între forma pătrunderii la sudarea în impulsuri de curent față de sudarea cu curent constant, la diferite viteze de sudare

- a. Arc electric în impulsuri, $v_1 < v_2$
- b. Arc electric în impulsuri, $v_2 > v_1$
- c. Arc electric normal, $v_1 < v_2$
- d. Arc electric normal, $v_2 > v_1$

Se observă că pătrunderea scade odată cu creșterea vitezei de sudare, indiferent de tipul arcului electric utilizat (normal sau în impulsuri).

Avantajele sudării în impulsuri față de sudarea normală, la aceeași viteză de avans a sârmei electrod nu se evidențiază la grosimea de 8mm luată în considerație

2.9. Modul de stingere a arcului

Amorsarea arcului electric la sudarea MIG/MAG este influențată în mod esențial de formarea sferei de metal de la capătul sârmei electrod pe parcursul perioadei de stingere a arcului electric. Reamorsarea se efectuează mult mai ușor dacă capătul sârmei electrod se retează oblic. Prin urmare, forma trebuie obținută printr-un proces controlat de stingere a arcului electric. În acest sens, în funcție de datele concrete, se pot utiliza una din următoarele metode:

- A. Reglarea intervalului de timp între momentul de decuplare a motorului dispozitivului de avans a sârmei electrod și momentul stingerii arcului electric (timpul de ardere înapoi a sârmei electrod). Această metodă poate fi utilizată în cazul în care se dispune de surse de sudare de calitate, capătul liber al sârmei electrod fiind reproductibil în 70% din cazuri (capătul liber al sârmei electrod a fost mai mic decât 1,2 x diametrul sârmei-electrod). Quantumul de 30% în care sferele de metal de la capătul liber al sârmei electrod au fost prea mari nu poate fi înlăturat în cazul instalațiilor cu lungime mare a pachetului de cabluri între dispozitivul de avans a sârmei electrod și pistolul de sudare. Acest fenomen rezultă pe baza frecărilor mari ale sârmei electrod în pachetul de cabluri.

- B. Instalațiile de sudare comandate cu tiristoare sau tranzistoare au alte posibilități în ceea ce privește coordonarea mecanismelor de stingere a arcului în vederea obținerii unui capăt liber ascuțit al sârmei electrod. Astfel, se realizează o decuplare a avansului sârmei electrod cu câteva milisecunde înainte de decuplarea curentului de sudare. Electrocul este imersat și „înghețat” în baia de metal aflată încă caldă. După deconectarea curentului de sudare, în circuitul de sudare pot fi induse impulsuri de tensiune. Dacă sârma este imersată în baia metalică, impulsul de curent realizat va arde puntea de sârmă creată. În acest caz nu se poate forma un arc electric datorită faptului că pe perioada pauzei tensiunea are valoarea 0. Astfel, la capătul sârmei electrod nu se formează o sferă de metal pregnantă (**figura 8a**). Dezavantajul acestei metode constă în faptul că nu întotdeauna poate fi evitată apariția stropilor.
- C. În cazul surselor de sudare MIG/MAG tranzistorizate se poate obține un capăt ascuțit al sârmei electrod dacă momentul de deconectare a curentului de sudare se găsește la sfârșitul ciclului curentului de impuls, după încheierea transferului de metal prin intermediul unei picături (**figura 8b**).

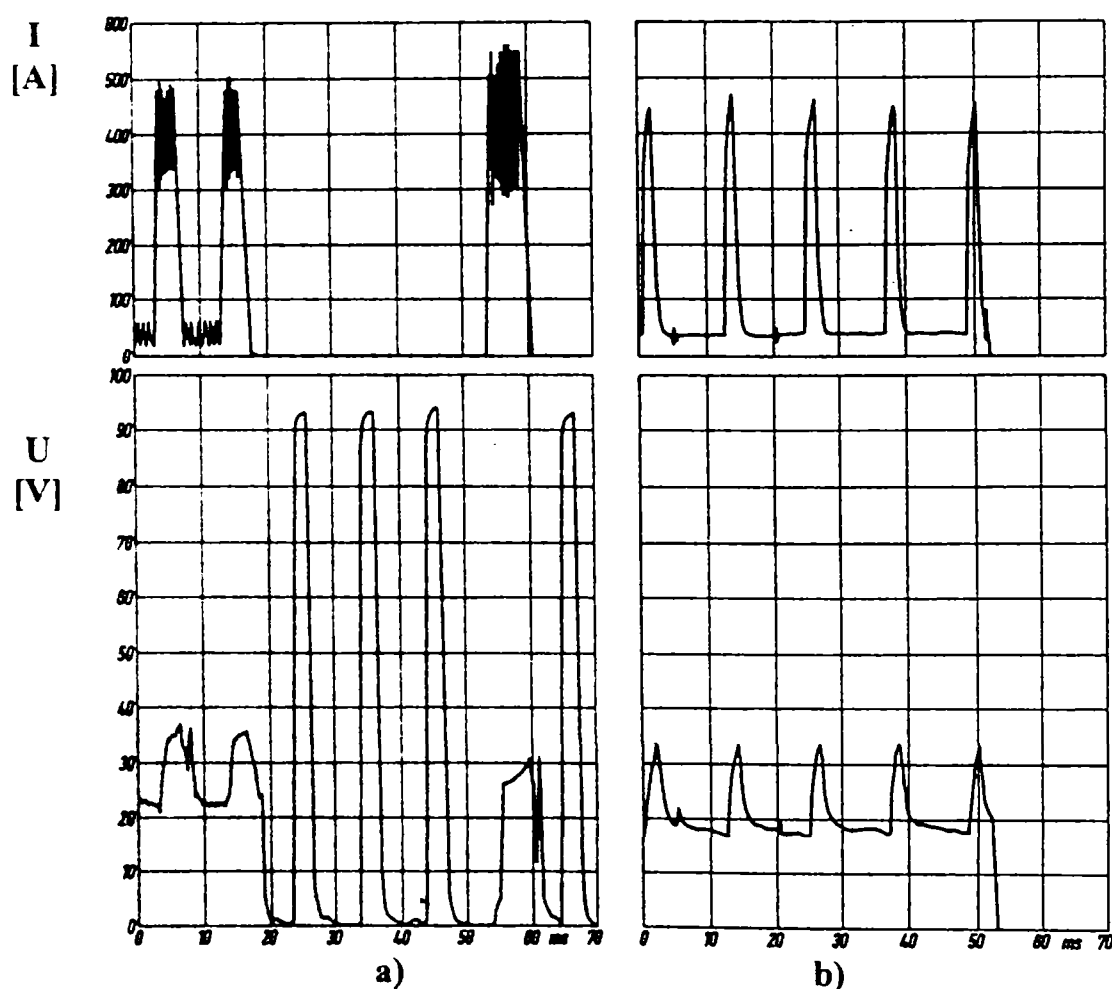


Figura 8. Modalitățile de stingere a arcului electric: a) Stingerea prin impulsuri libere; b) Stingerea după faza curentului de impuls

În general, indiferent de tipul arcului electric utilizat (scurt, lung, în impulsuri), dacă după încheierea operației de sudare se aplică un impuls de curent suficient de mare funcție de diametrul sârmei electrod, capătul sârmei electrod va rezulta ascuțit.

La sudarea MIG/MAG, amorsarea este realizată printr-un scurtcircuit care trebuie să fie cât de scurt posibil pentru a se putea evita stropirile. Procesul amorsării este influențat în principal de forma capătului liber al sârmei electrod, de suprafața capătului liber al sârmei electrod, de viteza redusă de avans utilizată la amorsare, de frecările sârmei electrod în pachetul de cabluri și de viteza de creștere a curentului de sudare de la scurtcircuit la valoarea de lucru.

Sursele de sudare tranzistorizate utilizează tehnica de sudare în impulsuri pentru a realiza îmbinări sudate cu cât mai puțini stropi. Acest lucru este valabil și în cazul amorsării. Capătul liber ascuțit se obține dacă se realizează decuplarea curentului de sudare imediat după desprinderea picăturii. În mod suplimentar, în vederea obținerii unor geometrii cvasi-perfecte în zona amorsării se poate proceda și la prelucrarea suplimentară a rostului.

2.10. Tendința de formare a stropilor

Utilizând amestecurile de gaze protectoare standardizate: M1, M2 și M3, procedeul de sudare MIG/MAG în impulsuri de curent prezintă în momentul de față cele mai mici pierderi datorate stropirilor.

În cazul în care parametri de sudare sunt aleși corespunzător, viteza de avans a sârmei electrod este constantă, transmiterea curentului la sârma electrod este corectă și gradul de curățenie a suprafeței pieselor de sudat este suficient, tendința de formare a stropilor este estompată în totalitate.

Dacă însă, poziția pistolului de sudare este prea înclinată, dacă arcul electric în impulsuri este reglat prea lung, dacă conținutul de CO₂ din amestecul de gaze protectoare este prea mare și/sau dacă forma impulsurilor nu este corespunzătoare pot apare stropiri.

Tendința de formare a stropilor este influențată și prin necorelarea energiei liniare cu natura materialelor îmbinate. Prin folosirea unei energii liniare prea mari picăturile desprinse din sârma electrod produc un impact puternic în baza metalică consecință fiind formarea stropilor.

Calitatea necorespunzătoare a suprafeței sârmei electrod, lungimea liberă necorespunzătoare și sfera prea mare de metal la capătul liber al sârmei electrod pot influența de asemenea tendința de formare a stropilor.

2.11. Influența gazelor de protecție asupra formei îmbinării sudate și asupra pătrunderii

În ciuda faptului că ionii și electronii din arcul electric provin în special din metalele care participă la procesul de sudare, compoziția gazului protector are un

rol important în ceea ce privește forma îmbinării sudate, profilul cusăturii, forțele care rezultă în timpul transferului picăturii, etc. Repartiția densității de curent depinde pe lângă cantitatea de vapori metalici și tensiunea de lucru și de conductivitatea termică a gazului sau a amestecului de gaze protectoare. Gazele și/sau amestecurile de gaze protectoare cu o conductivitate termică bună vor forma un arc electric strangulat, îngust, dezvoltat mai mult în direcție axială decât în direcție radială.

Astfel, CO_2 și He au o conductivitate termică mai bună decât Ar (figura 9).

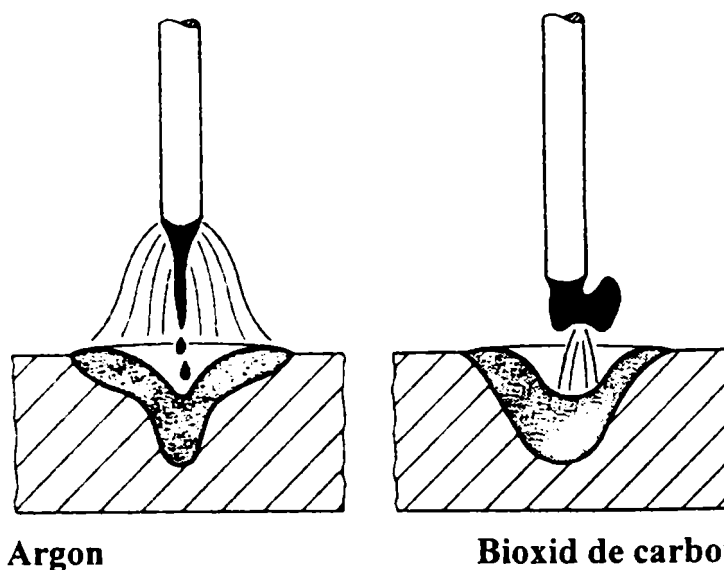


Figura 9. Influența gazelor protectoare asupra formei arcului electric

Se poate observa că în cazul utilizării bioxidului de carbon se formează un nucleu îngust conducător de curent în comparație cu cazul utilizării argonului și/sau a amestecurilor bogate în argon. Strangularea coloanei arcului provoacă o creștere a rezistenței electrice și o creștere a căderii de tensiune, la același curent de sudare. Rezultă că arcele electrice care ard sub protecție de bioxid de carbon necesită o tensiune de lucru mai mare (cu 2 - 4 volți).

În ciuda faptului că arcul electric care arde sub protecție de bioxid de carbon are o secțiune relativ mică, în cazul utilizării unor energii liniare ridicate apar arderi laterale mari corelate cu efectele de presare a arcului electric asupra topiturii, are loc o rapidă deplasare a petei focale, se formează oxizi și stropi de dimensiuni mari.

Utilizând argonul ca gaz protector rezultă un arc electric mai lat datorită conductivității termice mai mici a argonului față de bioxidul de carbon.

Arcul electric va cuprinde o suprafață mai mare din capătul sârmei electrod, transferul curentului făcându-se mai mult radial decât axial.

Totodată se constată că datorită conductivității termice mici a argonului apare o cădere puternică de temperatură în direcție radială. Din acest motiv pătrunderea este mică în lateral și are formă de „deget“ (figura 10). Această formă

este conferită de transferul concentrat de material și de puternicul debit de gaz în zona nucleului arcului electric.

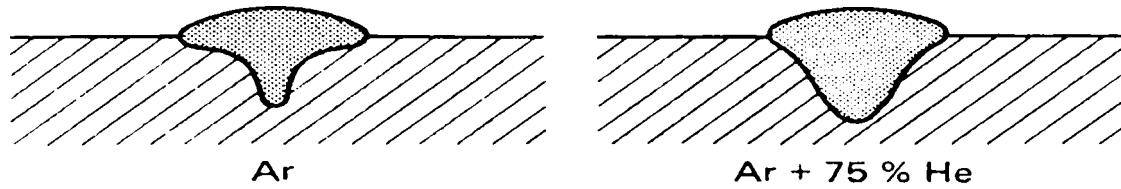


Figura 10. Influența naturii gazelor asupra pătrunderii

Heliul este mai ușor decât aerul. De aceea, în cazul în care sudarea se efectuează în poziție orizontală acesta prezintă tendința de a se ridica din zona de sudare, rezultând astfel un consum ridicat de gaz. Pentru a obține un efect de protecție egal cu cel al argonului trebuie utilizată o cantitate de heliu de 3 ori mai mare. Datorită faptului că heliul are o conductivitate termică mai bună rezultă o repartizare pe lățime a energiei, pătrunderea având formă de „U” (**figura 10**). De asemenea, datorită căderii mai mici de tensiune, arcul electric sub heliu are o energie mai mare, putându-se renunța la preîncălzirea pieselor de grosime mai mare, respectiv, se pot utiliza viteze mai mari de sudare.

În ciuda faptului că arcul electric sub bioxid de carbon are o densitate mare de energie, conductivitatea termică a bioxidului de carbon corelată cu transformările moleculare duce la un profil mai lat al pătrunderii (**figura 11**). Rezultă astfel o siguranță mai mare în obținerea pătrunderii în cazul în care sârma electrod este condusă cu anumite deviații laterale. Arcul electric sub bioxid de carbon se recomandă de asemenea pentru sudarea descendentă a pieselor de grosime mai mare sau pentru sudarea în poziție. Solicitarea termică a pistolului de sudare este mai mică decât în cazul utilizării amestecurilor de gaze.

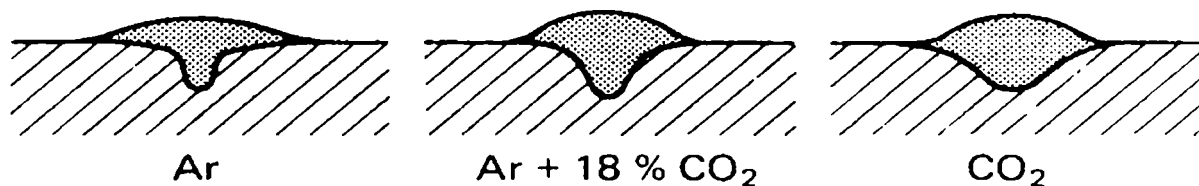


Figura 11. Influența compoziției gazului asupra profilului îmbinării

Adaosul de oxigen în amestecurile de gaze pe bază de argon conduc la pătrunderi laterale mai mari, la o stabilitate mai bună a arcului electric și la pierderi mai mari prin ardere. Creșterea conținutului de oxigen provoacă reducerea tensiunii superficiale la transferul picăturii și în topitură, favorizând obținerea unor îmbinări plate.

2.12. Susceptibilitatea de formare a porilor

În general, tendința de formare a porilor în îmbinările sudate MIG/MAG depinde de natura materialului care se sudează. Astfel, în cazul oțelului carbon aceasta tendință este provocată în special de azot, iar în cazul sudării aluminiului de către hidrogen.

Aceste gaze pot fi preluate de arcul electric ca urmare a temperaturilor înalte din arc și se produce disocierea. Preponderența procesului constă în stadiul de picătură datorită faptului că în acest stadiu temperatura este mai ridicată și suprafața de contact este mai mare decât în baia metalică. Azotul este preluat în general din aer, iar hidrogenul, poate să provină din umiditatea aerului și din straturile de oxizi de pe suprafața materialului de bază sau a materialului de adaos.

În general, îmbinările sudate între table de grosimi mari conțin mai mulți pori decât îmbinările dintre table de grosimi mici ca urmare a condițiilor de degazare defavorabile. Utilizarea amestecurilor de gaze mai bogate în argon mărește susceptibilitatea de formare a porilor.

3. Sursele de sudare cu arc electric în impulsuri

Tipurile constructive de surse pentru sudarea MIG în impulsuri

Pentru a putea utiliza avantajele sudării cu arc electric în impulsuri sunt necesare surse capabile să ofere caracteristici de variație a curentului, variabile în timp. Transferul picăturii a fost realizat la început utilizând surse de sudare clasice, comandate prin tiristoare (sistem de comandă cu întârziere de fază). Sursele comandate de tiristoare sunt capabile să dezvolte curenți de impuls cu frecvențe de cel mult 4 ori frecvența rețelei de alimentare. În prezent se utilizează surse de sudare tranzistorizate. Se deosebesc două tipuri de surse pentru sudarea în impulsuri:

- surse de sudare **analogice**;
- surse de sudare **cu tranzistoare în comutație**
 - pe primar (cu invertor)
 - pe secundar (circuitul de sudare)

3.1. Sursele de sudare analogice (cu tranzistoare în conducție variabilă) – figura 12

Primele surse de sudare comandate utilizate la sudare au fost cele analogice. Se consideră o sursă de sudare ca fiind comandată, în cazul în care frecvența sa de tact poate fi reglată independent de frecvența rețelei. Sunt echipate cu un transformator trifazat cu o singură priză în secundar. Redresarea tensiunii secundare se realizează cu ajutorul diodelor de siliciu, tensiunea aplicându-se unui bloc de tranzistoare legate în paralel. Diferența dintre tensiunea de ieșire din redresor și tensiunea necesară pentru arcul electric se aplică blocului cu tranzistoare. Ca urmare, pierderile mari impun răcirea cu apă. Randamentul sursei

este între 50-75%, acest dezavantaj acceptându-se datorită timpului de reacție foarte redus (30-50 microsecunde).

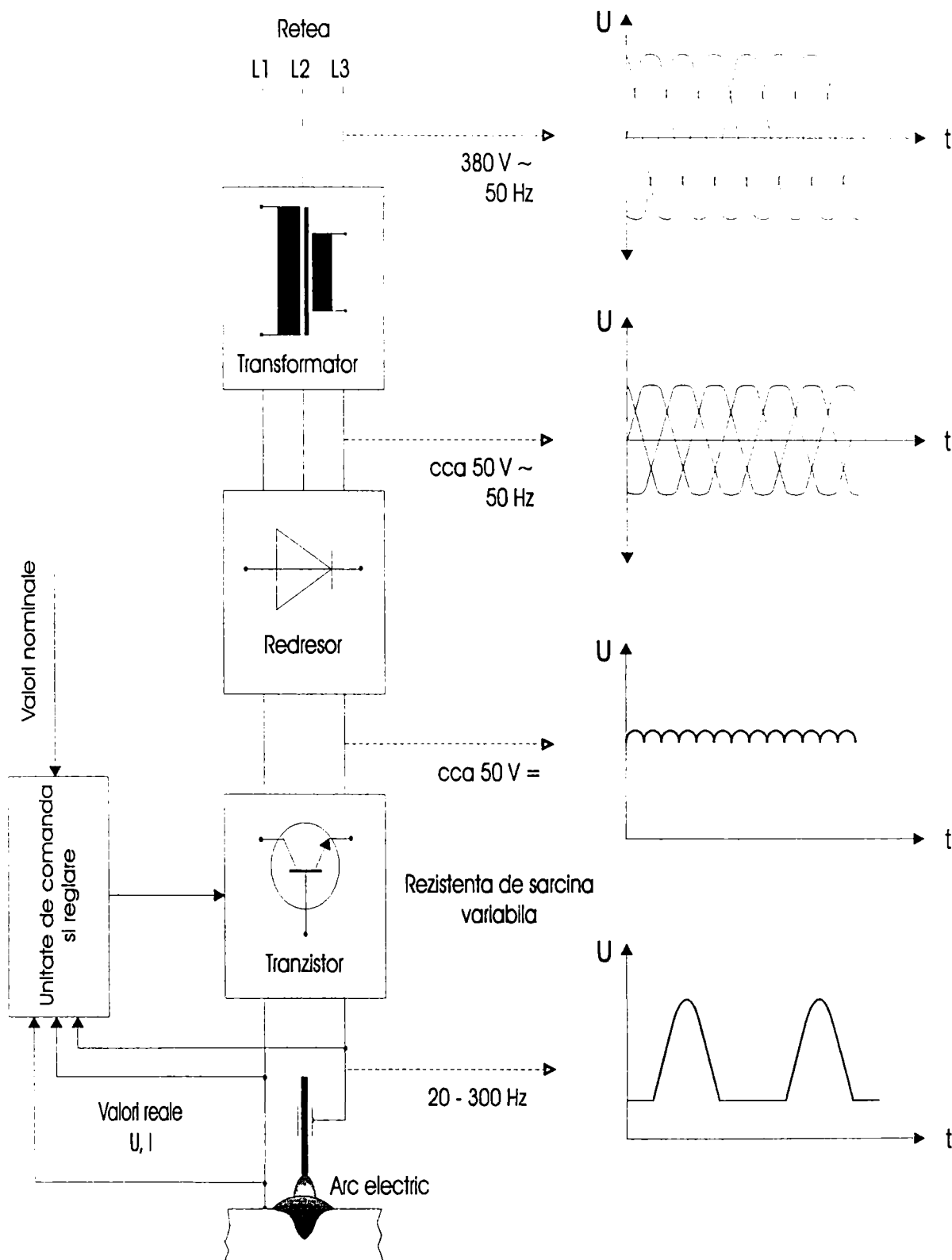


Figura 12. Schema de principiu a unei surse de sudare analogice

□ **Surse de sudare cu tranzistoare în comutație** – figura 13.

În cazul acestui tip constructiv semnalul de curent nu este cules în mod analog la ieșire, ci reprezintă valoarea efectivă a unor impulsuri de curent modulate.

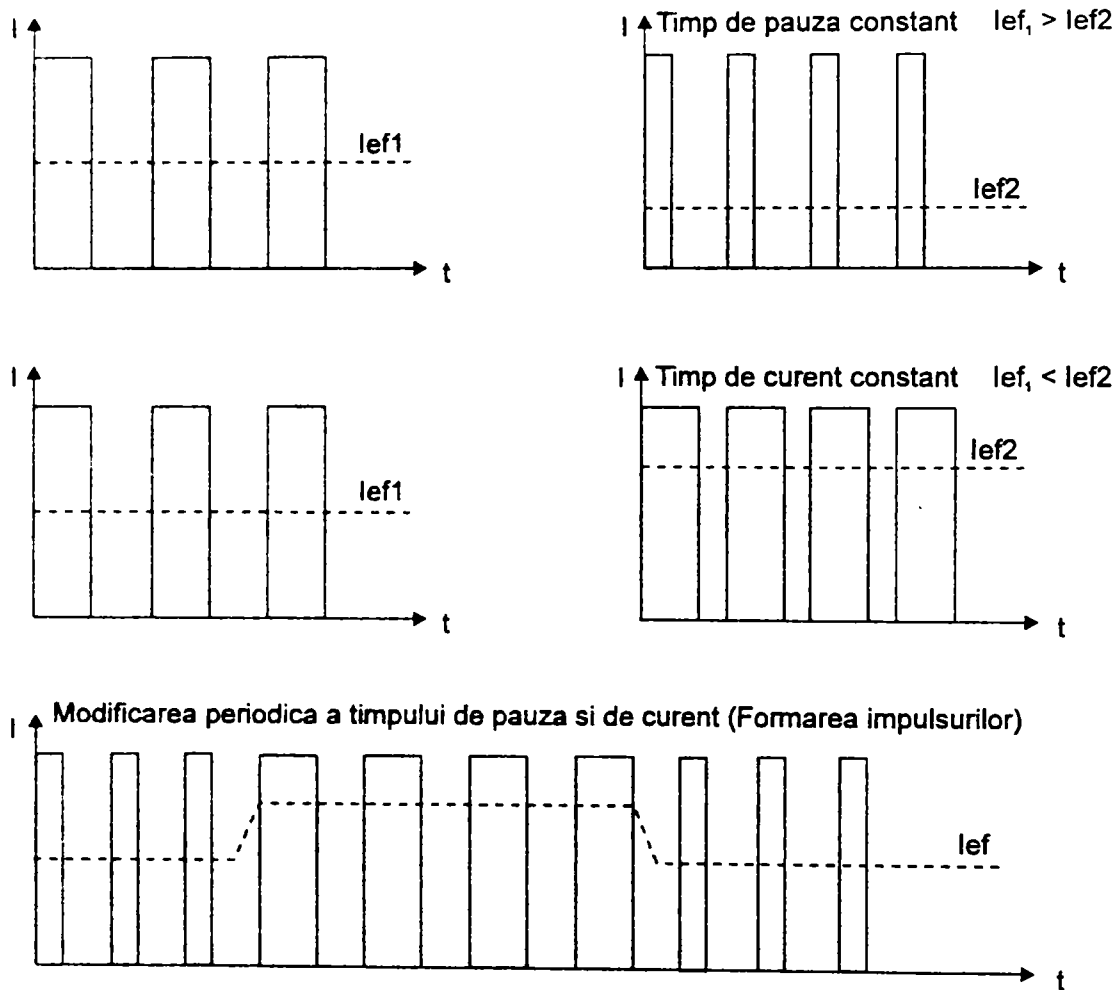


Figura 13. Obținerea curenților efectivi: constant și variabil în timp

Curbele de curent variabile în timp și în nivel se pot obține prin modificarea unor timpi de cuplare a curentului, de înălțime constantă, odată cu aplicarea unor frecvențe variabile.

3.2. Surse cu tranzistoare în comutație pe primar (invertoare) – figura 14.

La acest tip de surse redresarea tensiunii rețelei se realizează cu o punte trifazată cu diode, tensiunea continuă fiind transformată de către blocul inverter într-o tensiune alternativă de frecvență constantă cuprinsă între 20 și 30 kHz. Tensiunea astfel obținută se aplică transformatorului de forță monofazat pe miez de ferită și se redresează cu o punte monofazată. Rezultă o tensiune continuă variabilă în timp și în amplitudine. Tensiunea continuă astfel rezultată este netezită

cu ajutorul unei bobine. Timpii de reacție sunt 300-500 microsecunde, putându-se regla următorii parametri: curentul de puls, curentul de bază, durata și frecvența impulsurilor, precum și panta de creștere și descreștere a impulsului.

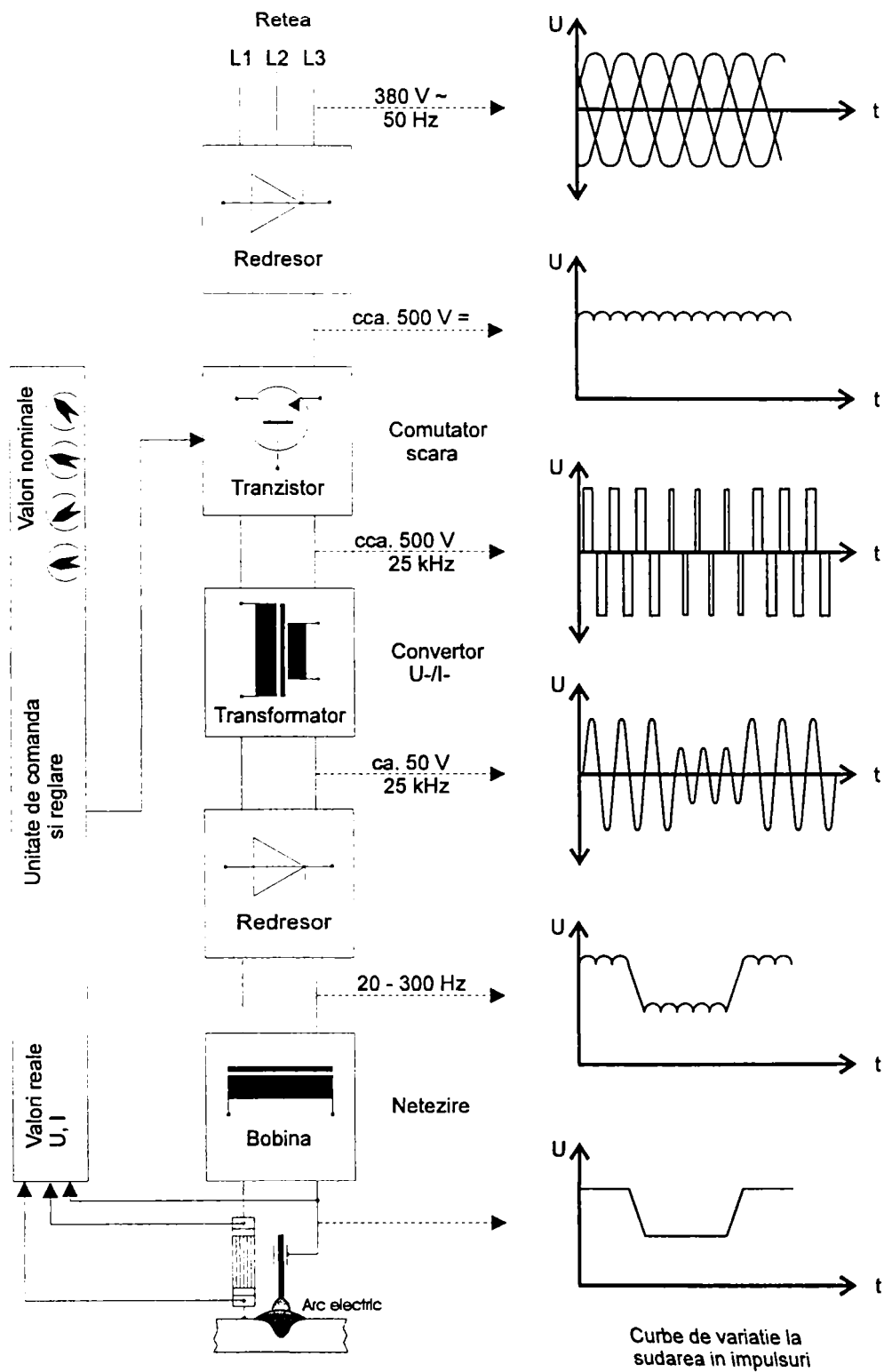


Figura 14. Sursa de sudare cu tranzistoare în comutație pe primar (invertor)

3.3. Sursele cu tranzistoare în comutație pe secundar – figura 15.

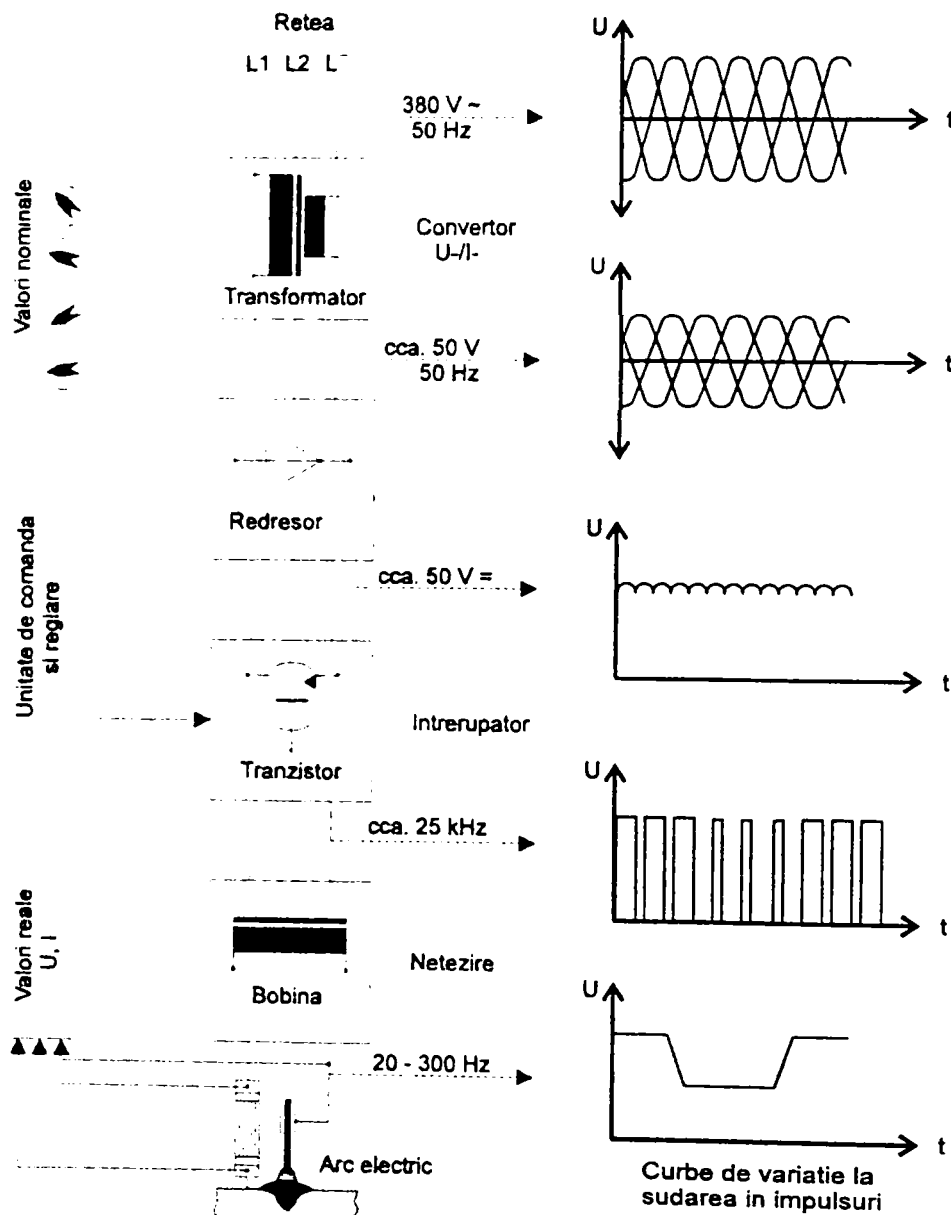


Figura 15. Sursă cu tranzistoare în comutație pe secundar

Spre deosebire de tipul de surse cu inverter, în acest caz, se realizează redresarea abia după transformatorul de sudare. Sunt formate dintr-un transformator trifazat al cărui secundar alimentează o punte trifazată cu diode. Tensiunea continuă este aplicată blocului cu tiristoare care o transformă într-o tensiune în impulsuri de frecvență fixă (20-60 kHz). Curentul de sudare este puternic netezit prin inductanța plasată în circuitul secundar. Randamentul sursei este între 75 și 95%. Pentru că blocul cu tranzistoare lucrează numai în regim de comutație, puterea disipată în tranzistoare este mult mai mică putându-se reduce astfel numărul de tranzistoare legate în paralel. Timpul de reacție este între 300 și 500 microsecunde.

3.4. Caracteristica tensiune-curent a surselor de sudare

În cazul sudării cu arc electric se tinde spre obținerea unei puteri cât mai constante la ieșirea sursei. Din acest motiv s-au construit surse de sudare cu caracteristică externă de tensiune constantă sau de curent constant. Influențe exterioare, din timpul procesului de sudare conduc la o modificare continuă a rezistențelor ohmice ale arcului electric. Pentru că în general este dificilă reglarea celor doi parametri caracteristici de putere - curentul și tensiunea - s-au introdus caracteristici externe constante.

▪ Caracteristica de tensiune constantă (reglarea ΔI)

Acest tip de caracteristică (figura 16), definit și ca o caracteristică ușor coborâtore, reacționează în cazul unor modificări relativ mari de curent prin variații relativ mici ale tensiunii. În cazul reducerii curentului de sudare (mărirea rezistenței arcului) se înregistrează o creștere a tensiunii de punere în mișcare, acest lucru făcând posibil ca un curent recomandat prin valoarea sa nominală să poată fi re-reglat rapid. În cazul utilizării unei caracteristici externe de tensiune constantă, reglarea nu se face printr-o intervenție exterioară, procesul denumindu-se de aceea: reglare internă.

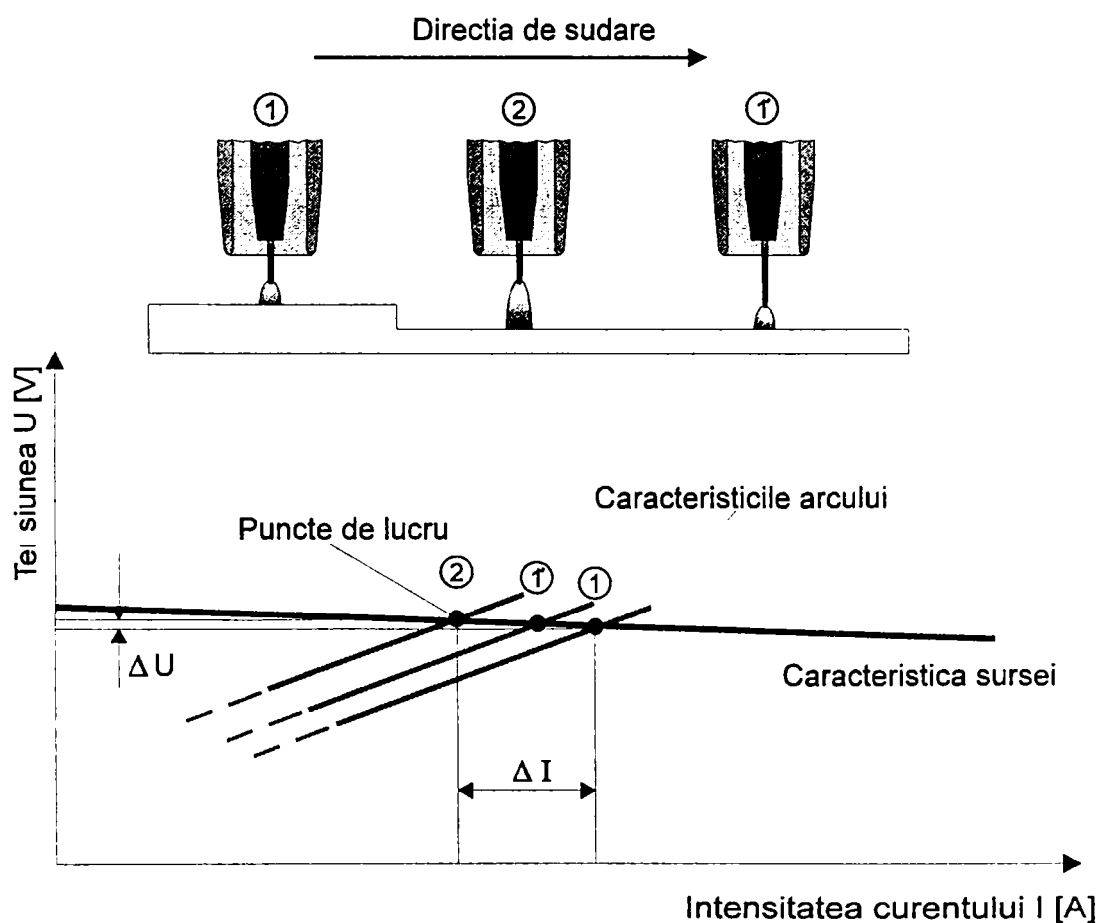


Figura 16. Reglarea ΔI

▪ Caracteristica de curent constant (reglarea ΔU)

Acest tip de caracteristică (figura 17) mai este denumit și caracteristică brusc coborâtoare. Caracteristica brusc coborâtoare reacționează prin variații relativ mari ale tensiunii în cazul unor modificări relativ mici ale curentului. În cazul reducerii curentului (creșterea rezistenței arcului) are loc o creștere puternică a tensiunii de punere în mișcare. Din acest motiv, un curent recomandat, reglat prin valoarea sa nominală, nu se re-reglează de la sine în cazul unei abateri. În cazul caracteristicii de curent constant reglarea se efectuează prin intervenția din afara procesului; din acest motiv acest tip de reglare este denumit: reglare externă. În trecut, reglarea externă se realiza prin transmiterea variației de tensiune rotorului motorului de antrenare a sârmei. Dacă, de exemplu, se înregistrează o creștere a lungimii arcului electric, crește tensiunea pe rotorul motorului de antrenare a sârmei electrod. Viteza de avans crește și lungimea arcului electric scade din nou.

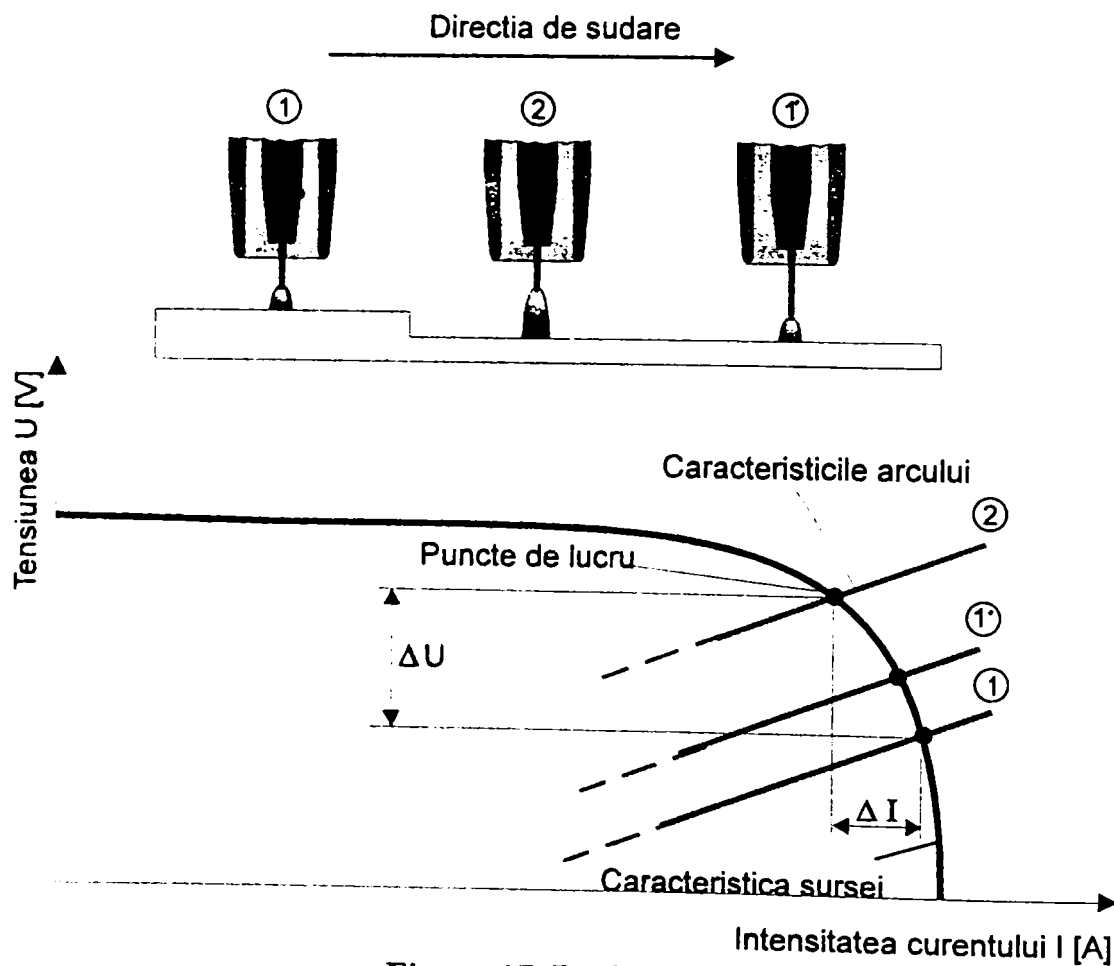


Figura 17. Reglarea ΔU

3.5. Sistemele de modulație la sursele de sudare în impulsuri

În cazul sudării în impulsuri are loc o conectare permanentă între două caracteristici statice (modulație). Prin modulație se înțelege utilizarea

caracteristicilor constante pe perioada fazei de puls și a celei de bază. În acest sens, există posibilitatea conectării între caracteristici constante de același tip sau între caracteristici diferite. În principiu se deosebesc patru posibilități de modulație între faza de puls (indice P) și cea de bază (indice G), prezentate schematic în figura 18.

- Modulație I_P/I_G - are loc o comutare între două caracteristici de curent constant, pe nivele diferite de putere.
- Modulație U_P/U_G - are loc o comutare între două caracteristici de tensiune constantă, pe nivele diferite de putere.
- Modulație U_P/I_G - are loc comutarea de pe o caracteristică de curent constant, în faza de bază pe o caracteristică de tensiune constantă, în faza de puls.
- Modulație I_P/U_G - are loc comutarea de pe o caracteristică de tensiune constantă (faza de bază) pe o caracteristică de curent constant (faza de puls).

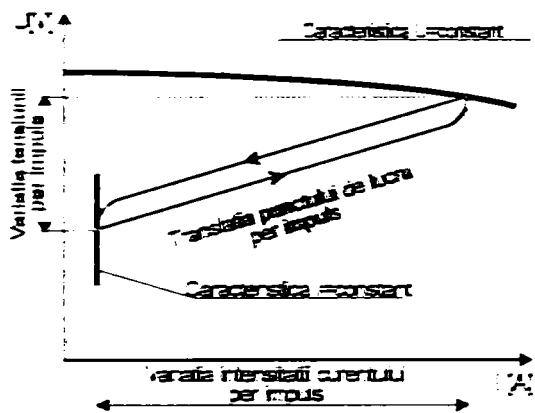
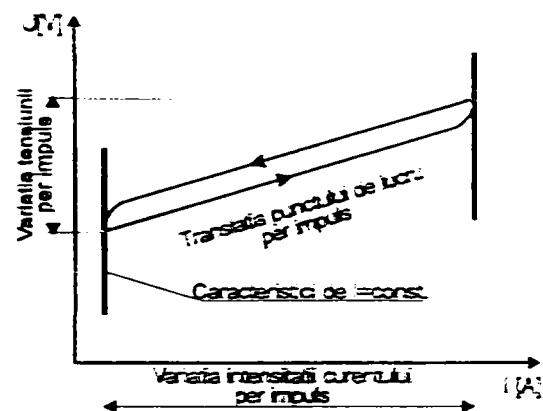
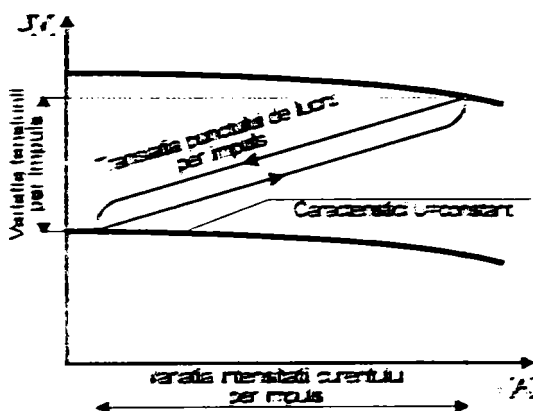
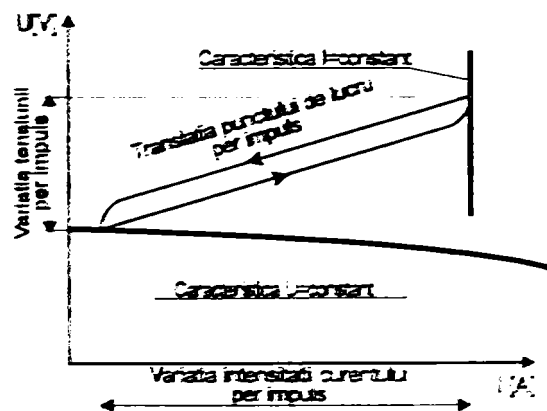
Sistem de modulație $I_P - U_G$ Sistem de modulație $I_P - I_G$ Sistem de modulație $U_P - U_G$ Sistem de modulație $U_P - I_G$

Figura 18. Sistemele de modulație la sudarea în impulsuri

Producătorii de instalații de sudare preferă sistemele de modulație I_G/U_P și I_G/I_p . O reglare a tensiunii marchează faptul că tensiunea este dată ca valoare nominală. Tensiunea este mărimea de punere în mișcare, cea care determină apariția unui curent. În cazul în care, la un reglaj de tensiune, în faza de bază se înregistrează o creștere a rezistenței arcului, se poate întâmpla ca valoarea nominală dată a tensiunii să nu mai poată face posibilă apariția unui curent minim de bază. În cazul curenților de bază reduși (cca. 25A), această situație poate conduce - cu o probabilitate mare - la stingerea arcului. Din acest motiv, tipurile de modulații care lucrează în faza de bază cu o caracteristică de tensiune constantă sunt mai puțin folosite.

Sursele de sudare care utilizează sistemul de modulație I_G/U_P sunt în prezent, cele mai răspândite. În cadrul acestui sistem de reglare se modifică comportarea statică a sursei în ritmul frecvenței de puls, și anume, de pe o caracteristică de curent constant în faza de bază pe o caracteristică de tensiune constantă în faza de puls (figura 19).

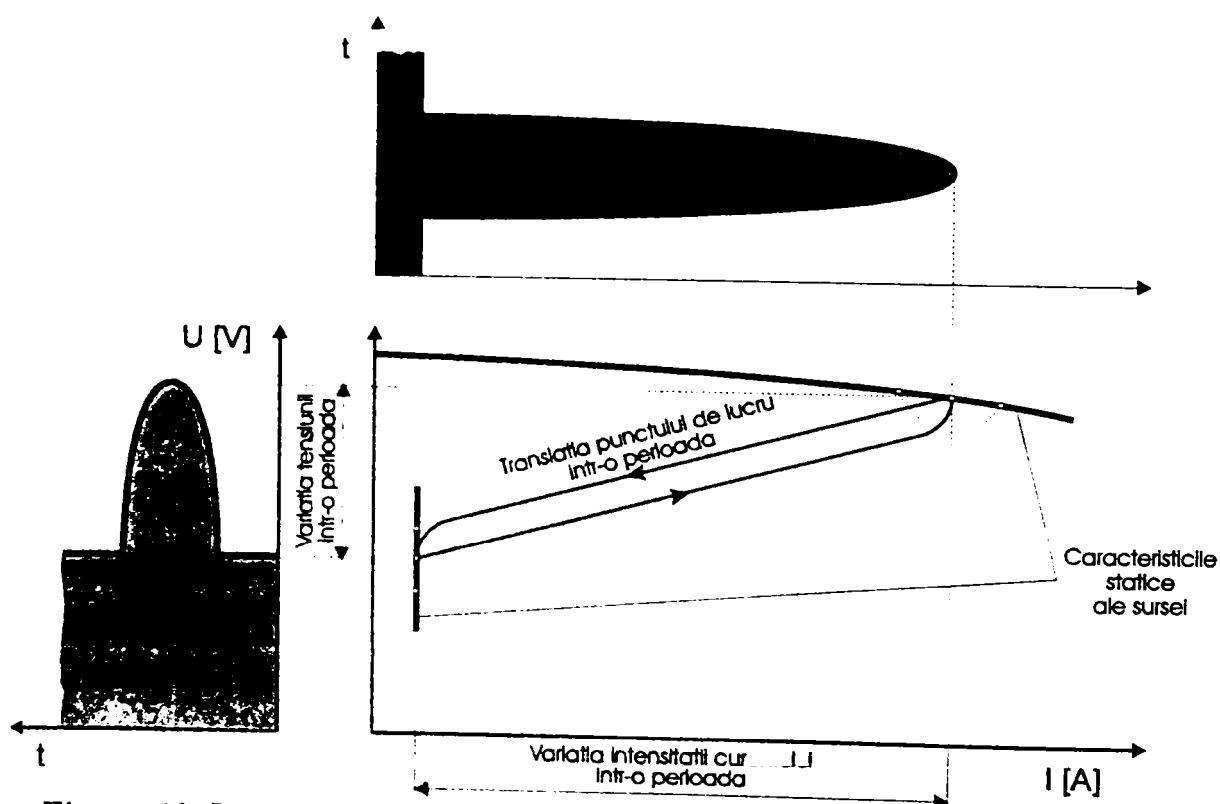


Figura 19. Deplasarea punctului de lucru la sudarea MIG în impulsuri (I_G/U_P)

Necesitatea efectuării unui reglaj de curent în faza de bază rezultă ca urmare a unei variații apreciabile a curentului (uneori chiar mai mare de 50A) odată cu modificarea lungimii arcului, față de caracteristicile de tensiune constantă. Datorită faptului că curentul de bază se reglează de regulă sub 100A, utilizarea unui sistem de reglare cu caracteristică de tensiune constantă, nu

reprezintă o soluție optimă, și anume, datorită pericolului de apariție a instabilităților în arcul electric.

Caracteristic pentru sistemul de modulare I_G/U_P este curentul stabil în faza de bază și sistemul de autoreglare în faza de puls. Datorită faptului că tensiunea, și prin aceasta lungimea arcului, pot fi reglate numai pe perioada de puls, în special la frecvențe de puls mici, se pot înregistra perturbații ale procesului printr-un punct de lucru instabil.

În ultimul timp se fabrică și surse de sudare care utilizează sistemul de reglare I_G/I_P . În cadrul acestui sistem, curentul se reglează atât pe parcursul fazei de bază cât și a celei de puls (figura 20). Variații ale lungimii arcului generează în acest caz curenți constanți, tensiunea modificându-se odată cu lungimea arcului. Lipsa capacității de autoreglare conduce la un punct de lucru instabil. De aceea, constructiv, aceste surse de sudare trebuie să conțină suplimentar un sistem de reglare a lungimii arcului.

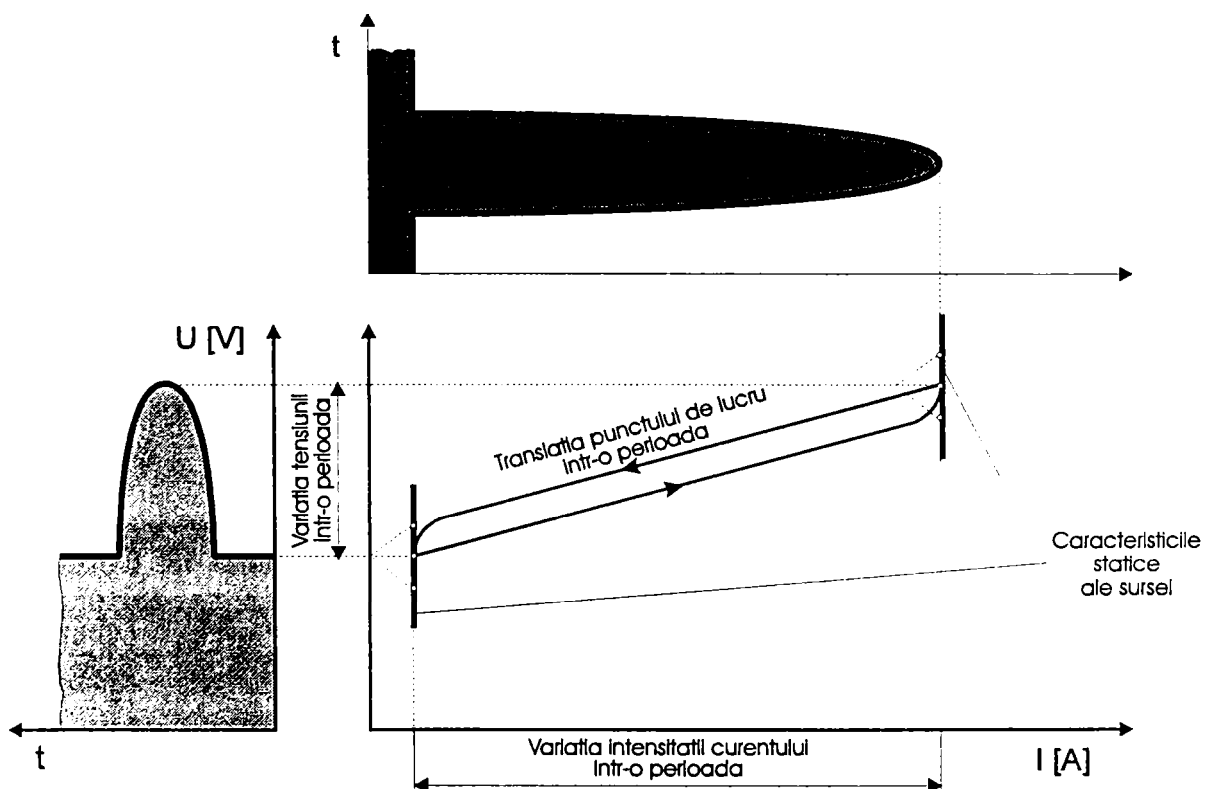


Figura 20. Deplasarea punctului de lucru la sudarea MIG în impulsuri (I_G/I_P)

Arcul de mare putere, folosit la componente mai groase, poate fi reprodus în ambele sisteme de modulare și nu există nici un motiv să se prefere unul din sisteme altuia. Intervalul de variație a lungimii este $L=10-20$ mm.

Arcul de mică putere, folosit la sudarea componentelor subțiri, este reprodus în condiții de procesare corectă de sistemul de modulație I_P/I_G . Intervalul de variație a reglajului lui L este ceva mai larg: $L=9-23$ mm.

Pistoletul de sudare

Principalele funcții ale pistolului de sudare sunt:

- conducerea gazului protector la locul de sudat;
- conducerea sârmei electrod și transmiterea curentului în electrod, la o distanță mică de arcul electric.

Aceste funcții sunt îndeplinite de către multitudinea de tipuri constructive și de numeroși producători care își oferă produsele pentru diversele aplicații posibile.

Există pe piață o mare diversitate de forme pistoale, în formă de trompă, de pistol, sau drepte. Alegerea formei pistolului se face în funcție de problema de sudare care trebuie rezolvată. De asemenea, există pistoale de sudare echipate cu motor și role de acționare a sârmei electrod (push-pull). Acestea se folosesc în special când sârma electrod este foarte sensibilă la rupere, când pachetul de cabluri are o lungime mare sau când este necesară o viteză de avans a sârmei electrod foarte constantă.

La alegerea pistolului de sudare MIG/MAG se iau în considerare următoarele:

- temperatura duzei de contact și a duzei de gaz;
- modul de izolare a duzei de gaz;
- tipul constructiv al canalelor de gaz protector și a duzei de gaz în vederea unui flux de gaz protector fără vârtejuri;
- suprafața sistemelor de etanșare în ceea ce privește gazul protector și apa de răcire;
- greutatea arzătorului și flexibilitatea pachetului de cabluri;
- posibilitățile de înlocuire și prețul părților componente care se uzează.

Diuza de contact

Diuza de contact are rolul de a ghida sârma electrod și de a transmite curentul de sudare în sârma electrod.

Următoarele fenomene pot îngreuna această funcție și pot în special frâna modul optim de transmitere a curentului de sudare:

- ◆ lungimea arcului electric (putere, lungime și distanță);
- ◆ densitate de curent prea ridicată la capătul duzei;
- ◆ formare de stropi în interiorul canalului duzei;
- ◆ defecte de formă pe suprafața sârmei electrod;
- ◆ impurități pe învelișul sârmei electrod;
- ◆ modificări ale presiunii de contact prin schimbarea curbării sârmei și a deviației la sudare;
- ◆ amorsarea arcului electric pe capătul duzei de contact în loc de piesă;
- ◆ timp de ardere liberă prea lung.

Materialele din care sunt confecționate diuzele de contact trebuie să prezinte o bună conductibilitate electrică, trebuie să aibă o rezistență mare față de

uzarea prin frecare și trebuie să fie, pe cât posibil, rezistente față de fenomenul de electroeroziune și/sau depunere de materiale străine.

În tabelele următoare se prezintă date complete privind regimurile tehnologice recomandate de firme producătoare de instalații de sudare MIG/MAG, la sudarea aliajelor de aluminiu de mare uzanță: Al 99,5 (tabelul 1), AlMg5 (tabelul 2), AlSi5 (tabelul 3), precum și la sudarea unor cupluri de materiale: AlMg3 cu AlMg5 (tabelul 4) și AlMg3 cu AlSi5 (tabelul 5), componentele având grosimea cuprinsă între 0,8 și 20 mm.

Tabelul 1. Parametri recomandați de P1, MA = MB = Al99.5

Numărul punctului	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Grosimea s[mm]	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	6.0	10.0	12.0	15.0
Curentul [A]	38	59	86	107	132	193	250	280	314
Tensiunea arcului [V]	16.8	17.8	18.3	20.3	21.4	22.9	25.0	25.7	28.4
Tensiunea nominală U_s [V]	21.7	22.5	23.2	23.7	24.3	25.5	27.4	28.8	31.4
Viteza de avans a sârmei v_D [m/min]	1.7	2.6	3.7	4.6	5.6	7.9	10.5	11.9	14.0
Timpul de puls t_p [ms]	1.8	1.9	1.9	1.9	1.8	1.8	1.9	1.9	2.1
Frecvența f [Hz]	39	59	91	112	135	182	231	242	260
Curentul de bază I_G [A]	17	31	53	75	103	170	234	257	290
Curentul de puls I_P [A]	250	239	209	208	207	229	267	299	343
Curentul de declanșare I_T [A]	33	30	3	3	3	3	3	11	24
Viteza de creștere a curentului I_{UP} [A/ms]	300	300	300	300	300	300	300	330	300
Viteza de descreștere a curentului I_{DOWN} [A/ms]	300	300	300	300	300	300	300	300	300
Arderea liberă a sârmei t_f [s]	0.10	0.10	0.10	0.10	0.11	0.12	0.12	0.12	0.12

Curentul de amorsare I_a [A]	680
Creșterea amorsării [%]	50
Timpul de amorsare t_a [s]	0.10
Limitarea grosimii materialului [mm]	12

Tabelul 2. Parametrii recomandați de P2, MA = MB = AlMg5

Viteza de avans a sârmei V_D [m/min]	Frecvența impulsului f [Hz]	Tensiunea de puls U_p [V]	Timpul de puls t_p [ms]	Intensitatea curentului de bază I_G [A]	Flancul pulsului	Tensiunea arcului [V]	Intensitatea curentului [A]
3.6	50	24	1.5	20	2	16.5	50
4.4	60	24	1.5	25	2	16.7	60
4.9	70	24	1.5	32	2	17	70
5.6	80	24	1.5	35	2	17.5	82
6.5	100	24	1.7	45	2	19.5	100
8.3	120	25	1.7	55	3	20.0	130
10.6	140	25	1.7	75	3	21.5	165
12.4	150	26	1.9	120	4	24	202
13.7	160	28	2.1	120	4	24	225
14.1	180	29	2.2	120	4	26	240
15.8	190	29	2.2	130	4	26	255

Tabelul 3. Parametrii recomandați de P2, MA = MB = AlSi5

Viteza de avans a sârmei V_D [m/min]	Frecvența impulsului f [Hz]	Tensiunea de puls U_p [V]	Timpul de puls t_p [ms]	Intensitatea curentului de bază I_G [A]	Flancul pulsului	Tensiunea arcului [V]	Intensitatea curentului [A]
2.4	57	22.5	1.2	15	2	15.7	40
3.0	65	22.5	1.2	25	2	17.7	52
3.5	65	22.5	1.2	32	2	17.3	60
4.3	90	22.5	1.2	40	2	17.9	80
5.1	100	22.5	1.2	60	2	19	100
6.3	110	22.5	1.3	80	3	20	125
7.1	140	22.5	1.4	100	3	22	150
8.1	180	22.5	1.5	120	3	22.5	172
10.5	150	24	1.5	100	2	22.7	150

Tabelul 4. Parametrii recomandați de P1, MA = AlMg5, MB = AlMg3

Numărul punctului	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Grosimea s [mm]	0.8	1.5	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	10.0	12.0	15.0
Curentul [A]	30	46	62	87	122	142	194	246	283	325
Tensiunea arcului [V]	14.9	14.5	15.8	17.7	19.5	19.8	20.3	24.0	27.4	27.8
Tensiunea nominală U_s [V]	21.1	22.0	22.7	22.6	23.3	23.9	24.7	23.0	27.8	30.0

Viteza de avans a sârmei v_D [m/min]	2.0	2.9	4.0	5.5	7.5	8.9	12.5	16.0	18.0	20.0
Timpul de puls t_p [ms]	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.8	1.8	2.0
Frecvența f [Hz]	27	42	61	85	107	130	190	270	285	300
Curentul de bază I_G [A]	15	20	30	60	93	100	130	210	240	270
Curentul de puls I_P [A]	320	325	340	340	340	340	340	340	340	340
Curentul de declanșare I_T [A]	60	60	60	60	60	60	60	60	3	3
Viteza de creștere a curentului I_{UP} [A/ms]	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300
Viteza de descreștere a curentului I_{DOWN} [A/ms]	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500
Arderea liberă a sârmei t_f [s]	0.13	0.12	0.12	0.12	0.13	0.13	0.14	0.15	0.15	0.15

Curentul de amorsare I_a [A]	680
Creșterea amorsării [%]	66
Timpul de amorsare t_a [s]	0.10
Limitarea grosimii materialului mm]	12

Tabelul 5. Parametri recomandați de P1, MA = AlSi5, MB = AlMg3

Numărul punctului	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Grosimea s [mm]	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	5.0	8.0	10.0	15.0	20.0
Curentul [A]	31	35	76	109	133	162	217	256	305	368
Tensiunea arcului [V]	16.4	17.8	18.8	20.1	20.8	23.0	25.3	27.2	29.2	29.6
Tensiunea nominală U_s [V]	20.4	21.0	22.5	22.5	23.0	23.8	25.8	28.3	31.5	32.0
Viteza de avans a sârmei v_D [m/min]	1.6	2.5	3.3	4.5	5.5	6.5	9.0	11.0	14.0	16.5
Timpul de puls t_p [min]	1.8	1.8	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	2.0	2.2	2.7
Frecvența f [Hz]	24	60	80	110	130	155	210	240	300	300
Curentul de bază I_G [A]	20	32	40	73	95	135	185	200	200	200

Curentul de puls I_p [A]	259	239	230	210	210	210	250	300	334	380
Curentul de declanșare I_T [A]	40	45	55	85	3	3	3	3	3	3
Viteza de creștere a curentului I_{UP} [A/ms]	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300
Viteza de descreștere a curentului I_{DOWN} [A/ms]	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450
Arderea liberă a sârmei t_f [s]	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.12	0.13	0.13	0.14	0.14

Curentul de amorsare I_a [A]	680
Creșterea amorsării [%]	50
Timpul de amorsare t_a [s]	0.20
Limitarea grosimii materialului [mm]	12

5. Concluziile

- ◆ Analizându-se un număr de 11 factori de influență asupra îmbinării sudate la sudarea MIG în impulsuri de curent, se definesc condițiile realizării unei îmbinări de calitate superioară evidențiindu-se avantajele sudării în impulsuri de curent.
- ◆ Se demonstrează că utilizarea unei polarități DC^+ , conduce la obținerea unor certe avantaje în ce privește pătrunderea, supraînălțarea, capacitatea de topire și chiar în ce privește estomparea tendinței de formare a stropilor.
- ◆ Dintre parametrii de sudare, intensitatea curentului, timpul de puls și frecvența pulsului, joacă un rol determinant în realizarea unui transfer masic favorabil – picătură pe puls – cu consecințe directe atât asupra productivității, cât și a calității procedurii. Relația directă frecvență – viteză de avans condiționează diametrul picăturii, cu alte cuvinte finețea transferului masic prin arcul electric.
- ◆ Din punctul de vedere al sursei de sudare în impulsuri se constată prevalența a două sisteme performante de modulație și anume sistemul U_p/I_G , mai larg răspândit în prezent și sistemul I_p/I_G , mai recent dezvoltat. Arcul electric de mare putere recomandat în cazul sudării componentelor mai groase poate fi obținut practic cu oricare din cele două sisteme de modulație. Arcul electric de mică putere recomandat la sudarea componentelor subțiri este reprodus în condiții de procesare corectă de către sistemul de modulație I_p/I_G .
- ◆ S-a adevărit că în sistemele de modulație amintite, intervalul de variație a lungimii libere este suficient de larg, fiind cuprins în limitele 10-20 mm. În cazul modulației I_p/I_G sursa de sudare trebuie să conțină suplimentar un sistem de reglare a lungimii arcului, pentru a evita zone de funcționare instabilă.

CAPITOLUL III

EVALUAREA PROBLEMELOR SPECIFICE SUDĂRII ALUMINIULUI

Cuprinsul:

1. Alumiuniul și domeniile de utilizare în industrie
2. Clasificarea aliajelor de alumiuniu
 - ◆ deformatate plastic nedurificabile
 - ◆ deformatate plastic durificabile
 - ◆ turnate
3. Caracteristicile mecanice ale alumiuniului și aliajelor sale
4. Criteriile de alegere a procedeului de sudare
5. Avantajele și dezavantajele sudării MIG
6. Materialele de adaos pentru sudare
7. Gazele protectoare
8. Problemele metalurgice la sudare
 - 8.1 Fisurarea la cald și preîncălzirea
 - 8.2 Distribuția căldurii în piesă
 - 8.3 Stratul de oxizi de suprafață
9. Defectele la sudarea alumiuniului
 - 9.1 Influența factorilor tehnologici
 - 9.2 Fisurile
 - 9.3 Lipsa de topire
 - 9.4 Incluziunile și porii
10. Concluziile

1. Aluminiul și domeniile de utilizare în industrie

Aluminiul este un element ușor având numărul de ordine 13 în sistemul periodic, cristalizează în forma cubică cu fețe centrate. Prezintă o ductilitate foarte bună la temperaturi joase sub 0°C, o înaltă rezistență la coroziune și nu este toxic. Are o conductivitate termică și o conductibilitate electrică mult superioară oțelului, este nemagnetic. Rezistența sa relativă raportată la greutatea specifică de 2,72 kg/dm³ este superioară oțelului. Rezistența la rupere statică este de 7-14 daN/mm², iar alungirea la rupere este cuprinsă între 18 și 35%.

În natură, aluminiul se găsește sub formă de hidroxizi sau silicați (caolina sau argila). Obținerea aluminiului se realizează în două etape:

- fabricarea oxidului de aluminiu (aluminei) din bauxită Al₂O₃, H₂O;
- obținerea metalului pur prin electroliză în stare topită.

Aluminiul pur are punctul de fuziune la 660°C, iar aliajele sale în intervalul de 482-660°C, depind de elementul de aliere și gradul de aliere. Este prelucrat facil prin turnare și prin procedee de deformare plastică. Poate fi laminat, forjat și extrudat, prelucrabilitatea prin așchiere fiind de asemenea ușoară.

Proprietățile și calitățile aluminiului sunt influențate de modificările structurale produse la temperaturi ridicate. Rezistența la rupere, ductilitatea, rezistența la oboseală și deformabilitatea depind de procesele de recoacere și de îmbătrânire ce au loc și interacționează în cursul sudării. Conductivitatea termică și conductibilitatea electrică ridicată reclamă folosirea unor curenți mari de sudare, durate mici în intervalul de cristalizare, precum și un control mai riguros decât în cazul oțelurilor.

Aluminiul tehnic pur are un conținut de minim 99,60% Al. Principalele aliaje conțin ca elemente de aliere de bază Cu, Si, Mn și Mg și Zn, Ni și Cr ca elemente suplimentare de aliere. Aliajele de aluminiu cu Cu, Si și Mg sunt aliaje eutectice, celelalte sunt de tip monotectic sau peritectic.

Aluminiul și aliajele sale în contact cu aerul dezvoltă o peliculă de oxid Al₂O₃ deosebit de tenace și refractară, care se topește de abia la temperatura de 2037°C. În urma tratamentelor termice și/sau a proceselor de prelucrare la cald, pelicula de oxid devine groasă și izolantă. Se impune îndepărtarea ei pe cale chimică și mecanică. Eliminarea facilă de pe suprafață se realizează însă prin sudare în medii de gaze protectoare, când ionii pozitivi din arc bombardează pata catodică făcând ca oxidul ce acoperă electrodul și zona arcului să fie vaporizat. Oxidul cristalizează fie în sistem cubic γ -Al₂O₃ în intervalul de temperatură de peste 500-1000°C, fie în sistem hexagonal α -Al₂O₃ la temperatură de peste 1000°C. În ambele forme însă, greutatea specifică este mai mare decât a aluminiului lichid, motiv pentru care se depune la partea inferioară a băii metalice afectând calitatea cusăturii.

Tabelul 1. Recomandări pentru alegerea aliajului de aluminiu

Domeniul de aplicabilitate	Aliaje recomandate	Aliaje ce pot fi utilizate
Construcția de aparate, Recipiente și conducte (vezi recipiente sub presiune)	Al99,8; Al99,5; AlMn; AlMnCu; AlMg2,5; AlMg3; AlMg2Mn0,8; AlMg2,7Mn; AlMg4,5Mn; AlMgSi0,5	AlMg4Mn; AlMgSi1; AlZn4,5Mg1
Construcții, inginerie Construcții portante Acoperișuri, fațade Ferestre, uși, pereți despărțitori Porți rulante, magazii rulante Solarii	AlMg3; AlMg2Mn0,8; AlMg4,5Mn; AlMgSi0,5; AlMgSi1; AlZn4,5Mg1 AlMn1; AlMg1; AlMg3 AlMgSi0,5 AlMgSi0,5; AlMg2,5; AlMg4Mn AlMgSi0,5	AlMn1; AlMnCu; AlMg1; AlMg2,5; AlMg5; AlMn1Mg1; AlMg2,7Mn; AlZnMgCu0,5 AlZnMgCu1,5 AlMnCu; AlMn1Mg0,5; Al99,5 AlMg1; AlMg3; AlMgSi0,8 AlMgSi0,8; AlMgSi1 AlMgSi0,8; AlMgSi1
Recipiente sub presiune și conducte	Al99,5; Al99,7; Al99,8; Al99,98R; AlMg3; AlMg2Mn0,8; AlMg4,5Mn	AlMg2,7Mn; AlMgSi1; AlZn4,5Mg1; AlMnCu
Recipiente sub presiune pentru gaze, conducte, schimbătoare de căldura	ca și recipientele sub presiune AlMn1; AlMgSi0,5; AlMgSi1	pt. butelii: AlMgSi1; AlMg5 resp. conform omologării AlMg3; AlMg2Mn0,8
Construcții de aeronautică	AlMg2,5; AlCu2,5Mg0,5; AlCuMg1; AlCuMg2; AlCuSiMn; AlZn4,5Mg1; AlZnMgCu0,5 AlZnMgCu1,5; Al99,5	AlMg3; AlMgSi1
Construcția de autovehicule Vehicule de transport marfă Cisterne Basculante Părți de caroserie Amortizoare Radiatoare, climatizoare	AlMgSi0,5; AlMgSi1; AlMg3; AlMg2Mn0,8 AlMg3; AlMg4,5Mn; AlZn4,5Mg1 AlMg4,5Mn AlCuMg; AlMgSi; AlMg - speciale AlZnMg - speciale AlMn; AlMnCu	AlMn1; AlMg2,5; AlZn4,5Mg1 AlMg2,7Mn; Al99,5; Al99,8 AlZn4,5Mg1 AlMg3; AlMg5 AlZn4,5Mg1 AlMgSi0,5; AlMg3;
Construcția de mașini, corpuri, carcase (construcții sudate) Dispozitive, scule Mese de poziționare Părți rotitoare Componente hidraulice și pneumatice Țevi pentru laminoare	AlMg4,5Mn; AlZnMg1 AlMg4,5Mn; AlMgSi1; AlCuMg1 AlMgSi0,5; AlMgSi1; AlZn4,5Mg1 AlCuMgPb; AlMgSiPb AlMgSi1; AlMgSi0,5; AlZnMgCu0,5 AlMgSi0,5; AlZn4,5Mg1; AlMgSi1	AlMgSi1; AlMgSi0,5; AlMg3; AlCuMg AlZnMgCu0,5 AlMgSi0,8 AlZnMg1; AlMgSi1; AlMg5 AlMgSi0,5 AlCuSiMn; AlZn4,5Mg1 AlCuMgPb; AlMgSi0,8
Produse metalice (inclusiv veselă)	Al99,9; Al99,85; Al99,5; AlMn1; AlMg1; AlMg2Mn0,3; AlMgSi0,5	AlMg1,5; AlMg3
Industria alimentară	Al99,5; Al99; AlMn; AlMg1; AlMg3; AlMgMn0,3	AlMg1,5; AlMg2,7Mn
Nituri, șuruburi	AlMn; AlMg3; AlMg5; AlMgSi1; AlCu2,5Mg0,5; AlCuMg1	Al99; Al99,5
Autovehicule pe șine Vagoane Accesorii Uși de vagoane, capace	AlZn4,5Mg1; AlMg2Mn0,8; AlMg4,5Mn; AlMgSi0,7 AlMgSi0,5; AlMg3 AlMgSi; AlMgSi0,5	AlMgSi1; AlMg3; AlMg1 AlMgSi1; AlZn4,5Mn AlMg4,5Mn
Caroserii, cale, construcții navale Catarge Accesorii	AlMgSi1; AlMg3; AlMg4,5Mn AlMgSi0,5; AlMgSi0,8 AlMgSi0,5; AlMg3; AlMg4,5Mn	AlMgSi0,5 AlMgSi1 AlZn4,5Mg1; AlMg1
Ambalaje Cutii de conserve Cutii de băuturi Capace de sticle	Al99,5; Al99; AlFeSi; AlMn0,6; AlMn1; AlMnCu; AlMg1 AlMn1Mg1; AlFeSi AlMg - speciale AlMn - speciale	AlMn1Mg1

Urmare a însușirilor remarcabile a aliajelor de aluminiu, gradul de utilizare a crescut în timp, astăzi devenind cel mai folosit aliaj după oțel. După [92], piața

de sudare a aluminiului progresează cu o rată anuală de 5,5%. Printre cele mai recente și importante penetrații se numără piața automobilelor. Primul automobil cu o caroserie completă din aluminiu este Audi A4. Pentru ilustrarea diversității aliajelor de aluminiu și a paletei deosebit de largi pe care o deservește în industrie, în tabelul 1 s-au concentrat datele cunoscute în literatură din cel puțin 10 subramuri de bază.

2. Clasificarea aliajelor de aluminiu

Gama largă de aliaje de aluminiu se clasifică în două mari categorii:

1. aliaje de aluminiu **deformate plastic**, care la rândul lor se subclasifică în două categorii:
 - ♦ aliaje nedurificabile; care își mențin rezistența prin prelucrare la rece (întindere, tragere, laminare) – tipurile de aliaje și compoziția chimică a acestora este prezentată în tabelul 2;
 - ♦ aliaje durificabile; care își datorează caracteristicile de rezistență tratamentului termic de ecrisare – tipurile de aliaje din această categorie cu compoziția chimică respectivă este prezentată în tabelul 3.
2. aliaje de aluminiu **turnate**.

Tabelul 2. Aliajele de aluminiu deformate plastic nedurificabile

Simbol Nr.material	Compoziția chimică în procente volumice								Altele	
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Sing.	Tot.
AlFeSi 3.0915	0.40 - 0.8	0.50- 1.0	0.10	0.10			0.10	0.05	0.06	0.25
AlMn0,6 3.0506	0.30	0.45	0.10	0.40- 0.8	0.10	0.10			0.05	0.15
AlMn1 3.0515	0.50	0.7	0.10	0.9- 1.5	0.30	0.10	0.20	0.10	0.05	0.15
AlMnCu 3.0517	0.6	0.7	0.05- 0.20	1.0- 1.5			0.10		0.05	0.15
AlMn1Mg1 3.0526	0.30	0.7	0.25	1.0- 1.5	0.8- 1.3		0.25		0.05	0.15
AlMg1 3.3315	0.30	0.45	0.05	0.15	0.7- 1.1	0.10	0.20		0.05	0.15
AlMg2,5 3.3523	0.25	0.40	0.10	0.10	2.2- 2.8	0.15- 0.35			0.05	0.15
AlMg3 ¹⁾ 3.3535	0.40	0.40	0.10	0.50	2.6- 3.6	0.30	0.20	0.15	0.05	0.15
AlMg5 ¹⁾ 3.3555	0.40	0.50	0.10	0.10- 0.6	4.5- 5.6	0.20	0.20	0.20	0.05	0.15
AlMg2Mn0.3 3.3525	0.40	0.50	0.15	0.10- 0.50	1.7- 2.4	0.15	0.15	0.15	0.05	0.15
AlMg2Mn0.8 3.3527	0.40	0.55	0.10	0.50- 1.1	1.6- 2.5	0.30	0.20	0.10	0.05	0.15
AlMg2,7Mn 3.3537	0.25	0.40	0.10	0.50- 1.0	2.4- 3.0	0.05- 0.20	0.25	0.20	0.05	0.15
AlMg4Mn 3.3547	0.40	0.40	0.10	0.40- 1.0	4.0- 4.9	0.05- 0.25	0.25	0.15	0.05	0.15

¹⁾ - Mn+Cr = 0.10 - 0.6 %

Tabelul 3. Aliajele de aluminiu deformate plastic durificabile

Simbol Nr.material	Compozitia chimica in procente volumice									Altele	
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti		Sing.	Total
E-AlMgSi 3.2305	0.50- 0.6	0.10- 0.30	0.02		0.35- 0.6		0.15		Cr+Mn+ Ti+V0.03	0.03	0.10
E-AlMgSi0,5 3.3207	0.30- 0.6	0.10- 0.30	0.05	0.05	0.35- 0.6		0.10			0.03	0.10
AlMgSi0,5 3.3206	0.30- 0.6	0.10- 0.30	0.10	0.10	0.35- 0.6	0.05	0.15	0.10		0.05	0.15
AlMgSi0,7 3.3210	0.50- 0.9	0.35	0.30	0.50	0.40- 0.7	0.30	0.20	0.10	Mn+Cr 0.12-0.5	0.05	0.15
AlMgSi1 3.2315	0.7- 1.3	0.50	0.10	0.40- 1.0	0.6- 1.2	0.25	0.20	0.10		0.05	0.15
AlMg1SiCu 3.3211	0.40- 0.8	0.7	0.15- 0.40	0.15	0.8- 1.2	0.04- 0.35	0.25	0.15		0.05	0.15
AlMgSiPb 3.0615	0.6- 1.4	0.50	0.10	0.40- 1.0	0.6- 1.2	0.30	0.30	0.20	Bi+Cd+ Pb+Sn 1.0-2.5	0.05	0.15
AlCuBiPb 3.1655	0.40	0.7	5.0- 6.0				0.30		Bi 0.2-0.6 Pb 0.2-0.6	0.05	0.15
AlCuMgPb 3.1645	0.8	0.8	3.3- 4.6	0.50- 1.0	0.40- 1.8		0.8	0.20	Bi+Cd+ Pb+Sn 1.0-2.5	0.10	0.30
AlCu2,5Mg0,5 3.1505	0.8	0.7	2.2- 3.0	0.20	0.20- 0.50	0.10	0.25			0.05	0.15
AlCuMg1 3.1325	0.20- 0.8	0.7	3.5- 4.5	0.40- 1.0	0.40- 1.0	0.10	0.25		Ti+Zr 0.25	0.05	0.15
AlCuMg2 3.1355	0.50	0.50	3.8- 4.9	0.30- 0.9	1.2- 1.8	0.10	0.25	0.15	Ti+Zr 0.20	0.05	0.15
AlCuSiMn 3.1255	0.50- 1.2	0.7	3.9- 5.0	0.40- 1.2	0.20- 0.8	0.10	0.25	0.15	Ti+Zr 0.20	0.05	0.15
AlZn4,5Mg1 3.4335	0.35	0.40	0.20	0.05- 0.50	1.0- 1.4	0.10- 0.35	4.0- 5.0		Ti+Zr 0.08-0.2 Zr 0.08-0.2	0.05	0.15
AlZnMgCu0,5 3.4345	0.50	0.50	0.50- 1.0	0.10- 0.40	2.6- 3.7	0.10- 0.30	4.3- 5.2		Ti+Zr 0.20	0.05	0.15
AlZnMgCu1,5 3.4365	0.40	0.50	1.2- 2.0	0.30	2.1- 2.9	0.18- 0.28	5.1- 6.1	0.20	Ti+Zr 0.25	0.05	0.15

3. Caracteristicile mecanice ale aluminiului și aliajelor sale

În mod normal, proprietățile mecanice, mai precis caracteristicile mecanice de rezistență reprezintă o subgrupă a proprietăților fizice. Ținând însă cont de importanța practică deosebită a acestor caracteristici, ele sunt tratate separat.

Caracteristicile mecanice sunt utilizate ca punct de plecare în aprecierea pretabilității unui anumit aliaj pentru o construcție anumită. Se iau în considerare și alte caracteristici, ca de exemplu conductibilitatea electrică, rezistența la coroziune, etc.

Duritatea reprezintă una din caracteristicile mecanice cel mai frecvent determinate la materialele metalice. În cazul aliajelor de aluminiu, la recepția materialului, duritatea nu joacă un rol important la aliajele destinate deformării plastice, și un rol aproape neînsemnat la aliajele turnate. Pe baza valorilor de duritate se poate totuși stabili estimativ starea în care se afla aliajul respectiv.

În general, la aliajele de aluminiu, datorită simplității determinării, se indică valoarea durtății Brinell. Valorile durtății variază în limite foarte largi, între HB=15 în cazul aluminiului pur moale și HB=140 pentru aliaj AlZnMgCu1,5 ecruisat la cald. Celelalte metode de determinare a durtății - Vickers, Knoop - nu sunt practic semnificative pentru aluminiu; cu ajutorul lor se pot verifica ocazional straturi anodice, respectiv se pot face determinări metalografice în vederea cercetării constituenților structurali.

Rezistența la tracțiune reprezintă caracteristica principală în aprecierea materialelor metalice, deci și a aluminiului. În mod frecvent, în cazul aluminiului se determină limita de curgere $R_{p0,2}$, rezistența la rupere R_m și alungirea la rupere A_5 sau A_{10} , precum și, ocazional, contracția Z.

În general, rezistența crește odată cu creșterea conținutului de elemente de aliere. Diferitele elemente de aliere au o influență diferită caracteristicilor de rezistență. În cazul în care se neglijează ecruisarea, se poate observa o ecruisare în stare moale, și anume, prin formarea de cristale mixte. Acest fenomen este cel mai pregnant în cazul aliajelor de aluminiu aliate cu magneziu.

Odată cu ecruisarea, limita de curgere crește mai rapid decât rezistența la rupere, indiferent de mecanismul prin care s-a efectuat creșterea rezistenței aliajului. Această creștere este deosebit de pregnantă în cazul deformării la rece. Pe de altă parte, efectul este foarte diminuat în cazul în care creșterea rezistenței are la bază efectul de formare a cristalelor mixte în stare moale. În cazul ecruisării tendința de mărire a rezistenței este medie. Un raport mare $R_{p0,2}/R_m$ nu este de regulă dorit deoarece duce la o comportare relativ casantă a aliajului. De aceea rezistența aliajelor respective este limitată. Pe de altă parte, odată cu creșterea rezistenței statice nu se înregistrează o creștere a rezistenței de durată. În plus, în cazul unor măsuri de creștere forțată a rezistenței, apar și fenomene secundare nedorite, ca de exemplu reducerea rezistenței la coroziune.

Rezistența la compresiune-strivire se poate determina în cazul materialelor casante prin solicitarea acestora până la rupere. Limitei de curgere - la tracțiune - îi corespunde rezistența la turtire - în cazul compresiunii. Aceste mărimi pot fi considerate valoric egale la aliajele de aluminiu. Ele prezintă importanță numai în cazul în care componentele sunt supuse unei solicitări de compresiune.

Rezistența la încovoiere este mai importantă în cazul materialelor casante. Încercarea la îndoire este efectuată în mod frecvent la aliajele de aluminiu turnate, și anume, în cazurile în care alungirea la rupere nu poate fi determinată precis prin încercarea de tracțiune.

Rezistența la forfecare prezintă importanță în cazul stabilirii forței la tăiere precum și în construcții speciale. Rezistența la forfecare este cuprinsă între 55 și 70% din rezistența la tracțiune; măsurile de creștere a rezistenței se manifestă mai puțin asupra rezistenței la forfecare în comparație cu rezistența la tracțiune. În cazul aliajelor de aluminiu turnate aceasta caracteristică este utilizată foarte rar.

Rezistența la torsiune se stabilește foarte rar în cazul aliajelor de aluminiu. Încercările la torsiune se efectuează în practică în vederea cercetării capacității de deformare.

La temperaturi ridicate comportarea aliajelor de aluminiu este analizată prin intermediul a 4 criterii de baza:

- ◆ influența unei încălziri temporare;
- ◆ proprietățile de rezistență la cald (încercare de durată scurtă);
- ◆ comportarea la fluaj (încercare de lungă durată);
- ◆ comportarea la solicitări variabile.

În cazul funcționării la temperaturi scăzute, valorile caracteristicilor de rezistență depind de sistemul de cristalizare. Datorită cristalizării în rețele cubice cu fețe centrate, aluminiul nu se confruntă cu problemele specifice materialelor care cristalizează în sisteme cubice cu volum centrat (oțeluri feritice).

Principalele proprietăți fizice ale aliajelor uzuale de aluminiu, densitatea, conductivitatea termică și electrică, utile calculelor de transfer de căldură și fenomenelor din arcul electric sunt prezentate în tabelul 4.

Tabelul 4. Proprietățile fizice ale unor aliaje de aluminiu uzuale

Materialul	Densitatea [kg/dm ³]	Conductibilitatea electrică [m/Ω · mm ²]	Conductivitatea termică [W/m · K]	Intervalul de solidificare [°C]
Al99,98	2,70	37,6	232	660
Al99,5	2,70	34 - 36	210 - 220	646 - 657
Al99	2,71	33 - 34	205 - 210	644 - 657
AlFeSi	2,71	34 - 35	210 - 220	640 - 655
AlMn	2,73	22 - 28	160 - 200	645 - 655
AlMnCu	2,73	23 - 29	160 - 200	643 - 654
AlMg3	2,66	20 - 23	140 - 160	610 - 640
AlMg5	2,64	15 - 19	110 - 140	575 - 630
AlMg4,5Mn	2,66	16 - 19	110 - 140	574 - 638
AlMgSi0,5	2,70	28 - 34	200 - 220	585 - 650
AlMgSi1	2,70	24 - 32	170 - 220	585 - 650
AlZn4,5Mg1	2,77	19 - 23	130 - 160	480 - 650
AlCuMg1	2,80	18 - 28	130 - 200	512 - 650
AlSi12	2,65	17 - 27	120 - 190	575 - 585

4. Criteriile de alegere a procedului de sudare

Sudarea aluminiului și/sau a aliajelor sale poate produce dificultăți tehnologice în cazul în care nu se iau în considerare anumite criterii de bază privind alegerea procedului de sudare, în cazul în care nu se ține seama de sudabilitatea diferitelor tipuri de aliaje de aluminiu sau dacă se neglijează aspectele metalurgice (fisurarea la cald, distribuția căldurii, stratul de oxid de suprafață), respectiv în cazul în care se face o alegere incorectă a materialelor de adaos.

În cazul construcțiilor sudate se pot utiliza toate aliajele de aluminiu deformate plastic nedurificabile; din categoria celor durificabile, sudabile sunt aliajele pe bază de AlMgSi, AlZnMg. Limitarea sudabilității este determinată de către anumite elemente de aliere și conținutul volumetric, care, prin încălzire suferă modificări ce conduc la scăderea ireversibilă a rezistenței și la apariția de fisuri. În această categorie se încadrează aliajele de aluminiu pe baza de Cu. Aliajele de aluminiu turnate prezintă în general o sudabilitate bună, excepție constituind piesele turnate prin presare care conțin incluziuni de gaze cu implicații directe asupra sudabilității lor.

Tabelul 5. Criteriile de apreciere în vederea alegerii procedurii de sudare a Al

	MIG	WIG	SE	GS
Calitatea îmbinării sudate				
Rezistența	1	2	4	4
Alungirea	1	1	4	2
Stabilitatea chimică	1	2	4	4
Defectele din îmbinare	2	1	4	4
Pătrunderea	1	3	2	4
Contractia	1	2	2	4
Domenii de aplicabilitate				
Sudarea tablelor subțiri ($s < 1$ mm)	-	1	-	2
Sudarea tablelor ($s > 3$ mm)	1	2	3	4
Sudarea aliajelor AlMg	1	1	-	4
Sudarea peste cap	1	2	-	-
Sudarea pieselor de grosime diferita	2	1	3	4
Sudarea cu viteze de sudare diferite	4	1	3	2
Sudarea pieselor turnate	2	1	-	-
Îmbinări între aliaje deformabile și turnate	1	2	-	-
Suduri de reparații la piese turnate	2	1	3	4
Sudarea mecanizata				
Cu material de adaos	1	2	-	-
Fără material de adaos	-	1	-	-
Îmbinări cap la cap ($s < 3$ mm)	2	1	-	-
Îmbinări cap la cap ($s > 3$ mm)	1	2	-	-
Îmbinări de colț	1	2	-	-
Considerente economice				
Cheltuieli pentru echipamente	4	3	2	1
Cheltuieli de intretinere	3	3	1	2
Cheltuieli pentru salarii	1	2	4	3
Timpul de scolarizare a sudorilor	1	2	3	4

Orientativ, tabelul 5, cuprinde criteriile informative ce pot fi utilizate în alegerea procedurii de sudare a aluminiului, atribuindu-se totodată indici de pretabilitate (descrescătoare de la 1 la 4).

Tabelele 7, 8 și 9 cuprind date privitoare la pretabilitatea la sudarea în medii de gaze protectoare (MIG/MAG și WIG) a aliajelor de aluminiu deformate plastic nedurificabile, a celor durificabile și a aliajelor de aluminiu turnate, recomandându-se totodată și materialul de adaos. Și în acest caz, sudabilitatea este apreciată cu indicii 1-4, scăzând pe măsura măririi acestora.

5. Avantajele și dezavantajele sudării MIG a aluminiului și a aliajelor sale

Avantajele

- ◆ existența unui domeniu larg de reglare a puterii arcului fără restricția de modificare a diametrului sârmei electrod;
- ◆ posibilitatea utilizării unor viteze mari de sudare;
- ◆ pretabilitatea pentru automatizare și robotizare;
- ◆ posibilitatea realizării unor rădăcini foarte bune la sudurile de colț;
- ◆ transportul centric al materialului de adaos în pistol;
- ◆ obținerea unor îmbinări sudate cu o geometrie corespunzătoare;
- ◆ asigurarea unui efect bun de curățire a oxizilor prin intermediul arcului electric;
- ◆ producerea unor deformații mai mici față de sudarea cu procedeul WIG.

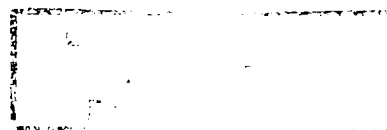
Dezavantajele

- producerea lipsei de topire la începutul îmbinării;
- la umplerea craterului final apar frecvent retasuri și fisuri de crater;
- lungimea arcului electric are o influență hotărâtoare asupra calității rădăcinii îmbinării sudate.

6. Materialele de adaos pentru sudare

Datorită fenomenelor caracteristice formării băii metalice topite, alegerea materialului de adaos se face nu numai din considerente legate de asigurarea unei rezistențe mecanice corespunzătoare, ci și din considerente de evitare a contracțiilor și de scădere a tendinței de fisurare. Se caută în special evitarea formării unor compuși fragilizanți de tipul CuAl_2 , Mg_2Si , MnAl_6 sau compuși conținând Fe. Alegerea materialului de adaos trebuie făcută cu mare atenție în special în cazul în care se utilizează viteze mari de sudare.

Compoziția chimică a materialelor de adaos folosite la sudarea aluminiului și a aliajelor acestuia este redată de tabelul 6.



Tabelul 6. Compoziția chimică a materialelor de adaos utilizate la sudarea Al

Simbol Nr.material	Compoziția chimică în procente volumice									
	Cu	Mn	Mg	Si	Fe	Zn	Cr	Ti	Altele Sing. Total	
S-Al99,8 3.0286	≤0.02 împreună ≤0.2%			≤0.15	≤0.015	≤0.06		≤0.03	≤0.01	
S-Al99,5 3.0259	≤0.05 împreună ≤0.5%			≤0.30	≤0.40	≤0.07		≤0.05	≤0.03	
S-Al99,5Ti 3.0805	≤0.05 Cu+Si+Fe+Zn+altele ≤ 0.5%			≤0.3	≤0.4	≤0.07		0.1- 0.2	≤0.03	
S-AlMn 3.0516	≤0.1	0.9- 1.4	0 - 0.3	≤0.5	≤0.6	≤0.2	≤0.05	≤0.1	≤0.05	≤0.15
S-AlMg3 3.3536	≤0.05	0 - 0.6	2.6-3.4	≤0.25	≤0.4	≤0.2	0-0.3	0.10- 0.25	≤0.05	≤0.15
S-AlMg5 3.3556	≤0.05	0 - 0.5	4.5-5.5	≤0.25	≤0.40	≤0.2	0-0.3	0.10- 0.25	≤0.05	≤0.15
S-AlMg4,5Mn 3.3548	≤0.05	0.6- 1.0	4.3-5.2	≤0.25	≤0.40		0.05- 0.25	0.10- 0.25	≤0.05	≤0.15
S-AlSi5 3.2245	≤0.05	≤0.1	≤0.1	4.5-5.5	≤0.4	≤0.2		≤0.25	≤0.05	≤0.15
S-AlSi12 3.2585	≤0.05	0 - 0.5	≤0.05	11.0- 13.5	≤0.6	≤0.10		≤0.15	≤0.05	≤0.15

Materialele de adaos recomandate la sudarea aliajelor de aluminiu nedurificabile, respectiv durificabile prin deformare plastică sunt prezentate în tabelele 7 și 8. Din aceste tabele rezultă atât cuplurile metal de adaos – metal de bază, cât și indicele de pretabilitate la sudare în procedeele de bază MIG și WIG.

Tabelul 7. Sudabilitatea și materialele de adaos recomandate la sudarea aliajelor de Al deformat plastic nedurificabile

Tipul aliajului	Pretabilitatea pentru sudarea WIG	Pretabilitatea pentru sudarea MIG	Materialele de adaos (recomandate)
Al 99,5	2	3	Al99,5; Al99,5 Ti
Al 99	2	3	Al99,5Ti; Al99,5
AlMn1	2	3	AlMn1
AlMnCu	2	3	AlMn1
AlMn1Mg0,5	neobișnuit	neobișnuit	-
AlMn1Mg1	2	2	AlMg3
AlMg2,5	1	1	AlMg3; AlMg5
AlMg3	1	1	AlMg3; AlMg5
AlMg5	2	2	AlMg5; AlMg4,5Mn
AlMg2Mn0,3	2	2	AlMg3
AlMg2Mn0,8	1	1	AlMg2Mn0,8 AlMg2Mn0,8Zr
AlMg2,7Mn	1	1	AlMg3; AlMg5
AlMg4,5Mn	2	2	AlMg4,5MnZr

Tabelul 8. Sudabilitatea și materialele de adaos recomandate la sudarea aliajelor de Al deformate plastic durificabile

Tipul aliajului	Pretabilitatea pentru sudarea WIG	Pretabilitatea pentru sudarea MIG	Materialele de adaos (recomandate)
AlMgSi0,5	2	2	AlMg5; AlSi
AlMgSi0,7	2	1	AlMg4,5Mn
AlMgSi1	2	1	AlMg5; AlMg4,5Mn; AlSi5
AlMg1SiCu	2	1	AlMg5; AlMg4,5Mn; AlSi5
AlCuMg1	nu se pretează	nu se pretează	-
AlCuMg2	nu se pretează	nu se pretează	-
AlCuSiMn	nu se pretează	nu se pretează	-
AlZn4,5Mg1	2	1	AlMg4,5Mn; AlMg5 AlMg4,5MnZr
AlZnMgCu0,5	nu se pretează	nu se pretează	-
AlZnMgCu1,5	nu se pretează	nu se pretează	-
AlMgSiPb	nu se pretează	nu se pretează	posibil cu AlSi
AlCuBiPb	nu se pretează	nu se pretează	posibil cu AlSi
AlCuMgPb	nu se pretează	nu se pretează	posibil cu AlSi

Materialele de adaos recomandate la sudarea aliajelor de aluminiu turnate, precum și gradul de pretabilitate a celor două procedee de sudare WIG și MIG sunt prezentate în tabelul 9.

7. Gazele protectoare

În ultimii ani, pe baza dezvoltării unor noi materiale care se supun îmbinărilor prin sudare și ale unor noi materiale de adaos, concomitent cu perfecționarea instalațiilor de sudare, s-a impus diversificarea gazelor și amestecurilor de gaze protectoare. Ca și gazele protectoare convenționale, noile gaze și amestecuri de gaze trebuie să îndeplinească o serie de cerințe din punct de vedere fizic, termic și metalurgic.

a) Cerințele generale care se referă în special la procesul de sudare sunt:

- să poată fi utilizate la toate tipurile de arce electrice;
- să asigure un efect protector suficient, în funcție de zona de aplicație și de forma îmbinării;
- să asigure o topire corespunzătoare a metalelor;
- să prezinte insensibilitate față de eventualele impurități din zona rostului;
- să poată fi utilizate indiferent de diametrul sârmei electrod;
- să favorizeze formarea stratului de zgură, respectiv distribuirea acestuia pe suprafața îmbinării sudate;
- să prezinte insensibilitate față de tendința de formare a porilor;
- să evite, pe cât posibil, formarea stropilor.

Tabelul 9. Sudabilitatea și materialele de adaos recomandate la sudarea aliajelor de Al turnate

Tipul aliajului	Pretabilitatea pentru sudarea WIG	Pretabilitatea pentru sudarea MIG	Materialele de adaos (recomandate)
G-AlSi12, GK-AlSi12	2	1	AlSi12
G-AlSi12(Cu) GK-AlSi12(Cu)	2	1	AlSi12
G-AlSi10Mg GK-AlSi10Mg	2	1	AlSi10Mg
G-AlSi10Mg(Cu) GK-AlSi10Mg(Cu)	2	1	AlSi10Mg
G-AlSi9Cu3 GK-AlSi9Cu3	3	2	AlSi12; AlSi5
G-AlSi6Cu4 GK-AlSi6Cu4	3	3	AlSi12
G-AlSi11 GK-AlSi11	2	1	AlSi12 AlSi10Mg
G-AlSi9Mg GK-AlSi9Mg	2	1	AlSi10Mg AlSi12
G-AlSi7Mg, GK-AlSi7Mg GF-AlSi7Mg	2	1	AlSi10Mg AlSi12 AlSi5
G-AlCu4Ti GK-AlCu4Ti	4	4	AlSi5 AlSi12
G-AlMg3 GK-AlMg3 GF-AlMg3	2	2	AlMg3 AlMg5
G-AlCu4TiMg GK-AlCu4TiMg GF-AlCu4TiMg	4	4	AlSi5 AlSi12
G-AlMg3Si GK-AlMg3Si GF-AlMg3Si	2	2	AlMg3 AlMg5
G-AlMg5 GK-AlMg5	2	2	AlMg5 AlMg4,5Mn
G-AlMg5Si GK-AlMg5Si	2	2	AlMg5 AlMg4,5Mn
G-AlSi5Mg GK-AlSi5Mg	2	1	AlSi5 AlSi12 AlSi10Mg
GD-AlSi9Cu3	nu se pretează	nu se pretează	posibil AlSi12
GD-AlSi12(Cu)	nu se pretează	nu se pretează	posibil AlSi12 l
GD-AlSi10Mg	nu se pretează	nu se pretează	posibil AlSi10Mg l
GD-AlMg9	nu se pretează	nu se pretează	posibil AlMg5 l

b) Cerințele de natură fizică sunt:

- să asigure o amorsare corespunzătoare și o reamorsare facilă;
- să asigure o bună stabilitate a arcului electric;
- să posede o conductibilitate electrică bună, ușurând astfel formarea plasmei termice;
- să asigure o degazare corespunzătoare a băii metalice;
- să aibă o bună capacitate de dizolvare.

c) Cerințele de natură termică sunt următoarele:

- să prezinte o bună conductivitate termică;
- să aibă o bună capacitate calorică;
- coeficientul de transmitere a căldurii să fie mare.

d) Cerințele de natură metalurgică sunt următoarele:

- să asigure o ardere bună a elementelor de aliere;
- să realizeze proprietăți mecano-tehnologice superioare;
- să contribuie la mărirea rezistenței la coroziune.

Pe lângă cerințele prezentate trebuie ținut cont și de cerințele impuse de compoziția materialului de bază, ceea ce determină utilizarea unor elemente de amestec în gazele protectoare. Din acest motiv se recomandă ca pentru fiecare aplicație concretă să se selecteze un gaz sau un amestec corespunzător de gaze protectoare.

Gazele și amestecurile de gaze protectoare utilizate la sudarea MIG/MAG

În funcție de însușirile fizico-chimice și de modul de comportare, gazele protectoare se pot clasifica în următoarele grupe:

I = gaze și amestecuri de gaze inerte;

R = gaze și amestecuri de gaze reducătoare;

M = amestecuri de gaze oxidante pe bază de argon care conțin oxigen, bioxid de carbon sau ambele gaze;

C = gaze și amestecuri de gaze puternic oxidante;

F = gaze cu reacție inertă pentru protecția rădăcinii.

În tabelul 10 s-au prezentat grupele de gaze și amestecuri de gaze protectoare care sunt normate precum și caracterul și compoziția acestora, menționând totodată procedeul de sudare pentru care se pretează. La sudarea MIG/MAG gazele protectoare au o influență hotărâtoare asupra arcului electric. Astfel, tensiunea de ionizare - caracteristică fizică fundamentală a gazului sau a amestecului de gaze - joacă un rol important în ceea ce privește amorsarea arcului electric. Un conținut ridicat de heliu în amestecul de gaze protectoare provoacă o amorsare mai dificilă a arcului electric.

Tabelul 10. Clasificarea gazelor protectoare

Denumire		Componenta, în procente volumice						Procedeu	Observații
Grupa	Cod	Oxidant		Inert		Reducător	Inert-reactiv		
		CO ₂	O ₂	Ar	He	H ₂	N ₂		
R	1			Rest **)		1 - 15		WIG, PL,T Prot. rad.	Reducător
	2			Rest**)		15 - 35			
I	1			100				MIG, WIG Prot. rad. Plasma	Inert
	2			Rest**)		100			
	3			Rest*)		20 - 80			
M1	1	>0 - 5		Rest**)		>0 - 5			Slab oxidant
	2	>0 - 5		Rest**)					
	3		>0 - 3	Rest**)					
	4	>0 - 5	>0 - 3	Rest**)					
M2	1	>5 - 25		Rest**)					
	2		>3 - 10	Rest**)					
	3	>5 - 25	>0 - 8	Rest**)					
M3	1	>25 - 50		Rest**)					
	2		>10 - 15	Rest**)					
	3	>5 - 50	>8 - 15	Rest**)					
C	1	100							Puternic oxidant
	2	rest	>0 - 30						
F	1					1 - 30	Rest	Prot .rad.	Reducător

*) valabil numai pentru amestecuri de gaz cu conținut egal sau mai mare de He
 **)argonul poate fi înlocuit de He în proporție de 95%

În tabelul 11, se prezintă principalele proprietăți ale gazelor protectoare (gazele care nu au fost incluse în tabelul 11 sunt gaze speciale fiind simbolizate SG) utilizate la sudarea MIG/MAG. Hotărâtoare pentru protecția băii metalice și/sau a materialului de adaos este densitatea gazului și faptul dacă gazul este atomic (inert) sau molecular. Gazele care sunt mai grele decât aerul nu se ridică prea ușor datorită căldurii formate la sudare. Gazele moleculare au o capacitate mare de protecție datorită măririi volumului în cazul disociației.

Tabelul 11. Proprietățile gazelor

Tipul gazului	Densitatea 15°C, 1 bar [kg/m ³]	Densitatea relativă fata de aer la 15°C, 1bar	Temperatura de fierbere la 1.013 bar [°C]	Greutatea atomică [kg/mol]	Comportarea la sudare
Argon, Ar	1,669	1,38	- 185,9	39,948	inert
Heliu, He	0,167	0,14	- 268,9	4,002	inert
Bioxid de carbon, CO ₂	1,849	1,44	- 78,5	44,011	oxidant
Oxigen, O ₂	1,337	1,04	- 183,0	31,998	oxidant
Azot, N ₂	1,170	0,91	- 195,8	28,013	inert în rc
Hidrogen, H ₂	0,085	0,06	- 252,9	2,016	reducător

În tabelul 12 se prezintă valorile energiei de disociere și a energiei de ionizare a diferitelor gaze.

Tabelul 12. Caracteristicile fizice ale gazelor

Tipul gazului protector	Energia de disociere [eV]	Energia de ionizare [eV]
Hidrogen, H ₂	4,5	13,6
Oxigen, O ₂	5,1	13,6
Bioxid de carbon, CO ₂	4,3	14,4
Heliu, He	-	24,6
Argon, Ar	-	15,8

Stabilitatea arcului electric este influențată de conductibilitatea electrică (σ). Așa cum rezultă din figura 1, argonul și azotul au față de heliu și hidrogen o conductibilitate electrică mai ridicată chiar și la temperaturi scăzute. Variațiile de conductibilitate ale gazelor se micșorează pe măsura măririi temperaturii, estompându-se complet la temperaturi ce depășesc 20000K. Corelând avantajele conductibilității electrice ridicate cu energia de ionizare se pot obține arce electrice corespunzătoare la tensiuni de lucru mai ridicate prin întrebuițarea amestecurilor de gaze protectoare pe bază de heliu.

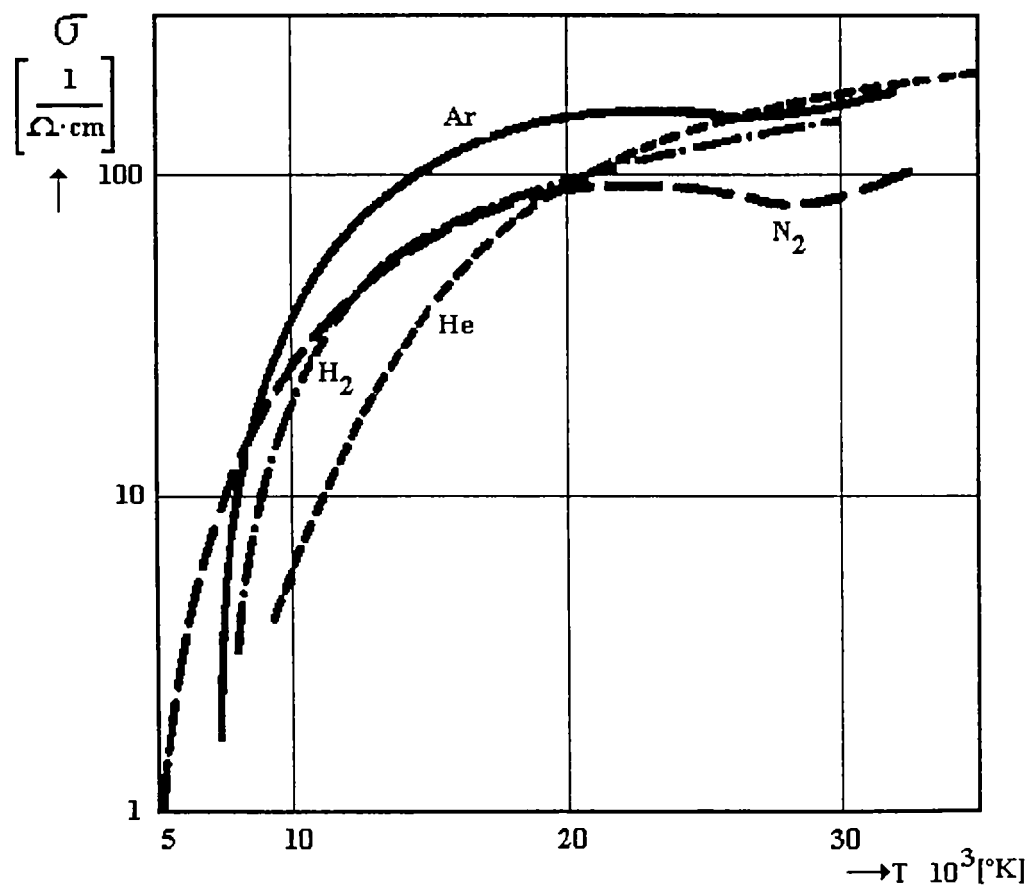


Figura 1. Conductibilitatea electrică a diferitelor gaze

Conductivitatea termică a gazelor (τ) este o altă caracteristică deosebit de importantă. La alegerea gazelor de protecție sau a amestecurilor de gaze, această caracteristică trebuie corelată cu conductivitatea termică a materialului care se sudează, figura 2.

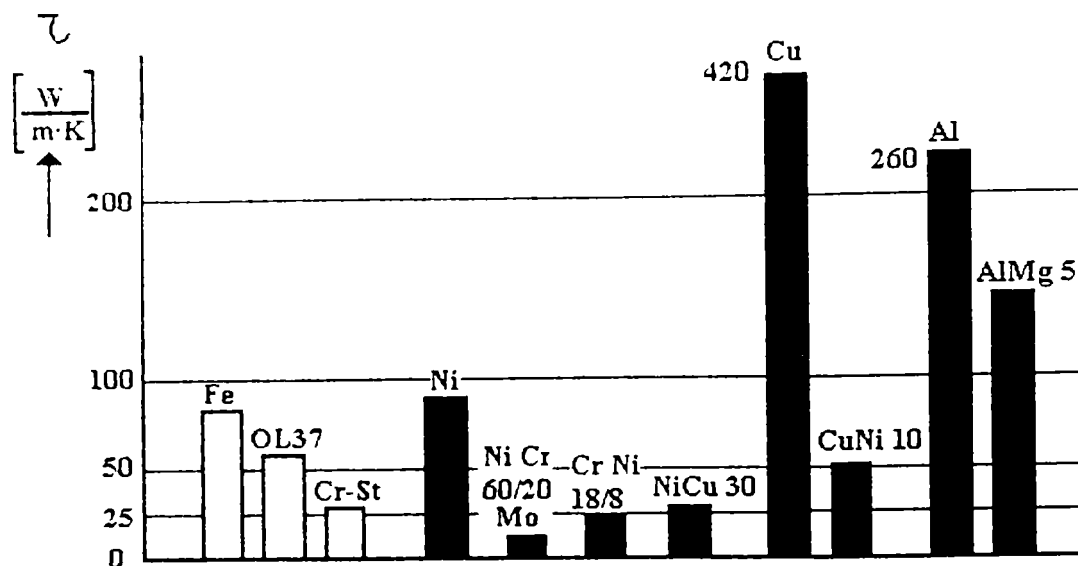


Figura 2. Conductivitatea termică a diferitelor metale

În tabelul 13 se prezintă capacitatea termică specifică și conductivitatea termică pentru 1 bar și 25°C. Cu toate că aceste condiții nu se obțin la sudare, valorile prezentate oferă o imagine a comportării diferitelor gaze din punct de vedere termic.

Tabelul 13. Conductivitatea termică a componentelor amestecurilor de gaze

Tipul gazului	Capacitatea termică specifică, c_p [kJ/kg K]	Capacitatea termică specifică, c_p [kJ/m ³ K]	Conductivitatea termică [W/m K]
Argon, Ar	0,5204	0,8394	177×10^{-4}
Helium, He	5,1931	0,8382	1500×10^{-4}
Bioxid de carbon, CO ₂	0,850	1,5176	164×10^{-4}
Oxigen, O ₂	0,9194	1,1880	264×10^{-4}
Hidrogen, H ₂	14,3	1,1626	1861×10^{-4}
Azot, N ₂	1,041	1,1771	259×10^{-4}

Pentru a avea o imagine mai clară în ceea ce privește conductivitatea termică a gazelor în condiții specifice de sudare, în figura 3 se prezintă variația conductivității cu temperatura pentru diferite gaze. Rezultă bunele proprietăți termice ale gazelor moleculare în domeniul temperaturilor de până la 4000°K. Gazele inerte au o conductivitate termică bună abia la temperaturi de peste 4000°K.

Se pun în evidență totodată avantajele heliului față de argon, avantaje care trebuie folosite la sudarea metalelor cu conductivitate termică ridicată cum sunt aluminiul, cuprul, etc.

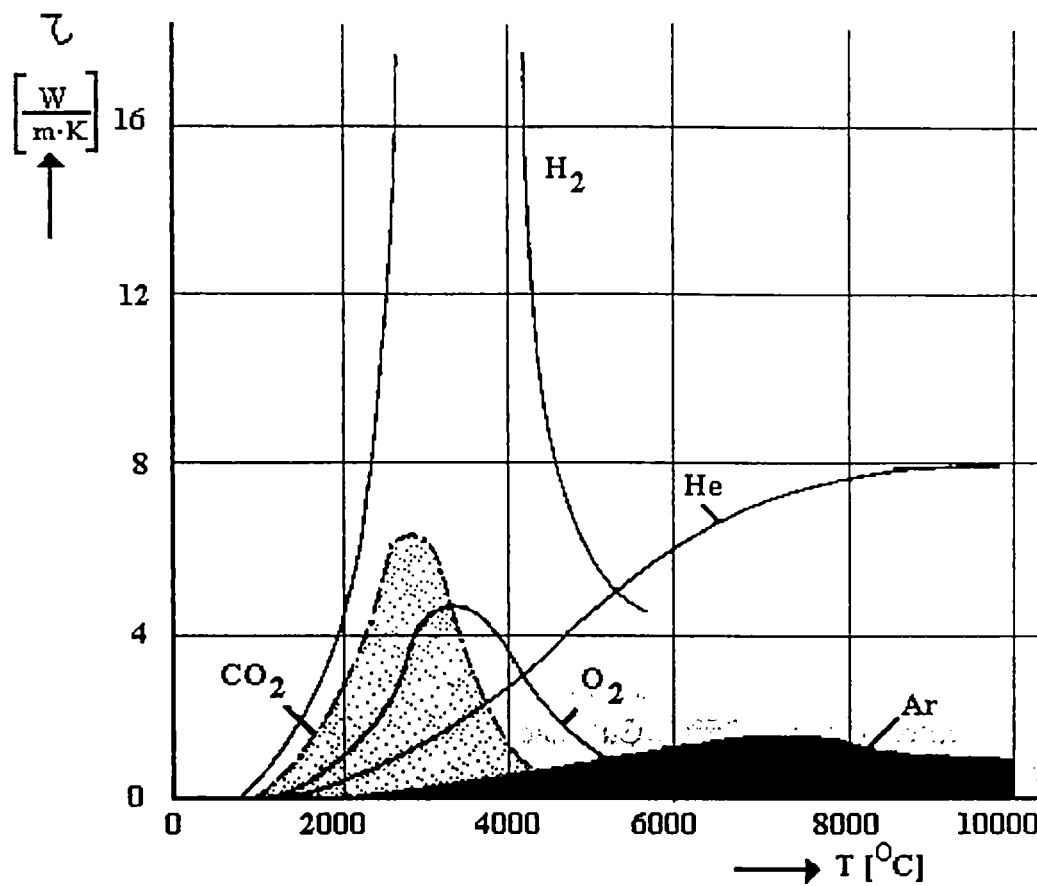


Figura 3. Variația cu temperatura a conductivității termice a gazelor

Proprietățile termice și fizice ale diferitelor componente care intră în amestecurile de gaze protectoare definesc domeniile de aplicație ale unui gaz sau amestec de gaze protectoare.

Din punct de vedere metalurgic și chimic, se precizează că gazele inerte nu intră în reacții în timpul procesului de sudare. Astfel, comportarea metalurgică vine în discuție numai în cazul sudării cu gaze moleculare.

În cazul în care amestecul de gaze protectoare conține bioxid de carbon, acesta poate determina arderea carbonului rezultat din disocierea bioxidului de carbon. Problema are o deosebită relevanță în cazul amestecurilor de gaze protectoare, care se utilizează la sudarea oțelurilor austenitice.

Oxigenul poate oxida diferite elemente de aliere, care se pot depune după aceea, sub formă de zgură, pe suprafața piesei. Dacă piesele sudate urmează să fie ulterior vopsite, acest strat trebuie îndepărtat. Pe de altă parte, oxigenul reduce tensiunea superficială și influențează capacitatea de umectare. Dacă conținutul de oxigen din amestecul de gaze protectoare este ridicat va rezulta și în metalul depus

un conținut mai ridicat de oxigen având repercusiuni asupra rezilienței și rezistenței îmbinării sudate.

Tabelul 14. Puritatea și punctele de rouă a gazelor și a amestecurilor de gaze

Denumirea	Puritatea în % volumice valori minime	Punctul de rouă la 1 bar, [°C] valori maxime	Umiditatea în ppm valori maxime
R	99,95	- 50	40
I	99,99	- 50	40
M1	99,70	- 50	40
M2	99,70	- 50	40
M3	99,70	- 50	40
C	99,70	- 35	200
F	99,80	- 50	40
Oxigen	99,50	- 35	200

În conformitate cu clasificarea gazelor și amestecurilor de gaze protectoare prezentată în tabelul 10, puritatea, punctele de rouă și valorile maxime ale umidității diferitelor gaze protectoare sunt cuprinse în tabelul 14. Valorile specifice pentru amestecurile de gaze protectoare se determină în funcție de natura gazelor care intră în amestec și coeficientul de participare.

Abaterile admisibile în formarea amestecurilor sunt de $\pm 0,5$ % volumice pentru participare cu până la 5% volumice și de ± 10 % volumice pentru cote de participare de 50% volumice.

Diuza de gaz din cadrul pistolului de sudare MIG asigură un flux laminar al gazului protector, acoperind totodată baia metalică topită. Forma conică a diuzei de gaz îmbunătățește fluxul de gaz protector.

Debitul de gaz protector și diametrul diuzei de gaz se aleg în funcție de:

- puterea arcului;
- tipul îmbinării sudate;
- natura materialului;
- viteza de sudare.

Diuza de curent, ca una din componentele principale ale pistolului de sudare, asigură transmiterea curentului electric la materialul de adaos și este confecționată pe acest considerent din Cu sau aliaje de cupru. Diametrul diuzei de curent (sau de contact) este standardizat și se alege în funcție de:

- natura materialului;
- diametrul sârmei electrod.

În funcție de tipul îmbinării realizate, aceasta are o poziție relativă determinată față de diuza de gaz.

8. Problemele metalurgice la sudarea aluminiului și aliajelor sale

În cadrul acestei problematice am tratat trei fenomene frecvente care însoțesc procesele sudo-termice:

- Fisurarea la cald;
- Distribuția căldurii;
- Stratul de oxid de suprafață.

8.1. Fisurarea la cald

Fisurile la cald reprezintă discontinuități micro și macroscopice de material în baia metalică sau în zona influențată termic care se formează în timpul cristalizării. Tendința de fisurare la cald poate fi observată la acele materiale care la limitele cristalelor prezintă faze cu temperaturi de topire scăzute. În ciuda faptului că aceste fisuri sunt mai frecvente în cazul contracțiilor mari, chiar o contracție mică în timpul răcirii duce la formarea unor fisuri intercrystaline localizate în îmbinarea sudată sau lângă aceasta. Tensiuni cu valori scăzute sunt uneori suficiente pentru a favoriza aceste fisuri.

Fisurile la cald se clasifică în:

- ◆ fisuri de cristalizare sau de solidificare, localizate în cusătură;
- ◆ fisuri de supraîncălzire localizate pe linia de fuziune (ZIT) sau în apropierea acesteia.

Anumite elemente de aliere favorizează tendința de fisurare la cald pe parcursul procesului de răcire, în special la sudarea prin topire (de exemplu Cu sau Pb). Elemente de aliere ca Mg și Si favorizează tendința de fisurare la cald numai în domeniul conținutului critic.

Fisurile de cristalizare se datorează în principal:

- structurii grosolane;
- formării eutecticilor ușor fuzibili.

Probabilitatea cea mai mare în formarea fisurilor de cristalizare o oferă aliajele eutectice obținute prin alierea aluminiului cu Mg, Si și Cu. Eutecticul este alcătuit din soluții solide ale Al și faze intermetalice de tip β de Al_8Mg_5 în cazul aliajelor Al-Mg, sau de tip θ de $CuAl_2$ în cazul aliajelor de Al-Cu. Legătura dintre soluția solidă de Al unde în cursul răcirii se formează dendrite și fazele intermetalice menționate este slabă facilitând producerea de fisuri. La aliajele de Al-Mg și Al-Mg-Cu, care folosesc elemente de aliere ce lărgesc practic intervalul de cristalizare, rezistența la fisurare scade sensibil.

Fisurile de supraîncălzire sunt generate de tensiunile interne produse la solidificarea băii, știut fiind faptul că la trecerea din faza lichidă în faza solidă, aluminiul își micșorează volumul (se contractă) cu 6,5%. Contractia liniară în intervalul de temperaturi 660°C-20°C este de 1,85%, ceea ce explică nivelul ridicat al tensiunilor interne.

Condițiile de fisurare sub influența tensiunilor-deformațiilor produse la răcire pot fi studiate luând în considerație variația proprietăților mecanice la limita comportării fragile a aliajelor de aluminiu durificabile. După cum se evidențiază în figura 4, curba de ductilitate $\epsilon=f(t)$ variază brusc în intervalul de temperaturi lichidus-solidus T_L-T_S , care este situat în domeniul 660°C-500°C.

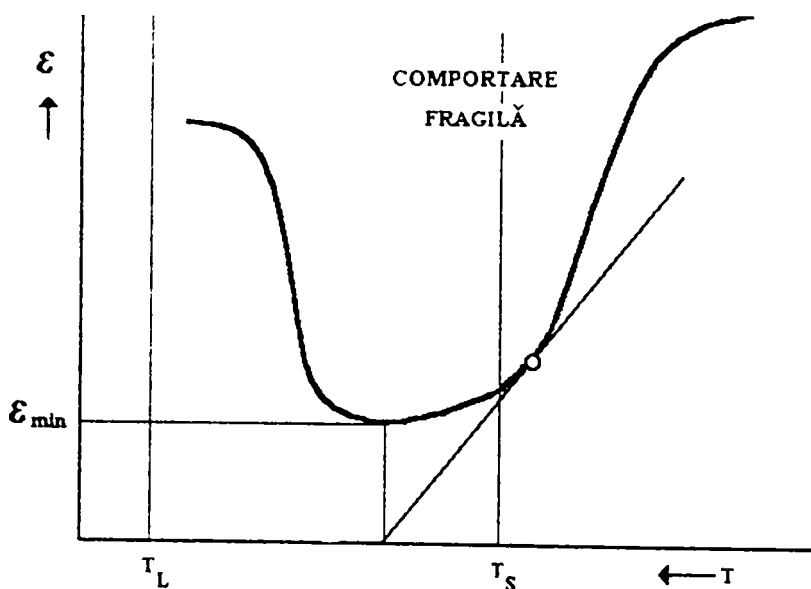


Figura 4.

În vederea evitării zonei de comportare fragilă, de la temperatura corespunzătoare valorii minime a deformației specifice, condițiile de solidificare trebuie să fie sub panta dreptei tangență la curbă în punctul C, ce determină viteza critică de deformare cu temperatura VCT.

$$\frac{d\epsilon}{dT} < VCT \quad (1)$$

evitând astfel traversarea zonei de fisurare. Descompunând pe $d\epsilon/dT$ se obține:

$$\frac{d\epsilon}{dT} = \frac{\partial\epsilon/\partial t}{\partial T/\partial t} \quad (2)$$

Termenul de la numărător reprezintă viteza de deformare în [mm/mm·s], iar termenul de la numitor viteza de răcire în [°C/s] tipică ciclului termic aplicat.

Evitarea fenomenului de fisurare la cald guvernat de tensiuni și deformații induse la solidificarea băii poate fi realizată, deci, pe următoarele două căi: micșorarea componentei vitezei de deformație prin inducerea suplimentară de tensiuni de compresiune prin încălzire locală în imediata vecinătate din spatele capului de sudare, respectiv prin mărirea vitezei de răcire.

Fisuri la cald pot fi generate și prin rigiditatea construcției, acestea fiind localizate de regulă în următoarele zone/cazuri:

- în craterul final;
- în cazul existenței unor distanțe necorespunzătoare față de marginile piesei;
- în cazul unei lungimi prea mari a arcului electric (cantitate de căldura prea mare introdusă în piesă);
- în cazul unei energii liniare prea ridicate (cantitate de căldura prea mare introdusă în piesa);
- în cazul unei temperaturi necorespunzătoare a piesei (ordine de sudare, preîncălzire).

Apariția fisurilor este influențată sensibil de modul de aplicare a tehnologiei de către operatorul sudor. De asemenea, o alegere improprie a parametrilor de sudare sau a lungimii arcului poate conduce la apariția fisurilor chiar și la materiale cu sudabilitate bună.

În tabelul 15 sunt prezentate valori orientative pentru preîncălzirea anumitor aliaje de aluminiu.

Tabelul 15. Valorile orientative pentru temperatura și timpul de preîncălzire

Materialul	Grosimea tablei sau a peretelui [mm]		Temperatura maxima de pre-încălzire [°C]	Timpul maxim de preîncălzire [min]
	WIG	MIG		
AlMgSi0,5	≥ 5 - 12		180	60
AlMgSi1	> 12	> 20	200	30
			220	20
			250	10
AlZnMg1	≥ 4 - 12		140	30
	> 12	> 16	160	20
AlMg4,5Mn	≥ 6 - 12	> 16	150 - 200	10
AlMg5	> 12		150 200	10

În funcție de cauzele de producere a fisurilor există mai multe posibilități de a minimiza sau de a împiedica tendința de fisurare. Dintre acestea se menționează:

- alegerea unui material de adaos supraaliat cu elementul de aliere critic;
- alegerea unor materiale de bază cu sudabilitate superioară;
- introducerea controlată de energie în piesă (alegerea unei lungimi corespunzătoare a arcului electric și optimizarea energiei liniare);

- controlarea temperaturii piesei (reducerea temperaturii piesei la grosimi mici, respectiv preîncălzirea piesei la grosimi mari);
- măsuri constructive de evitare a fisurilor la cald în piesă (ordinea de sudare în vederea excluderii tensiunilor remanente ridicate).

Alegerea unui aliaj corespunzător pentru materialul de adaos dat este o premiză importantă pentru evitarea fisurării la cald în îmbinarea sudată.

Pentru a reduce fisurile la cald, determinate metalurgic, se utilizează materiale de adaos în care elementele de aliere cu domeniu critic de apariție a fisurării la cald sunt în conținut ridicat. Conținutul acestor elemente în îmbinarea sudată trebuie să se afle și după solidificarea băii în afara domeniului critic. Ele permit obținerea de îmbinări cu o granulație mai fină și îngustarea intervalului de cristalizare.

Sensibilitatea de fisurare este un criteriu important pentru aprecierea sudabilității materialelor de baza. Cuprul, ca element de aliere a aluminiului, conduce la îmbunătățirea caracteristicilor de rezistență, în schimb mărește tendința de fisurare la cald. Plumbul se folosește în aliaj pentru a îmbunătăți condițiile de prelucrare prin așchiere; el, însă, mărește tendința de fisurare la cald.

Tendința de fisurare poate fi influențată hotărâtor și de rigiditatea construcției. Construcții moi (la care se înregistrează o contracție mare la sudare) reduc riscul de formare a fisurilor. Construcții rigide (în mod frecvent sunt posibile contracții mici) cresc tendința de fisurare a îmbinării. Odată cu mărirea rigidității construcției, întreaga deformație se localizează în îmbinarea sudată propriu-zisă.

În cazul construcțiilor moi, zonele din jurul îmbinării sudate preiau și ele din contracție, iar quantumul de deformare care revine îmbinării este de regulă mai redus.

O contracție masivă în îmbinarea sudată poate fi generată și prin ordine defavorabilă de sudare. În general, ultimele îmbinări, realizate de exemplu la construcții în formă de cadru sunt cele mai afectate. Aceste tendințe sunt favorizate în cazul grosimilor mici prin temperaturile ridicate ale pieselor.

Cantitatea de căldură introdusă în piesa este influențată de:

- căldura introdusă prin procesul de sudare;
- încălzirea piesei la sudare (caracteristicile materialului și ordinea de sudare).

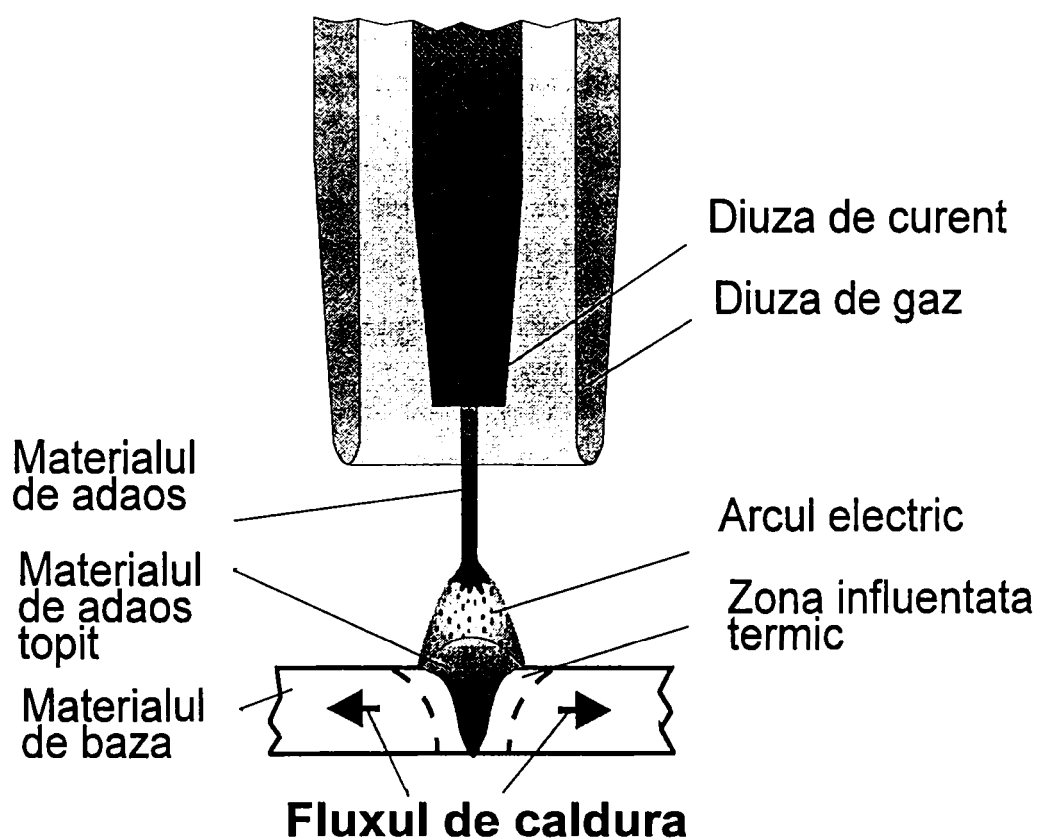
O ordine necorespunzătoare la sudare, de exemplu multe cusături într-un șir, poate provoca la grosimi mici ale pereților, o creștere a temperaturii piesei. O temperatură ridicată a componentelor mărește contracția îmbinării sudate care favorizează fisurarea. Printr-o ordine de sudare corectă și pauze corespunzătoare între cordoane, temperatura piesei poate fi menținută în domeniul subcritic.

Temperatura piesei poate influența negativ viteza de răcire și geometria îmbinării. Astfel, o răcire lentă corelată cu grosimi mici ale pereților favorizează fisurarea. Temperaturi ridicate ale componentelor determină formarea unei îmbinări mai mult subînălțată, o grosime mai mică a îmbinării, o îmbinare deci care poate prelua numai forțe de contracție mici.

8.2. Distribuția căldurii în piesă

Fenomenele specifice aluminiului se datorează conductibilității mari a acestuia în raport cu oțelul. Temperatura materialului de bază este scăzută la începutul îmbinării. În această fază puterea arcului electric trebuie utilizată și pentru încălzirea materialului de bază. Pe parcursul efectuării sudării, crește temperatura materialului de bază, mai ales în cazul grosimilor mici de material. În jurul arcului electric se formează un câmp de temperatură corespunzător, iar o mare parte din cantitatea de căldură indusă prin arc electric se transmite în piesă.

La sfârșitul îmbinării sudate, în timpul umplerii craterului final, temperatura materialului de bază devine exagerată. Ca urmare, craterele finale ce se formează, reprezintă o problemă în ceea ce privește asigurarea calității, datorită faptului că acesta este locul de formare a unor fisuri, în general ramificate. În cursul executării operației de umplere a craterului final trebuie avut grijă să nu se formeze retasuri (pe baza unei presiuni prea reduse a arcului electric asupra băii metalice).



Fluxul de căldura
Figura 5. Distribuția fluxului de căldură în piesă

Cantitatea de căldură introdusă este cuantificată prin energia liniară. Aceasta influențează în mod hotărâtor introducerea căldurii în piesă. Energia liniară provoacă modificările survenite în materialul de adaos și în materialul de bază datorită procesului de sudare.

Zona influențată termic (ZIT) este locul în care are loc un tratament termic, diferit însă esențial față de un tratament termic tehnic, și anume, în ceea ce privește desfășurarea temporală a tratamentului.

În cazul aliajelor de aluminiu durificabile, ca urmare a tratamentului termic pot apare următoarele fenomene:

- scăderea rezilienței și rezistenței în ZIT;
- posibile fisurări prin deplasări ale limitelor grăunților;
- scăderea rezistenței la coroziune;
- sudabilitate mai bună în stare recoaptă de punere în soluție.

În cazul aliajelor nedurificabile se înregistrează:

- fenomene de recristalizare (scăderea rezistenței în ZIT);
- atingerea rezistenței inițiale numai prin deformare după sudare;
- obținerea unor granulații mari în cazul pieselor supuse unor deformații critice.

Mărimea ZIT-ului poate fi determinată prin alegerea energiei liniare. O energie liniară crescută conduce la formarea unui ZIT lat, caracterizându-se prin scăderea caracteristicilor de rezistență.

Fluxul de căldură în materialul de bază prezintă următoarele aspecte:

- căldura este transmisă de la baia metalică topită prin materialul de bază; acesta, după încălzirea rapidă provocată de arcul electric, determină o viteză mare de răcire;
- cantitatea de căldură crește odată cu conductivitatea termică (foarte ridicată la aluminiu);
- cantitatea de căldură depinde de următorii factori:
 - ◆ grosimea peretelui diferitelor piese (grosimi mari generează un flux mai mare de căldură);
 - ◆ tipul îmbinării sudate (de exemplu, îmbinările de colț necesită o cantitate mai mare de căldură decât îmbinările cap la cap);
 - ◆ energia liniară și viteza de sudare;
 - ◆ lungimea arcului electric (un arc scurt, concentrat, introduce o cantitate de căldură mai mică în piesă).

Efectele negative în ZIT pot fi evitate/reduce prin răcire locală controlată.

Influența energiei liniare:

Energia liniară reprezintă cantitatea de căldură sau energia introdusă de arcul electric în piesă, raportată la lungimea îmbinării. Ea influențează hotărâtor modificările provocate de arcul electric în materialul de bază și în zona sudată.

Energia liniară se alege în funcție de grosimea peretelui. O energie liniară prea mică (putere scăzută a arcului electric sau viteza mare de sudare) împiedică o topire suficientă a materialului de bază.

O energie liniară prea mare (putere mare a arcului electric sau viteză mică de sudare) generează o temperatură prea ridicată a băii metalice topite și a zonei influențate termic.

Temperatura băii metalice topite și, prin aceasta, aspectul și calitatea îmbinării sudate, este influențată atât de lungimea arcului electric cât și de poziția pistolului de sudare, grosimea piesei, modul de pregătire a rostului și efectul de răcire a dispozitivelor de fixare sau a componentelor în contact mecanic.

8.3. Stratul de oxizi de suprafață

Datorită afinității mari a aluminiului față de oxigen și a instabilității aluminiului față de fenomenul de coroziune, pe toate suprafețele aluminiului care vin în contact cu aerul se formează un strat de oxid. Datorită temperaturii de topire ridicate (2000 °C) a acestui oxid - aproximativ de trei ori temperatura de topire a aluminiului - arcul electric nu poate realiza topirea acestuia. O creștere a temperaturii arcului ar duce la favorizarea formării peliculei de oxid care ar înfășura materialul ca un strat de piele, marginile rostului topindu-se fără a rezulta o îmbinare sudată. Această peliculă ar putea fi străpunsă dacă baia metalică s-ar găsi dedesubtul unui strat de material de adaos topit; s-ar realiza amestecarea băii topite, ruperea peliculei de oxid și astfel, formarea unei îmbinări sudate. Aceasta din urmă, însă, ar rezulta plină de oxizi, iar rezistența îmbinării ar fi deosebit de mică.

Pelicula de oxid poate fi îndepărtată prin curățire chimică, cu ajutorul fluxurilor (clorizi și fluorizi) care realizează topirea peliculei și transformarea acesteia într-un strat de zgură ușoară, specifică, care se ridică la suprafață. Este important ca elementul care îndeplinește rolul de dizolvare a oxidului să-și păstreze proprietățile și la temperatura de sudare, evitându-se vaporizarea acestuia. Fluxurile se utilizează la sudarea oxigaz a aluminiului și la sudarea cu arc electric descoperit. La sudarea în medii de gaze protectoare, îndepărtarea peliculei de oxid se realizează prin intermediul efectului de curățire al arcului electric. Perdeaua de gaz protector împiedică o nouă formare a stratului de oxid. Distrugerea și îndepărtarea peliculei impune utilizarea polarității pozitive la sudarea MIG sau sudarea WIG în curent alternativ.

Stratul de oxid are deci următoarele proprietăți:

- are o greutate mai mare decât aluminiul și coboară la baza băii metalice;
- structuri de oxizi prezente în îmbinarea sudată generează structuri de separație, și, prin aceasta, lipsa de topire;
- oxidul este favorizat de temperaturile ridicate și de prezența umidității;
- privit la nivel microscopic, oxidul are o suprafață cu creștături care absoarbe umiditatea generând formarea de pori în îmbinarea sudată.

Grosimea stratului de oxid influențează stabilitatea arcului electric datorită scăderii energiei electronilor. O grosime nu prea mare a stratului de oxid poate influența pozitiv arcul electric prin efectul stabilizator, în special în cazul utilizării surselor de sudare convenționale. O grosime mare duce la formarea incluziunilor pe flancurile rostului și la rădăcină, suprasolicitând efectul de curățire al arcului electric.

Grosimea stratului de oxid este dificil de determinat, uzual utilizându-se metoda indirectă de determinare, prin măsurarea rezistenței ohmice (stratul de oxid are un efect izolant electric, contrar materialului de bază - aluminiu).

9. Defectele la sudarea aluminiului

9.1. Influența factorilor tehnologici

Temperatura piesei influențează hotărâtor parametrii arcului electric și calitatea sudării. O temperatură ridicată a piesei poate genera următoarele aspecte:

- arc electric de lungime exagerată care influențează stabilitatea procesului;
- favorizarea apariției de defecte în îmbinare (fisuri, exces de pătrundere, străpungeri etc.).

Excesul de temperatură din piesă poate fi provocat prin:

- cantitatea mare de căldură introdusă prin arcul electric, energia liniară;
- timpii de sudare lungi, fără întreruperi;
- temperaturile de preîncălzire necorespunzătoare;
- ordinea de sudare nefavorabilă;
- timpii de răcire prea scurți între straturile depuse.

Geometria îmbinării este influențată negativ de către:

- un arc electric alungit (retasură, supraîncălzire);
- o baie metalică supraîncălzită (scurgere de metal, contracții mai mari);
- o zonă influențată termic (ZIT) supraîncălzită (contracții mai mari, extinderea zonei cu granulație mare).

Dependența geometriei îmbinării sudate în funcție de temperatura piesei este următoarea:

- dacă temperatura piesei este prea mică, baia de sudare se răcește rapid, îmbinarea sudată nu prezintă retasuri și nu apare pericolul de fisurare datorită temperaturii piesei;
- dacă temperatura piesei este medie, baia de sudare se răcește rapid, îmbinarea sudată este ușor subînălțată și nu apare pericolul de fisurare datorită temperaturii piesei;

- dacă temperatura piesei este foarte mare, baia de sudare se răcește lent, îmbinarea sudată are retasuri vizibile și există pericolul de fisurare datorită temperaturii piesei;
- dacă temperatura piesei este mult prea mare, baia de sudare se răcește lent, îmbinarea sudată prezintă retasuri mari și există pericol mare de fisurare datorită temperaturii piesei;

Odată cu creșterea temperaturii piesei, îmbinarea sudată este predispusă tot mai mult la formarea de retasuri, iar la piesele cu pereți de grosimi mici apare o subțiere. În cazul temperaturii ridicate a piesei, la pereții cu grosimi mici apare pericolul de fisurare.

9.2. Fisurile

Apariția fisurării la sudare poate fi cauzată de:

- material (de bază sau de adaos);
- procesul de sudare (lungimea arcului electric, energia liniară);
- considerente constructive (construcție rigidă, distanțe marginale necorespunzătoare, dimensionare incorectă a grosimii pereților);
- traseul fluxului de căldura în piesă (ordinea de sudare).

Fisurile pot fi evitate numai în cazul în care se iau în considerare toate influențele posibile și se minimizează cauzele. Fisurile pot apare în diferite poziții relativ la îmbinarea sudată, astfel încât deosebim fisuri longitudinale și transversale.

Fisura longitudinala se poate produce:

- ◆ în mijlocul sau pe lângă mijlocul îmbinării sudate, ca urmare a unei prinderi provizorii necorespunzătoare;
- ◆ lângă îmbinarea sudată, în ZIT, ca urmare a alegerii unui material de adaos necorespunzător;
- ◆ la rădăcina îmbinării, datorită unor forțe de torsiune cauzate de încălziri necorespunzătoare sau de soluții constructive cu încastrări multiple.

Fisurile transversale pot fi situate:

- ◆ la suprafață, fiind generate de regulă datorită unei naturi necorespunzătoare a aliajului;
- ◆ la rădăcina îmbinării sudate.

În general, fisurile pot influența sensibil durata de funcționare statică și dinamică, de aceea acestea nu se admit în îmbinarea sudată. Ele sunt cauzate de procedeul de sudare și sunt favorizate de natura materialului - aluminiu. În acest caz, fisurile cele mai frecvente sunt cele la cald.

Fisurile de crater final pot fi evitate prin reducerea energiei de sudare (funcția de descreștere a curentului). Din motive de rezistență, craterul final trebuie umplut întotdeauna pentru a nu forma o zonă de slăbire în îmbinarea sudată.

9.3. Lipsa de topire

Aceasta poate apărea în îmbinările sudate ale materialelor pe bază de aluminiu din următoarele cauze:

- procesul de sudare (parametrii, energia liniară, poziția pistolului, poziția de sudare);
- pregătirea rostului;
- unghiul de deschidere prea mic, respectiv distanțele necorespunzătoare între muchii;
- puterea necorespunzătoare a arcului electric;
- lipsa preîncălzirii materialului de bază.

La sudarea MIG sunt specifice defectele în formă de lipsă de topire localizate la începutul îmbinării.

Puterea arcului electric nu poate fi reglată în cazul sudării MIG independent de sârma electrod, de aceea, materialul de adaos va alimenta spațiul arcului din primul moment al amorșării acestuia. Materialul de adaos va fi așezat pe materialul de bază încă rece, arcul electric arzând pe baia metalică și împiedicând încălzirea metalului de bază. Ca rezultat, apare un defect specific procedurii MIG, lipsa de topire la începutul îmbinării.

Lipsa de topire poate apărea și pe baza unei poziții necorespunzătoare - deplasări - ale pistolului de sudare, având ca urmare formarea unei structuri supraîncălzite, a unei colorări prin formare de oxizi și a unei contracții pe partea opusă.

La îmbinările de colț și în cazul unor diferențe mari de grosime apare lipsa de topire la rădăcină datorită următoarelor cauze:

- ◆ un arc electric prea lung;
- ◆ diametrul sârmei electrod prea mare;
- ◆ poziție necorespunzătoare a pistolului.

9.4. Incluziunile și porii

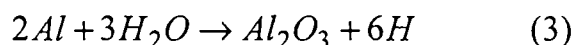
Incluziunile se formează în procesul reacțiilor de reducere din baia metalică în timpul solidificării. Ca urmare a răcirii, oxizii de Al, având o greutate specifică superioară aluminiului lichid, rămân incluzionați. Principalele cauze ale defectului sunt:

- diferența mare între temperatura ridicată de topire a oxidului și a aluminiului;

- protecția insuficientă a băii;
- numărul mare de straturi;
- accesul și poziția defectuoasă a capului de sudare.

Porii se formează prin degazarea necorespunzătoare a băii ca urmare a scăderii solubilității, în special a hidrogenului, odată cu răcirea băii. Cantitatea de pori depinde de presiunea băii și de viteza de formare a germeilor de cristalizare.

În aluminiul lichid la temperatura de fuziune se dizolvă o cantitate de hidrogen de circa $0,7 \text{ g}/100 \text{ cm}^3$, pe câtă vreme în aluminiu solidificat numai $0,035 \text{ g}/100 \text{ cm}^3$. Eliminarea hidrogenului dizolvat este împiedicată pe de o parte de valoarea scăzută a coeficientului de difuzie a hidrogenului, iar pe de altă parte de către pelicula de Al_2O_3 . La aliajele de Al-Mg se formează pelicula de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{MgO}$ capabilă de o absorbție și mai intensă a umidității. Principalele surse de absorbție a hidrogenului în baia de sudură, pe baza reacției:



sunt vaporii de apă din mediul atmosferic și cantitatea de umiditate conținută în materialul de adaos. Alte surse de formare a porilor sunt:

- ◆ excesul de hidrogen din baie, provenit din impuritățile gazelor de protecție și din lipsa de curățenie a componentelor;
- ◆ viteze mari de răcire;
- ◆ strat prea gros de metal depus;
- ◆ arc electric prea lung;
- ◆ rost oxidat, substanțe de pasivizare;
- ◆ temperaturi scăzute și umiditate excesivă a mediului de lucru.

După formă și densitate incluziunile și porii pot fi: izolați, aliniați, distribuiți și grupați.

Alte defecte tipice de proces la sudarea aluminiului și aliajelor sale, precum și cauzele acestora sunt centralizate în tabelul 16.

Micșorarea tendinței de formare a porilor utilizând arcul electric în impulsuri de curent poate fi explicată prin intercorelarea următoarelor influențe:

- prin reducerea lungimii arcului electric la sudarea în impulsuri se micșorează duratele de menținere a picăturii în domeniul fierbinte al arcului electric;
- condițiile de preluare a gazelor în baia metalică pot fi înrăutățite prin mărirea diametrului picăturii și prin reducerea suprafeței și a temperaturii picăturii de metal rezultate;
- se pot oferi condiții superioare degazării băii metalice prin vibrarea băii metalice în ritm cu frecvența impulsurilor.

Tabelul 16. Defectele și cauzele acestora (sudarea aluminiului și aliajelor sale)

Defecte sau perturbații	Cauze posibile
Arcul electric nu amorsează	Polaritate necorespunzătoare Circuit de sudare întrerupt Defecțiuni la dispozitivul de avans al sârmei
Lungimea arcului nu este constantă	Perturbații la dispozitivul de avans al sârmei Defecțiuni la diuza de contact Sârma electrod îndoită Pachet de cabluri îndoit prea tare
Electrodul înghețat în diuza de contact	Perturbații la dispozitivul de avans al sârmei Reglaj necorespunzător al echipamentului Răcire insuficientă a pistolului
Perturbații în sistemul gazos de protecție	Debit de gaz prea mic Diuză de mărime necorespunzătoare; deformată Turbulențe datorate impurităților din diuză Stropi de metal în diuză Diuza de contact excentrică față de diuza de gaz Distanța necorespunzătoare față de diuza de gaz Poziție necorespunzătoare a pistolului
Suprafața îmbinării sudate gri închis - neagră	Polaritate necorespunzătoare Perturbații în sistemul de protecție gazos Poziție necorespunzătoare a pistolului Lungime prea mare a arcului Impurități pe flancurile rostului sau pe sârmă Sistem de răcire cu apă a pistolului - neetanș Conducte de alimentare cu gaz neetanș
Pătrundere insuficientă	Forma greșită a rostului Curent de sudare prea scăzut Lungime prea mare a arcului Viteză de sudare prea mare
Arderi excesive	Rost de lățime prea mare Curent de sudare prea mare Lungime prea mică a arcului Viteză de sudare prea mică

10. Concluziile

- ◆ Prezentarea unor clasificări exhaustive a aliajelor de aluminiu durificabile, respectiv nedurificabile prin deformare plastică, precum și a criteriilor de sudabilitate ale principalelor materiale de adaos utilizate la sudarea pieselor laminate și/sau turnate, permite alegerea pertinentă a cuplurilor material de bază – material de adaos, funcție de domeniul de aplicație urmărit.

- ◆ Evidențierea amestecurilor de gaze protectoare industriale, inerte și active, a principalelor însușiri fizice ale acestora, oferă largi posibilități de stăpânire corectă a fenomenelor de instabilitate probabile în arcul electric.
- ◆ Cercetând problemele metalurgice la sudarea aluminiului și aliajelor de aluminiu, s-a insistat asupra condițiilor de apariție a fenomenului de fisurare la cald și de formare a porilor și incluziunilor. Impactul unei intervenții operative în proces este facilitată prin gruparea cauzelor posibile pe categorii de defecte și perturbații de maximă probabilitate.
- ◆ Analiza cuprinsă în capitol s-a soldat cu consecințe și în ce privește elaborarea programului experimental. Se menționează în context programul de cercetare a influenței acoperirii prin băițuire a suprafețelor active, precum și programul de evaluare calitativă și cantitativă a imperfecțiunilor și defectelor induse de procedeul de sudare MIG în impulsuri de curent.
- ◆ Conform așteptărilor, amestecul de gaz Ar50%+He50% conduce la obținerea unei adâncimi de pătrundere superioare și a unei lățimi mai mari la sudarea cu arc pulsant.
- ◆ În cazul utilizării amestecurilor de gaze Ar+CO₂ îmbinările sudate devin poroase, punctajul de porozitate plasându-le în clase de calitate inferioare.

CAPITOLUL IV

PROGRAMUL ȘI MIJLOACELE EXPERIMENTALE

Cuprinsul:

1. Elaborarea programului experimental
 - a. Determinarea influenței parametrilor de sudare asupra caracteristicilor de bază;
 - b. Determinarea influenței lungimii libere;
 - c. Analiza transferului de picături;
 - d. Stabilirea influenței procesului de curățare prin băițuire a materialului de bază asupra calității sudurii;
 - e. Analiza metalografică;
 - f. Examinarea radiografică.
2. Celula experimentală
3. Alegerea și caracterizarea aliajelor experimentate
4. Concluziile

1. Elaborarea programului experimental

Programul experimental a fost conceput astfel încât să învedereze atât aspectele legate de procesul de sudare cât și cele privind calitatea depunerilor de cordoane. El cuprinde un număr de 6 aspecte – subprograme.

a. Determinarea influenței parametrilor de sudare asupra caracteristicilor de bază: U_{ef} , I_{ef} , P_{ef} , P_p și P_G , la două grosimi investigate ale materialului de bază, tipice construcției de automobile, conform schemei din figura 1.

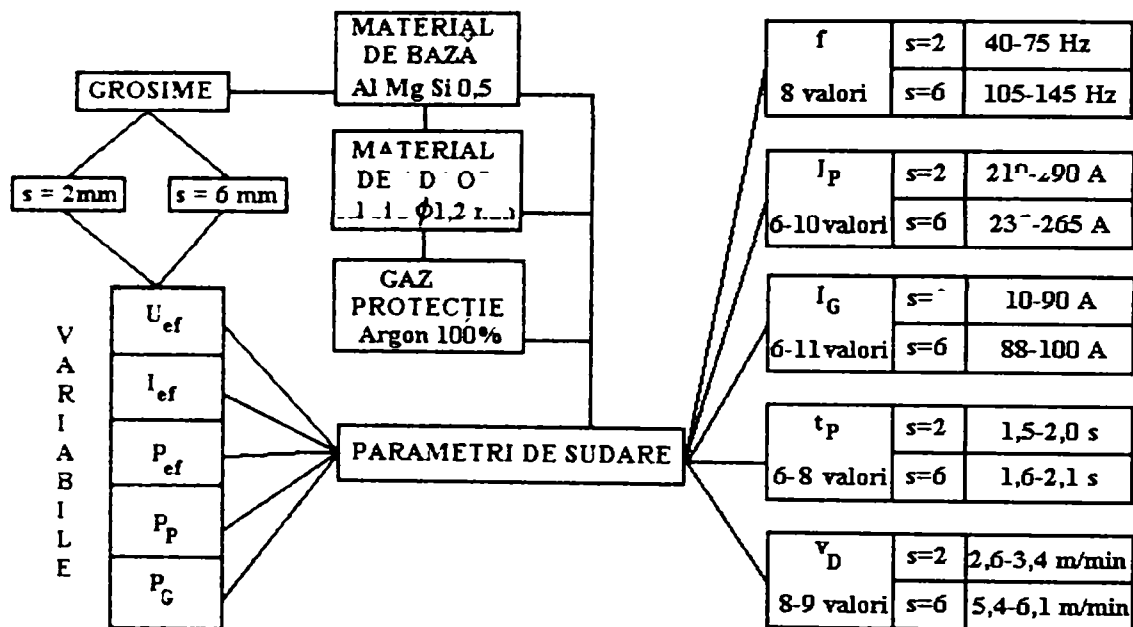


Figura 1.

Programul a urmărit stabilirea unui număr de 60 de dependențe între parametri de sudare și variabilele urmărite folosindu-se un număr de circa 400 măsurători. Limita inferioară de valori indicate la fiecare parametru de sudare corespunde determinărilor de la grosimea $s=6\text{ mm}$, iar limita superioară, la grosimea $s=2\text{ mm}$. Rezultatele obținute și interpretarea acestora fac obiectul capitolului V.

Programul experimental a fost realizat pe baza încercărilor experimentale realizate cu valorile parametrilor specifici prezentate în tabelul 1 pentru tabla de grosime 2 mm, respectiv în tabelul 2 pentru tabla de grosime 6 mm. Anexele 4.1, respectiv 4.2 prezintă formele tensiunii și curentului pentru seria de încercări experimentale la variația frecvenței. Celulele marcate în cele două tabele corespund valorilor stabilite ca fiind optime

Tabelul 1. Parametri de puls experimentați și valorile acestora (2mm)

Curentul de bază I_G [A]	Curentul de puls I_p [A]	Timpul de puls t_p [ms]	Viteza sârmei v_D [m/min]	Frecvența f [Hz]	I_{UP} [A/ms]	I_{DOWN} [A/ms]
5	210	1,3	2,6	40	100	100
10	220	1,4	2,7	45	200	200
15	230	1,5	2,8	50	300	300
20	238	1,6	2,9	55	400	400
25	240	1,7	3,0	60	500	500
30	250	1,8	3,1	65	600	600
35	260	1,9	3,2	70	700	700
40	270	2,0	3,3	75	800	800
	280		3,4		900	900
	290				999	999

Grosimea materialului: 2mm
 Natura materialului de bază: AlMgSi0,5
 Tipul materialului de adaos: AlSi5
 Viteza de sudare: 60 cm/min
 Lungimea liberă: 12+3=15 mm
 Natura gazului protector: Argon
 Debitul gazului protector: 18l/min

Nota: experimentările corespunzând coloanei f [Hz] sunt prezentate detaliat în Anexa 4.1

Tabelul 2. Parametri de puls experimentați și valorile acestora (6mm)

Curentul de bază I_G [A]	Curentul de puls I_p [A]	Timpul de puls t_p [ms]	Viteza sârmei v_D [m/min]	Frecvența f [Hz]
88	235	1,6	5,4	105
90	240	1,7	5,6	110
92	245	1,8	5,7	115
93	250	1,9	5,8	120
94	255	2,0	5,9	125
100	265	2,1	6,0	130
			6,1	135
				140
				145

Grosimea materialului: 6mm
 Natura materialului de bază: AlMgSi0,5
 Tipul materialului de adaos: AlSi5
 Viteza de sudare: 60 cm/min
 Lungimea liberă: 14+3=17 mm
 Natura gazului protector: Argon
 Debitul gazului protector: 18l/min

Nota: experimentările corespunzând coloanei f [Hz] sunt prezentate detaliat în Anexa 4.2

b. Determinarea influenței lungimii libere a sârmei electrod asupra formei și calității depunerii prin sudare, conform schemei din figura 2.

În Anexa 4.3 sunt prezentate variațiile tensiunii și curentului pentru grosimea tablei de 2mm și următorul șir de valori ale lungimii libere [mm]: 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 19, 21, 23 și 25 (valoare optimă determinată $L=13$ mm). Analog, în Anexa 4.4 sunt prezentate variațiile tensiunii și curentului pentru grosimea tablei

de 6mm și următorul șir de valori ale lungimii libere: 7, 9, 11, 13, 15, 17, 19, 21, 23 și 25 (valoare optimă determinată $L=17\text{mm}$).

Folosind un număr de 55 variante de sudare, programul stabilește un număr de 5 dependențe originale de rezoluție statistică între caracteristicile investigate. Rezultatele obținute și interpretarea acestora face obiectul capitolului VI.

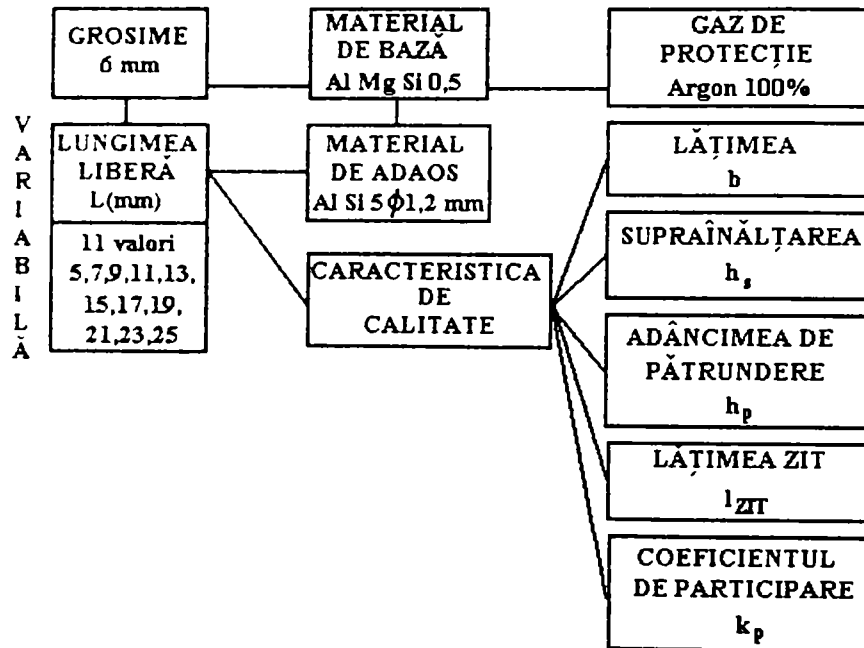


Figura 2.

În continuare se prezintă curbele de regresie pentru variația tensiunii funcție de lungimea liberă în cele două cazuri studiate (tablă de 2mm, respectiv de 6mm grosime).

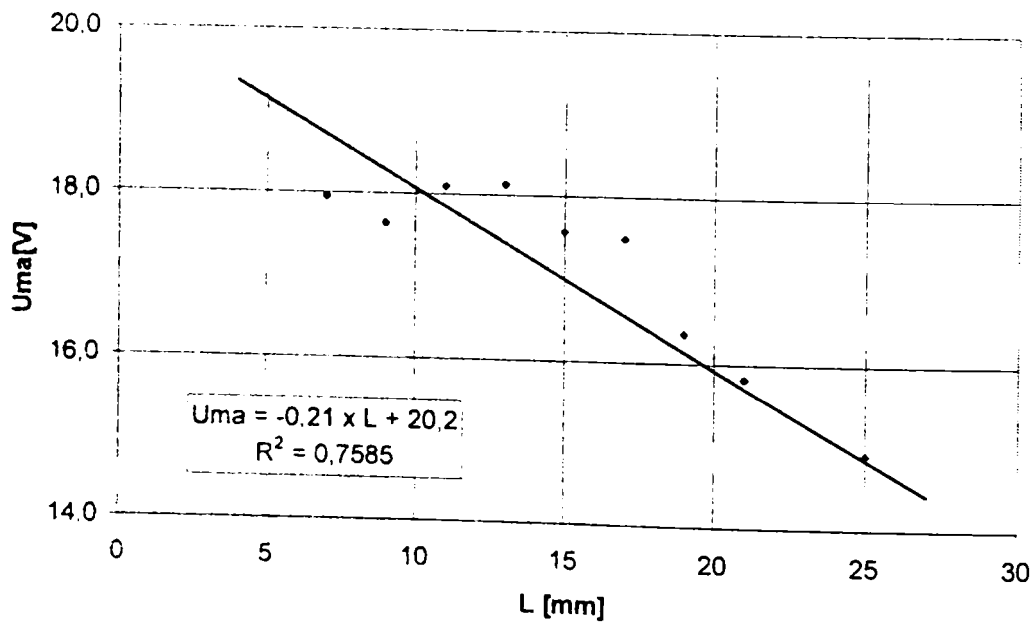


Figura 3. Variația tensiunii U_{ma} funcție de lungimea liberă L (tablă de 2mm)

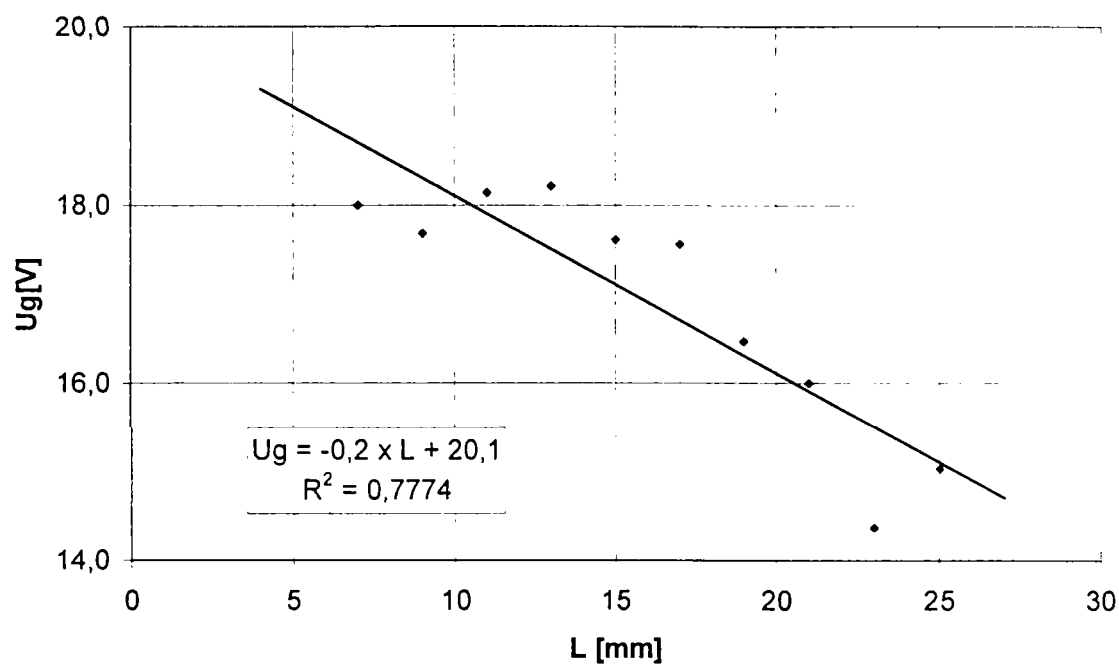


Figura 4. Variația tensiunii U_g funcție de lungimea liberă L (tablă de 2mm)

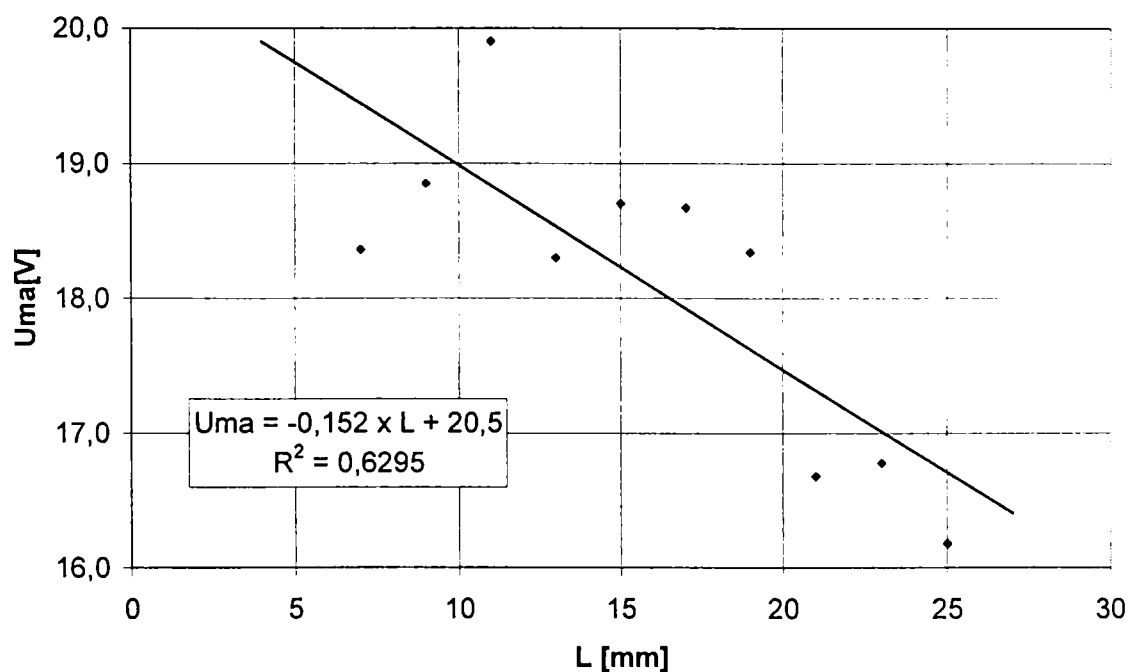


Figura 5. Variația tensiunii U_{ma} funcție de lungimea liberă L (tablă de 6mm)

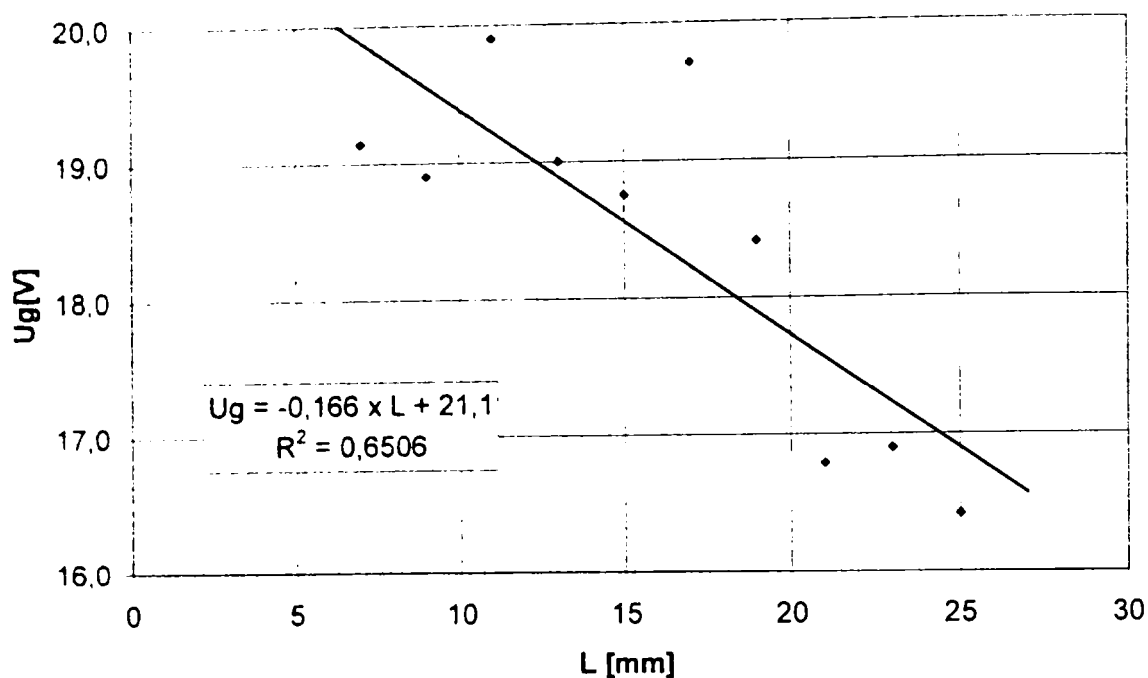


Figura 6. Variația tensiunii U_g funcție de lungimea liberă L (tablă de 6mm)

c. Analiza transferului de picături prin arcul electric și a momentului desprinderii, folosind înregistrări de diagrame $I=f(t)$ și $U=f(t)$, precum și filmarea rapidă a procesului de desprindere a picăturilor.

Filmarea rapidă s-a realizat cu următoarele viteze: 2250 imagini/s, 1125 imagini/s și 750 imagini/s, iar pentru display s-au folosit următoarele viteze: 8 imagini/s, 12 imagini/s și 4 imagini/s.

Condițiile în care s-a sudat au fost: $v_s=60\text{cm/min}$, $v_D=2,9$ și $5,7\text{m/min}$, $f=60$ și 120Hz , $I_G=25\text{A}$ și 90A , iar $I_p=238\div 290\text{A}$, variabil în trepte și $L=7\div 25$ mm, variabil de asemenea în trepte.

Rezultatele privind transferul masiv prin arcul electric format în condițiile de mai sus sunt prezentate în paragraful 10 al capitolului I.

d. Stabilirea influenței procedurii de curățare prin băițuire a materialului de bază asupra calității sudurii, s-a urmărit pe baza programului prezentat în figura 7.

Acoperirea prin băițuire s-a realizat cu o soluție de 10% acid azotic, la o temperatură de 70°C , durata de contact fiind de 2 minute. Spălarea s-a efectuat în H_2O + soluție apoasă 20% de acid azotic. După spălare plăcile experimentale au fost uscate în aer cald.

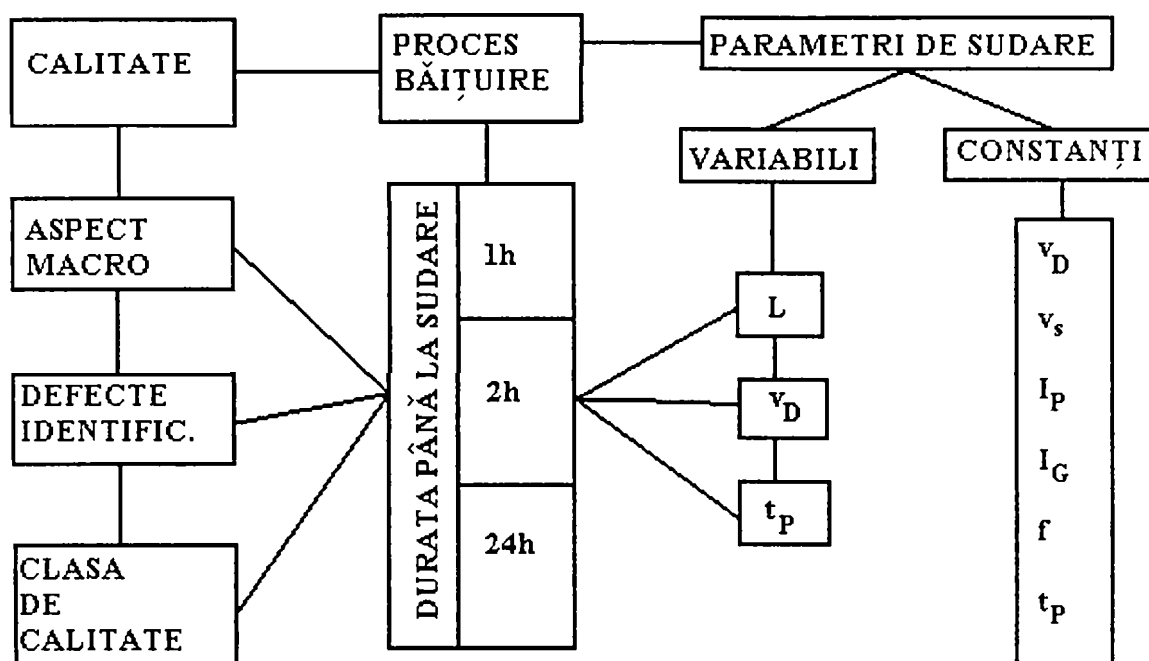


Figura 7.

Sudarea a succedat încheierii operației de băițuire și anume, după 1h, după 2h și după 24h. Protecția băii a fost asigurată în două variante și anume în Ar 100% și într-un amestec 50%Ar – 50%He.

Pentru sudare s-au folosit următorii parametri: $v_D=5,8$ m/min, $I_p=245A$, $t_p=1,8$ ms, $f=120Hz$, $I_G=98A$, $v_s=60cm/min$, urmărindu-se influența următoarelor variabile asupra ciclogramei procesului:

- lungimea liberă L;
- viteza de avans v_D ;
- timpul de puls t_p .

Cu toate că acest program a fost destul de larg, rezultatele, controversate de altfel și în literatura de specialitate [99][101], au fost pe departe de a fi considerate încurajatoare în ceea ce privește îmbunătățirea calității îmbinării. În această situație s-a și renunțat la prezentarea lor.

e. Analiza metalografică în secțiuni transversale și longitudinale ale depunerilor în trei zone investigate, conform schemei din figura 8.

Ca material experimental s-au folosit 12 probe metalografice, respectiv un număr de 60 determinări de duritate. Condițiile de analiză metalografică, rezultatele obținute și interpretarea lor formează obiectul paragrafului 3 din capitolul VI.

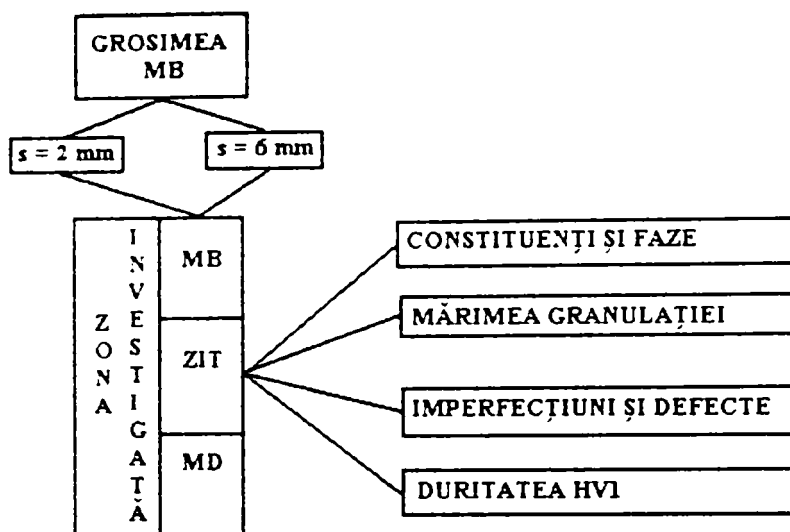


Figura 8.

f. **Examinarea radiografică** s-a realizat pentru un număr de 22 plăci cu depuneri de cordon la grosimea de 2 mm (12 plăci) și la grosimea de 6 mm (10 plăci). S-a urmărit determinarea naturii imperfecțiunilor-defectelor, a mărimii acestora și încadrarea acestora în clase de calitate. Condițiile de examinare radiografică, precum și rezultatele sunt prezentate în cadrul paragrafului 5 al capitolului VI.

2. Celula experimentală

Celula experimentală a fost realizată în întregime de autorul tezei în cadrul SLV-Fellbach, care a pus la dispoziție spațiul și condițiile de lucru. Ea se compune dintr-o sursă de sudare în impulsuri - 1, un dispozitiv de manipulare a sârmei tip push-pull - 2, un robot industrial cu 6 axe - 3, dulapul de comandă a acestuia - 4, căruciorul de poziționare - 5, interfața de măsurare - 6 condusă de calculator - 7, precum și tehnica de filmare rapidă (figura 9).

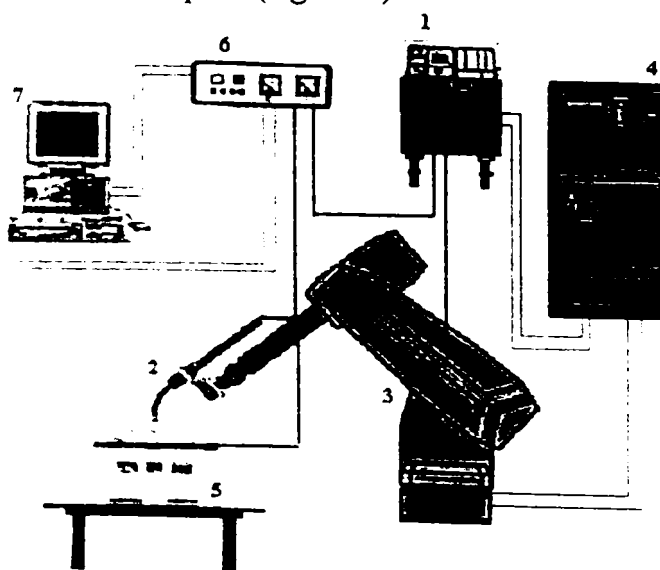


Figura 9.

Sursa de sudare în impulsuri a fost de tip sinergic, de 450A.

Dispozitivul de avans a sârmei electrod utilizat a fost cu 4 role de antrenare și istolet ush- ull răcit cu apă.

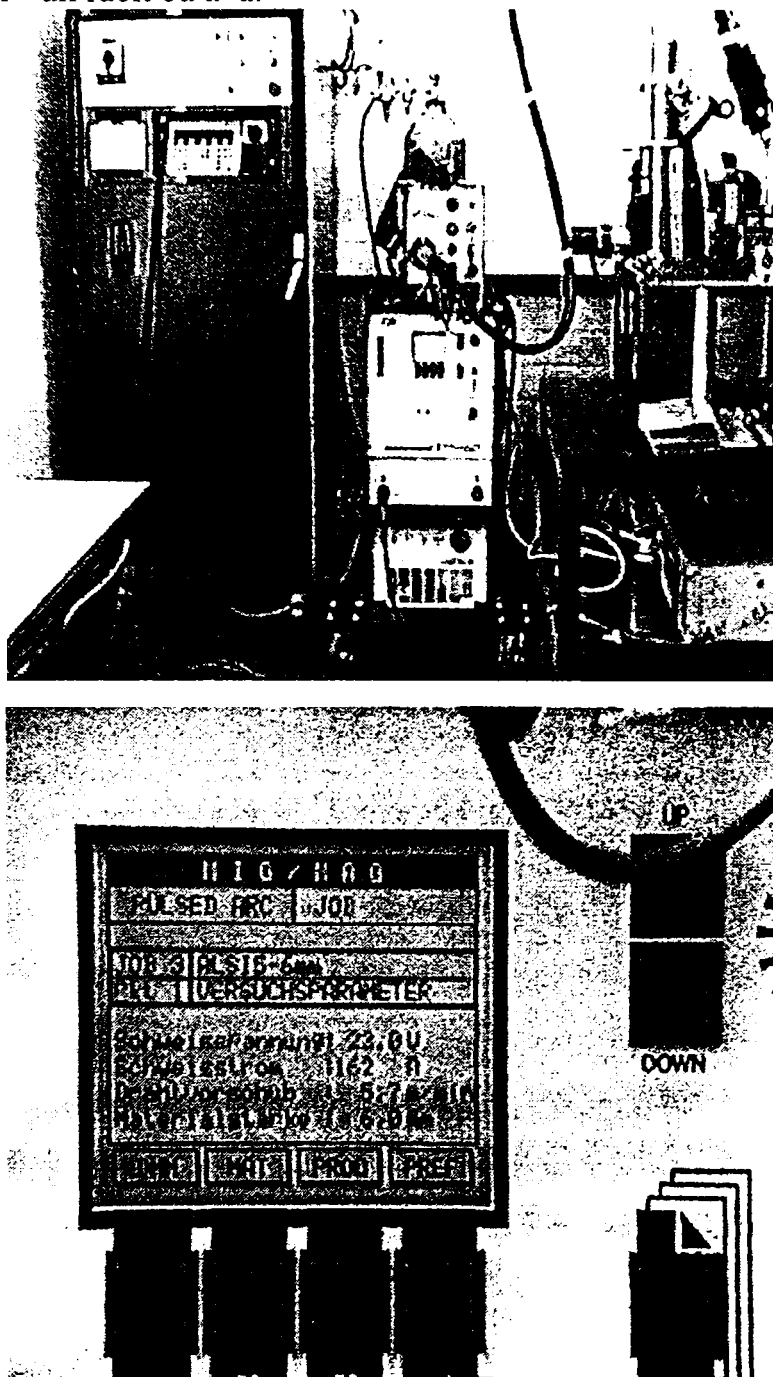


Figura 10. Sursa de sudare și dispozitivul de avans a sârmei electrod

Robotul utilizat a fost un robot industrial cu 6 axe a cărui acționare posedă 6 axe suplimentare pentru interpolare. Are posibilitatea să programeze independent parametrii de sudare, precum și diferite traiectorii specifice operației de sudare curente.

Comanda robotului este continuă, programabilă în sistemul teach-in.

Căruciorul de poziționare este condus de către robot prin folosirea a două programe de mișcare cu pistolul în poziție fixă: mișcarea pentru realizarea îmbinărilor continue lungi și mișcarea pentru realizarea îmbinărilor continue scurte.

Programele detaliate ale robotului pentru executarea îmbinărilor experimentale, respectiv pentru acționarea căruciorului sunt prezentate detaliat.

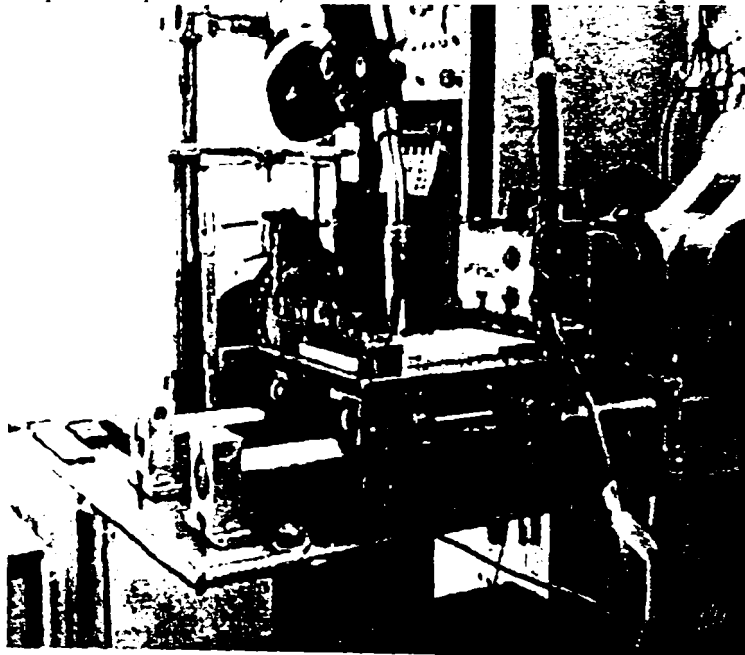


Figura 11. Căruciorul de poziționare

Interfața de măsurare transformă tensiunile de sudare și modifică curentul de sudare în semnale analogice de tensiune, pe care le redă apoi pentru prelucrare calculatorului.

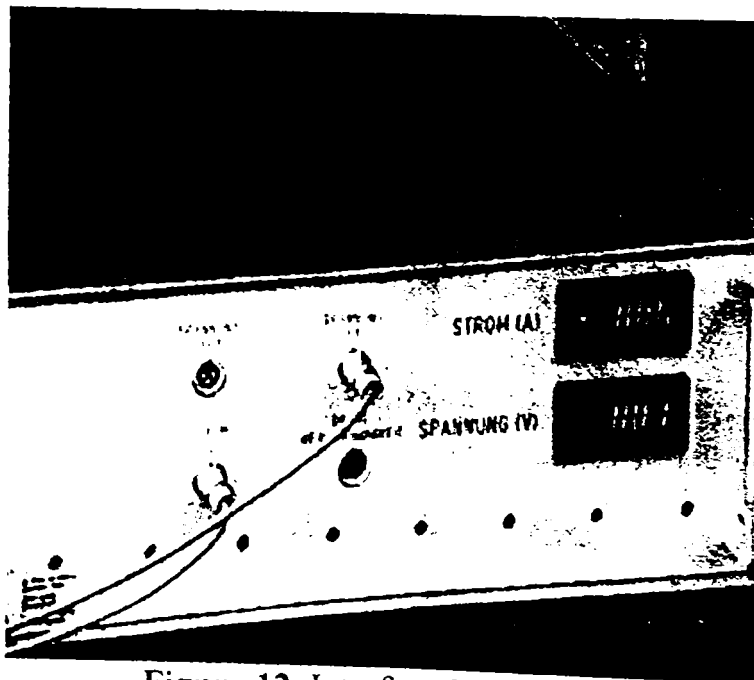


Figura 12. Interfața de măsurare

Calculatorul și software-ul. Ca software s-a utilizat un program specific de măsurare/culegere a datelor PC-Scope T512V2.4/1.1. Interfața de măsurare Scope T512 poate să prelucreze maximum 8 semnale analogice de tensiune într-un domeniu de potențial de la $\pm 62,5\text{mV}/125\text{mV}$ până la $\pm 62,5\text{V}/125\text{V}$, adică într-un display de 10^3 . În cadrul experimentărilor, interfața s-a folosit pe două canale pentru tensiune și pentru curent. Semnalele obținute de la interfața de măsurare au fost digitalizate în cartela Scope și livrate ca valori măsurate. Cu ajutorul software-ului specific, valorile măsurate au fost stocate și redată grafic sub formă de diagrame. Un experiment cuprinde 2048 puncte de măsurare, iar durata de prelucrare este funcție de frecvența de lucru. Durata minimă la frecvența de 2MHz este de 500 ms.

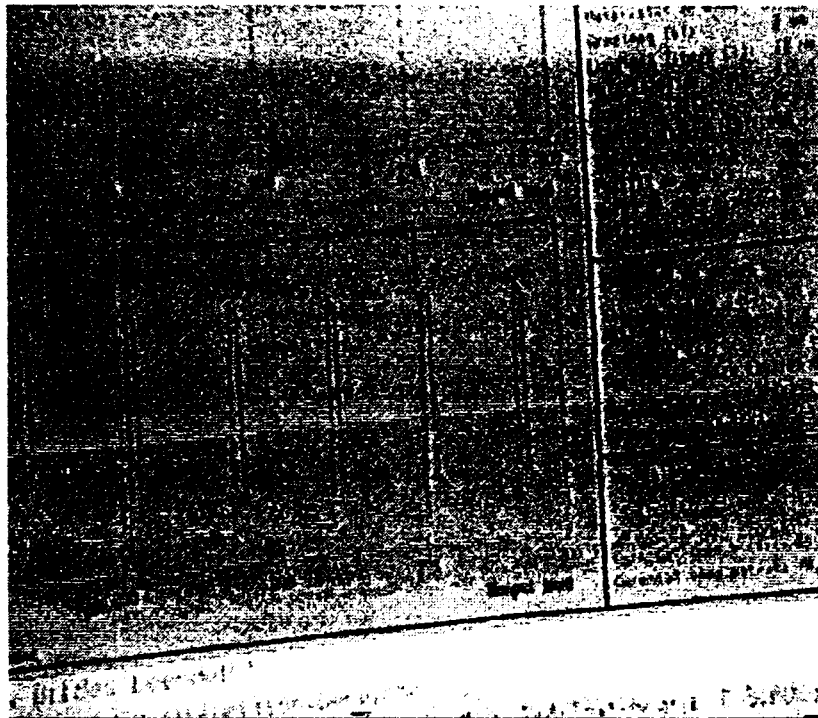


Figura 13. Imagini de pe display-ul calculatorului

Tehnica de filmare rapidă a cuprins videocamera Canonvision EX8 mm Video Camcorder. Suplimentar s-a folosit un obiectiv foto cu durata de închidere de $1/10000$ s, un filtru gri 8,4 și o postlentică 1,2. Pentru facilitarea filmării rapide în zona arcului puternic iluminat, fondul planului activ a fost de asemenea contrailuminat.

Programul robotului pentru efectuarea îmbinărilor longitudinale

10	$v=1000$ mm/s max 2500mm/s	- stabilirea vitezei de mișcare
20	TCP 2	- stabilirea punctului de centrare
30	KOORDV 0	- resetarea sistemului de coordonate
40	ROBOT KOORD	- selectarea coordonatelor robotului
50	WARTE BIS EING99=1	- instrucțiune de așteptare

60	POS V=100%	- poziție în zona de lucru – apropiere
70	POS V=100%	- punctul de începere a sudurii
80	v=10 mm/s max 2500 mm/s	- stabilirea vitezei de sudare (deplasare braț)
90	KARTES KOORD	- selectarea coordonatelor robotului
100	WARTE 0,5 s	- instrucțiune de așteptare
110	PULS AUSG1	- cuplarea sursei de sudare în impulsuri
120	WARTE 0,1 s	- instrucțiune de așteptare
130	POS V=100%	- punctul de sfârșit al îmbinării
140	PULS AUSG1	- decuplarea sursei de sudare în impulsuri
150	WARTE 0,5 s	- instrucțiune de așteptare
160	ROBOT KOORD	- selectarea coordonatelor robotului
170	v=1000 mm/s max 2500mm/s	- stabilirea vitezei de mișcare
180	POS V=100%	- revenire în poziția de așteptare
190	RETURN	- instrucțiune de încheiere a programului

Programul robotului pentru mișcarea căruciorului (pistolet în poziție fixă), îmbinări continue, lungi

10	v=1000 mm/s max 2500mm/s	
20	TCP 2	
30	KOORDV 0	
40	ROBOT KOORD	
50	POS V=100%	- conectarea căruciorului la sistemul articulat
60	KARTES KOORD	
70	v=10 mm/s max 2500mm/s	
80	WARTE BIS EING99=1	
90	POS V=100%	- punctul de începere a îmbinării sudate
100	WARTE 0,5 s	
110	PULS AUSG1	
120	WARTE 0,1 s	
130	POS V=100%	- punctul de încheiere a cordonului
140	PULS AUSG1	
150	WARTE 0,5 s	
160	POS V=100%	
180	RETURN	

Programul robotului pentru mișcarea căruciorului (pistolet în poziție fixă), îmbinări continue, scurte

10	v=1000 mm/s max 2500mm/s
----	--------------------------

20	TCP 2	
30	KOORDV 0	
40	ROBOT KOORD	
50	POS V=100%	- conectarea căruciorului la sistemul articulat
61	KARTES KOORD	
70	v=10 mm/s max 2500mm/s	
80	WARTE BIS EING99=1	
90	POS V=100%	- punctul de începere a îmbinării sudate
100	WARTE 0,5 s	
110	PULS AUSG1	
120	WARTE 0,1 s	
130	POS V=100%	- punctul de încheiere a cordonului I
140	PULS AUSG1	
150	WARTE 0,5 s	
160	WARTE BIS EING99=1	
170	POS V=100%	- punctul de începere a cordonului II
180	PULS AUSG1	
190	WARTE 0,1 s	
200	POS V=100%	- punctul de încheiere a cordonului II
210	PULS AUSG1	
220	WARTE 0,5 s	
230	POS V=100%	- punctul inițial de plecare (revenire)
240	RETURN	

Oscilogramele $I=f(t)$; $U=f(t)$ au fost înregistrate on-line manual și automat cu ajutorul unui osciloscop digital cu memorie de tip Hameg, HM205-3, pentru cuplarea DC având display-ul de frecvență în limitele 0-10MHz. Osciloscopul a fost cuplat cu un înregistrator în coordonate X-Y de tip HD148, având posibilitatea de amplificare pe direcția Y de 5x, $1\text{mV/cm}\pm 5\%$, iar pe direcția X de 10x, $1\mu\text{s/cm}\pm 5\%$. Pentru analiză și reglare, aparatul permite realizarea de stop-cadru și reluarea cu decalaje de timp din urmă.

Curentul de sudare (I) este măsurat între polul (-) al sursei de sudare și piesă (legată la masă). Cele două cabluri de măsurare sunt legate la o interfață de măsurare ce conține un modul LEM. Aceasta transformă curentul într-o tensiune relativ mică ce poate fi măsurată de placa de măsurare a calculatorului și realizează în același timp protecția galvanică.

Tensiunea (U) este măsurată între capătul pistolului de sudare și piesă (legată la masă). Cele două fire de măsurare sunt legate la aceeași interfață de măsurare.

Din interfața de măsurare, firele de măsurare a tensiunii sunt legate la niște octocuploare – care realizează protecția galvanică – protejând astfel calculatorul de eventuale supratensiuni.

Cele două tensiuni de măsurare (provenite de la culegerea U și I) sunt trecute printr-un cuplor analog-digital care realizează transformarea mărimilor măsurate (analogice) în mărimi digitale (ce pot fi prelucrate de către calculator).

3. Alegerea și caracterizarea aliajelor experimentate

Materialele folosite în cursul experimentării parametrilor de sudare au fost cele preconizate la realizarea caroseriei de automobil Audi A4 și anume cuplul AlMgSi0,5 (3.3206) ca material de bază și AlSi5(3.2245) ca material de adaos.

Compoziția materialului de bază, caracteristicile fizice și caracteristicile mecanice sunt prezentate în tabelele 3-5. Principalele proprietăți ale acestuia pot fi enunțate după cum urmează:

- este un material cu rezistență și limită de curgere pentru majoritatea aplicațiilor și prezintă și o rezistență chimică bună;
- asigură o bună prelucrabilitate prin extrudare, motiv pentru care este destinat confecționării profilelor de secțiune complexă;
- după călire, limita de curgere rămâne scăzută ceea ce îl face ușor de calibrat sau îndreptat;
- are un grad superior de pretabilitate la procedeele de sudare mecanizate MIG și WIG;
- prin sudare, rezistența la rupere scade, dar poate fi din nou ecruisat.

Tabelul 3. Compoziția chimică în % de masă (greutate %), restul Al

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Alte elemente	
0,30-0,60	0,10-0,30	0,10	0,10	0,35-0,6	0,05	0,15	0,10	0,05	0,15

Tabelul 4. Caracteristicile fizice

Densitatea (Greutatea specifică) [g/cm ³]	Intervalul de solidificare [°C]	Conductibi- litatea termică [m/Ω·mm ²]	Conductivi- tatea termică [W/m·K]	Dilatația termică [10 ⁻⁶ /K]	Modulul de elasticitate [N/mm ²]
2,70	585-650	38-34	200-220	23,4	≈70000

Tabelul 5. Caracteristicile mecanice

Tipul semifabri- catului	Starea	Grosimea [mm]	Rezistența la rupere R _m [N/mm ²]	Limita de curgere R _{p0,2} [N/mm ²]	Alungirea la rupere A5 [%]	Duritatea [HB]
Profil DIN 1748 Partea I	F13	oricare	130	65	15	45
	F22	oricare	215	160	12	70
	F25	≤10	245	195	10	75

Marca de sârmă electrod a fost aleasă pe baza criteriului gradului de pretabilitate la sudura în medii de gaze protectoare inerte a aliajului AlMgSi0,5. Compoziția chimică a aliajului AlSi5 de tip 3.2245 este prezentată în tabelul 6

capitolul III. După cum rezultă și din tabelul 8 capitolul III, de recomandare a modului de alegere a cuplului metal de bază – metal de adaos, la aliajul de AlMgSi0,5 ca material de bază, prioritatea numărul unu o deține sârma de marcă AlSi5 (tabelul 6).

Tabelul 6. Alegerea cuplului material de adaos - material de bază în cazul sudării aliajelor de aluminiu

Materialul A								
Al99,9 Al99,8 Al99,7	Al99,8							
Al99,5 Al99	Al99,5 Al99,5Ti	Al99,5 Al99,5Ti						
AlMn	Al99,5Ti AlMn	Al99,5Ti AlMn	AlMn AlSi5					
AlMg1 AlMg2Mn0,3 AlMg3	AlMg5 ¹⁾	AlMg5 ¹⁾	AlMg5 ¹⁾	AlMg3 AlMg5				
AlMg4,5Mn AlMg5	AlMg5 ¹⁾	AlMg5 ¹⁾	AlMg5 ¹⁾	AlMg5 AlMg4,5Mn	AlMg5 AlMg4,5Mn			
AlMg2Mn0,8	AlMg5 ¹⁾	AlMg5 ¹⁾	AlMg5 ¹⁾	AlMg3 AlMg5 AlMg4,5Mn	AlMg5 AlMg4,5Mn	AlMg4,5Mn AlMg5 AlMg3		
AlMgSi0,5 AlMgSi1 AlMgSi0,7	AlSi5	AlSi5	AlSi5	AlMg3 AlMg5	AlMg5 AlMg4,5Mn	AlMg5 AlMg4,5Mn	AlSi5 AlMg3 AlMg5	
AlZn4,5Mn1	AlSi5	AlSi5	AlSi5	AlMg4,5Mn AlMg5	AlMg4,5Mn AlMg5	AlMg4,5Mn AlMg5	AlMg4,5Mn AlSi5 AlMg5	AlMg4,5Mn AlMg5
Materialul B	Al99,9 Al99,8 Al99,7	Al99,5 Al99	AlMn	AlMg1 AlMg2 AlMg3	AlMg4,5Mn AlMg5	AlMg2Mn0,8	AlMgSi0,5 AlMgSi1 AlMgSi0,7	AlZn4,5Mg1

1) nu se recomandă, posibilă sudarea WIG cu material de adaos

Diametrul sârmei electrod a fost ales ca fiind $\phi 1,2$ mm pentru a satisface, pe de o parte, condițiile de deformare strict limitate în industria de automobile ca urmare a cerințelor estetice, iar pe de altă parte datorită necesității de a asigura o rată de depunere suficientă pentru o bună productivitate a procesului de sudare aplicat.

4. Concluziile

- ◆ În vederea analizării procesului de sudare MIG în impulsuri de curent la aliaje de aluminiu, autorul a elaborat un program experimental complex, urmărind pe de o parte corelarea parametrilor de reglaj cu cei integratori de proces, iar pe de

altă parte, investigarea cantitativă a principalilor parametri calimetrice ai sudurii;

- ◆ Investigațiile s-au bazat pe utilizarea unei celule experimentale realizate de autor la SLV-Fellbach, condusă de un robot, o sursă de sudare în impulsuri de curent sinergică, interfața de măsurare cuplată la calculator cu cartela de măsurare Scope T512 având capacitatea de prelucrare concomitentă a 8 semnale analogice. În scopul urmării în timp real a procesului de sudare, în special a transferului masic prin arcul electric, s-a folosit o instalație de filmare rapidă condusă de o videocameră Canonvision Ex8.
- ◆ Mărcile de aliaje experimentate au fost alese în conformitate cu prevederile proiectului caroseriei automobilului Audi A4, folosindu-se două variante de grosimi: 2 mm, corespunzătoare grosimii tablei de caroserie, și 6 mm, corespunzătoare grosimii profilelor structurii de rezistență a caroseriei.
- ◆ În cadrul programului experimental redat de figura 2, s-au analizat 55 de variante de sudare în urma cărora s-au stabilit un număr de 4 corelații statistice între media geometrică și cea aritmetică a tensiunii față de lungimea liberă a sârmei electrod. Ele sunt descrise de funcții liniar-descrescătoare în intervalul cercetat și relevă o bună consistență statistică, coeficientul de intensitate al corelațiilor indicând valori cuprinse între 0.63 și 0.77.

CAPITOLUL V

ANALIZA STATISTICĂ A INFLUENȚEI PARAMETRILOR DE SUDARE

Cuprinsul:

1. Scopul și sursele datelor experimentale
2. Programul pentru calculul automat al parametrilor de sudare
3. Influența parametrilor de sudare asupra tensiunii efective U_{ef}
 - Analiza statistică la grosimile de 2 și 6 mm
 - Funcțiile de dependență simultană
4. Influența parametrilor de sudare asupra curentului efectiv I_{ef}
 - Analiza statistică la grosimile de 2 și 6 mm
 - Funcțiile de dependență simultană
5. Influența parametrilor de sudare asupra puterii efective P_{ef}
 - Analiza statistică la grosimile de 2 și 6 mm
 - Funcțiile de dependență simultană
6. Influența parametrilor de sudare asupra puterii de bază P_G
 - Analiza statistică la grosimile de 2 și 6 mm
 - Funcțiile de dependență simultană
7. Influența parametrilor de sudare asupra puterii de puls P_p
 - Analiza statistică la grosimile de 2 și 6 mm
 - Funcțiile de dependență simultană
8. Concluziile

1. Scopul și sursele datelor experimentale

În acest capitol sunt prezentate rezultatele analizei statistice asupra datelor obținute în urma aplicării programului experimental de investigare a influenței factorilor de proces. Tabelele 1 și 2 cuprind valorile numerice ale parametrilor de sudare măsurate în cursul experimentărilor efectuate prin depunere de cordoane sudate la table de aluminiu de grosime 2mm, respectiv 6mm.

S-au luat în considerație dependențele tensiunii efective U_{ef} , a curentului efectiv I_{ef} , a puterii efective P_{ef} , a puterii de bază P_G și a puterii de puls P_p de următorii parametri ai procesului de sudare (parametri de reglaj):

- frecvența f ;
- intensitatea curentului de puls I_p ;
- intensitatea curentului de declanșare I_T ;
- intensitatea curentului de bază I_G ;
- durata pulsului de curent t_p ;
- viteza de avans a sârmei electrod v_D .

S-au obținut astfel în total 50 de corelații statistice monoparametrice, câte 25 la fiecare grosime, precum și 10 corelații multiparametrice, câte 5 pentru fiecare grosime.

Analiza statistică asupra influenței multiparametrice a folosit funcția de tip:

$$y = a_0 + a_1 \cdot v_D + a_2 \cdot t_p + a_3 \cdot I_T + a_4 \cdot I_p + a_5 \cdot f \quad (0)$$

pe baza unui program de calcul elaborat în MS Visual Basic.

Valorile parametrilor funcției au fost calculate pentru un grad de încredere de 95%. Numărul de valori introduse a fost de 46, iar numărul iterațiilor de 50.

S-au calculat valorile medii, dispersia, abaterea medie pătratică, variabila Student, intervalul de confidență pentru probabilitatea de 95%, valoarea celei mai bune estimări, eroarea de estimare, coeficientul de intensitate a corelației.

Tabelul 1. Parametrii la sudarea tablelor de aluminiu AlMgSi0,5 cu grosimea de 2 mm

Viteza sârmei	Timpul de puls	Curentul de declanșare	Curentul de puls	Frecvența pulsurilor	Tensiunea efectivă	Curentul efectiv	Puterea efectivă	Puterea de bază	Puterea de puls
v_D [m/min]	t_p [ms]	I_T [A]	I_P [A]	f [Hz]	U_{ef} [W]	I_{ef} [A]	P_{ef} [W]	P_G [W]	P_P [W]
2.9	1.5	78	238	40	14.52	54.80	816.11	423.68	4478.28
2.9	1.5	78	238	45	16.08	52.06	864.83	450.08	4717.25
2.9	1.5	78	238	50	14.32	54.95	824.95	397.88	4421.63
2.9	1.5	78	238	55	15.79	56.36	922.26	458.78	4604.33
2.9	1.5	78	238	60	18.13	57.64	1133.18	515.33	5135.00
2.9	1.5	78	238	65	17.67	59.58	1130.10	493.58	5239.43
2.9	1.5	78	238	70	18.69	61.88	1256.77	532.78	5713.58
2.9	1.5	78	210	60	17.29	54.93	1011.06	465.38	4182.33
2.9	1.5	78	220	60	17.27	55.85	1017.57	489.08	4506.23
2.9	1.5	78	230	60	17.76	56.73	1079.65	508.83	5208.33
2.9	1.5	78	240	60	17.70	57.23	1083.84	489.08	5256.73
2.9	1.5	78	250	60	18.03	57.39	1122.61	489.08	5801.83
2.9	1.5	78	260	60	19.24	58.27	1233.39	524.63	6544.43
2.9	1.5	78	270	60	19.07	59.16	1261.94	516.73	6974.98
2.9	1.5	78	280	60	19.55	60.96	1323.34	532.53	7310.73
2.9	1.5	78	290	60	19.18	62.01	1330.51	520.53	7342.38
2.9	1.5	3	238	60	15.61	55.20	923.25	441.68	4439.08
2.9	1.5	10	238	60	15.28	55.62	906.03	435.98	4489.93
2.9	1.5	20	238	60	15.47	56.67	935.29	437.73	4640.53
2.9	1.5	30	238	60	15.58	56.21	935.68	453.53	4711.63
2.9	1.5	40	238	60	15.52	56.13	921.36	469.33	4723.48
2.9	1.5	50	238	60	15.69	57.62	955.35	477.23	4620.73
2.9	1.5	60	238	60	15.73	58.57	959.15	489.08	4711.63
2.9	1.5	70	238	60	16.23	57.61	978.46	489.08	4652.33
2.9	1.5	78	238	60	17.14	58.10	1056.43	500.93	5051.33
2.9	1.5	80	238	60	17.14	58.10	1056.43	500.93	5051.33
2.9	1.5	90	238	60	17.79	60.34	1148.42	520.68	5315.98
2.9	1.3	78	238	60	16.05	56.6	944.21	485.13	4691.88
2.9	1.4	78	238	60	17.42	55.96	1025.46	504.88	4913.08
2.9	1.5	78	238	60	18.13	57.64	1133.18	516.73	5134.28
2.9	1.6	78	238	60	17.88	58.51	1117.60	500.93	5205.38
2.9	1.7	78	238	60	18.02	59.01	1145.49	508.83	5308.08
2.9	1.8	78	238	60	19.20	61.03	1275.53	532.53	5793.93
2.6	1.5	78	238	60	19.87	57.13	1247.68	524.63	6161.33
2.7	1.5	78	238	60	19.17	56.93	1187.71	524.63	5793.93
2.8	1.5	78	238	60	17.53	57.30	1076.94	486.65	5260.25
2.9	1.5	78	238	60	18.13	57.64	1133.18	516.73	5434.48
3	1.5	78	238	60	16.36	57.82	987.26	489.08	4695.83
3.1	1.5	78	238	60	15.77	59.05	968.47	481.18	4612.88
3.2	1.5	78	238	60	15.31	62.60	998.16	473.28	4581.28
3.3	1.5	78	238	60	15.22	62.08	978.37	477.23	4340.33
3.4	1.5	78	238	60	14.75	64.20	980.49	499.58	4462.28

Tabelul 2. Parametrii la sudarea tablelor de aluminiu AlMgSi0,5
cu grosimea de 6 mm

Viteza sârmei	Timpul de puls	Curentul de bază	Curentul de puls	Frecvența pulsurilor	Tensiunea efectivă	Curentul efectiv	Puterea efectivă	Puterea de bază	Puterea de puls
v_D [m/min]	t_p [ms]	I_T [A]	I_P [A]	f [Hz]	U_{ef} [W]	I_{ef} [A]	P_{ef} [W]	P_G [W]	P_P [W]
5.7	1.8	88	245	120	17.96	122.18	2278.34	1484.475	5339.68
5.7	1.8	90	245	120	19.68	123.77	2535.01	1662.225	5801.83
5.7	1.8	92	245	120	19.32	125.20	2518.01	1662.200	5766.28
5.7	1.8	93	245	120	20.91	125.82	2737.28	1764.925	6129.68
5.7	1.8	94	245	120	20.06	126.58	2637.39	1764.925	5849.23
5.7	1.8	100	245	120	24.17	131.27	3286.16	2207.325	6876.23
5.7	1.8	92	235	120	17.06	122.76	2124.80	1543.725	4573.38
5.7	1.8	92	240	120	17.29	123.45	2184.96	1531.875	4561.53
5.7	1.8	92	245	120	19.14	124.36	2469.95	1662.200	5485.83
5.7	1.8	92	250	120	21.16	125.24	2759.89	1829.175	6248.18
5.7	1.8	92	255	120	22.00	126.15	2897.43	1863.675	6595.78
5.7	1.8	92	265	120	22.51	128.41	3026.28	1911.075	7002.63
5.7	1.6	92	245	120	17.73	120.69	2184.27	1579.280	4751.13
5.7	1.7	92	245	120	17.08	123.01	2139.95	1555.580	4751.13
5.7	1.8	92	245	120	18.62	124.37	2399.16	1626.680	5343.63
5.7	1.9	92	245	120	22.16	126.24	2912.53	1918.980	6196.83
5.7	2.0	92	245	120	21.66	128.00	2890.60	1824.180	6113.88
5.7	2.1	92	245	120	24.29	129.48	3280.24	2069.080	6813.03
5.7	1.8	92	245	105	17.65	120.56	2163.23	1689.875	4762.93
5.7	1.8	92	245	110	17.09	121.37	2112.97	1614.825	4798.53
5.7	1.8	92	245	115	18.55	122.48	2321.83	1741.200	4940.72
5.7	1.8	92	245	120	20.13	122.57	2538.79	1930.825	5699.13
5.7	1.8	92	245	125	20.39	123.90	2612.62	1887.375	5770.23
5.7	1.8	92	245	130	20.51	125.45	2659.79	1879.475	5853.18
5.7	1.8	92	245	135	21.12	126.56	2761.06	1954.525	5817.63
5.7	1.8	92	245	140	23.16	127.28	3055.07	2116.475	6587.88
5.7	1.8	92	245	145	23.05	128.43	3070.03	2096.725	6445.68
5.4	1.8	92	245	120	22.97	121.57	2881.81	2104.625	6481.23
5.5	1.8	92	245	120	22.50	121.71	2822.24	2096.725	6386.43
5.6	1.8	92	245	120	22.66	121.71	2843.04	2096.700	6339.03
5.7	1.8	92	245	120	21.41	121.60	2686.17	1974.275	6042.78
5.8	1.8	92	245	120	22.01	122.34	2771.12	2049.325	6208.68
5.9	1.8	92	245	120	19.91	122.91	2520.15	1832.075	5782.08
6.0	1.8	92	245	120	18.03	123.65	2286.08	1689.875	4845.93
6.1	1.8	92	245	120	16.25	126.17	2077.90	1638.525	4616.83

2. Programul pentru calculul automat al parametrilor de sudare în funcție de valoarea parametrilor de reglaj

În vederea calculării rapide a parametrilor de sudare în funcție de parametrii de reglaj, s-a realizat un program de calcul în MS Visual Basic. Sursa acestui program este prezentată în anexă.

În figura 1 este prezentat un exemplu din timpul funcționării programului. Acesta are o singură fereastră-interfață și poate fi eventual inclus într-un sistem informatic mai complex.

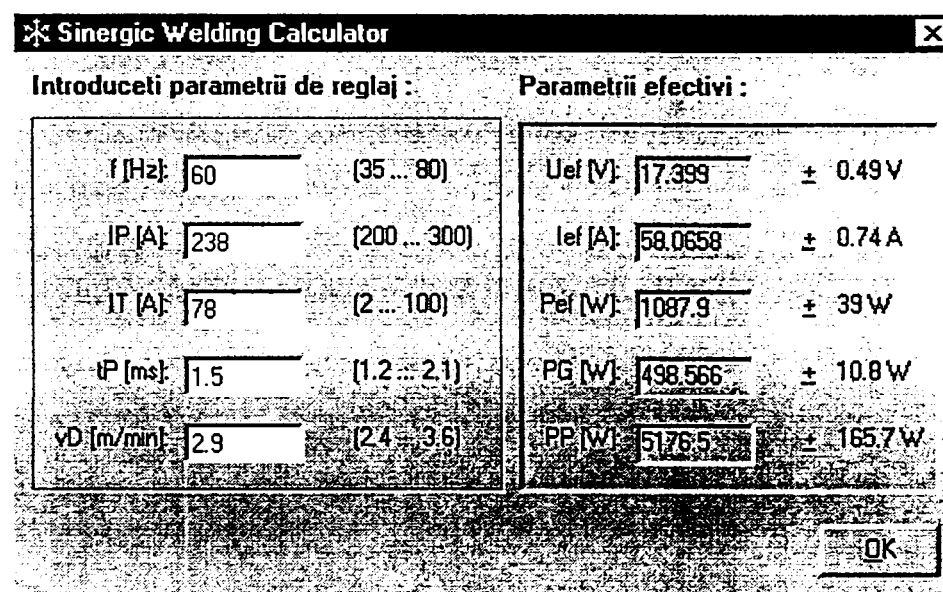


Figura 1. Vedere din programul de calcul automat

Așa cum se poate observa, programul sugerează pentru fiecare dintre parametri intervalul de valori numerice pentru care au fost calculate ecuațiile de regresie. Depășirea limitelor acestui interval duce la rezultate necontrolate și deci nu este recomandată.

Valorile calculate ale parametrilor efectivi sunt afectate de erori statistice inerente. Așa cum se poate observa, acestea au fost menționate lângă valorile calculate. Aceste valori reprezintă abaterea absolută medie a valorilor calculate cu ajutorul ecuațiilor de regresie față de valorile experimentale.

3. Influența parametrilor de sudare asupra tensiunii efective (U_{ef})

În prima etapă a analizei statistice s-au determinat funcțiile de regresie individuale pentru fiecare dintre parametri de sudare considerați. În figurile 2-6 sunt prezentate grafic aceste influențe.

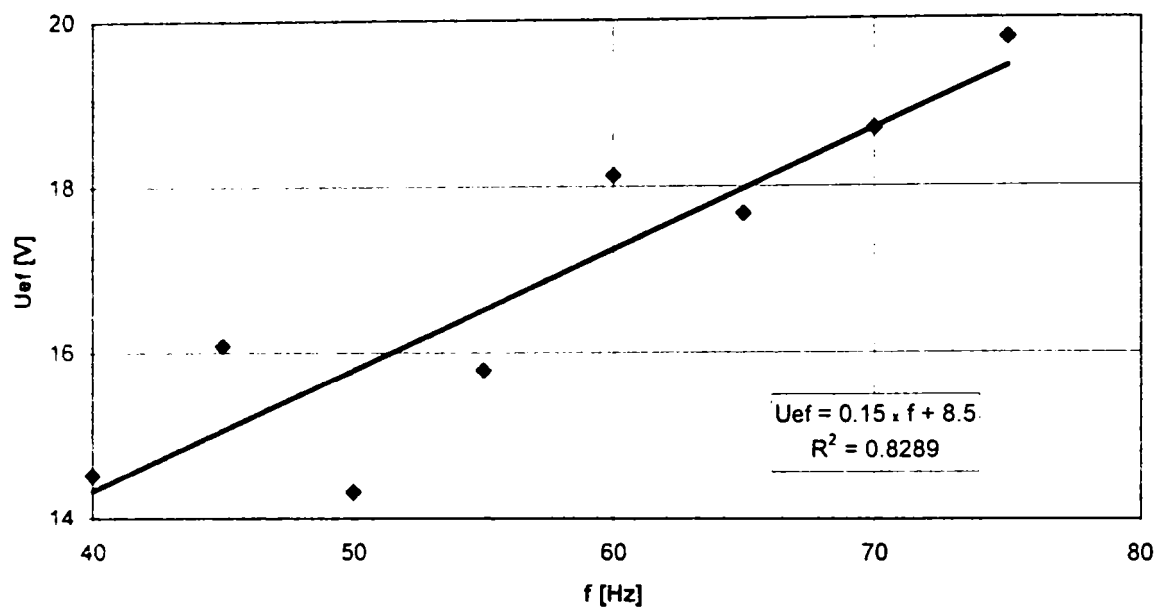


Figura 2a. Influența frecvenței asupra tensiunii efective (gros. 2 mm)

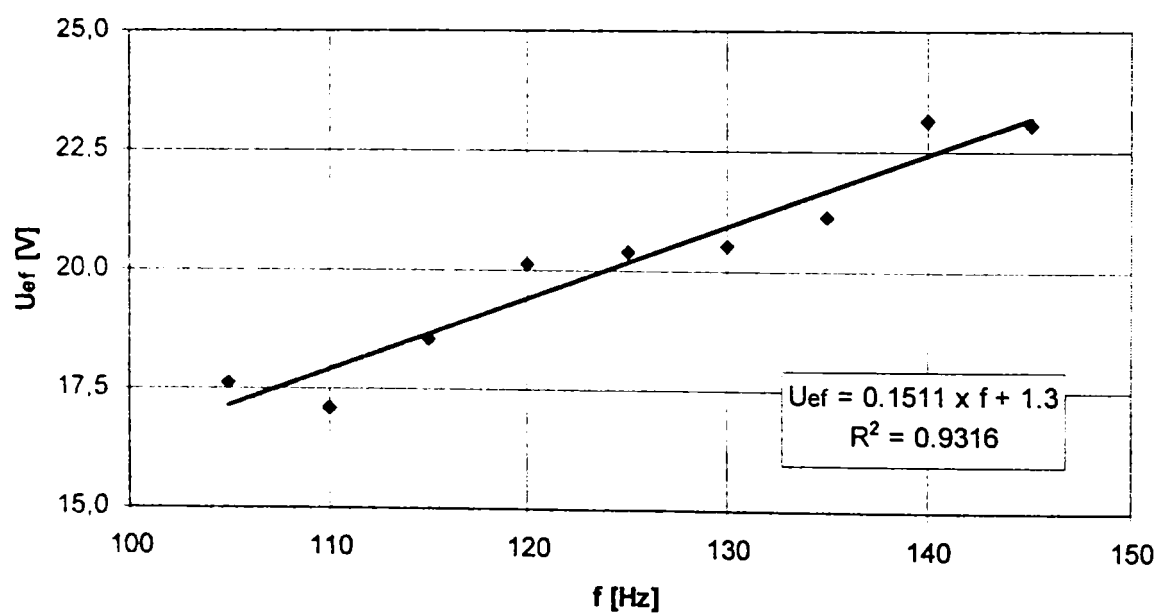


Figura 2b. Influența frecvenței asupra tensiunii efective (gros. 6 mm)

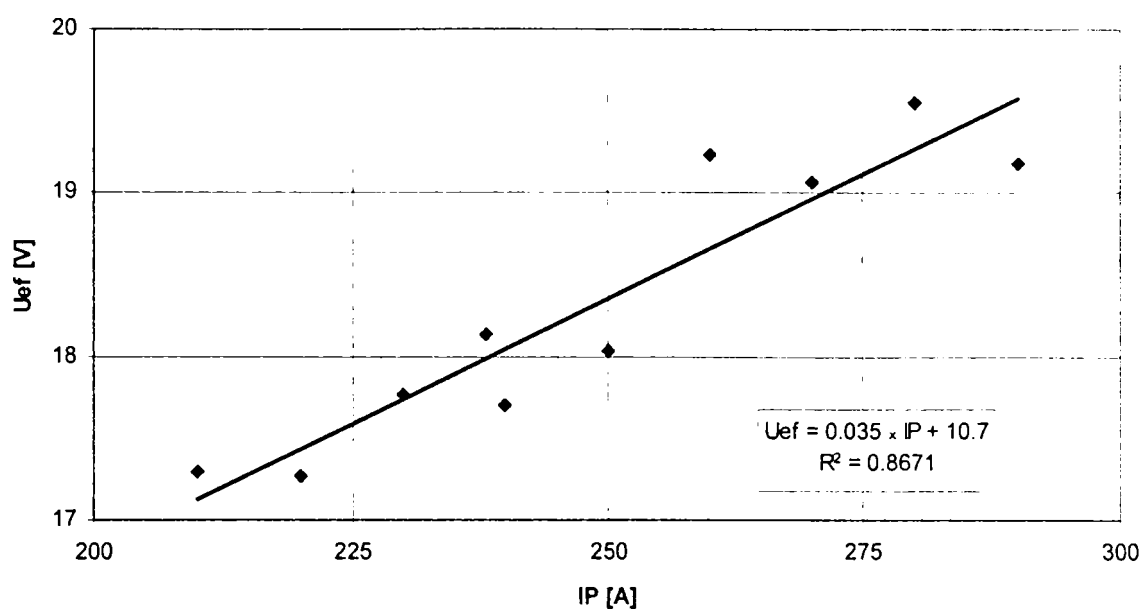


Figura 3a. Influența curentului de puls asupra tensiunii efective (gros. 2 mm)

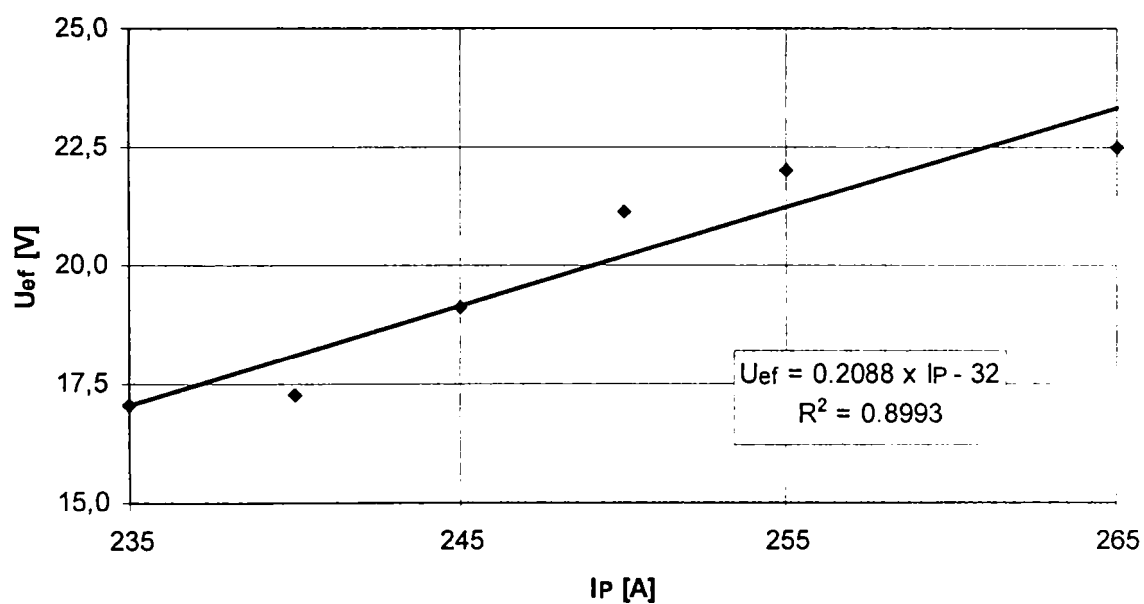


Figura 3b. Influența curentului de puls asupra tensiunii efective (gros. 6 mm)

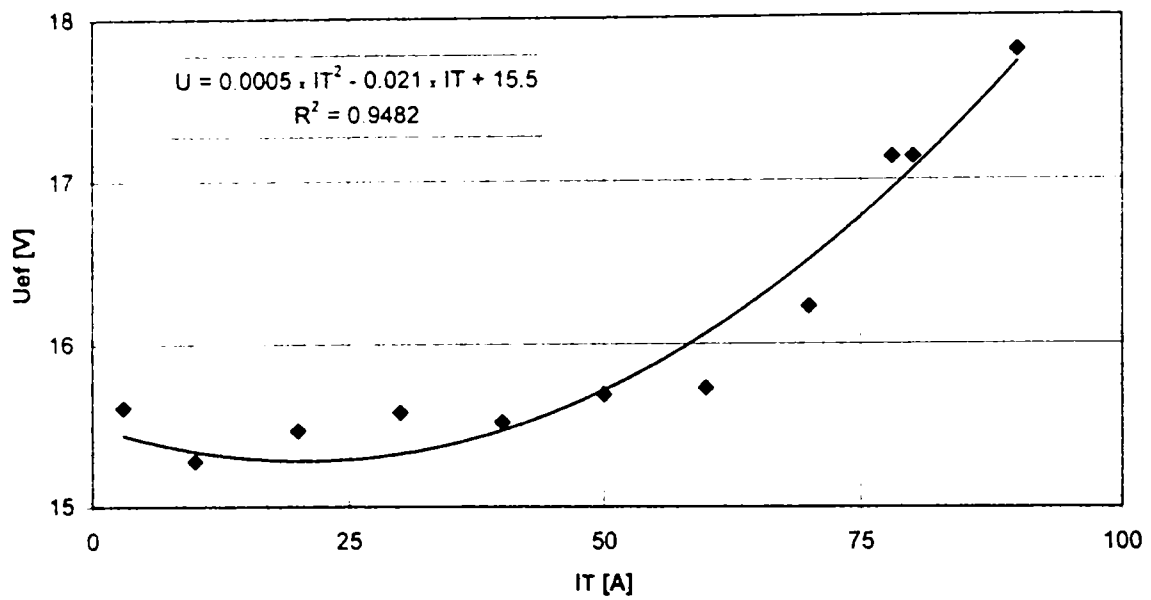


Figura 4a. Influența curentului de declanșare asupra tensiunii efective (gros. 2 mm)

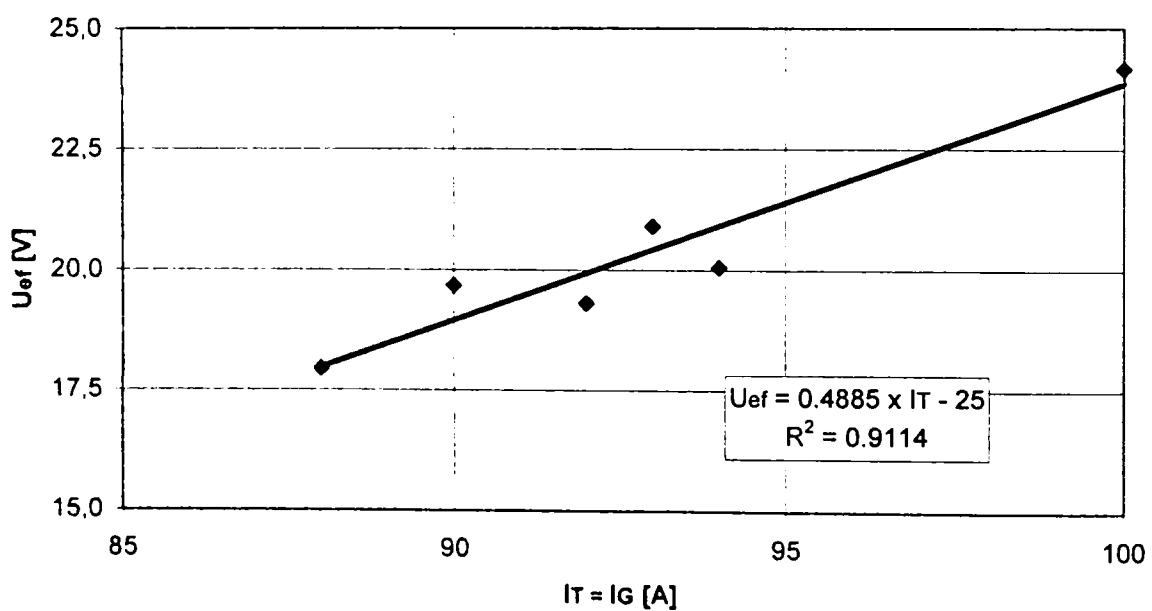


Figura 4b. Influența curentului de declanșare/de bază ($I_T=I_G$), asupra tensiunii efective (gros. 6 mm)

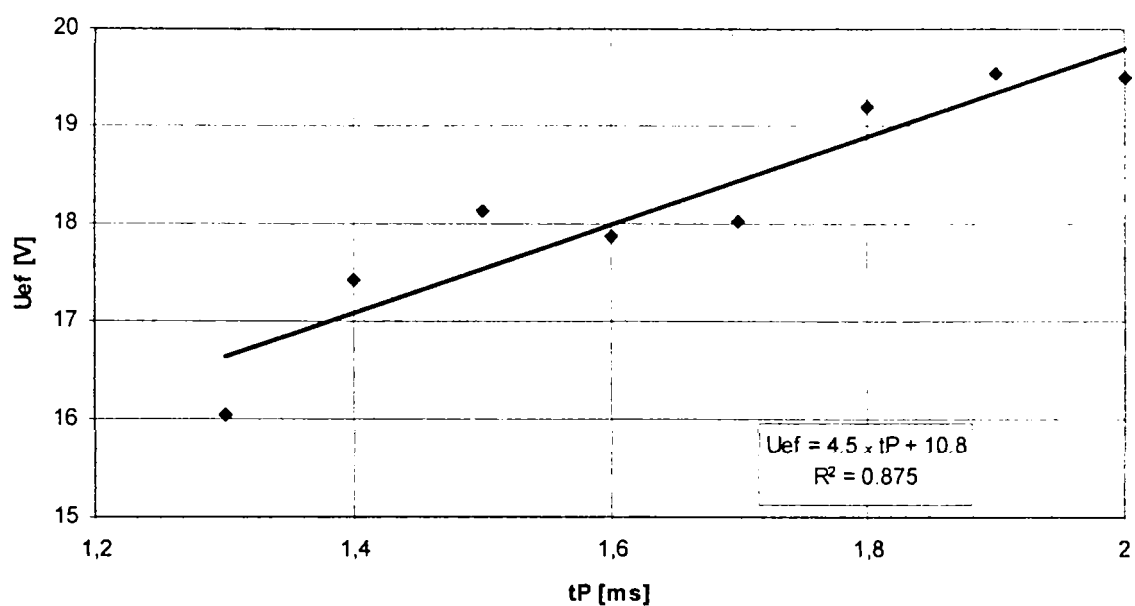


Figura 5a. Influența duratei pulsului asupra tensiunii efective (gros. 2 mm)

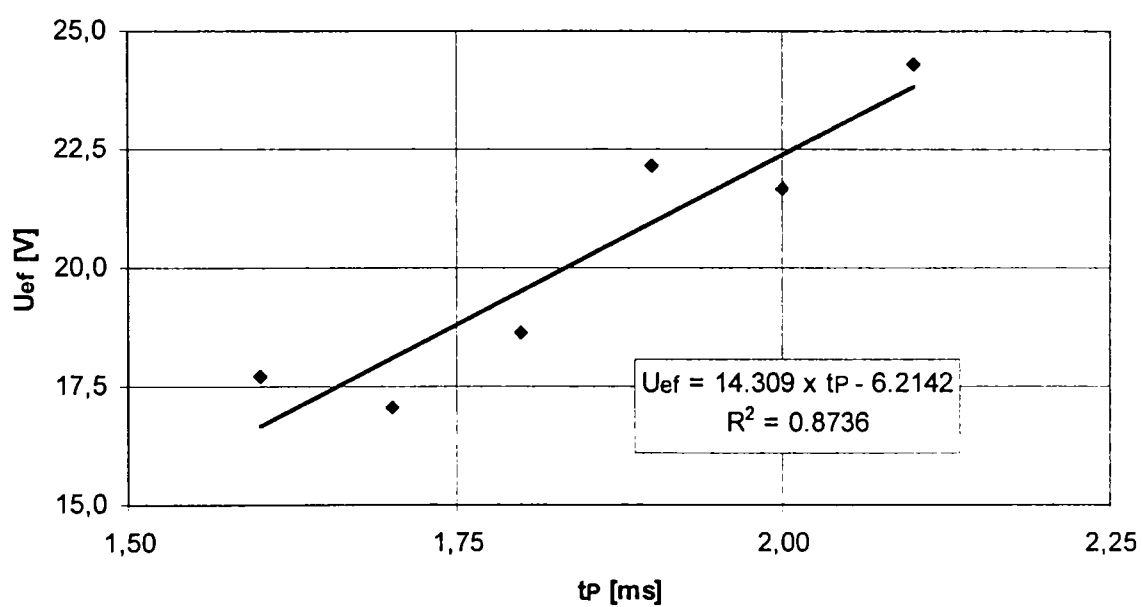


Figura 5b. Influența duratei pulsului asupra tensiunii efective (gros. 6 mm)

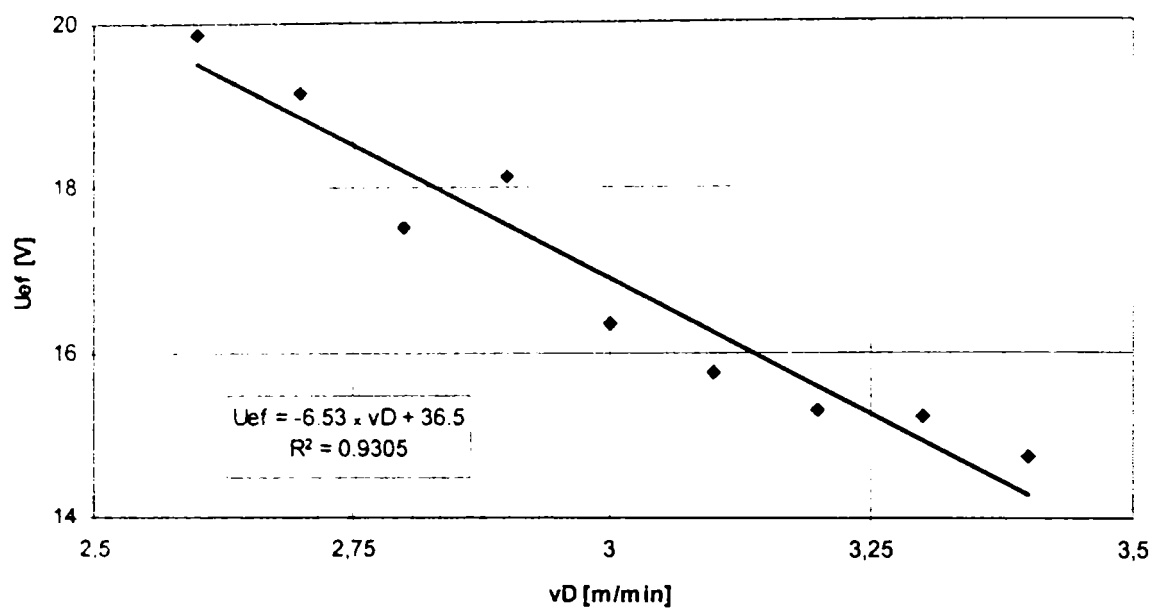


Figura 6a. Influența vitezei de avans a sârmei asupra tensiunii efective (gros. 2 mm)

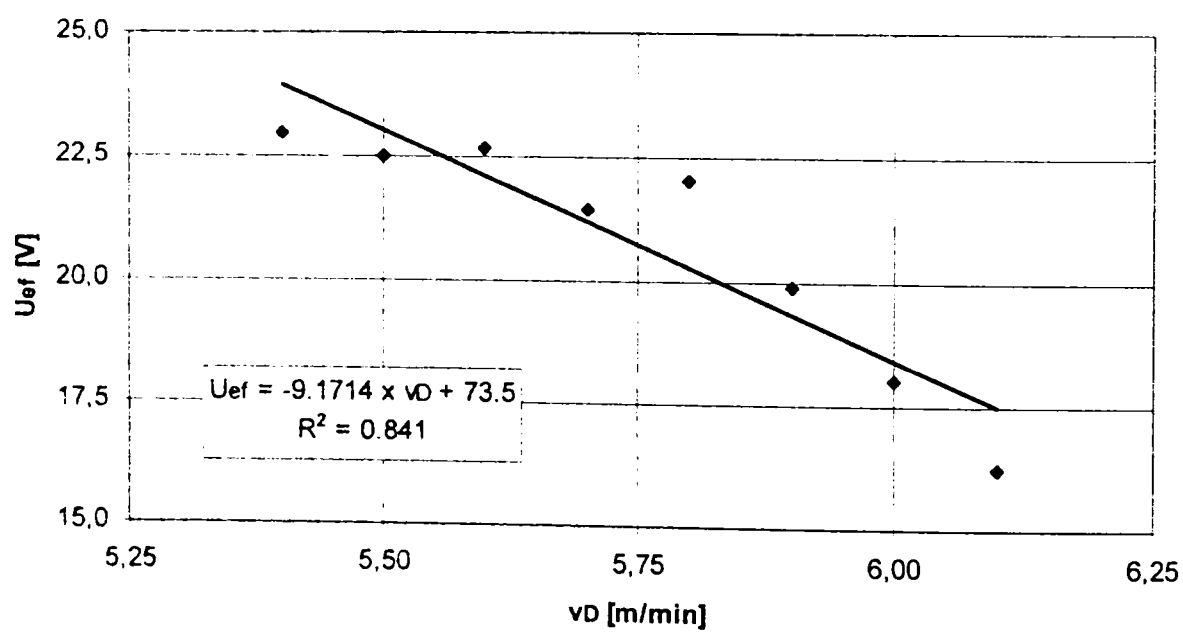


Figura 6b. Influența vitezei de avans a sârmei asupra tensiunii efective (gros. 6 mm)

Corespunzător, în tabelul 3 sunt prezentate sintetic expresiile curbelor de regresie și valorile coeficientului de intensitate a corelației pentru cele două valori ale grosimii tablelor.

Tabelul 3. Influența parametrilor de sudare asupra tensiunii efective

Figura	Gros. [mm]	Funcția de regresie	Coeficientul de intensitate a corelației (R^2)
2a	2	$U_{ef} = 0.15 f + 8.5$	0.8289
2b	6	$U_{ef} = 0.1511 f + 1.3$	0.9316
3a	2	$U_{ef} = 0,035 I_p + 10.7$	0.8671
3b	6	$U_{ef} = 0.2088 I_p - 32$	0.8993
4a	2	$U_{ef} = 0.0005 I_T^2 - 0.021 I_T + 15.5$	0.9482
4b	6	$U_{ef} = 0.4885 I_T - 25$	0.9114
5a	2	$U_{ef} = 4.5 t_p + 10.8$	0.8750
5b	6	$U_{ef} = 14,309 t_p - 6,2142$	0.8993
6a	2	$U_{ef} = -6.53 v_D + 36.5$	0.9305
6b	6	$U_{ef} = -9.1714 v_D + 73.5$	0.8410

Dependențele tensiunii efective de frecvența f , de curentul de puls I_p și de timpul de puls t_p , precum și de curentul I_T/I_G la grosimi de 6 mm sunt liniar crescătoare. Fac excepție, dependența $U_{ef}=f(I_T)$ la grosimi de 2 mm, unde este de formă parabolică, precum și dependențele tensiunii efective de viteza de avans v_D , care sunt reprezentate de regresii liniare descrescătoare.

Comparația între grosimi conduce la concluzia că diferențe semnificative de influențe relative se constată doar în cazul parametrului durată de puls.

Așa cum rezultă din valorile coeficientului de intensitate a corelației (R^2), prezentate în tabelul 3 (mai mari decât 0.8), intensitatea corelațiilor este puternică.

Analiza statistică a influenței reciproce dintre parametri de sudare a relevat, cu un nivel de încredere de 99% (risc de a greși de 1%), că nu există influențe reciproce între nici o pereche de parametri. Această concluzie este valabilă în domeniul valorilor considerate pentru parametrii de sudare, așa cum rezultă din tabelele 1 și 2.

▪ Analiza statistică a influenței parametrilor asupra tensiunii efective

a) Grosime 2 mm

```
Parameters a00000,a10000,a01000,a00100,a00010,a00001
Variables vD,tP,IT,IP,f,Uef
Function Uef=a00000+a10000*vD+a01000*tP+a00100*IT+a00010*IP+a00001*f
Confidence 95
```

Data

Beginning computation...

Iteration 0. Sum of squared deviations = 5.95261E+006

Iteration 1. Sum of squared deviations = 5.80534E+003
 Iteration 2. Sum of squared deviations = 1.56285E+001
 Iteration 3. Sum of squared deviations = 1.56285E+001

---- Final Results ----

Function: Uef=a00000+a10000*vD+a01000*tP+a00100*IT+a00010*IP+a00001*f
 Number of observations = 46
 Maximum allowed number of iterations = 50
 Convergence tolerance factor = 1.000000E-010
 Relative function convergence.
 Number of iterations performed = 3
 Final sum of squared deviations = 1.56285E+001
 Standard error of estimate = 0.62507
 Average deviation = 0.488352
 Maximum deviation for any observation = 1.63434
 Proportion of variance explained (R²) = 0.8634 (86.34%)

---- Descriptive Statistics for Variables ----

Variable	Minimum value	Maximum value	Mean value	Standard dev.
vD	2.6	3.4	2.91957	0.122238
tP	1.3	2	1.52609	0.112417
IT	3	90	70.8913	19.0651
IP	210	290	240.348	12.5099
f	40	75	59.5652	4.92455
Uef	14.32	19.87	17.2433	1.59439

---- Calculated Parameter Values ----

Parameter	Initial guess	Final estimate	Standard dev.	t	Prob(t)
a00000	1	8.13423	3.39815	2.39	0.02146
a10000	1	-6.42359	0.765104	-8.40	0.00001
a01000	1	4.63049	0.834371	5.55	0.00001
a00100	1	0.0356589	0.00493569	7.22	0.00001
a00010	1	0.0382465	0.00748438	5.11	0.00001
a00001	1	0.152374	0.0189449	8.04	0.00001

---- Analysis of Variance ----

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F value	Prob(F)
Regression	5	98.76571	19.75314	50.56	0.00001
Error	40	15.6285	0.3907124		
Total	45	114.3942			

---- 95.000% Confidence Intervals ----

Parameter	Lower limit	Best estimate	Upper limit

a00000	1.26628	8.13423	15.0022
a10000	-7.96993	-6.42359	-4.87725
a01000	2.94416	4.63049	6.31683
a00100	0.0256835	0.0356589	0.0456344
a00010	0.0231199	0.0382465	0.0533731
a00001	0.114085	0.152374	0.190664

b) Grosime 6 mm

parameter a, avd, atp, ait, aip, af
 variables vD, tP, IT, IP, f, Uef
 function Uef = a+avd*vD+atp*tP+ait*IT+aip*IP+af*f

confidence 95

data

Beginning computation...

Iteration	0.	Sum of squared deviations = 7.00222E+006
Iteration	1.	Sum of squared deviations = 1.09634E+003
Iteration	2.	Sum of squared deviations = 3.70054E+001
Iteration	3.	Sum of squared deviations = 3.70054E+001

---- Final Results ----

Function: Uef = a+avd*vD+atp*tP+ait*IT+aip*IP+af*f
 Number of observations = 35
 Maximum allowed number of iterations = 50
 Convergence tolerance factor = 1.000000E-010
 Relative function convergence.
 Number of iterations performed = 3
 Final sum of squared deviations = 3.70054E+001
 Standard error of estimate = 1.12962
 Average deviation = 0.838368
 Maximum deviation for any observation = 2.9012
 Proportion of variance explained (R²) = 0.7860 (78.60%)

---- Descriptive Statistics for Variables ----

Variable	Minimum value	Maximum value	Mean value	Standard dev.
vD	5.4	6.1	5.71143	0.113167
tP	1.6	2.1	1.80857	0.0742469
IT	88	100	92.1429	1.61141
IP	235	265	245.571	4.33376
f	105	145	121.286	7.0024
Uef	16.25	24.29	20.2911	2.25541

---- Calculated Parameter Values ----

Parameter	Initial guess	Final estimate	Standard dev.	t	Prob(t)
a	1	-66.3048	19.7587	-3.36	0.00222

avd	1	-8.0213	1.71259	-4.68	0.00006
atp	1	13.7249	2.61059	5.26	0.00001
ait	1	0.490285	0.120263	4.08	0.00032
aip	1	0.185741	0.0447303	4.15	0.00026
af	1	0.138498	0.0276911	5.00	0.00003

---- Analysis of Variance ----

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F value	Prob(F)
Regression	5	135.9477	27.18954	21.31	0.00001
Error	29	37.00544	1.27605		
Total	34	172.9532			

---- 95.000% Confidence Intervals ----

Parameter	Lower limit	Best estimate	Upper limit
a	-106.716	-66.3048	-25.8932
avd	-11.524	-8.0213	-4.5186
atp	8.38552	13.7249	19.0642
ait	0.244317	0.490285	0.736253
aip	0.0942558	0.185741	0.277226
af	0.0818621	0.138498	0.195133

▪ **Funcțiile de dependență simultană a tensiunii efective (U_{ef})**

În vederea calculării automate a tensiunii efective, s-a determinat dependența simultană a tensiunii efective funcție de cei cinci parametri de sudare considerați. Ecuatiile liniare multiparametrice (1), (2) prezintă această dependență pentru table cu grosimea de 2 mm, respectiv pentru table cu grosimea de 6 mm.

$$U_{ef} = 8.1 - 6.42v_D + 4.63t_p + 0.036I_T + 0.038I_p + 0.152f \quad (1)$$

$$U_{ef} = -66.3 - 8.02v_D + 13.72t_p + 0.4902I_T + 0.1857I_p + 0.1385f \quad (2)$$

Intervalul de încredere a coeficienților din ecuațiile (1) și (2) a fost determinat cu un nivel de încredere de 95%. Coeficientul de intensitate a corelațiilor este $R^2=0.8634$, respectiv $R^2=0.7860$, ceea ce indică o corelație puternică. Abaterea medie a valorilor calculate cu ecuațiile (1) și (2) este de 0.49 V respectiv 0.84 V, iar abaterea maximă este de 1.63 V, respectiv 2.90 V.

4. Influența parametrilor de sudare asupra curentului efectiv (I_{ef})

Ca și în paragraful precedent, inițial s-au determinat funcțiile de regresie individuale pentru fiecare dintre parametrii de sudare considerați. În figurile 7-11 sunt prezentate grafic aceste influențe.

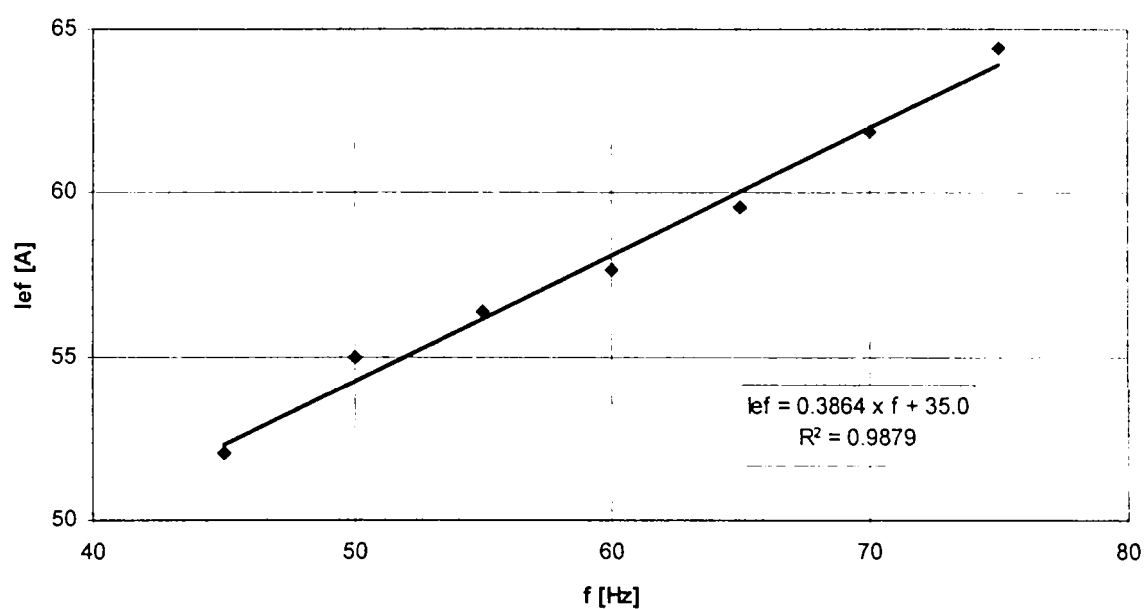


Figura 7a. Influența frecvenței asupra curentului efectiv (gros. 2 mm)

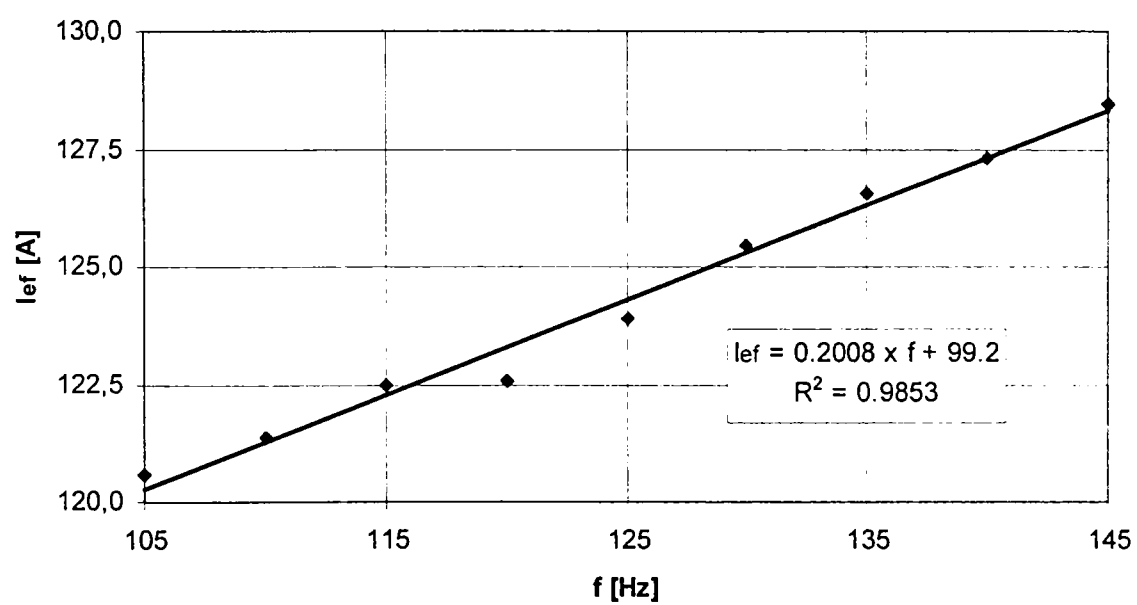


Figura 7b. Influența frecvenței asupra curentului efectiv (gros. 6 mm)

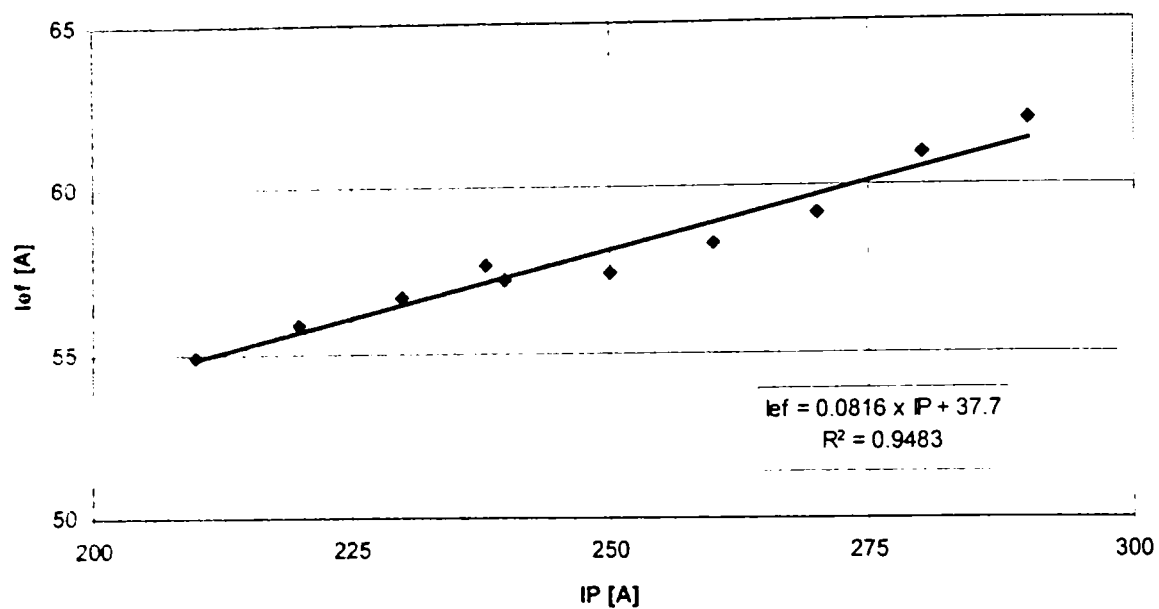


Figura 8a. Influența curentului de puls asupra curentului efectiv (gros. 2 mm)

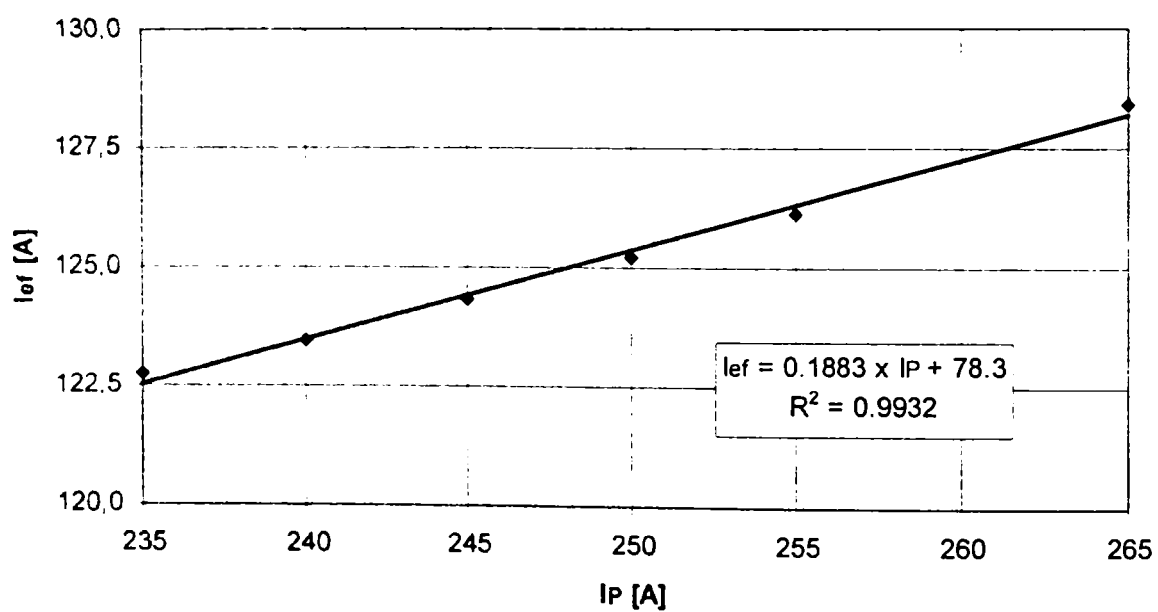


Figura 8b. Influența curentului de puls asupra curentului efectiv (gros. 6 mm)

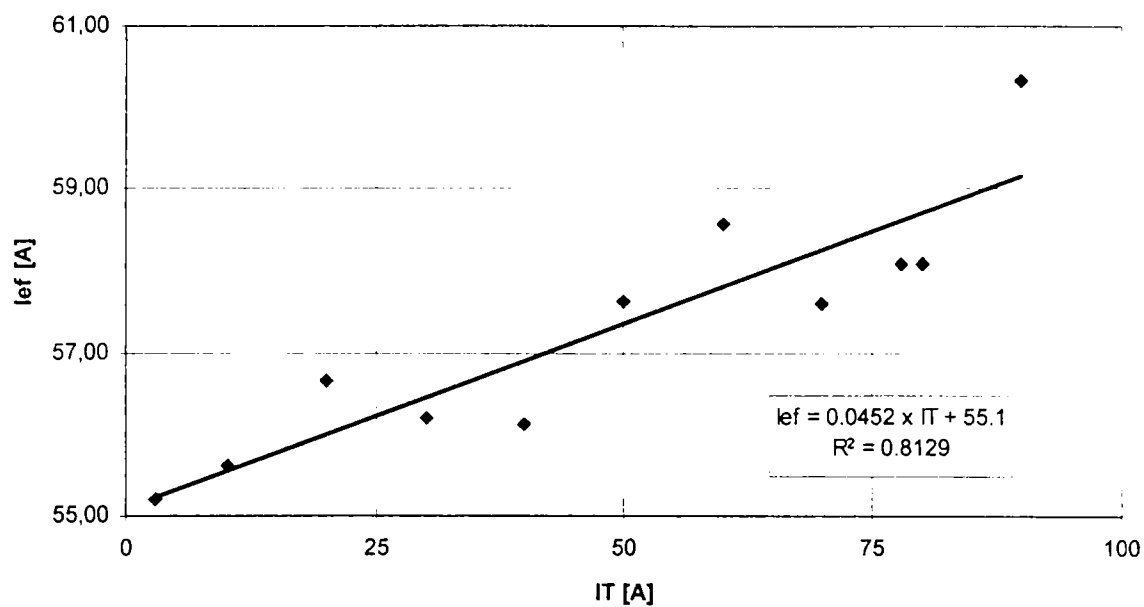


Figura 9a. Influența curentului de declanșare asupra curentului efectiv (gros. 2 mm)

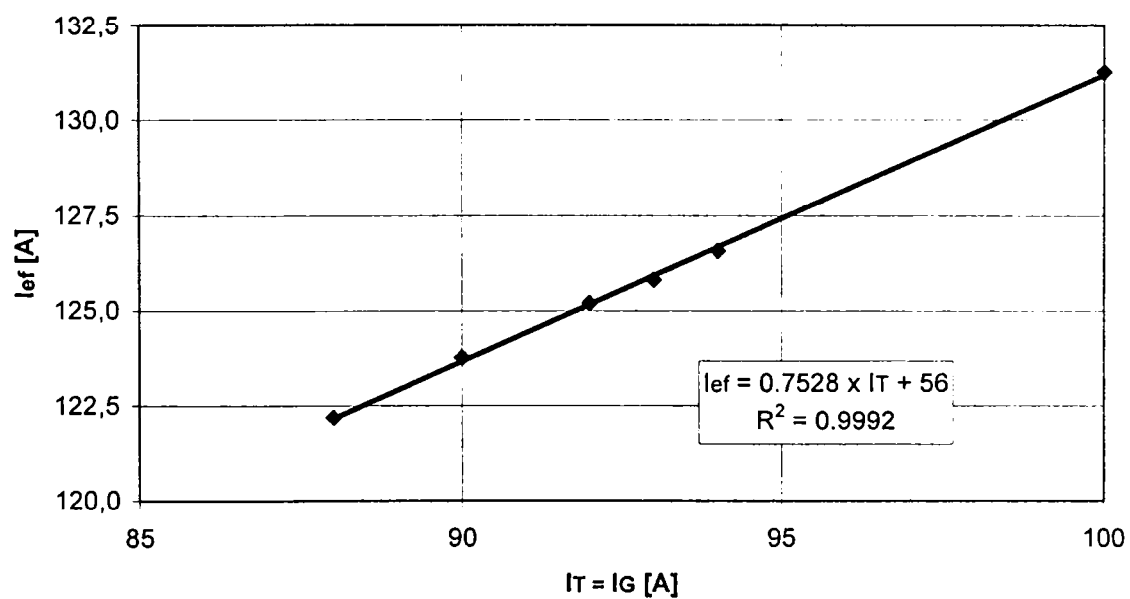


Figura 9b. Influența curentului de declanșare/de bază ($I_T = I_G$), asupra curentului efectiv (gros. 6 mm)

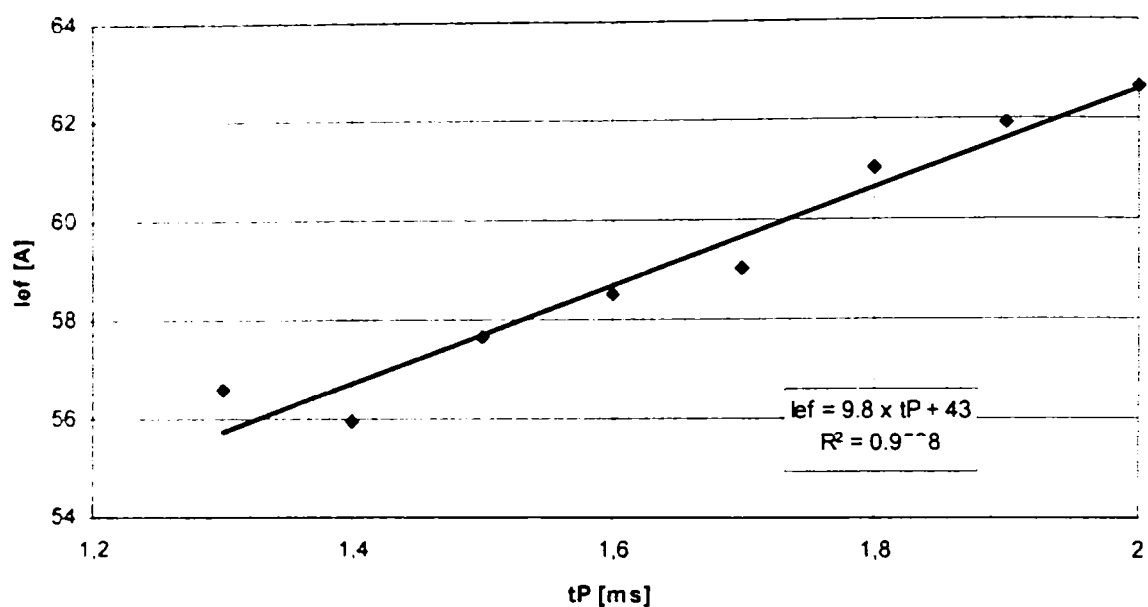


Figura 10a. Influența timpului de puls asupra curentului efectiv (gros. 2 mm)

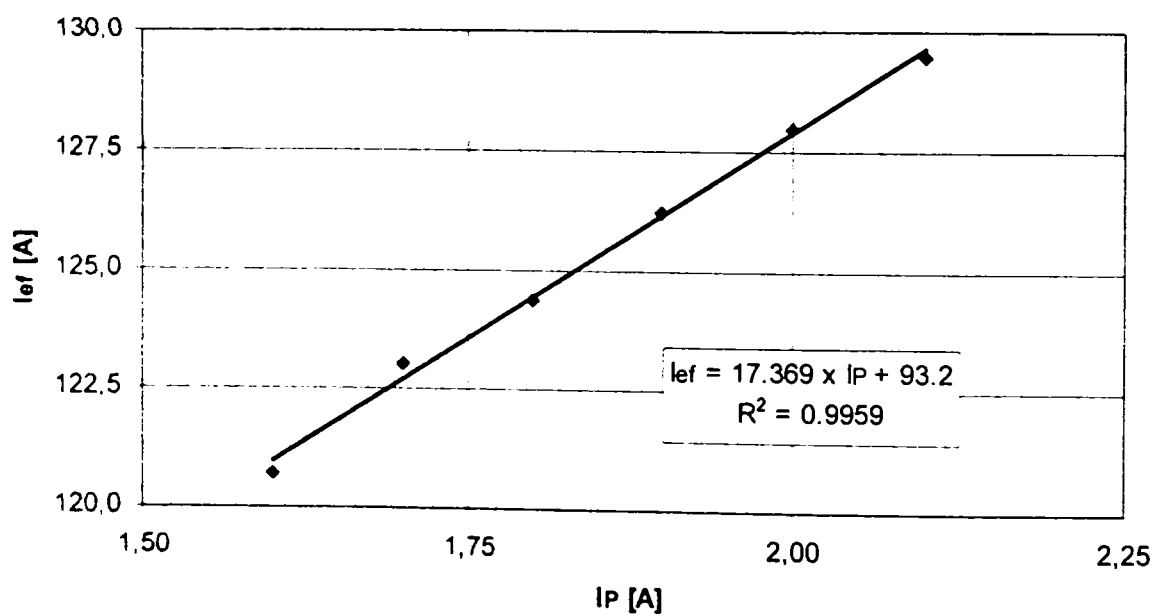


Figura 10b. Influența timpului de puls asupra curentului efectiv (gros. 6 mm)

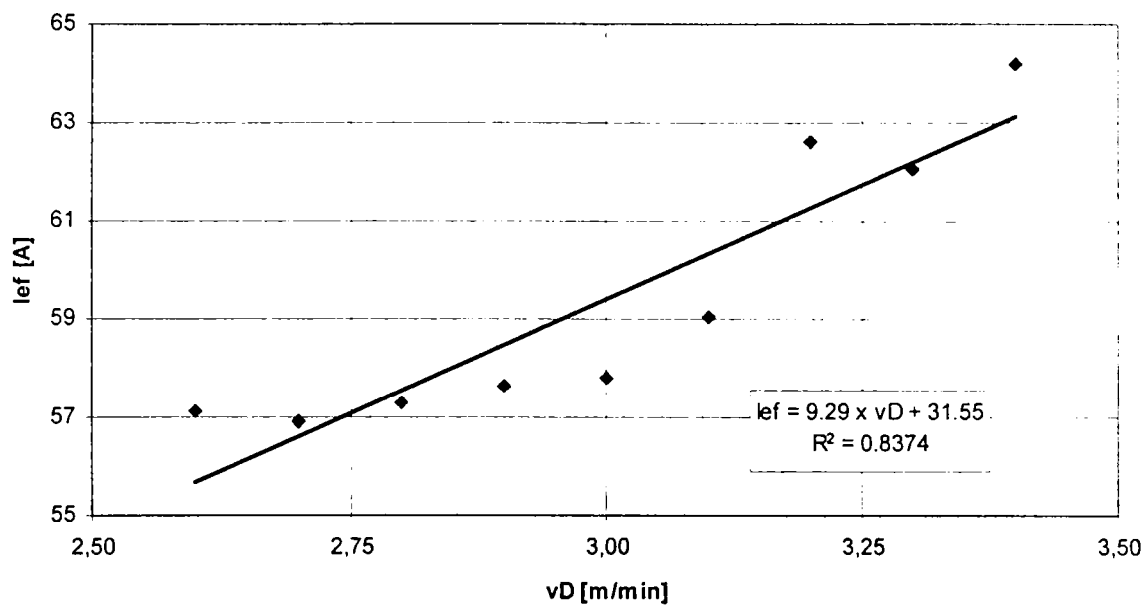


Figura 11a. Influența vitezei de avans a sârmei asupra curentului efectiv (gros. 2 mm)

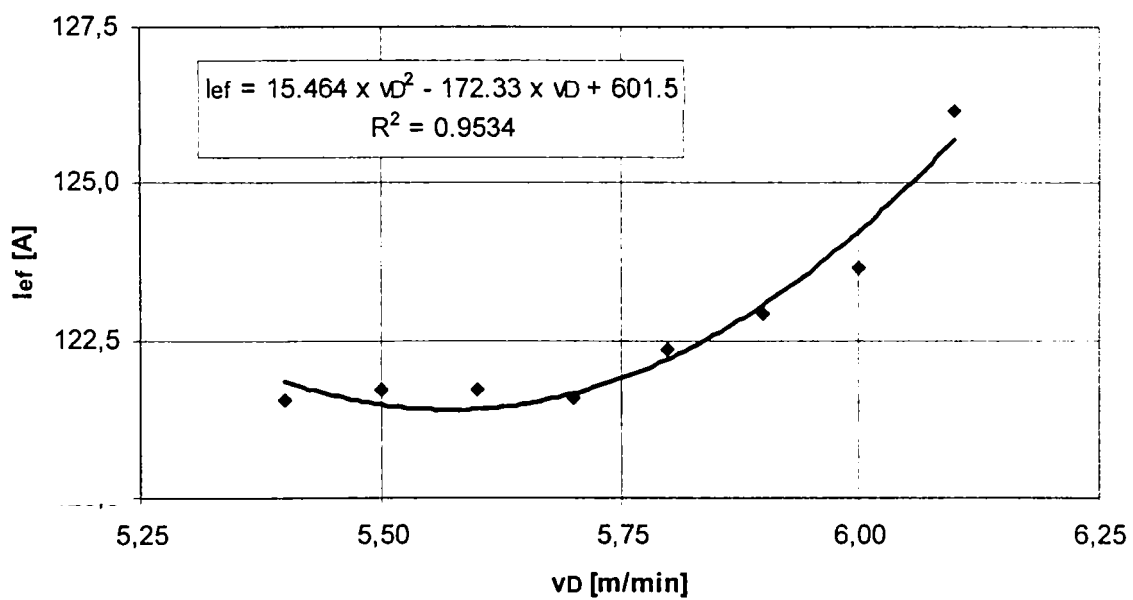


Figura 11b. Influența vitezei de avans a sârmei asupra curentului efectiv (gros. 6 mm)

Corespunzător, tabelul 4 prezintă sintetic cele cinci curbe de regresie și valoarea coeficientului de intensitate a corelației.

Tabelul 4. Influența parametrilor de sudare asupra curentului efectiv

Figura	Gros. [mm]	Funcția de regresie	Coeficientul de intensitate a corelației (R^2)
7a	2	$I_{ef} = 0.3864 f + 35.0$	0.9879
7b	6	$I_{ef} = 0.2008 f + 99.2$	0.9853
8a	2	$I_{ef} = 0.0816 I_p + 37.7$	0.9483
8b	6	$I_{ef} = 0.1883 I_p + 78.3$	0.9932
9a	2	$I_{ef} = 0.0452 I_T + 55.1$	0.8246
9b	6	$I_{ef} = 0.7528 I_T + 56$	0.9992
10a	2	$I_{ef} = 9.8 t_p + 43$	0.9528
10b	6	$I_{ef} = 17.369 I_p + 93.2$	0.9959
11a	2	$I_{ef} = 9.29 v_D + 31.55$	0.8374
11b	6	$I_{ef} = 15.464 v_D^2 - 172.33 v_D + 601.5$	0.9534

Dependențele curentului efectiv de frecvența f , de curentul de puls I_p , de curentul de declanșare I_T , de timpul de puls t_p și de viteza de avansare v_D , la grosimea de 2 mm, sunt reprezentate de funcții liniar crescătoare. Dependența $I_{ef}=f(v_D)$ la grosimea de 6 mm este reprezentată de o funcție parabolică.

Ca și în cazul influenței asupra tensiunii efective, așa cum rezultă din valorile coeficientului de intensitate a corelației (R^2), prezentate în tabelul 4 (mai mari decât 0.8), intensitatea corelațiilor este puternică.

De asemenea, analiza statistică a influenței reciproce dintre parametrii de sudare au relevat, cu un nivel de încredere de 99%, că nu există influențe reciproce între nici o pereche de parametri. Această concluzie este valabilă în domeniul valorilor considerate pentru parametri de sudare, așa cum rezultă din tabelele 1 și 2.

▪ Analiza statistică a influenței parametrilor asupra curentului efectiv

a) Grosime 2 mm

```
Parameters a0,af,aIP,aIT,atP,avD
Variables vD,tP,IT,IP,f,Ief
Function Ief=a0+af*f+aIP*IP+aIT*IT+atP*tP+avD*vD
Confidence 95
```

Data

Beginning computation...

```
Iteration 0. Sum of squared deviations = 4.67443E+006
Iteration 1. Sum of squared deviations = 6.67995E+003
Iteration 2. Sum of squared deviations = 4.36340E+001
Iteration 3. Sum of squared deviations = 4.36340E+001
```

---- Final Results ----

Function: $I_{ef} = a_0 + a_f \cdot f + a_{IP} \cdot IP + a_{IT} \cdot IT + a_{tP} \cdot tP + a_{vD} \cdot vD$
 Number of observations = 46
 Maximum allowed number of iterations = 50
 Convergence tolerance factor = 1.000000E-010
 Relative function convergence.
 Number of iterations performed = 3
 Final sum of squared deviations = 4.36340E+001
 Standard error of estimate = 1.04444
 Average deviation = 0.7381
 Maximum deviation for any observation = 2.84729
 Proportion of variance explained (R^2) = 0.8625 (86.25%)

---- Descriptive Statistics for Variables ----

Variable	Minimum value	Maximum value	Mean value	Standard dev.
vD	2.6	3.4	2.91957	0.122238
tP	1.3	2	1.52609	0.112417
IT	3	90	70.8913	19.0651
IP	210	290	240.348	12.5099
f	40	75	59.5652	4.92455
Ief	52.06	64.4	58.262	2.65594

---- Calculated Parameter Values ----

Parameter	Initial guess	Final estimate	Standard dev.	t	Prob(t)
a0	1	-21.3948	5.67801	-3.77	0.00053
a _f	1	0.305077	0.0316554	9.64	0.00001
a _{IP}	1	0.0679825	0.0125058	5.44	0.00001
a _{IT}	1	0.0350881	0.00824711	4.25	0.00012
a _{tP}	1	9.09816	1.39416	6.53	0.00001
a _{vD}	1	9.85532	1.27842	7.71	0.00001

---- Analysis of Variance ----

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F value	Prob(F)
Regression	5	273.7977	54.75954	50.20	0.00001
Error	40	43.63404	1.090851		
Total	45	317.4317			

---- 95.000% Confidence Intervals ----

Parameter	Lower limit	Best estimate	Upper limit
a0	-32.8705	-21.3948	-9.91901
a _f	0.241099	0.305077	0.369056
a _{IP}	0.0427073	0.0679825	0.0932578
a _{IT}	0.01842	0.0350881	0.0517562

atP	6.28044	9.09816	11.9159
avD	7.27152	9.85532	12.4391

b) Grosime 6 mm

parameter a, avd, atp, ait, aip, af
 variables vD, tP, IT, IP, f, Ief
 function Ief=a+avd*vD+atp*tP+ait*IT+aip*IP+af*f
 confidence 95

data

Beginning computation...

Iteration	0.	Sum of squared deviations =	4.11996E+006
Iteration	1.	Sum of squared deviations =	1.09380E+003
Iteration	2.	Sum of squared deviations =	3.76815E+001
Iteration	3.	Sum of squared deviations =	3.76815E+001

---- Final Results ----

Function: Ief=a+avd*vD+atp*tP+ait*IT+aip*IP+af*f
 Number of observations = 35
 Maximum allowed number of iterations = 50
 Convergence tolerance factor = 1.000000E-010
 Relative function convergence.
 Number of iterations performed = 3
 Final sum of squared deviations = 3.76815E+001
 Standard error of estimate = 1.1399
 Average deviation = 0.872894
 Maximum deviation for any observation = 2.20897
 Proportion of variance explained (R²) = 0.8449 (84.49%)

---- Descriptive Statistics for Variables ----

Variable	Minimum value	Maximum value	Mean value	Standard dev.
vD	5.4	6.1	5.71143	0.113167
tP	1.6	2.1	1.80857	0.0742469
IT	88	100	92.1429	1.61141
IP	235	265	245.571	4.33376
f	105	145	121.286	7.0024
Ief	120.56	131.27	124.493	2.67294

---- Calculated Parameter Values ----

Parameter	Initial guess	Final estimate	Standard dev.	t	Prob(t)
a	1	-83.0811	19.9383	-4.17	0.00025
avd	1	4.25321	1.72817	2.46	0.02004
atp	1	18.349	2.63433	6.97	0.00001
ait	1	0.829608	0.121356	6.84	0.00001
aip	1	0.207493	0.045137	4.60	0.00008
af	1	0.187157	0.0279429	6.70	0.00001

---- Analysis of Variance ----

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F value	Prob(F)
Regression	5	205.2359	41.04719	31.59	0.00001
Error	29	37.68153	1.299363		
Total	34	242.9175			

---- 95.000% Confidence Intervals ----

Parameter	Lower limit	Best estimate	Upper limit
a	-123.86	-83.0811	-42.3021
avd	0.718661	4.25321	7.78775
atp	12.9611	18.349	23.7369
ait	0.581403	0.829608	1.07781
aip	0.115176	0.207493	0.29981
af	0.130007	0.187157	0.244308

▪ **Funcțiile de dependență simultană asupra curentului efectiv (I_{ef})**

Dependența simultană a curentului efectiv funcție de cei cinci parametri de sudare considerați este prezentată în ecuațiile liniare multiparametrice (3) și (4). Ecuația (3) prezintă această dependență pentru table cu grosimea de 2 mm, iar ecuația (4) pentru table cu grosimea de 6 mm.

$$I_{ef} = -21.4 + 0.305f + 0.0680I_p + 0.0351I_T + 9.10t_p + 9.86v_D \quad (3)$$

$$I_{ef} = -83.1 + 0.1872f + 0.2075I_p + 0.8296I_T + 18.35t_p + 4.25v_D \quad (4)$$

Ca și pentru ecuațiile (1) și (2), intervalul de încredere a coeficienților din ecuațiile (3) și (4) a fost determinat cu un nivel de încredere de 95%. Coeficientul de intensitate a corelațiilor este $R^2 = 0.8625$ respectiv $R^2 = 0.8449$, ceea ce indică o corelație puternică. Abaterea medie a ecuațiilor (3) și (4) este de 0.74 A respectiv de 0.87 A, iar abaterea maximă este de 2.85 A respectiv 2.21 A.

5. Influența parametrilor de sudare asupra puterii efective (P_{ef})

Analiza statistică decurge conform celor arătate în paragrafele precedente. Figurile 12-16 prezintă grafic dependența puterii efective de parametrii de sudare.

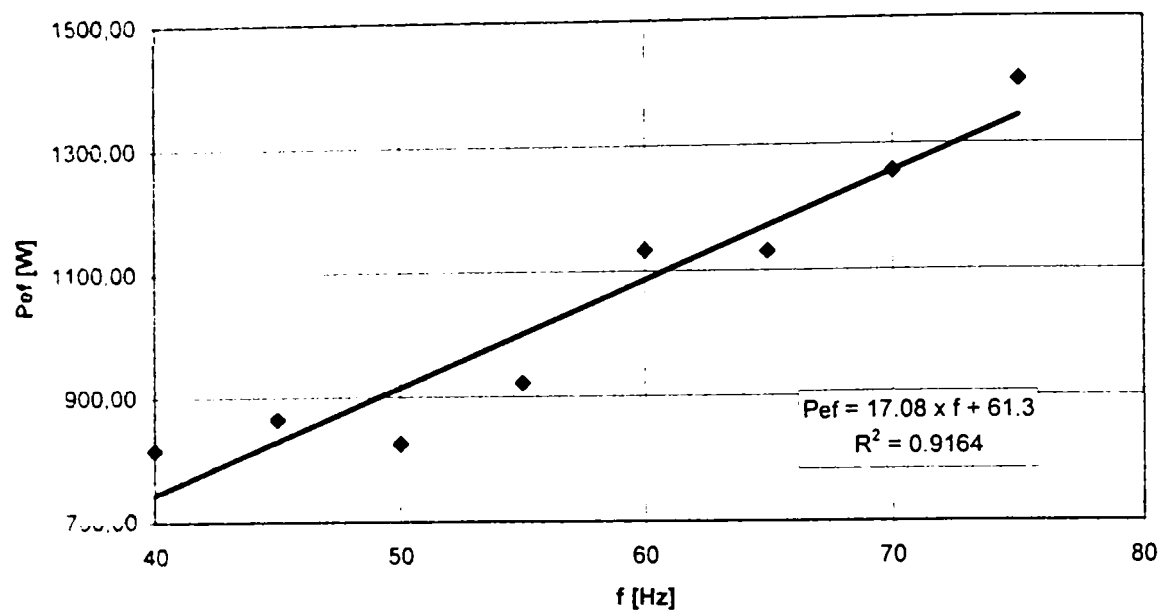


Figura 12a. Influența frecvenței asupra puterii efective (gros. 2 mm)

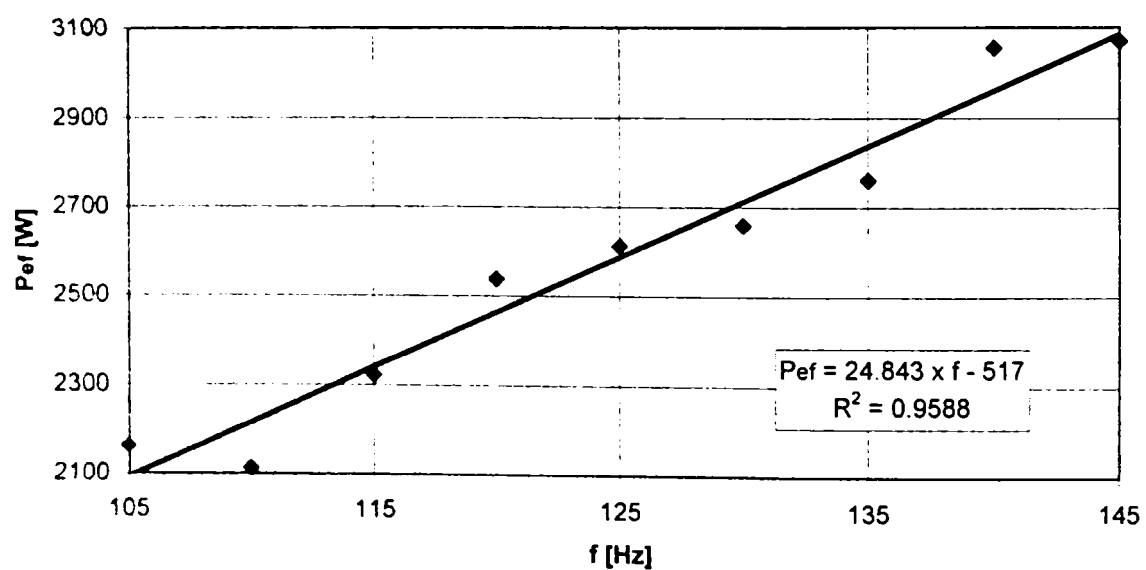


Figura 12b. Influența frecvenței asupra puterii efective (gros. 6 mm)

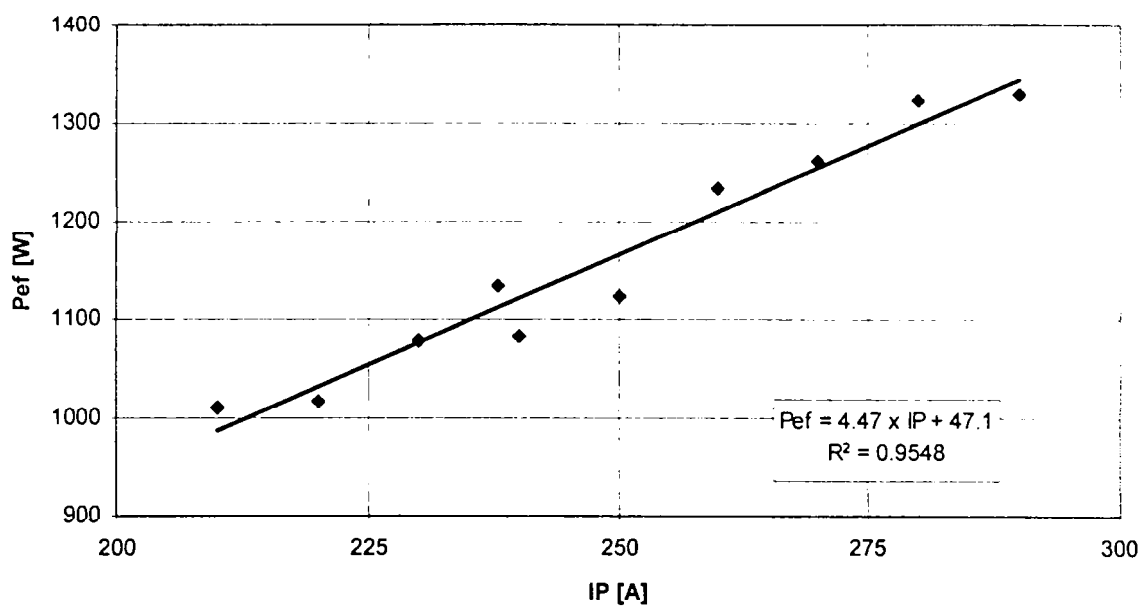


Figura 13a. Influența curentului de puls asupra puterii efective (gros. 2 mm)

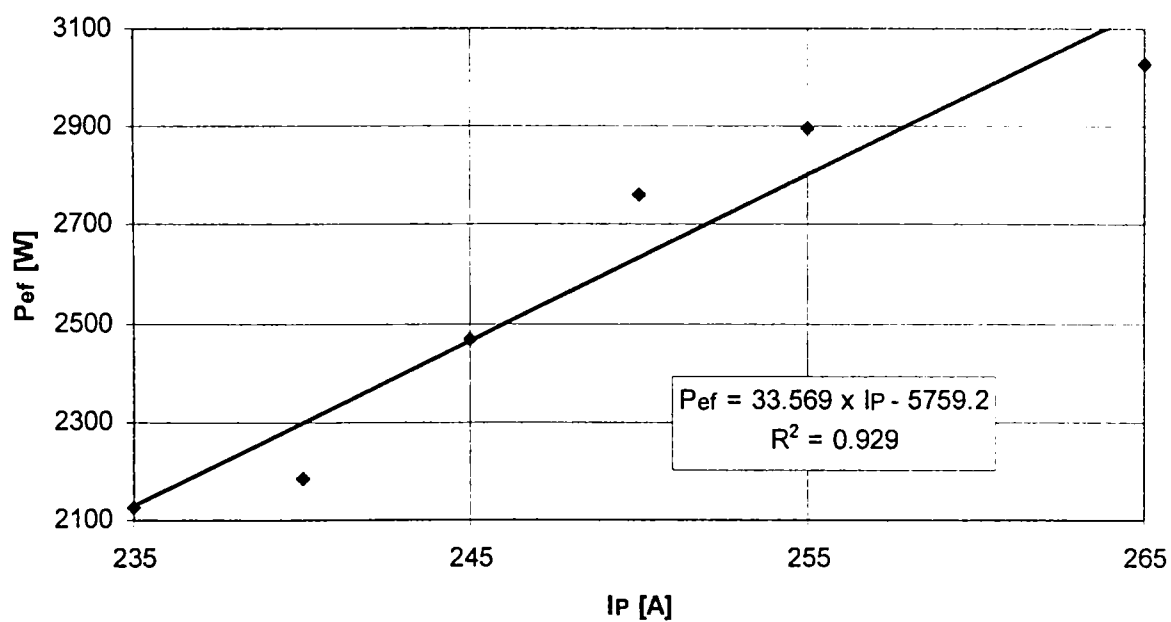


Figura 13b. Influența curentului de puls asupra puterii efective (gros. 6 mm)

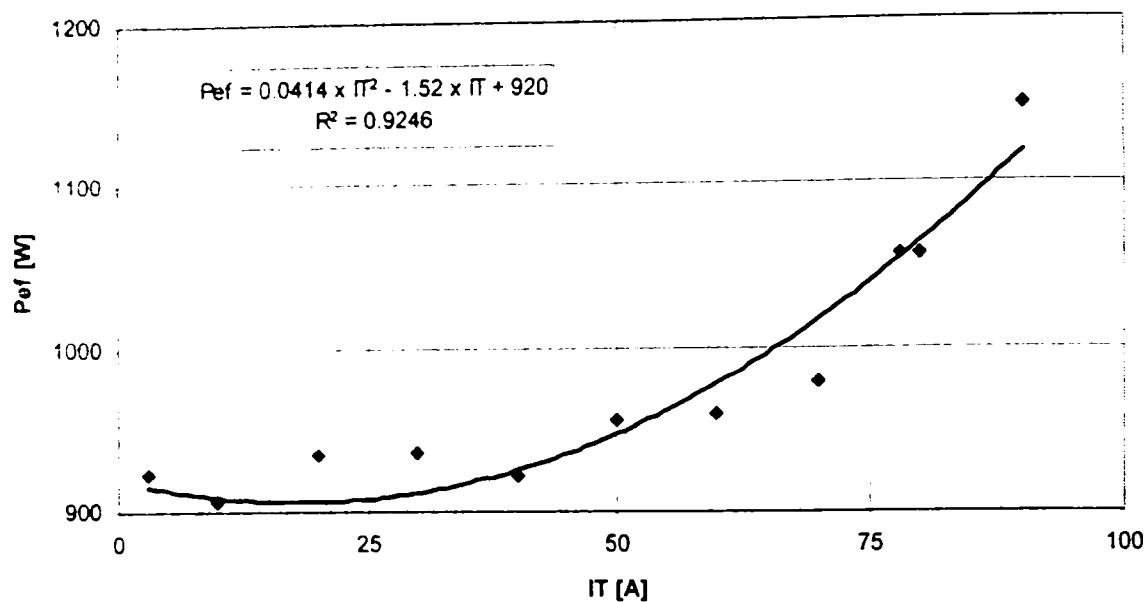


Figura 14a. Influența curentului de declanșare asupra puterii efective (gros. 2 mm)

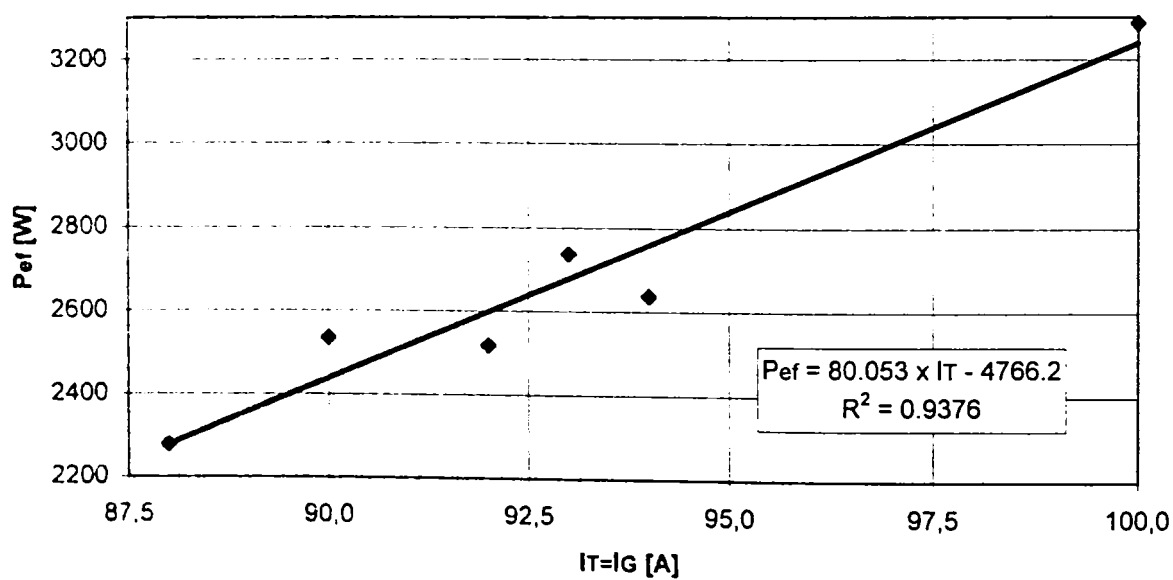


Figura 14b. Influența curentului de declanșare/de bază ($I_T=I_G$), asupra puterii efective (gros. 6 mm)

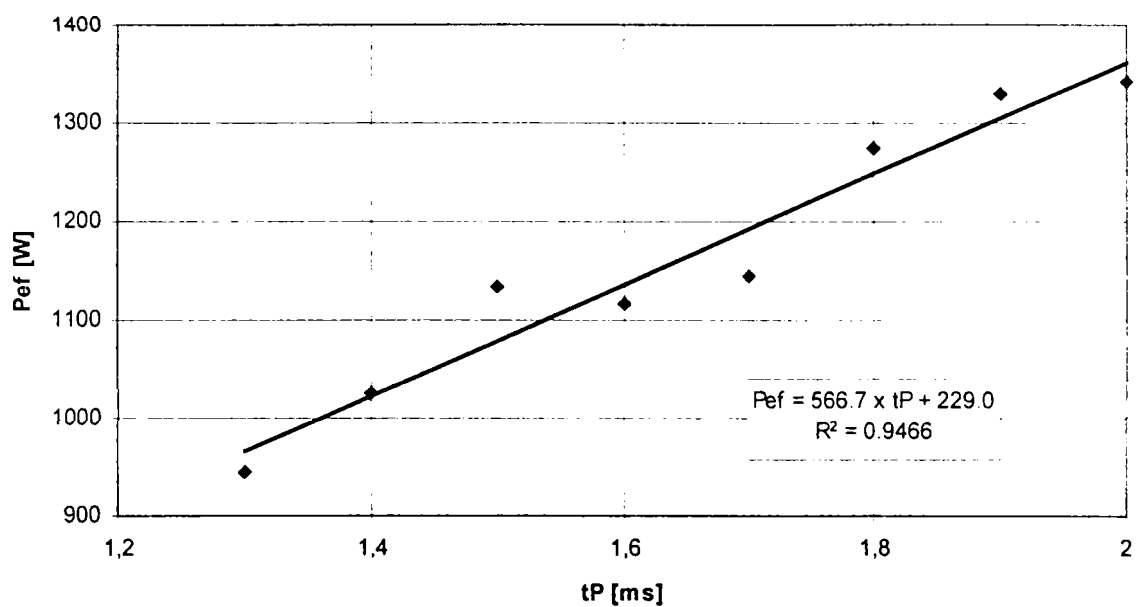


Figura 15a. Influența timpului de puls asupra puterii efective (gros. 2 mm)

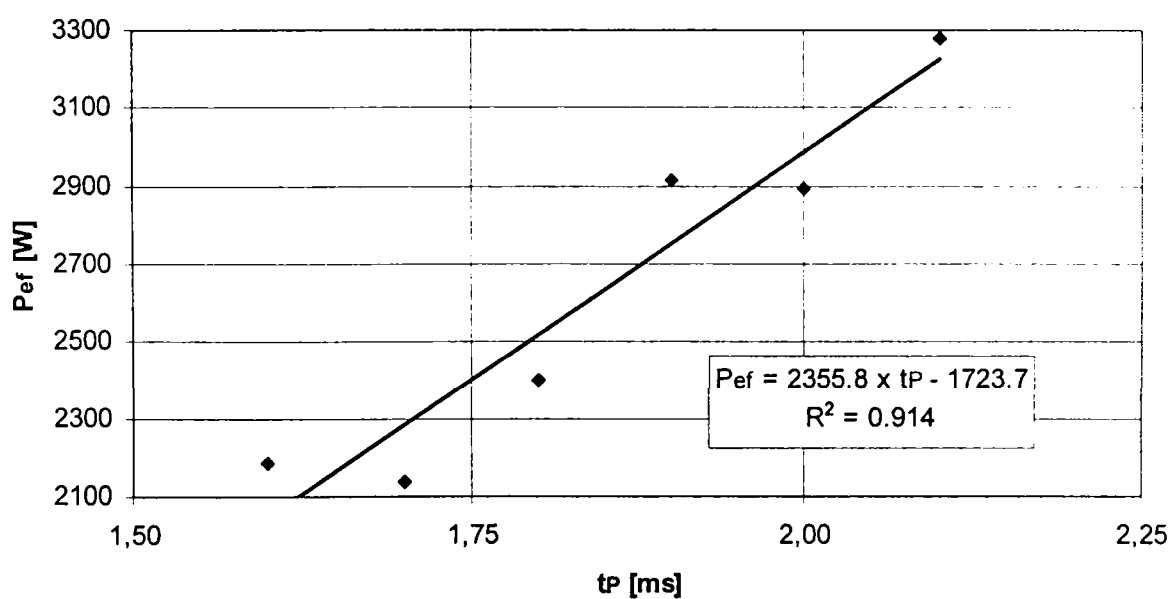


Figura 15b. Influența timpului de puls asupra puterii efective (gros. 6 mm)

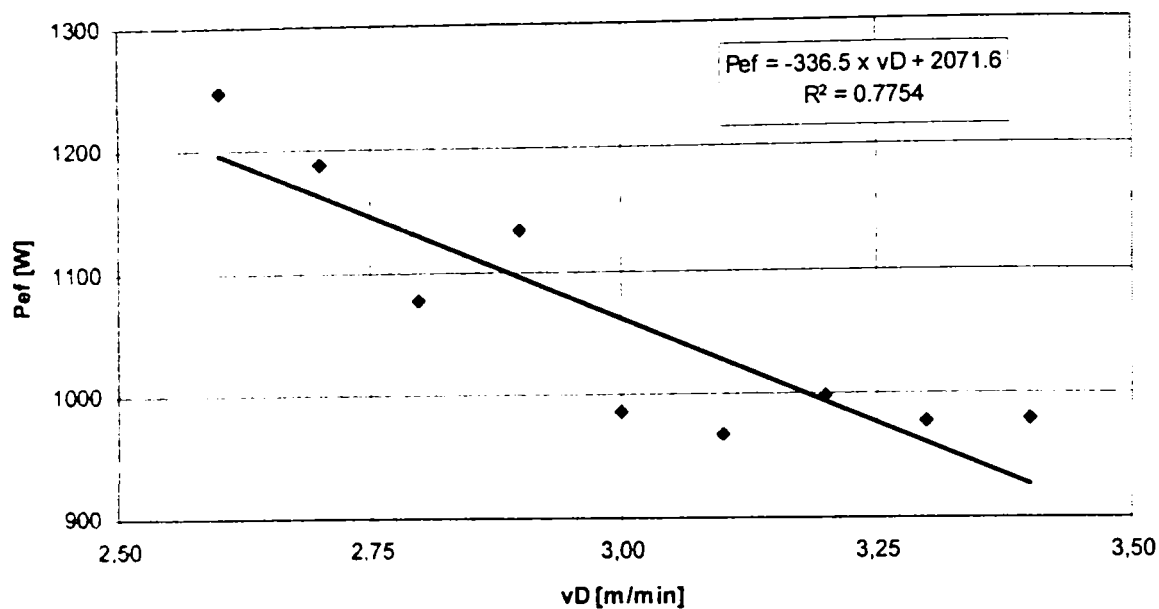


Figura 16a. Influența vitezei de avans a sârmei asupra puterii efective (gros. 2 mm)

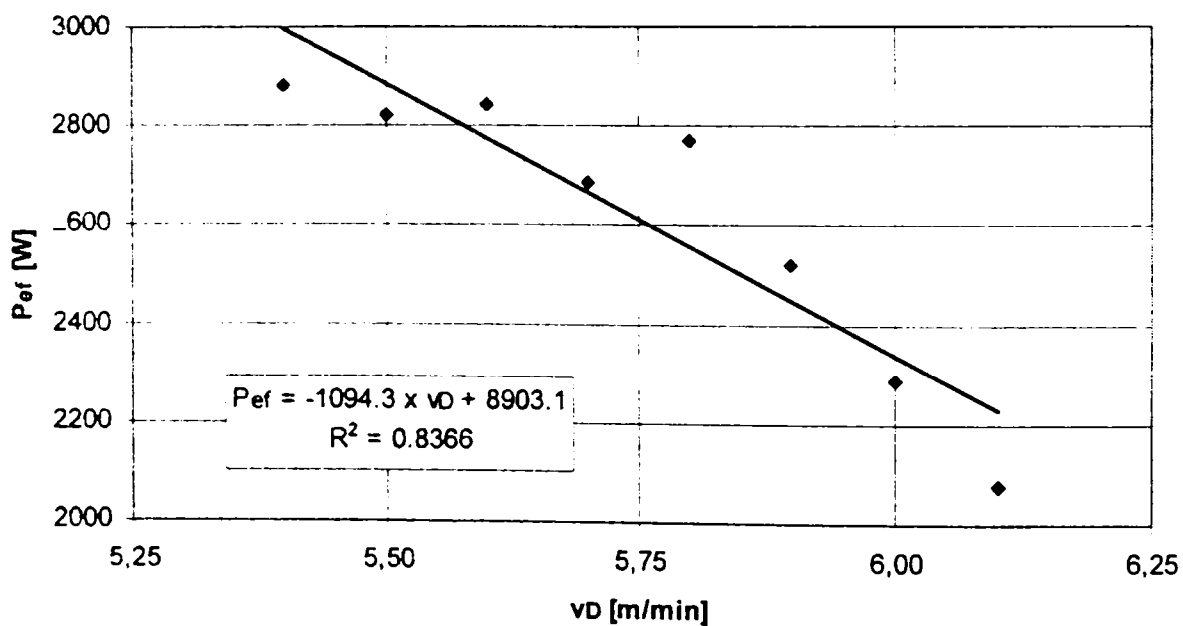


Figura 16b. Influența vitezei de avans a sârmei asupra puterii efective (gros. 6 mm)

Corespunzător, tabelul 5 prezintă forma analitică a curbelor de regresie și intensitatea corelațiilor.

Tabelul 5. Influența parametrilor de sudare asupra puterii efective

Figura	Gros. [mm]	Funcția de regresie	Coefficientul de intensitate a corelației (R^2)
12a	2	$P_{ef} = 17.08 f + 61.3$	0.9154
12b	6	$P_{ef} = 24.843 f - 517$	0.9588
13a	2	$P_{ef} = 4.47 I_P + 41.1$	0.8671
13b	6	$P_{ef} = 33.569 I_P - 5759.2$	0.9290
14a	2	$P_{ef} = 0.0414 I_T^2 - 1.52 I_T + 92.0$	0.9246
14b	6	$P_{ef} = 80.053 I_T - 4766.2$	0.9376
15a	2	$P_{ef} = 4.5 t_p + 10.8$	0.9140
15b	6	$P_{ef} = 2355.8 t_p - 1723.7$	0.9140
16a	2	$P_{ef} = -336.5 v_D + 2071.6$	0.7754
16b	6	$P_{ef} = -1094.3 v_D + 8903.1$	0.8366

După cum se poate observa, dependențele puterii efective P_{ef} de frecvența f , curentul de puls I_P , curentul de declanșare I_T la grosimea de 6 mm și de timpul de puls t_p sunt caracterizate de funcții liniar crescătoare în întreg domeniul analizat. Fac excepție funcția puterii efective de curentul I_T la grosimea de 2 mm, care este o funcție parabolică, precum și funcțiile puterii efective de viteza de avans care, pentru ambele grosimi analizate, sunt de tip liniar descrescătoare.

Comparativ între grosimi, diferențieri mai mari se produc în cazul frecvenței, curentului de puls și a duratei pulsului.

Ca și în cazul tensiunii efective și a curentului efectiv și în cazul puterii efective analiza statistică a influenței reciproce dintre parametrii de sudare au demonstrat, cu un nivel de încredere de 99%, că nu există influențe reciproce între nici o pereche de parametrii.

▪ Analiza statistică a influenței parametrilor asupra puterii efective

a) Grosime 2 mm

Parameters a0, af, aIP, aIT, atP, avD

Variables vD, tP, IT, IP, f, Pef

Function $P_{ef} = a_0 + a_f * f + a_{IP} * I_P + a_{IT} * I_T + a_{tP} * t_P + a_{vD} * v_D$

Confidence 95

Data

Beginning computation...

```
Iteration 0. Sum of squared deviations = 2.34665E+007
Iteration 1. Sum of squared deviations = 1.87574E+006
Iteration 2. Sum of squared deviations = 4.07102E+005
Iteration 3. Sum of squared deviations = 1.55325E+005
Iteration 4. Sum of squared deviations = 9.21273E+004
```

Iteration 5. Sum of squared deviations = 9.21273E+004

---- Final Results ----

Function: $P_{ef} = a_0 + a_f \cdot f + a_{IP} \cdot IP + a_{IT} \cdot IT + a_{tP} \cdot tP + a_{vD} \cdot vD$
 Number of observations = 46
 Maximum allowed number of iterations = 50
 Convergence tolerance factor = 1.000000E-010
 Relative function convergence.
 Number of iterations performed = 5
 Final sum of squared deviations = 9.21273E+004
 Standard error of estimate = 47.9915
 Average deviation = 39.0182
 Maximum deviation for any observation = 90.9902
 Proportion of variance explained (R^2) = 0.9074 (90.74%)

---- Descriptive Statistics for Variables ----

Variable	Minimum value	Maximum value	Mean value	Standard dev.
vD	2.6	3.4	2.91957	0.122238
tP	1.3	2	1.52609	0.112417
IT	3	90	70.8913	19.0651
IP	210	290	240.348	12.5099
f	40	75	59.5652	4.92455
Pef	816.11	1400.17	1078.1	148.652

---- Calculated Parameter Values ----

Parameter	Initial guess	Final estimate	Standard dev.	t	Prob(t)
a0	1	-1201.05	260.902	-4.60	0.00004
af	1	17.0934	1.45455	11.75	0.00001
aIP	1	4.8351	0.574634	8.41	0.00001
aIT	1	2.91391	0.378951	7.69	0.00001
atP	1	551.229	64.0611	8.60	0.00001
avD	1	-325.023	58.743	-5.53	0.00001

---- Analysis of Variance ----

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F value	Prob(F)
Regression	5	902252.9	180450.6	78.35	0.00001
Error	40	92127.3	2303.182		
Total	45	994380.2			

---- 95.000% Confidence Intervals ----

Parameter	Lower limit	Best estimate	Upper limit
a0	-1728.35	-1201.05	-673.739
af	14.1537	17.0934	20.0332
aIP	3.67371	4.8351	5.99648

aIT	2.14802	2.91391	3.67981
atP	421.756	551.229	680.702
avD	-443.748	-325.023	-206.299

b) Grosime 6 mm

parameters a, avd, atp, ait, aip, af
 variables vD, tP, IT, IP, f, Pef
 function $Pef = a + avd * vD + atp * tP + ait * IT + aip * IP + af * f$
 confidence 95

data

Beginning computation...

Iteration 0. Sum of squared deviations = 1.64897E+008
 Iteration 1. Sum of squared deviations = 3.26349E+006
 Iteration 2. Sum of squared deviations = 1.21739E+006
 Iteration 3. Sum of squared deviations = 5.33397E+005
 Iteration 4. Sum of squared deviations = 5.33397E+005

---- Final Results ----

Function: $Pef = a + avd * vD + atp * tP + ait * IT + aip * IP + af * f$
 Number of observations = 35
 Maximum allowed number of iterations = 50
 Convergence tolerance factor = 1.000000E-010
 Relative function convergence.
 Number of iterations performed = 4
 Final sum of squared deviations = 5.33397E+005
 Standard error of estimate = 135.621
 Average deviation = 104.783
 Maximum deviation for any observation = 324.259
 Proportion of variance explained (R^2) = 0.8649 (86.49%)

---- Descriptive Statistics for Variables ----

Variable	Minimum value	Maximum value	Mean value	Standard dev.
vD	5.4	6.1	5.71143	0.113167
tP	1.6	2.1	1.80857	0.0742469
IT	88	100	92.1429	1.61141
IP	235	265	245.571	4.33376
f	105	145	121.286	7.0024
Pef	2077.9	3286.16	2612.75	340.806

---- Calculated Parameter Values ----

Parameter	Initial guess	Final estimate	Standard dev.	t	Prob(t)
a	1	-13989	2372.19	-5.90	0.00001
avd	1	-984.784	205.611	-4.79	0.00005
atp	1	2310.5	313.423	7.37	0.00001
ait	1	83.0479	14.4386	5.75	0.00001

aip	1	31.1073	5.37024	5.79	0.00001
af	1	22.7255	3.32455	6.84	0.00001

---- Analysis of Variance ----

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F value	Prob(F)
Regression	5	3415657	683131.4	37.14	0.00001
Error	29	533397	18393		
Total	34	3949054			

---- 95.000% Confidence Intervals ----

Parameter	Lower limit	Best estimate	Upper limit
a	-18840.8	-13989	-9137.3
avd	-1405.31	-984.784	-564.256
atp	1669.46	2310.5	2951.53
ait	53.5173	83.0479	112.578
aip	20.1238	31.1073	42.0909
af	15.9259	22.7255	29.5251

- **Funcțiile de dependență simultană a puterii efective (P_{ef})**

Ecuatiile multiparametrice liniare (5) și (6) prezintă dependența simultană a puterii efective funcție de cei cinci parametri de sudare luați în considerare, pentru grosimea tablelor de 2 mm, respectiv 6 mm.

$$P_{ef} = -1201 + 17.1f + 4.84I_p + 2.91I_T + 551t_p - 325v_D \quad (5)$$

$$P_{ef} = -13989 + 22.73f + 31.1I_p + 83.0I_T + 2310t_p - 984.8v_D \quad (6)$$

Intervalul de încredere a coeficienților a fost determinat cu un nivel de încredere de 95%. Coeficientul de intensitate a corelației este $R^2 = 0.9074$, respectiv $R^2 = 0.8649$ ceea ce indică o corelație puternică. Abaterea medie a ecuațiilor (5) și (6) este de 39.0 W, respectiv 104.8 W iar abaterea maximă este de 91.0 W, respectiv 324.3 W.

6. Influența parametrilor de sudare asupra puterii de bază (P_G)

Analiza statistică decurge, de asemenea, conform celor arătate în paragrafele precedente. Figurile 17-21 prezintă grafic dependența dintre puterea de bază și parametrii de sudare.

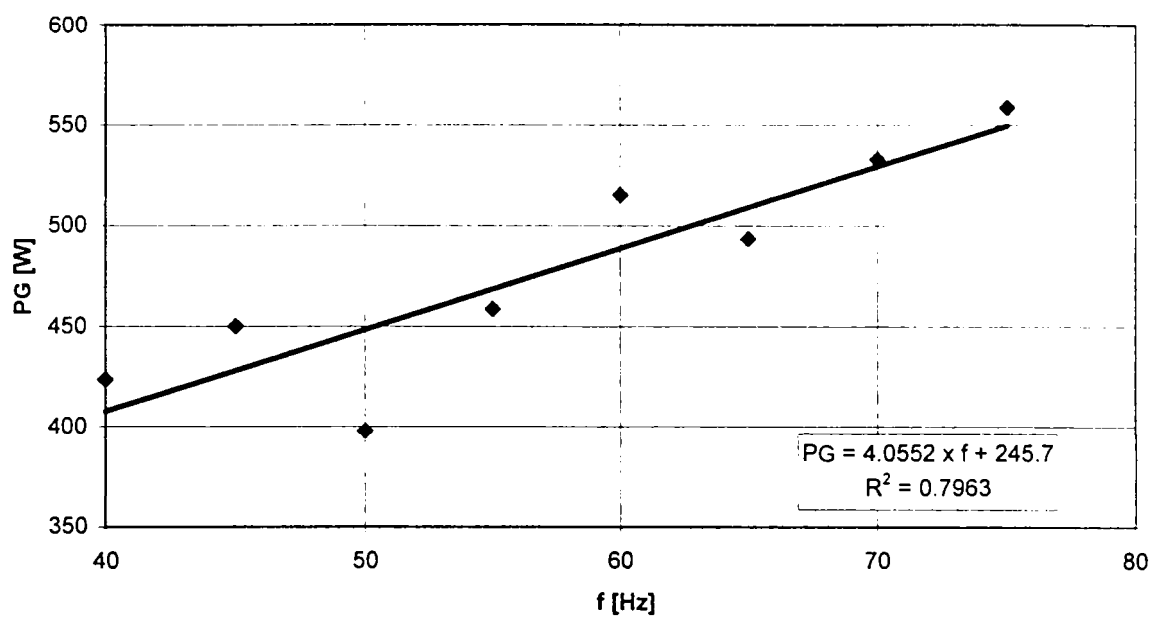


Figura 17a. Influența frecvenței asupra puterii de bază (gros. 2 mm)

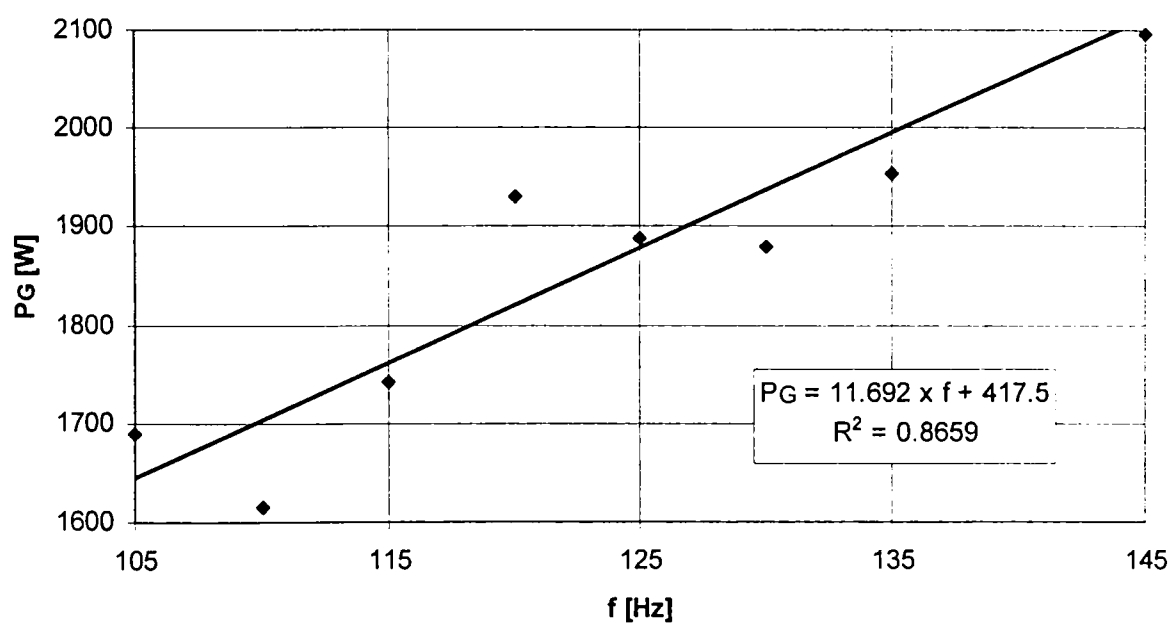


Figura 17b. Influența frecvenței asupra puterii de bază (gros. 6 mm)

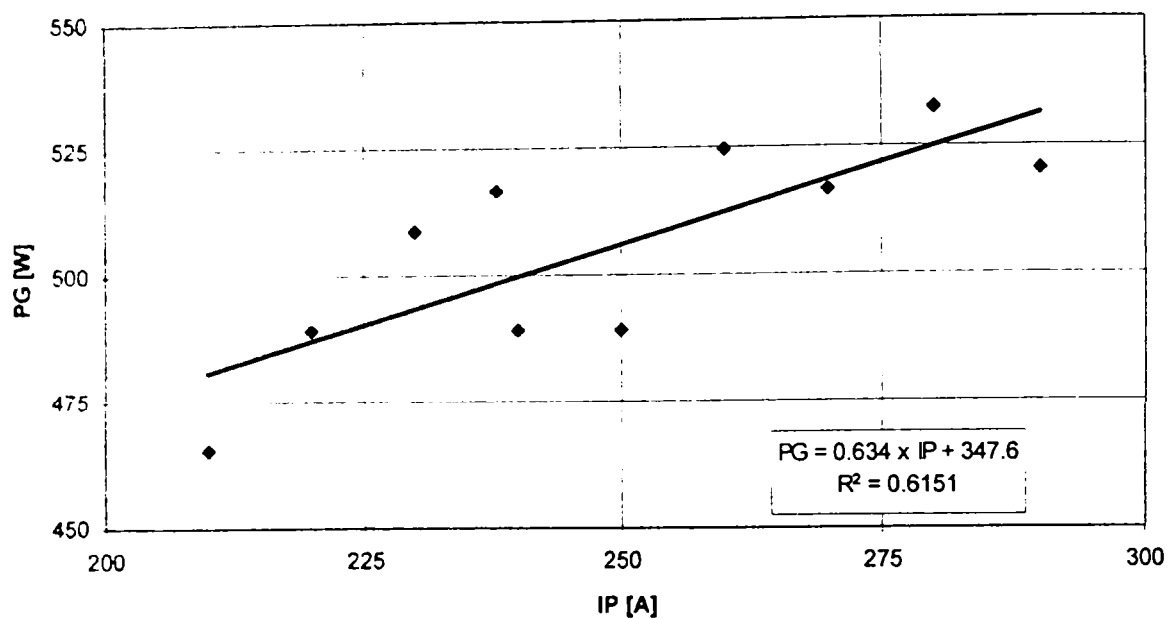


Figura 18a. Influența curentului de puls asupra puterii de bază (gros. 2 mm)

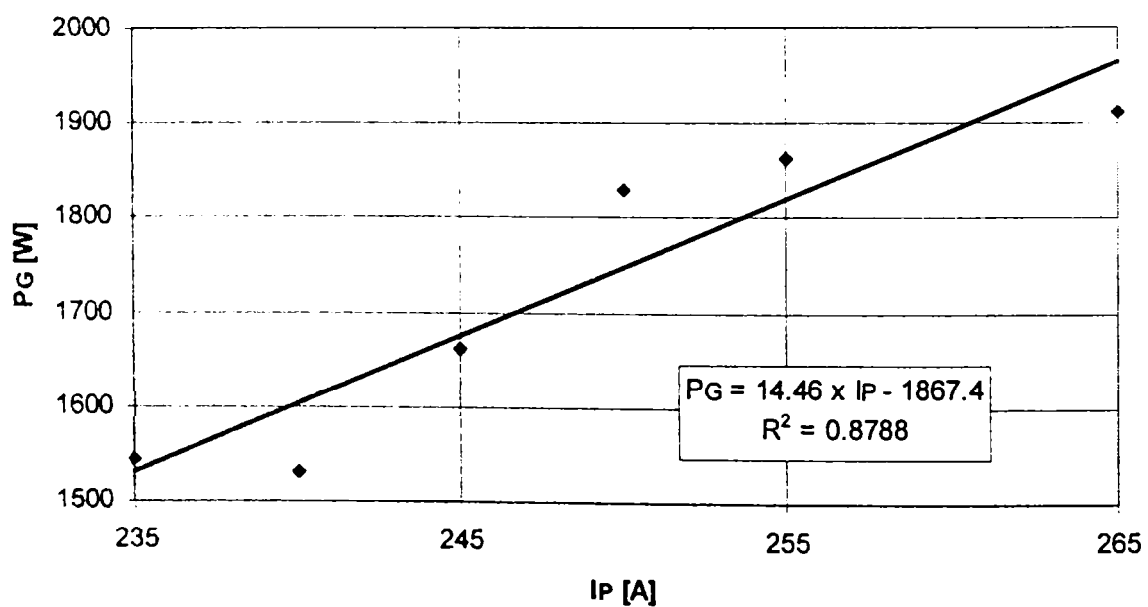


Figura 18b. Influența curentului de puls asupra puterii de bază (gros. 6 mm)

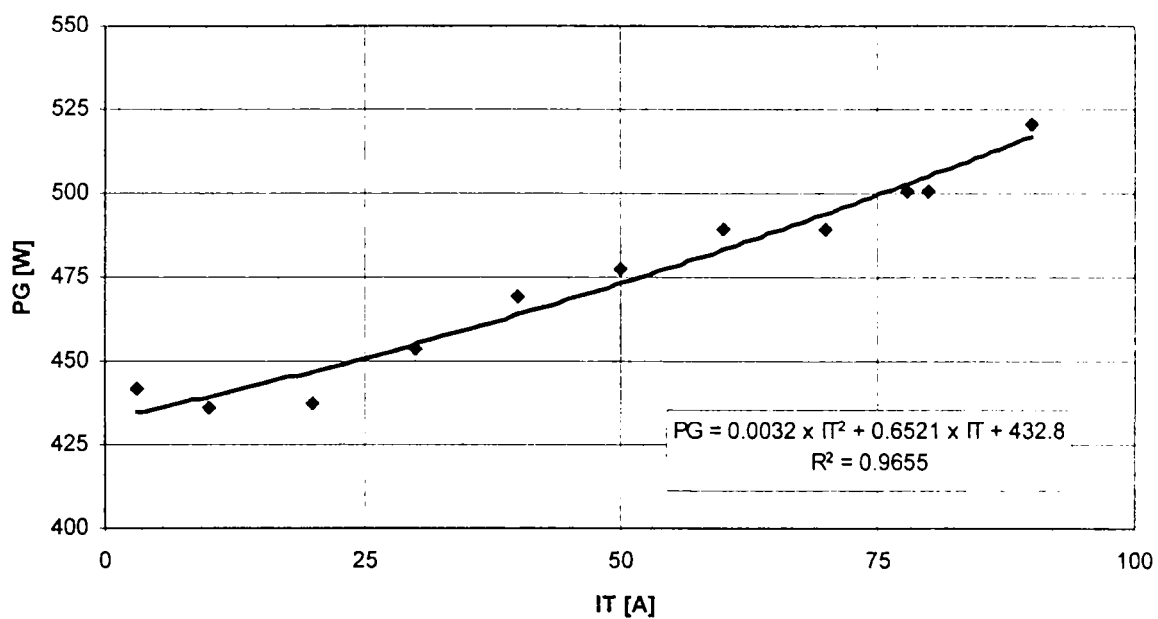


Figura 19a. Influența curentului de declanșare asupra puterii de bază (gros. 2 mm)

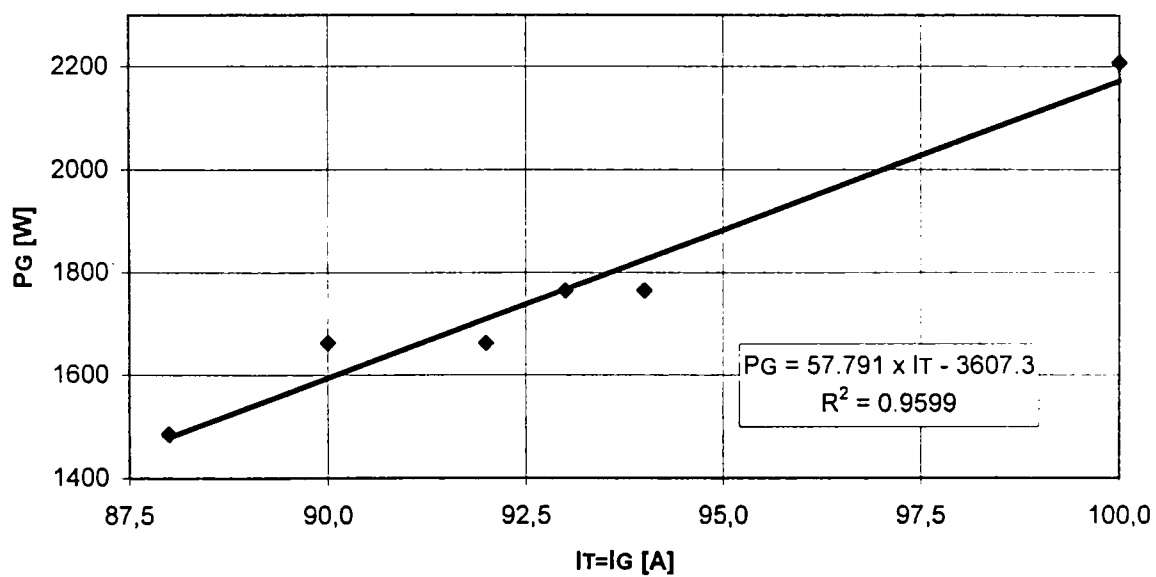


Figura 19b. Influența curentului de declanșare/de bază ($I_T=I_G$), asupra puterii de bază (gros. 6 mm)

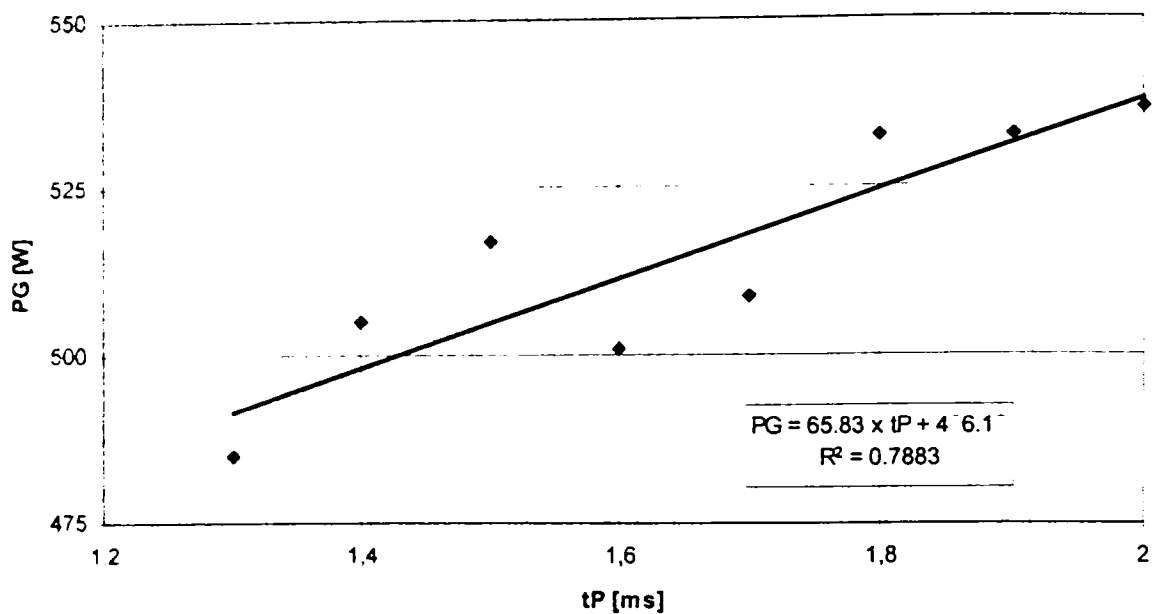


Figura 20a. Influența timpului de puls asupra puterii de bază (gros. 2 mm)

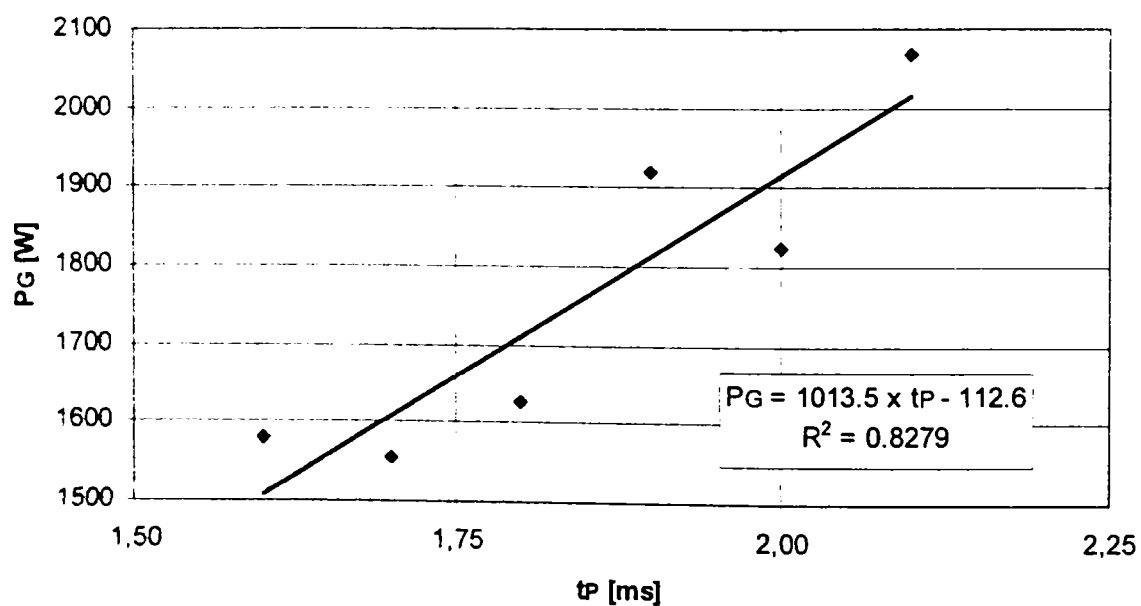


Figura 20b. Influența timpului de puls asupra puterii de bază (gros. 6 mm)

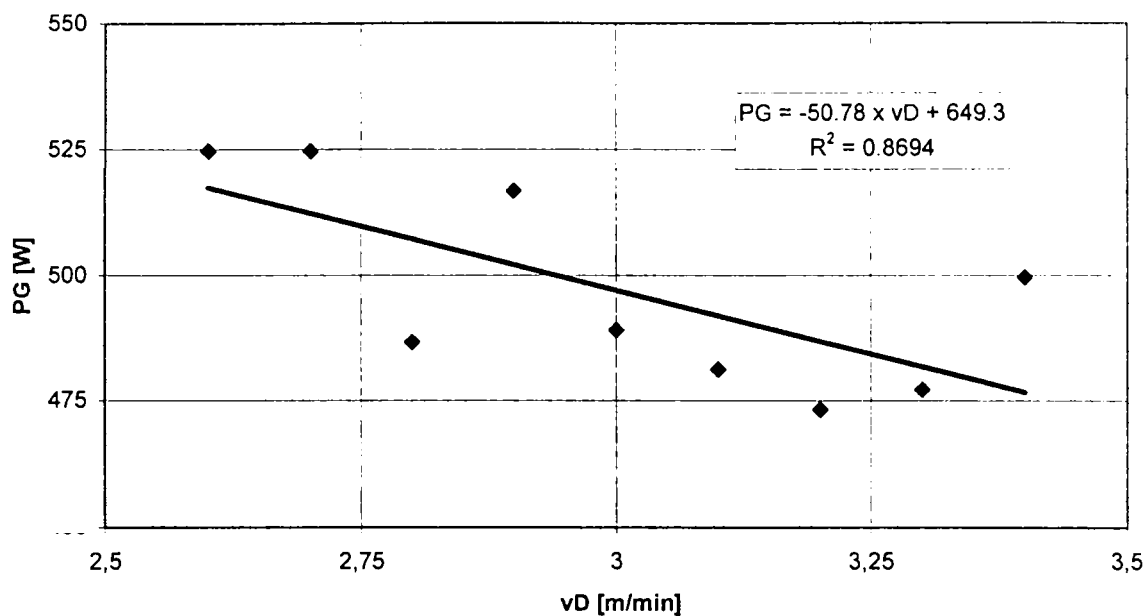


Figura 21a. Influența vitezei de avans a sârmei asupra puterii de bază (gros. 2 mm)

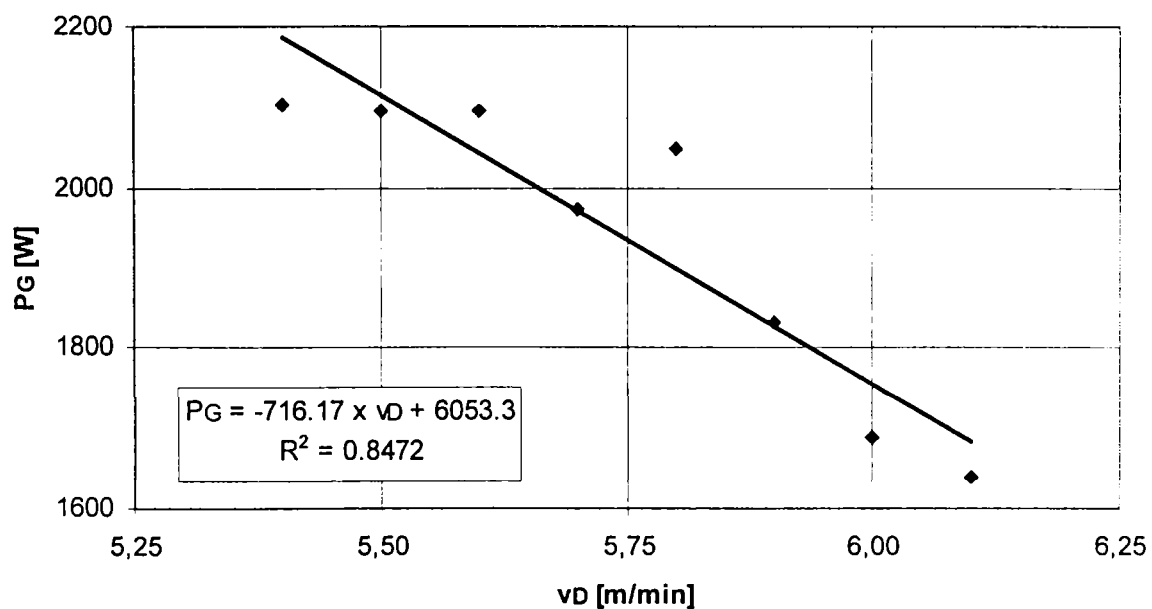


Figura 21b. Influența vitezei de avans a sârmei asupra puterii de bază (gros. 6 mm)

Corespunzător, tabelul 6 prezintă forma analitică a curbelor de regresie și intensitatea corelațiilor.

Tabelul 6. Influența parametrilor de sudare asupra puterii de bază

Figura	Gros. [mm]	Funcția de regresie	Coeфициentul de intensitate a corelației (R^2)
17a	2	$P_G = 4.0552 f + 245.7$	0.7963
17b	6	$P_G = 11.692 f + 417.5$	0.8659
18a	2	$P_G = 0.634 I_p + 347.6$	0.6151
18b	6	$P_G = 14.46 I_p - 1867.4$	0.8788
19a	2	$P_G = 0.0032 I_T^2 + 0.6521 I_T + 432.8$	0.9655
19b	6	$P_G = 57.791 I_T - 3607.3$	0.9599
20a	2	$P_G = 65.83 t_p + 406.13$	0.7883
20b	6	$P_G = 1013.5 t_p - 112.6$	0.8279
21a	2	$P_G = -50.78 v_D + 649.3$	0.8694
21b	6	$P_G = -716.17 v_D + 6053.3$	0.8472

Dependențele puterii de bază în funcție de frecvența f , curentul de puls I_p , curentul de declanșare I_T și durata de puls t_p , sunt de formă liniar crescătoare în intervalul analizat. Face excepție dependența puterii de bază în funcție de viteza de avans v_D , care este de formă liniar descrescătoare.

Comparația între grosimi pune în evidență în toate cazurile dependențe mai intense în cazul grosimii mai mari, de 6 mm.

Ca și în cazul paragrafelor precedente și în cazul puterii de bază, analiza statistică a influenței reciproce dintre parametri de sudare au demonstrat, cu un nivel de încredere de 99%, că nu există influențe reciproce între nici o pereche de parametrii.

• Analiza statistică a influenței parametrilor asupra puterii de bază

a) Grosime 2 mm

```
Parameters a0,avD,atP,aIT,aIP,af
Variables vD,tP,IT,IP,f,PG
Function PG=a0+avD*vD+atP*tP+aIT*IT+aIP*IP+af*f
Confidence 95
```

Data

Beginning computation...

```
Iteration 0. Sum of squared deviations = 6.57474E+005
Iteration 1. Sum of squared deviations = 2.47006E+004
Iteration 2. Sum of squared deviations = 1.45640E+004
Iteration 3. Sum of squared deviations = 9.61977E+003
Iteration 4. Sum of squared deviations = 9.61977E+003
```

---- Final Results ----

Function: $PG=a_0+avD*vD+atP*tP+aIT*IT+aIP*IP+af*f$
 Number of observations = 46
 Maximum allowed number of iterations = 50
 Convergence tolerance factor = 1.000000E-010
 Relative function convergence.
 Number of iterations performed = 4
 Final sum of squared deviations = 9.61977E+003
 Standard error of estimate = 15.5079
 Average deviation = 10.7886
 Maximum deviation for any observation = 58.5894
 Proportion of variance explained (R^2) = 0.8097 (80.97%)

---- Descriptive Statistics for Variables ----

Variable	Minimum value	Maximum value	Mean value	Standard dev.
vD	2.6	3.4	2.91957	0.122238
tP	1.3	2	1.52609	0.112417
IT	3	90	70.8913	19.0651
IP	210	290	240.348	12.5099
f	40	75	59.5652	4.92455
PG	397.88	558.83	493.277	33.516

---- Calculated Parameter Values ----

Parameter	Initial guess	Final estimate	Standard dev.	t	Prob(t)
a0	1	44.2558	84.3075	0.52	0.60253
avD	1	-46.5114	18.9821	-2.45	0.01874
atP	1	77.987	20.7006	3.77	0.00053
aIT	1	0.884063	0.122454	7.22	0.00001
aIP	1	0.628111	0.185686	3.38	0.00162
af	1	4.23338	0.470021	9.01	0.00001

---- Analysis of Variance ----

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F value	Prob(F)
Regression	5	40929.69	8185.939	34.04	0.00001
Error	40	9619.773	240.4943		
Total	45	50549.47			

---- 95.000% Confidence Intervals ----

Parameter	Lower limit	Best estimate	Upper limit
a0	-126.137	44.2558	214.649
avD	-84.8759	-46.5114	-8.14689
atP	36.1493	77.987	119.825
aIT	0.636573	0.884063	1.13155
aIP	0.252823	0.628111	1.0034
af	3.28342	4.23338	5.18333

b) Grosime 6 mm

parameters a, avd, atp, ait, aip, af
 variables vD, tP, IT, IP, f, PG
 function $PG=a+avd*vD+atp*tP+ait*IT+aip*IP+af*f$
 confidence 95

data

Beginning computation...

Iteration 0. Sum of squared deviations = 6.57607E+007
 Iteration 1. Sum of squared deviations = 1.17108E+006
 Iteration 2. Sum of squared deviations = 6.84174E+005
 Iteration 3. Sum of squared deviations = 5.35604E+005
 Iteration 4. Sum of squared deviations = 5.35604E+005

---- Final Results ----

Function: $PG=a+avd*vD+atp*tP+ait*IT+aip*IP+af*f$
 Number of observations = 35
 Maximum allowed number of iterations = 50
 Convergence tolerance factor = 1.000000E-010
 Relative function convergence.
 Number of iterations performed = 4
 Final sum of squared deviations = 5.35604E+005
 Standard error of estimate = 135.901
 Average deviation = 99.4264
 Maximum deviation for any observation = 311.318
 Proportion of variance explained (R^2) = 0.6114 (61.14%)

---- Descriptive Statistics for Variables ----

Variable	Minimum value	Maximum value	Mean value	Standard dev.
vD	5.4	6.1	5.71143	0.113167
tP	1.6	2.1	1.80857	0.0742469
IT	88	100	92.1429	1.61141
IP	235	265	245.571	4.33376
f	105	145	121.286	7.0024
PG	1484.48	2207.33	1824.43	201.328

---- Calculated Parameter Values ----

Parameter	Initial guess	Final estimate	Standard dev.	t	Prob(t)
a	1	-5659.73	2377.1	-2.38	0.02405
avd	1	-554.713	206.036	-2.69	0.01166
atp	1	884.213	314.071	2.82	0.00867
ait	1	53.0745	14.4684	3.67	0.00098
aip	1	10.8276	5.38134	2.01	0.05359
af	1	12.399	3.33142	3.72	0.00085

---- Analysis of Variance ----

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F value	Prob(F)
Regression	5	842512.3	168502.5	9.12	0.00003
Error	29	535604.3	18469.11		
Total	34	1378117			

---- 95.000% Confidence Intervals ----

Parameter	Lower limit	Best estimate	Upper limit
a	-10521.5	-5659.73	-797.952
avd	-976.11	-554.713	-133.316
atp	241.857	884.213	1526.57
ait	23.4829	53.0745	82.6661
aip	-0.178653	10.8276	21.8338
af	5.58535	12.399	19.2126

▪ **Funcțiile de dependență simultană a puterii de bază**

Ecuțiile liniare multiparametrice (7) și (8) prezintă dependența simultană a puterii de bază în funcție de cei cinci parametri de sudare luați în considerare.

$$P_G = 44.2 + 4.23f + 0.628I_P + 0.884I_T + 78t_p - 46.5v_D \quad (7)$$

$$P_G = -5659 + 12.4f + 10.83I_P + 53.07I_T + 884.2t_p - 554.7v_D \quad (8)$$

Intervalul de încredere a coeficienților din ecuațiile (7) și (8) a fost determinat cu un nivel de încredere de 95%. Coeficientul de intensitate a corelațiilor este $R^2 = 0.8097$ ceea ce indică o corelație puternică, respectiv $R^2 = 0.6114$, ceea ce indică o corelație slabă. Abaterea medie este de 10.8 W, respectiv 99.4 W, iar abaterea maximă este de 58.6 W, respectiv 311.3 W.

7. Influența parametrilor de sudare asupra puterii de puls (P_P)

Analiza statistică decurge, de asemenea, conform celor arătate în paragrafele precedente. Figurile 22-26 prezintă grafic dependența dintre puterea de bază și parametri de sudare.

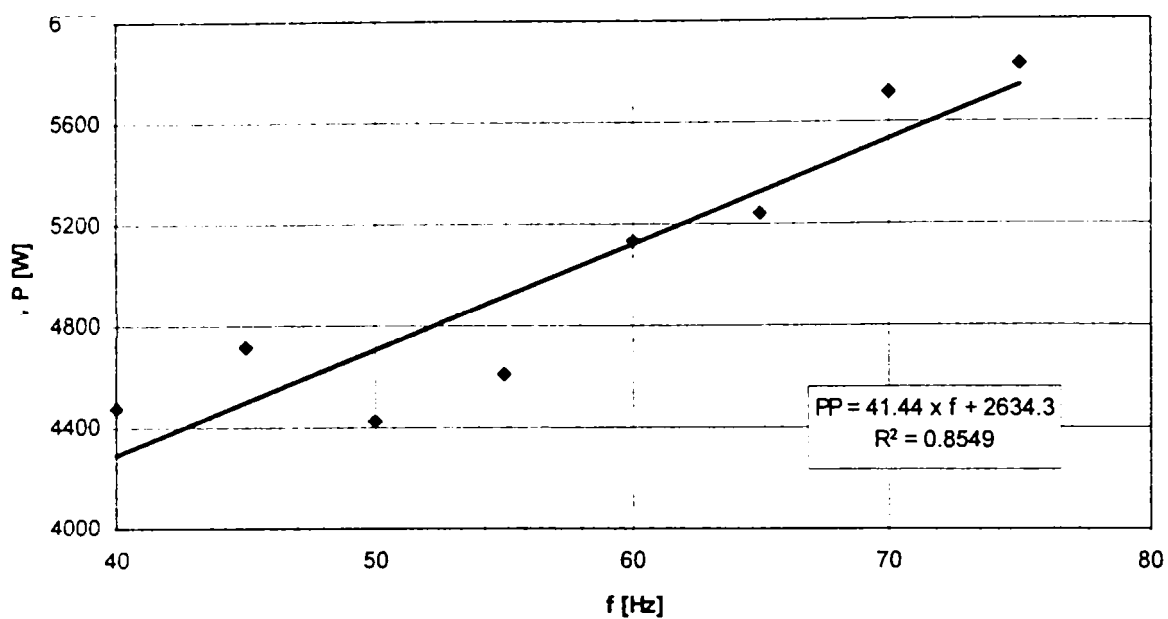


Figura 22a. Influența frecvenței asupra puterii de puls (gros. 2 mm)

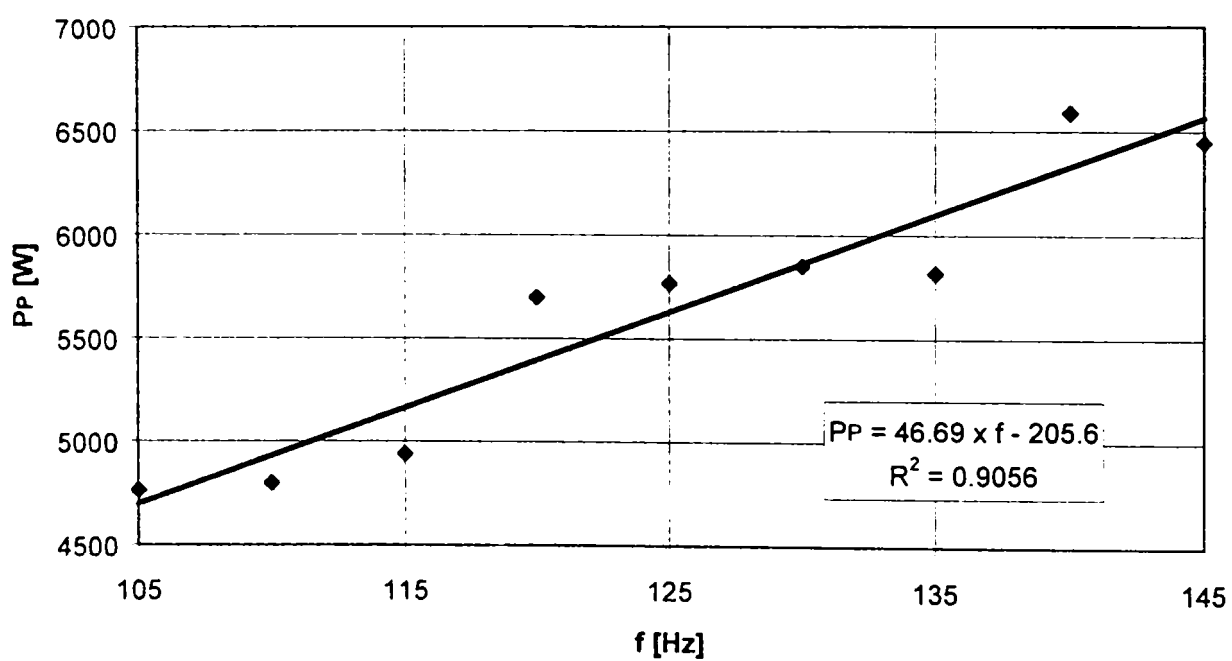


Figura 22b. Influența frecvenței asupra puterii de puls (gros. 6 mm)

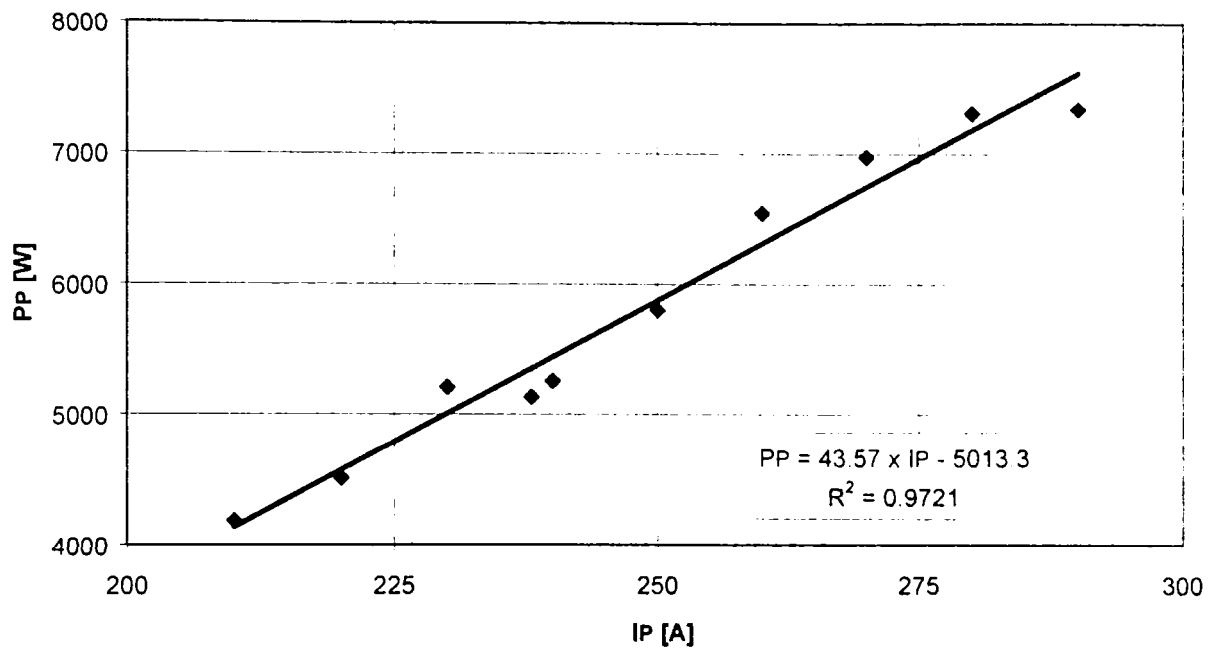


Figura 23a. Influența curentului de puls asupra puterii de puls (gros. 2 mm)

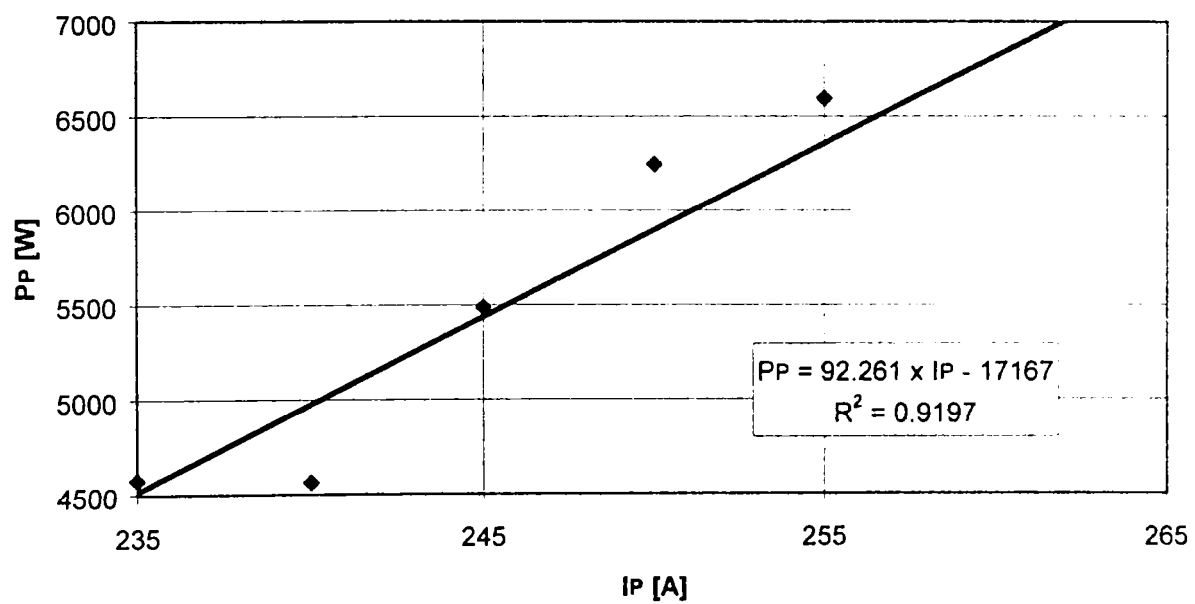


Figura 23b. Influența curentului de puls asupra puterii de puls (gros. 6 mm)

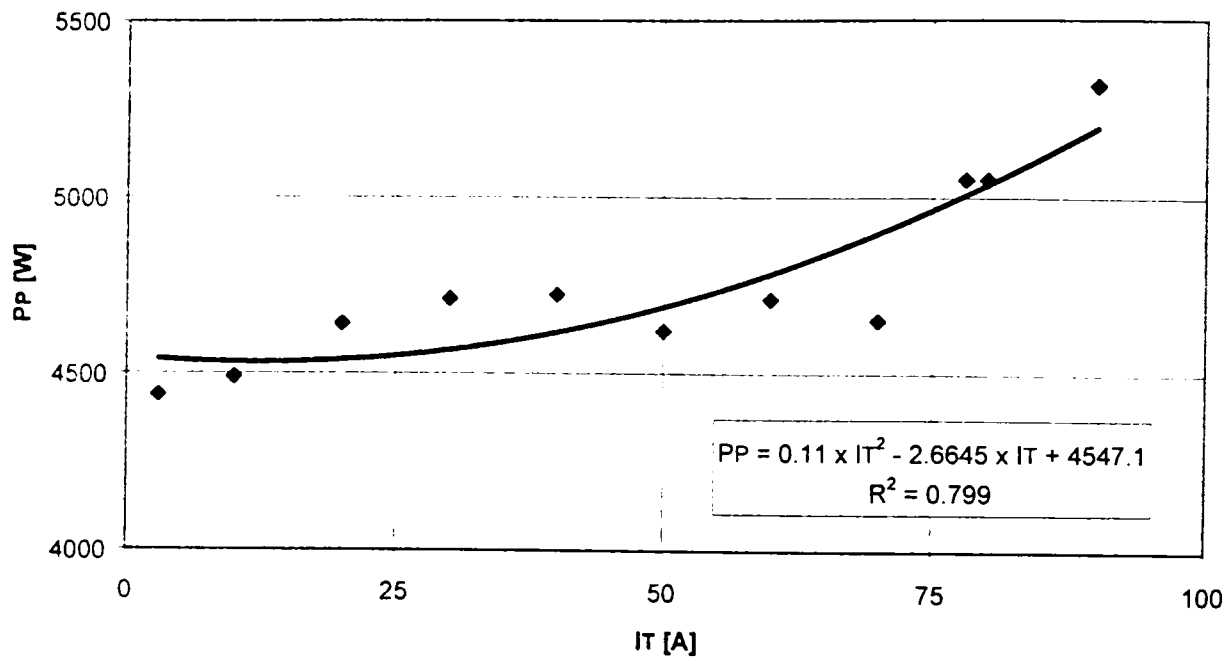


Figura 24a. Influența curentului de declanșare asupra puterii de puls (gros. 2 mm)

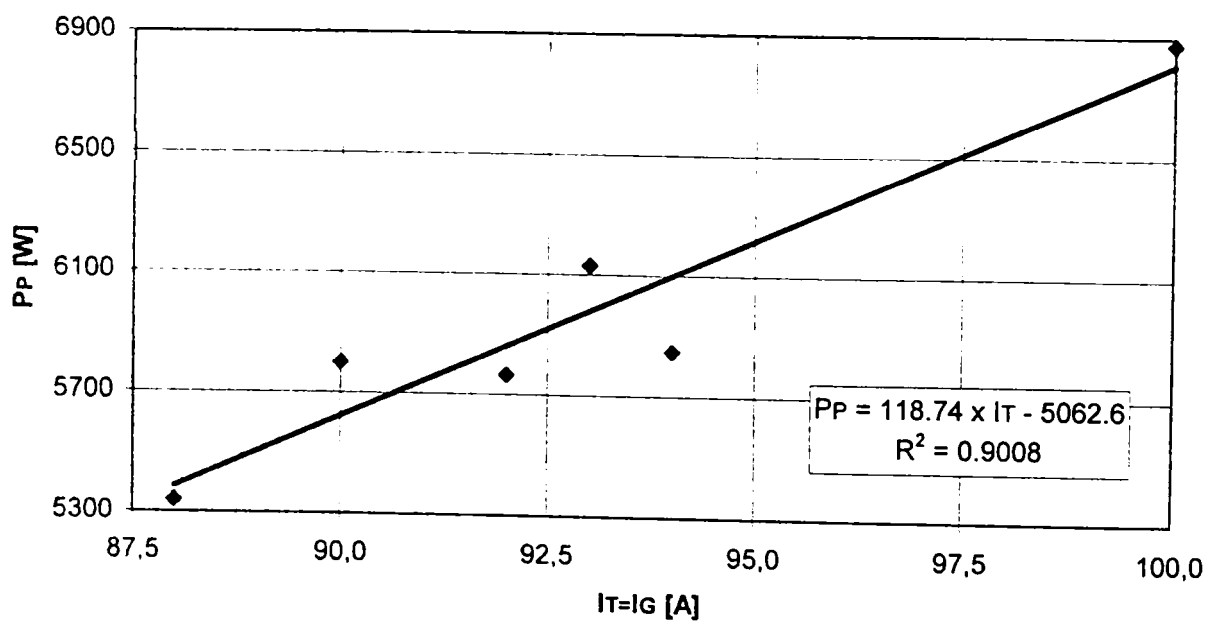


Figura 24b. Influența curentului de declanșare/de bază ($I_T=I_G$), asupra puterii de puls (gros. 6 mm)

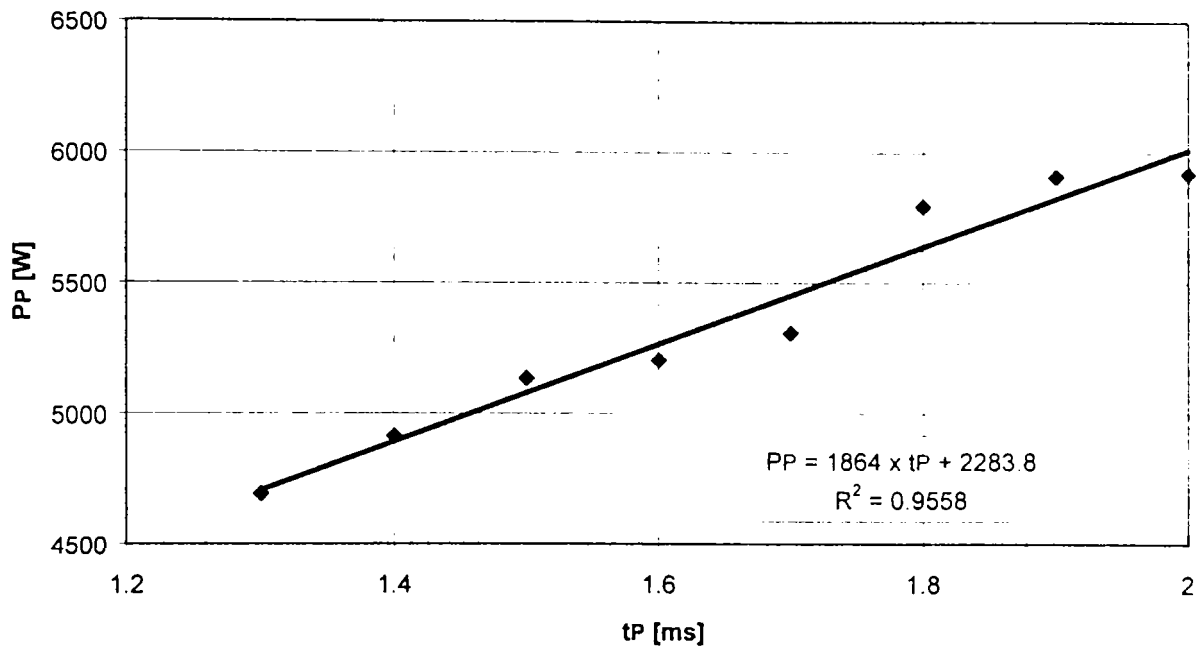


Figura 25a. Influența timpului de puls asupra puterii de puls (gros. 2 mm)

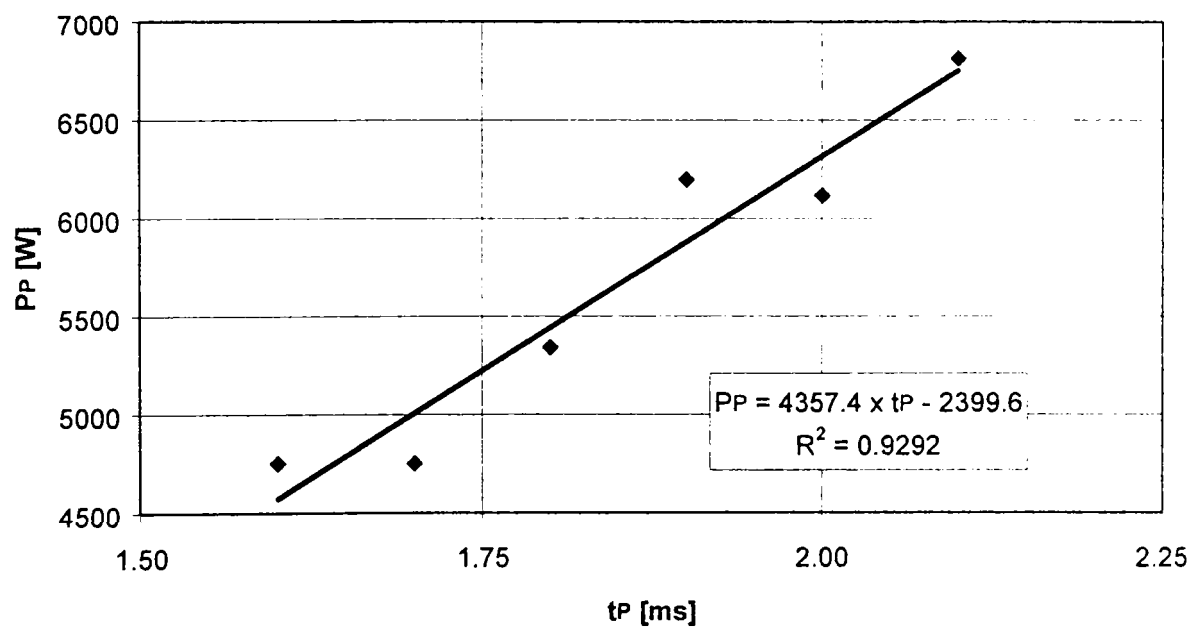


Figura 25b. Influența timpului de puls asupra puterii de puls (gros. 6 mm)

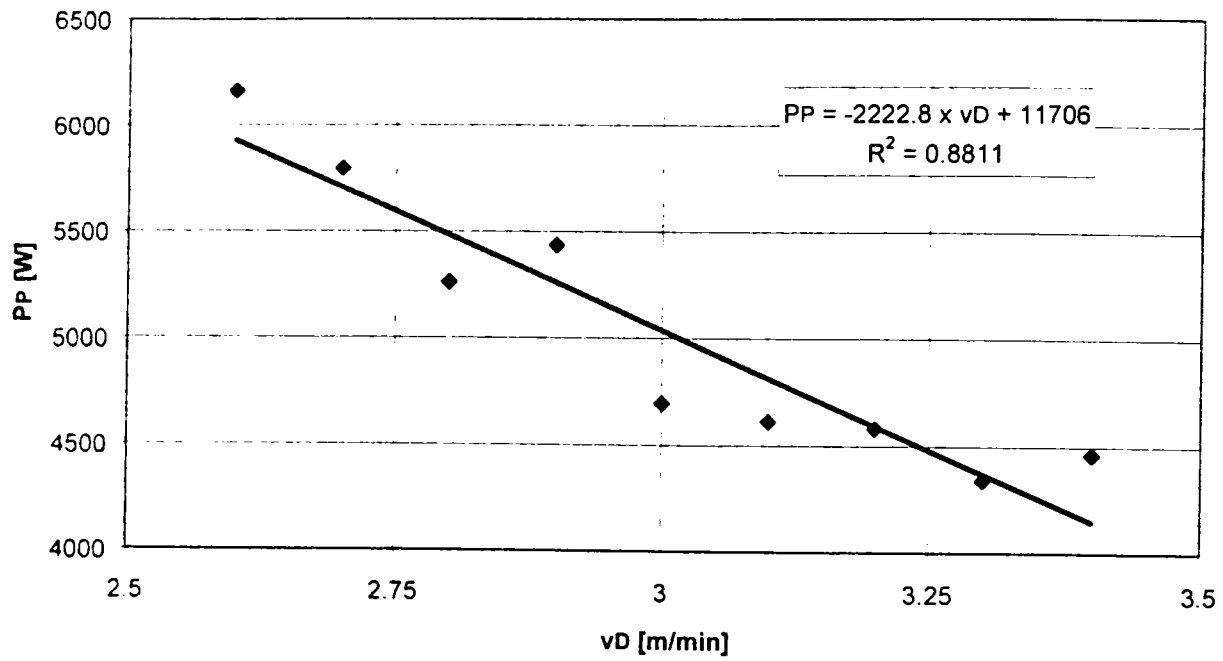


Figura 26a. Influența vitezei de avans a sârmei asupra puterii de puls (gros. 2 mm)

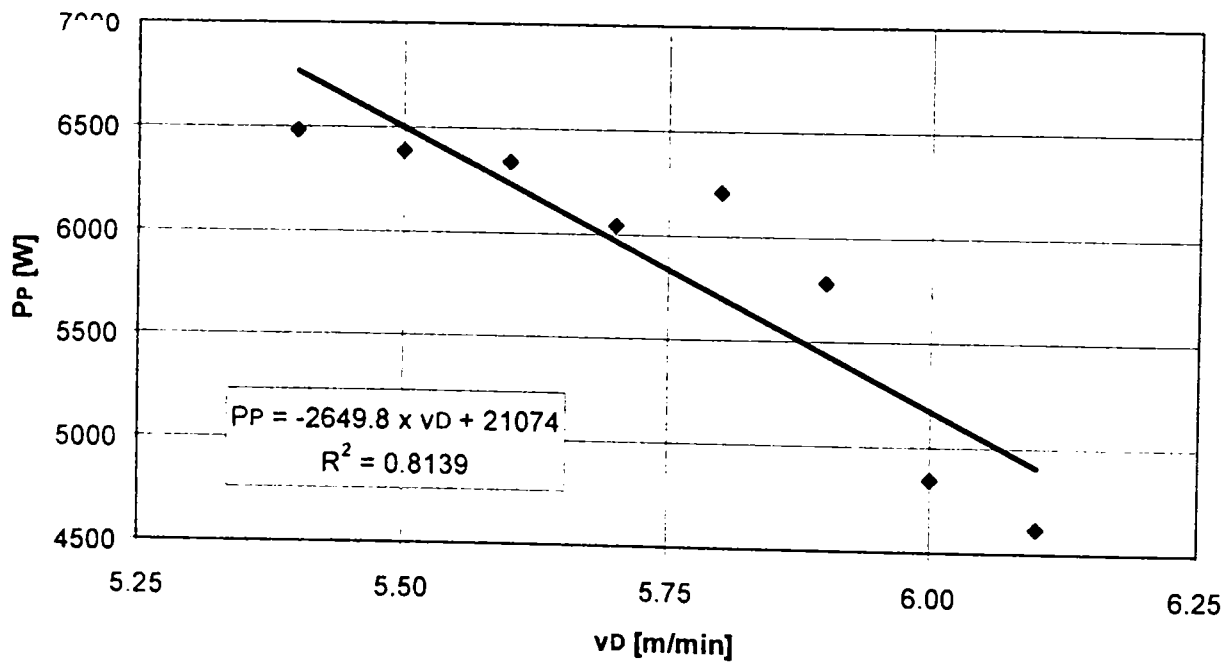


Figura 26b. Influența vitezei de avans a sârmei asupra puterii de puls (gros. 6 mm)

Corespunzător, tabelul 7 prezintă forma analitică a curbelor de regresie și intensitatea corelațiilor.

Tabelul 7. Influența parametrilor de sudare asupra puterii de puls

Figura	Gros. [mm]	Funcția de regresie	Coefficientul de intensitate a corelației (R^2)
22a	2	$P_p = 41.44 f + 2634.3$	0.8549
22b	6	$P_p = 46.69 f - 205.6$	0.9056
23a	2	$P_p = 43.57 I_p - 5013.3$	0.9721
23b	6	$P_p = 92.261 I_p - 17167$	0.9197
24a	2	$P_p = 0.11 I_T^2 - 2.6645 I_T + 4547.1$	0.7990
24b	6	$P_p = 118.74 I_T - 5062.6$	0.9008
25a	2	$P_p = 1864 t_p + 2283.8$	0.9558
25b	6	$P_p = 4357.4 t_p - 2399.6$	0.9292
26a	2	$P_p = -2222.8 v_D + 11706$	0.8811
26b	6	$P_p = -2649.8 v_D + 21074$	0.8139

Dependențele puterii de puls P_p de frecvența f , curentul de puls I_p , curentul de declanșare I_T și durata pulsului t_p sunt caracterizate de funcții liniar crescătoare cu excepția curentului I_T , la grosimea de 2 mm, unde funcția este de tip parabolic. Dependența puterii de puls P_p de viteza de avans v_D , este reprezentată de funcții liniar descrescătoare.

Comparația între grosimi indică varianțe relativ mari în cazul parametrului durată de puls t_p , respectiv viteză de avans v_D , la grosimea de 6 mm.

În cazul puterii de puls, analiza statistică a influenței reciproce dintre parametrii de sudare au demonstrat, cu un nivel de încredere de 99%, că nu există influențe reciproce între nici o pereche de parametrii.

▪ Analiza statistică a influenței parametrilor asupra puterii de puls

a) Grosime 2 mm

```
Parameters a0,avD,atP,aIT,aIP,af
Variables vD,tP,IT,IP,f,PP
Function PP=a0+avD*vD+atP*tP+aIT*IT+aIP*IP+af*f
Confidence 95
```

Data

Beginning computation...

```
Iteration 0. Sum of squared deviations = 1.09390E+009
Iteration 1. Sum of squared deviations = 1.93627E+007
Iteration 2. Sum of squared deviations = 2.10280E+006
Iteration 3. Sum of squared deviations = 1.89359E+006
Iteration 4. Sum of squared deviations = 1.89359E+006
```

---- Final Results ----

Function: $PP = a_0 + avD \cdot vD + atP \cdot tP + aIT \cdot IT + aIP \cdot IP + af \cdot f$
 Number of observations = 46
 Maximum allowed number of iterations = 50
 Convergence tolerance factor = 1.000000E-010
 Both parameter and relative function convergence.
 Number of iterations performed = 4
 Final sum of squared deviations = 1.89359E+006
 Standard error of estimate = 217.577
 Average deviation = 165.67
 Maximum deviation for any observation = 442.516
 Proportion of variance explained (R^2) = 0.9282 (92.82%)

---- Descriptive Statistics for Variables ----

Variable	Minimum value	Maximum value	Mean value	Standard dev.
vD	2.6	3.4	2.91957	0.122238
tP	1.3	2	1.52609	0.112417
IT	3	90	70.8913	19.0651
IP	210	290	240.348	12.5099
f	40	75	59.5652	4.92455
PP	4182.33	7342.38	5196.18	765.797

---- Calculated Parameter Values ----

Parameter	Initial guess	Final estimate	Standard dev.	t	Prob(t)
a0	1	-5541.79	1182.84	-4.69	0.00003
avD	1	-2120.86	266.321	-7.96	0.00001
atP	1	1659.24	290.431	5.71	0.00001
aIT	1	10.9215	1.71804	6.36	0.00001
aIP	1	46.1353	2.60519	17.71	0.00001
af	1	42.5593	6.59444	6.45	0.00001

---- Analysis of Variance ----

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F value	Prob(F)
Regression	5	2.449646E+007	4899292	103.49	0.00001
Error	40	1893589	47339.73		
Total	45	2.639005E+007			

---- 95.000% Confidence Intervals ----

Parameter	Lower limit	Best estimate	Upper limit
a0	-7932.42	-5541.79	-3151.17
avD	-2659.11	-2120.86	-1582.6
atP	1072.25	1659.24	2246.23
aIT	7.44915	10.9215	14.3938
aIP	40.87	46.1353	51.4006

af 29.2313 42.5593 55.8872

b) Grosime 6 mm

Parameters a0, avD, atP, aIT, aIP, af

Variables vD, tP, IT, IP, f, PG

Function $PG = a0 + avD \cdot vD + atP \cdot tP + aIT \cdot IT + aIP \cdot IP + af \cdot f$

Confidence 95

Data

Beginning computation...

Iteration 0. Sum of squared deviations = 6.57474E+005
 Iteration 1. Sum of squared deviations = 2.47006E+004
 Iteration 2. Sum of squared deviations = 1.45640E+004
 Iteration 3. Sum of squared deviations = 9.61977E+003
 Iteration 4. Sum of squared deviations = 9.61977E+003

---- Final Results ----

Function: $PG = a0 + avD \cdot vD + atP \cdot tP + aIT \cdot IT + aIP \cdot IP + af \cdot f$

Number of observations = 46

Maximum allowed number of iterations = 50

Convergence tolerance factor = 1.000000E-010

Relative function convergence.

Number of iterations performed = 4

Final sum of squared deviations = 9.61977E+003

Standard error of estimate = 15.5079

Average deviation = 10.7886

Maximum deviation for any observation = 58.5894

Proportion of variance explained (R^2) = 0.8097 (80.97%)

---- Descriptive Statistics for Variables ----

Variable	Minimum value	Maximum value	Mean value	Standard dev.
vD	2.6	3.4	2.91957	0.122238
tP	1.3	2	1.52609	0.112417
IT	3	90	70.8913	19.0651
IP	210	290	240.348	12.5099
f	40	75	59.5652	4.92455
PG	397.88	558.83	493.277	33.516

---- Calculated Parameter Values ----

Parameter	Initial guess	Final estimate	Standard dev.	t	Prob(t)
a0	1	44.2558	84.3075	0.52	0.60253
avD	1	-46.5114	18.9821	-2.45	0.01874
atP	1	77.987	20.7006	3.77	0.00053
aIT	1	0.884063	0.122454	7.22	0.00001
aIP	1	0.628111	0.185686	3.38	0.00162
af	1	4.23338	0.470021	9.01	0.00001

---- Analysis of Variance ----

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F value	Prob(F)
Regression	5	40929.69	8185.939	34.04	0.00001
Error	40	9619.773	240.4943		
Total	45	50549.47			

---- 95.000% Confidence Intervals ----

Parameter	Lower limit	Best estimate	Upper limit
aC	-126.137	44.2558	214.649
avD	-84.8759	-46.5114	-8.14689
atP	36.1493	77.987	119.825
aIT	0.636573	0.884063	1.13155
aIP	0.252823	0.628111	1.0034
af	3.28342	4.23338	5.18333

- **Funcțiile de dependență simultană a puterii de puls (P_p)**

Ecuatiile liniare multiparametrice (9) și (10) prezintă dependența simultană a puterii de puls în funcție de cei cinci parametri de sudare luați în considerare.

$$P_p = -5542 + 42.6f + 46.1I_p + 10.9I_T + 1659t_p - 2120v_D \quad (9)$$

$$P_p = 44.3 + 4.233f + 0.6281I_p + 0.8840I_T + 77.98t_p - 46.51v_D \quad (10)$$

Intervalul de încredere a coeficienților din ecuațiile a fost determinat cu un nivel de încredere de 95%. Coeficientul de intensitate a corelațiilor este $R^2 = 0.9282$, respectiv $R^2 = 0.8097$ ceea ce indică o corelație puternică. Abaterea medie a ecuațiilor este de 165.7 W, respectiv 10.8 W, iar abaterea maximă este de 442.5 W, respectiv 58.59 W.

8. Concluziile

- În vederea calculării automate a parametrilor de sudare de bază, funcție de parametri de reglaj, a fost elaborat un program de calcul în MS Visual Basic, ce poate fi încorporat și într-un sistem informatic mai complex.
- Analiza statistică a cuprins dependențele tensiunii efective U_{ef} , a curentului efectiv I_{ef} , a puterii efective P_{ef} , a puterii de bază P_G și a puterii de puls P_p de următorii parametri ai procesului de sudare: frecvența f , intensitatea curentului de puls I_p , intensitatea curentului de declanșare I_T , respectiv a curentului de bază I_G , durata pulsului de curent t_p și viteza de avans a sârmei electrod v_D . S-au obținut astfel un număr de 50 de corelații statistice monoparametrice și 10

corelații statistice multiparametrice pentru cele două grosimi de tablă de aluminiu studiate, 2mm și 6mm.

- În toate cazurile coeficientul de intensitate a corelației R^2 s-a situat peste valoarea 0,8 (în majoritatea cazurilor peste 0,9) ceea ce indică legături statistice foarte strânse. Analiza influenței reciproce dintre parametri de sudare a relevat, cu un nivel de încredere de 99%, absența acestora la oricare pereche de parametri.
- Dependențele tensiunii efective de frecvență, de curent și de durată de puls sunt de tip liniar crescătoare. Fac excepție dependențele $U_{ef}=f(I_T)$ la grosimea de 2 mm, unde funcția este de tip parabolic, precum și dependențele tensiunii efective de viteza de avans, reprezentate de regresii liniare descrescătoare. Parametrul durată de puls diferențiază semnificativ dependențele obținute la cele două grosimi 2 și 6 mm.
- Dependențele curentului efectiv, de frecvență, curent și durată de puls, curent de declanșare și de viteza de avans la grosimea de 2 mm sunt reprezentate de regresii liniar crescătoare. Dependența $I_{ef}=f(v_D)$ la grosimea de 6 mm este reprezentată de o funcție parabolică.
- Dependențele puterii efective, ale puterii de bază și ale puterii de puls de frecvență, de curent și de durată de puls și curent de declanșare la grosimi de 6 mm reprezintă regresii liniar crescătoare. Aceleași dependențe de viteza de avans sunt reprezentate prin funcții liniar descrescătoare.
- Rezultă că energia consumată la sudarea în impulsuri depinde pe lângă factorii cunoscuți: tensiune, curent, viteza de sudare și de frecvența curentului de puls. Această din urmă dependență este pe de o parte directă (relațiile din tabelele 5-7), iar pe de altă parte implicită, în primul rând prin intermediul curentului efectiv (relațiile din tabelul 4), iar în al doilea rând prin intermediul tensiunii efective (relațiile din tabelul 3).
- Din compararea funcțiilor de putere rezultă diferențe semnificative între grosimi la mai mulți parametri de reglaj analizați.

CAPITOLUL VI

INVESTIGAREA FACTORILOR DE CALITATE A DEPUNERILOR PRIN SUDARE

Cuprinsul:

1. Măsurarea parametrilor geometrici ai depunerilor
2. Determinarea influenței lungimii libere
3. Analiza metalografică
4. Încercarea de duritate
5. Examinarea radiografică
6. Concluziile

1. Măsurarea parametrilor geometrici ai depunerilor prin sudare

Parametrii geometrici ai depunerilor prin trecere cu un singur rând se determină pe baza probelor de analiză macroscopică în secțiune transversală (figura 1).

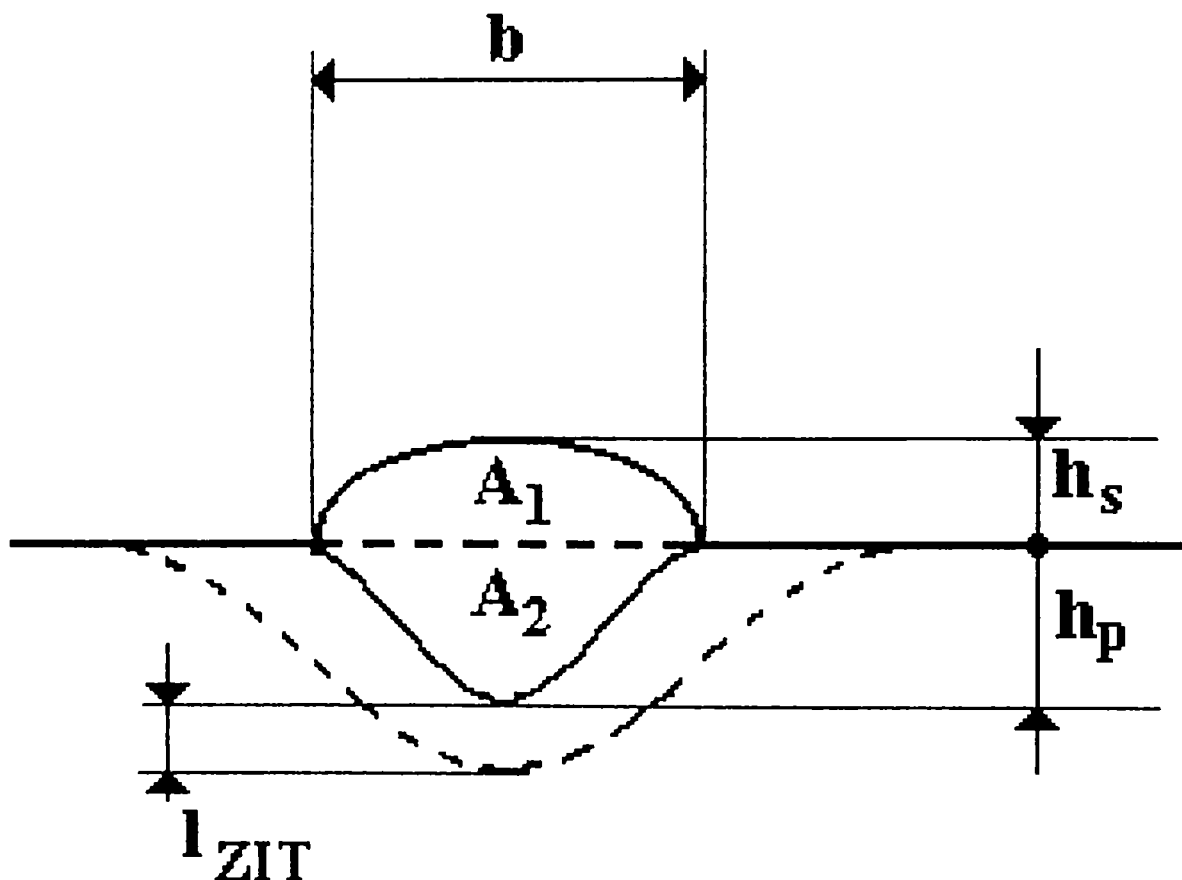


Figura 1. Parametrii geometrici ai cusăturii sudate

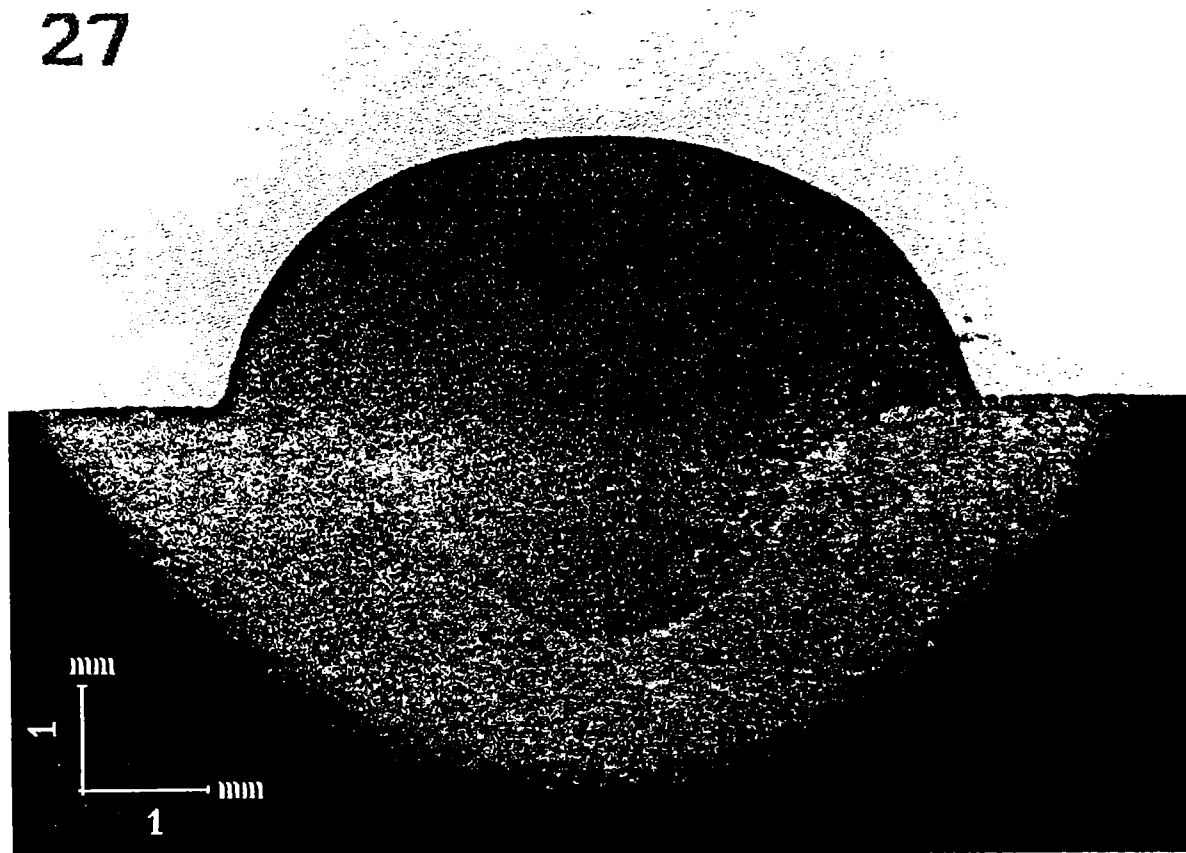
Aceștia sunt: lățimea b , supraînălțarea h_s , adâncimea de pătrundere h_p , lățimea zonei influențate termic l_{ZIT} în secțiunea maximă de pătrundere, precum și coeficientul de participare a depunerii k_p , obținut din relația:

$$k_p = \frac{A_2}{A_1 + A_2} \cdot 100 \quad (\%) \quad (1)$$

unde A_1 și A_2 sunt suprafețele reprezentate în figura 1.

În vederea măririi preciziei determinării parametrilor respectivi, secțiunile transversale au fost scanate pe calculator și mărite de 15 ori, în cazul depunerilor pe grosimea de 6 mm, respectiv de 21,5 ori în cazul depunerilor pe grosimea de 2 mm.

În figurile 2 și 3 se exemplifică o astfel de secțiune scanată corespunzător probei 27 din tabelele de măsurători. Măsurările și planimetrările necesare au fost efectuate cu ajutorul calculatorului. Rezultatele obținute sunt prezentate în tabelele 1 și 2 și conțin valorile măsurate la 48 probe macroscopice. Pentru obținerea dimensiunilor reale trebuie operat cu scara de mărire.



Materialul de bază: AlMgSi0,5
Grosimea tablei: 6 mm
Materialul de adaos: AlSi5
Diametrul sârmei: 1,2 mm
Lungimea liberă: 17 mm

Figura 2.

3



Materialul de bază: AlMgSi0,5
 Grosimea tablei: 2 mm
 Materialul de adaos: AlSi5
 Diametrul sârmei: 1,2 mm
 Lungimea liberă: 19 mm

Figura 3.

Tabelul 1. Parametrii geometrici măsuțați la tabla de 6 mm (15:1)

Marcaj probă	L [mm]	b val.măs.	h _s val.măs.	h _p val.măs.	l _{ZIT} val.măs.	k _p	Aspect macroscopic
27	17	92.0	36.0	-	20.0	0,182	-
28	15	91.0	35.5	23,3	34.0	0,163	-
29	13	101.8	34.2	23.8	-	0,149	-
30	11	-	34.0	24.0	35.0	0,158	-
31	9	93,7	33,8	22,2	37,0	0,138	-
32	19	82,5	35,5	26,5	27,0	0,166	-
33	21	93,6	37,2	26,8	23,0	0,212	-
34	23	87,0	35,5	29,5	20,0	0,176	-
35	25	89,0	37,5	31,0	23,0	0,225	-
38	17	91,0	35,9	24,1	25,0	0,180	coresp.
39	19	87,5	-	28,0	20,0	0,198	lățime nereg.
40	21	84,5	36,5	26,5	22,0	0,191	lățime nereg.+arsuri
41	23	81,0	-	30,0	18,0	0,200	coresp.
42	25	81,7	37,3	29,7	20,0	0,187	lățime nereg.+arsuri
43	15	95,5	-	-	33,0	0,170	coresp.
44	13	95,0	33,9	22,1	28,0	0,156	lățime nereg.
45	11	-	34,9	23,1	33,0	0,135	coresp.
46	9	95,5	35,6	21,4	36,0	0,144	coresp.
47	7	100,6	35,0	-	-	0,121	coresp.
49/1	17	86,0	-	-	28,0	0,165	-
49/2	17	87,0	37,1	24,9	25,0	0,172	-

Tabelul 2. Parametrii geometrici măsurati la tabla de 2 mm (21,5:1)

Marcaj probă	L [mm]	b val.măs.	h_s val.măs.	h_p val.măs.	Aspect macroscopic
1	15	137,5	32,0	46,3	-
2	17	117,8	32,5	44,3	-
3	19	116,2	36,4	42,6	-
4	21	124,1	28,4	52,4	-
5	21	125,0	26,6	54,4	-
6	23	108,0	29,0	46,0	-
7	25	112,5	30,0	47,8	-
8	13	140,0	37,7	45,1	-
9	11	110,5	29,1	44,1	-
10	9	130,5	29,6	52,4	-
11	7	130,0	26,5	54,4	-
12	5	122,1	32,1	51,5	-
14/1	-	77,5	46,6	8,4	-
14/2	13	120,2	35,8	43,5	-
15	15	129,0	34,5	36,5	coresp.
16	17	126,4	28,2	52,1	lățime nereg.
17	19	125,5	29,0	55,1	coresp.
18	21	116,6	37,3	45,4	lățime nereg.
19	23	123,2	33,3	13,1	lățime nereg.
20	25	107,0	37,0	40,0	lățime nereg. + întreruperi
21	13	138,8	31,1	45,7	f. bun
23	9	125,2	31,7	32,9	f. bun
24	7	158,0	42,8	25,2	f. bun
26/1	13	51,5	48,3	32,2	f. bun
26/2	13	133,6	34,5	44,5	-
50	5	119,5	37,9	45,1	întreruperi puncte

2. Determinarea influenței lungimii libere

Rezultatele au fost prelucrate statistic permițând, în cazul grosimii de 6 mm, stabilirea unui număr de 5 dependențe de semnificație statistică ca funcții de lungimea liberă.

Valorile anormale stabilite pe baza criteriului Chauvenet au fost eliminate. În această situație au fost două valori ale lățimii b , patru valori ale supraînălțării h_s , trei valori ale adâncimii de pătrundere h_p și două ale lățimii zonei influențate termic l_{ZIT} .

După cum rezultă din figurile 4 și 5, atât în cazul supraînălțării depunerii h_s , cât și în cazul adâncimii de pătrundere h_p , în intervalul $L=7\div 25$ mm, funcțiile $h_s=f(L)$, respectiv $h_p=f(L)$ sunt reprezentate de relații liniare de forma:

$$h_s = 0.0086 \cdot L + 2.23 \quad (2)$$

$$h_s = 0.0353 \cdot L + 1.11 \quad (3)$$

Dacă în cazul supraînălțării cu valoarea coeficientului de intensitate a corelației $R^2=0,5299$ nu se poate accepta decât o tendință de creștere a dependenței respective, în cazul adâncimii de pătrundere, cu un $R^2=0,8842$, corelația $h_p=f(L)$ poate fi apreciată având o înaltă semnificație statistică.

După cum rezultă, supraînălțarea relativă se plasează în domeniul $0,35\div 0,42$ din grosime. Adâncimea de pătrundere se situează în intervalul $1,5\div 2,0$ mm, ceea ce reprezintă $(0,25\div 0,33)\cdot s$, s fiind grosimea de material pe care s-a realizat depunerea.

Lățimea depunerii b , evoluează în sens invers, figura 6 arătând o micșorare odată cu mărirea lungimii libere:

$$b = -0.057 \cdot L + 7.00 \quad (4)$$

și deși coeficientul de intensitate a corelației $R^2=0,5757$ este destul de mic, tendința de evoluție este evidentă.

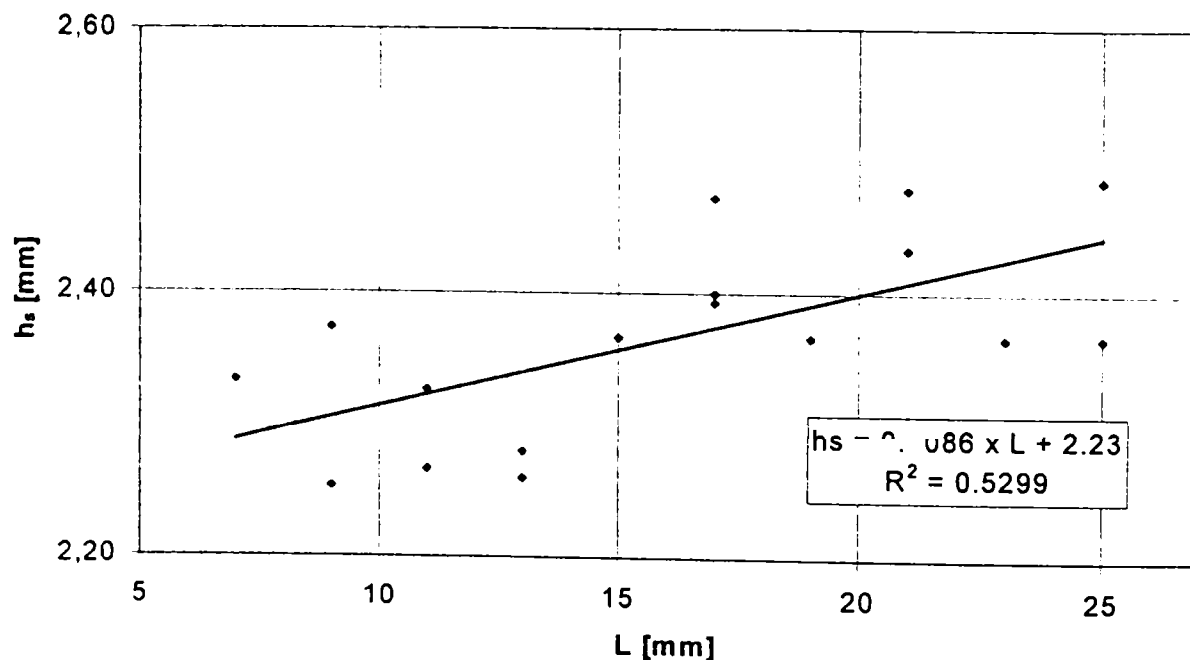


Figura 4. Variația supraînălțării funcție de lungimea liberă

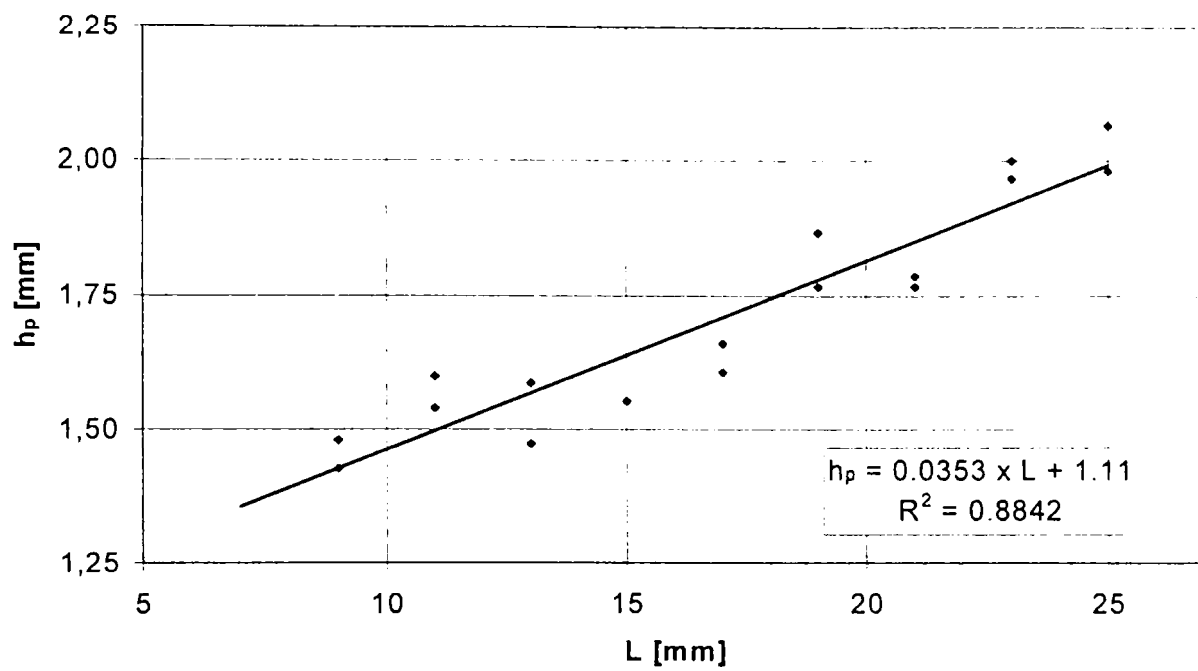


Figura 5. Variația adâncimii de pătrundere funcție de lungimea liberă

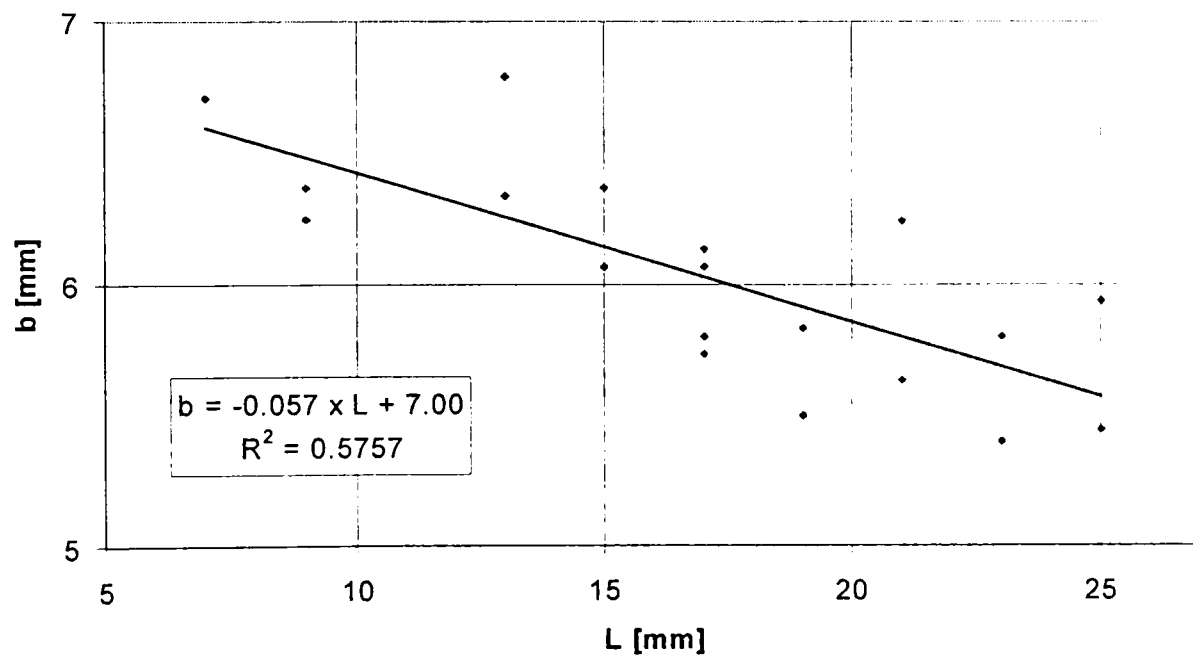


Figura 6. Variația lățimii îmbinării funcție de lungimea liberă

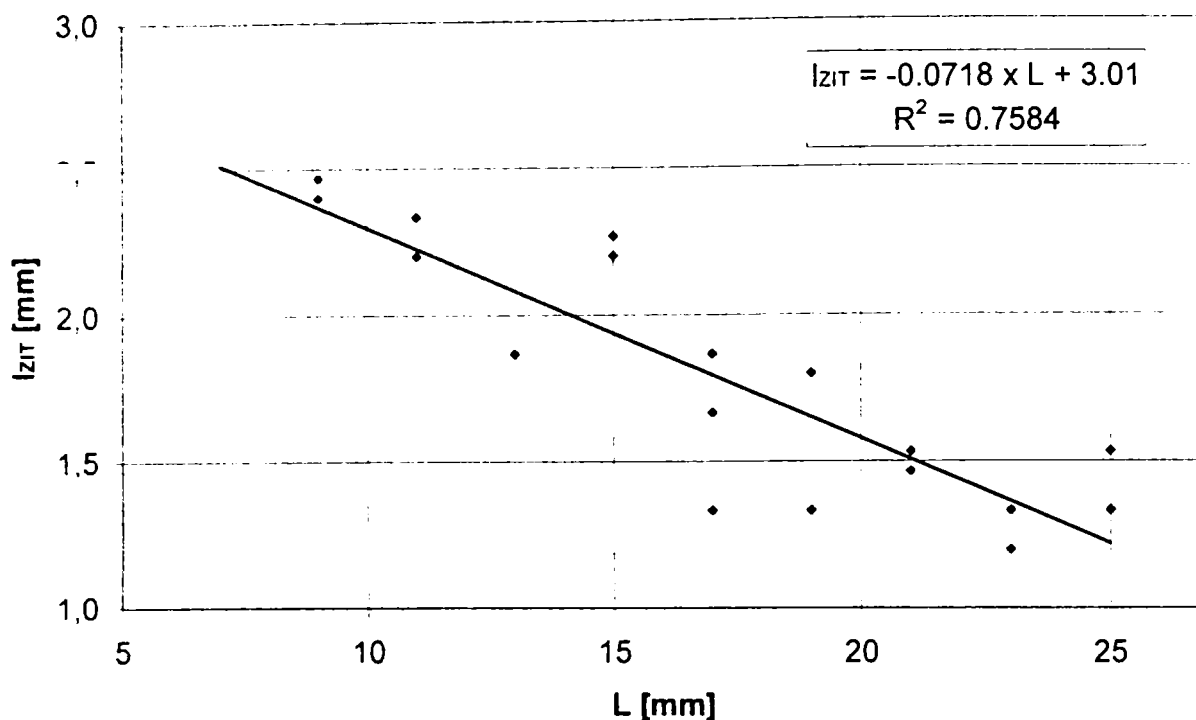


Figura 7. Variația lățimii zonei influențate termic funcție de lungimea liberă

O influență mult mai consistentă din punct de vedere statistic, dar și ca domeniu de variație relativă s-a pus în evidență în privința lățimii zonei influențate termic măsurată în planul de simetrie a depunerii l_{ZIT} . Așa cum rezultă din figura 7, dependența $l_{ZIT}=f(L)$ este ca și în cazul $b=f(L)$ de formă liniar descrescătoare:

$$l_{ZIT} = -0.0718 \cdot L + 3,01 \quad (5)$$

Cu un coeficient de intensitate a corelației $R^2=0,7584$ se poate aprecia corelația de semnificație statistică corespunzătoare.

Influența coeficientului de participare a materialului depus se manifestă într-un domeniu relativ restrâns, valorile extreme aflându-se între 0,121, corespunzător lui $L=7\text{mm}$ și 0,250, corespunzător lui $L=25\text{mm}$. Totuși în intervalul respectiv se poate accepta o corelație liniară bună, întrucât $R^2=0,7889$. După cum rezultă din figura 8, corelația este de forma:

$$k_p = -0.0043 \cdot L + 0.100 \quad (6)$$

Rezultatul se explică pe de o parte prin mărirea adâncimii de pătrundere odată cu mărirea lui L , ceea ce implică mărirea componentei A_2 , iar pe de altă parte, prin micșorarea lui b pe măsura creșterii lui L , rezultă micșorarea componentei A_1 .

Încercările de corelare a parametrilor geometrici cu lungimea liberă a sârmei electrod la grosimea de 2 mm, nu s-au soldat cu rezultate concludente, deoarece valorile coeficienților de corelație R^2 s-au situat sub limita de acceptare a unei legături justificate. În această situație la aprecierea calității depunerilor s-au folosit exclusiv rezultatele analizei metalografice și ale examinărilor radiografice. Comparând rezultatele obținute la cele două grosimi analizate se constată pătrunderea mai bună în cazul grosimii de 2 mm, însoțită și de o lățime superioară la majoritatea regimurilor de depunere experimentate.

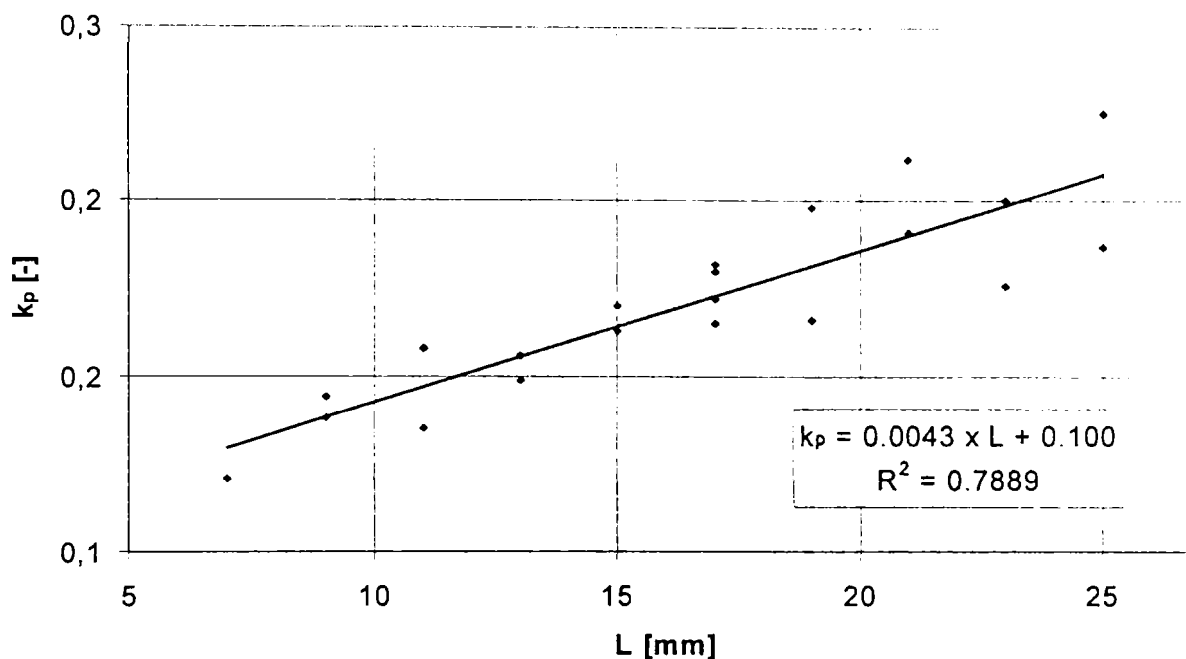


Figura 8. Variația coeficientului de participare funcție de lungimea liberă

3. Analiza metalografică

Analiza metalografică s-a efectuat conform [140] la un număr de 6 probe prelevate din depunerile realizate pe tablă de 6 mm grosime și 6 probe prelevate din depunerile realizate pe tablă de 2 mm grosime. Ea a cuprins în mod egal câte 3 secțiuni transversale marcate cu T și câte trei secțiuni longitudinale marcate cu L. Probele au fost alese după criteriul lungimii libere a sârmei electrod astfel încât să se utilizeze valorile extreme de 5, respectiv 7 și 25 mm și o valoare mijlocie de 16 mm. S-au investigat în concordanță cu [140], structura metalografică, granulația și imperfecțiunile din zonele tipice, depunerile prin sudură: materialul de bază MB, zona influențată termic ZIT și depunerea propriu-zisă MD.

Probele au fost fixate în duracryl și atacate cu soluție HF în concentrație de 5%. Analiza metalografică s-a efectuat la o mărire de 100x.

Duritatea s-a determinat prin metoda Vickers cu sarcina de 10N, conform [136]. Eroarea relativă de justete este $\pm 3\%$, iar cea de fidelitate, de $\pm 4\%$.

Tabelul 3. Analiza metalografică a probelor sudate la table de grosime 6 mm

Nr. crt.	Marcaj probă	Lungime liberă [mm]	Secțiune	Zona cercetată	Structura constatată	Imperfecțiuni-defecte	Nr. foto
1-2	42 (KK5)	25	T și L	MB	- Structură granulară bogată în Al, cu particule fine de compuși MgSi ₂ , granulație 6-7	Nu se evidențiază	3
				ZIT	- Structură granulară bogată în Al, cu particule de MgSi ₂ , granulație 4-5	Nu se evidențiază	idem
				MD	- Structură dendritică fină, specifică aliajelor Al-Si (α)	Pori fini, izolați, de 0,042-0,083 mm	4
3-4	47 (KK10)	7	T și L	MB	- Structură granulară bogată în Al, cu particule fine de compuși MgSi ₂ , granulație aproximativ 6	Nu se evidențiază	7
				ZIT	- Structură granulară bogată în Al, cu particule de MgSi ₂ , granulație 5-6	Nu se evidențiază	idem
				MD	- Structură dendritică fină, specifică aliajelor Al-Si (α)	Pori foarte fini, izolați	idem
5-6	38 (KK1)	17	T și L	MB	- Structură granulară fină bogată în Al, cu compuși MgSi ₂ , granulație 7-8	Nu se evidențiază	10
				ZIT	- Structură granulară fină bogată în Al, cu compuși fini de MgSi ₂ , granulație 7	Nu se evidențiază	idem
				MD	- Structură dendritică fină, specifică aliajelor Al-Si (α)	Pori fini	9

Tabelul 4. Analiza metalografică a probelor sudate la table de grosime 2 mm

Nr. crt.	Marcaj probă	Lungime liberă [mm]	Secțiune	Zona cercetată	Structura constatată	Imperfecțiuni-defecte	Nr. foto
1-2	20 (K7)	25	T și L	MB	- Structură granulară bogată în Al, cu particule fine de compuși MgSi ₂ , granulație 7-8	Nu se evidențiază	17 T 18 L
				ZIT	- Structură granulară bogată în Al, cu particule fine de MgSi ₂ , granulație 7	Nu se evidențiază	idem
				MD	- Structură dendritică fină, specifică aliajelor Al-Si (α)	Nu se evidențiază	idem
3-4	50 (K12)	7	T și L	MB	- Structură granulară bogată în Al, cu particule fine de compuși MgSi ₂ , granulație aproximativ 8	Nu se evidențiază	11 T
				ZIT	- Structură granulară bogată în Al, cu particule de compuși MgSi ₂ , granulație 6-7	Microfisuri	idem
				MD	- Structură dendritică, specifică aliajelor Al-Si (α)	Pori fini, izolați, de 0,11 mm	13 L
5-6	16 (K2)	17	T și L	MB	- Structură granulară bogată în Al, cu particule de compuși MgSi ₂ , granulație aproximativ 8	Nu se evidențiază	10
				ZIT	- Structură granulară bogată în Al, cu particule fine de compuși de MgSi ₂ , granulație 6-7	Nu se evidențiază	idem
				MD	- Structură dendritică fină, specifică aliajelor Al-Si (α)	Nu se evidențiază	9

Rezultatele analizei metalografice sunt prezentate detaliat în tabelul 3, corespunzător grosimii de 6 mm, și în tabelul 4, corespunzător grosimii de 2 mm. Ea atestă o structură granulară bogată în Al, cu particule fin dispersate de compuși

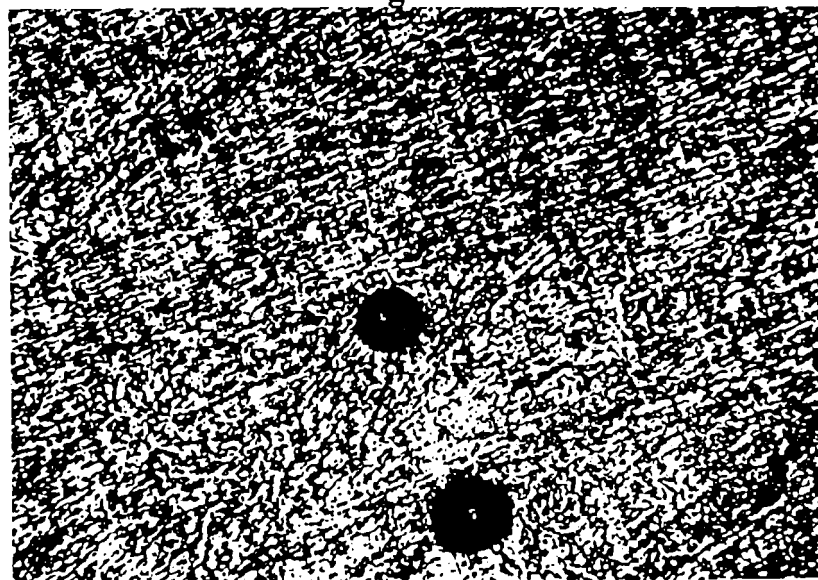
MgSi₂ în materialul de bază și în zona influențată termic, diferențierea zonelor fiind reliefată doar de mărimea granulației. Astfel, în ZIT, aceasta a fost, în medie, la un punct diferență de MB, indicând o structură mai puțin fină decât în MB. S-a constatat totodată că punctajul probelor de 6 mm grosime este inferior celui determinat la probele subțiri de 2 mm grosime, ceea ce pune în evidență un regim termic sensibil diferit. În materialul depus s-a constatat o structură dendritică tipică aliajelor de structură α (figura 9).

Din punctul de vedere al imperfecțiunilor se constată la toate probele de 6 mm grosime prezența unor pori fini (figura 10) ceea ce la probele de 2 mm grosime s-a putut pune în evidență numai la proba realizată în regim de lungime liberă de 5 mm, unde s-au constatat, însă, și microfisuri (figura 11).



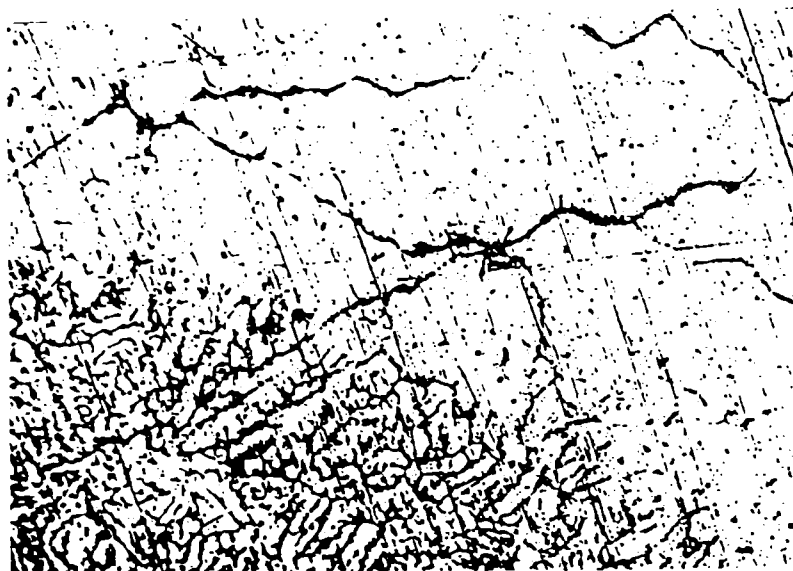
magnitudine 100x

Figura 9.



magnitudine 100x

Figura 10.



magnitudine 100x

Figura 11.

4. Încercarea de duritate

Încercarea de duritate s-a efectuat cu metoda Vickers folosind o sarcină de amprentare de 10N [137]. Eroarea relativă de justețe s-a încadrat în limitele $\pm 3\%$, iar cea de fidelitate, în limitele $\pm 4\%$. S-a utilizat schema clasică de imprimare a penetratorului cu 3 urme în MB, 3 urme în ZIT, orientate de-a lungul acestuia și 3 urme în metalul depus MD. S-au utilizat aceleași probe pe care s-a făcut și analiza metalografică. Rezultatele sunt centralizate în tabelul 5, distinct pe grosimi de probe, zone investigate și probe.

Tabelul 5.

Zona cercetată	Duritatea HV1 [daN/mm ²]					
	s = 6 mm			s = 2 mm		
	42	47	38	20	50	16
MD	52,5	53,6	57,2	66,5	59,2	64,2
	51,9	51,9	56,0	65,7	59,9	62,0
	53,0	53,0	53,0	60,6	59,2	59,2
Media	52,5	52,8	55,4	64,3	59,4	61,8
ZIT	50,3	50,3	50,8	54,8	57,2	52,5
	49,8	50,8	52,5	53,0	55,4	51,9
	49,8	49,3	51,4	50,8	54,8	53,0
Media	50,0	50,1	51,5	52,9	55,8	52,5
MB	49,3	47,3	46,8	47,8	51,4	50,3
	48,8	46,8	47,8	47,3	50,8	48,8
	46,4	47,3	47,8	45,0	50,3	47,8
Media	48,1	47,1	47,5	46,6	51,0	49,0
Secțiune longitudinală	52,5	53,6	53,6	58,5	56,0	56,0
$\Delta HV1$ (MD-MB)	4,4 (9,1%)	5,7 (12,1%)	7,9 (16,6%)	17,7 (38,0%)	8,4 (16,5%)	12,8 (26,1%)

Rezultatele obținute conduc la următoarele constatări:

- duritatea variază lent de la materialul de bază spre materialul depus;
- diferențele dintre cele două zone $\Delta HV1$ se situează, în medie, între $9 \div 16,6\%$ la piesele de 6 mm grosime, respectiv $16,5 \div 38,0\%$ la piesele de 2 mm grosime;
- în toate cazurile, valorile durității în ZIT se plasează între valorile durității din materialul de bază și acelea ale metalului depus.

5. Examinarea radiografică

Controlul radiografic al cordoanelor depuse experimental a urmărit determinarea clasei (nivelului) de calitate, pe baza criteriilor stabilite de standardele internaționale [11], [119]. S-a utilizat instalația röntgen de tip Scan-ray DGA, având tensiunea maximă de accelerare $U=250\text{kV}$ și curentul catodic cuprins în intervalul $I=0-5\text{mA}$. Filmul radiografic s-a ales din clasa G2 [119] și anume Agfa D5, având granulația fină, recomandat pentru tehnicile de control B, de înaltă sensibilitate. Din plăcile experimentale, realizate cu diferiți parametri, au fost selectate pentru control radiografic 12 plăci având grosimea de 2 mm și 10 plăci având grosimea de 6 mm.

Parametri de examinare s-au ales în funcție de grosimea pieselor experimentate $s = 2$ mm, respectiv $s = 6$ mm. Tensiunea de accelerare s-a ales conform [119, tabelul 32], și anume de 50 kV în cazul $s = 2$ mm, respectiv de 60 kV în cazul $s = 6$ mm. Folosind diagrama de expunere a filmului D5, corespunzătoare pieselor din aluminiu [119], a rezultat o expunere $I \cdot t = 15$ mA·min la $s = 2$ mm, respectiv 10 mA·min la $s = 6$ mm. Prin utilizarea aceluiași curent catodic de $I = 5$ mA în cele două situații, durata de expunere a fost de 3 min la $s = 2$ mm și de 2 min la piesele având grosimea $s = 6$ mm.

Filmele radiografice au fost analizate cu ajutorul negatoscopului cu halogen și după 5x.

Calitatea expunerilor radiografice a fost stabilită cu ajutorul indicatorului de calitate a imaginii cu fire de tip W10Al, cu diametrele firelor calibrate cuprinse între $0,1 \div 0,4$ mm. Având în vedere că în toate cazurile, pe film s-a putut urmări până la cel de-al patrulea fir al indicatorului de calitate a imaginii a fost stabilit la 0,2 mm, ceea ce corespunde unei rezoluții absolute pentru discontinuități foarte fine de 0,2 mm.

Rezultatele controlului sunt sintetizate în tabelul 6. Acesta cuprinde date de identificare a probelor examinate, descrierea succintă a imperfecțiunilor constatate și încadrarea în clase de calitate potrivit normei europene [137].

Tabelul 6. Controlul radiografic al probelor

Grosime a plăcii	Simbolul plăcii	Descrierea imperfecțiunilor detectate	Încadrarea în clase de calitate: sever B, intermediar C, moderat D
s = 2 mm	K1	Pori izolați, cordon continuu, pătrundere incompletă	B
	K2	Pori izolați la capete, depunere complet pătrunsă	C
	K3	Pori capăt, fisură de crater, exces pătrundere	D
	K4	Reluare defectuoasă, crater adânc, pătrundere completă	D
	K5	Pătrundere neregulată	D
	K6	Lățime neregulată, fisură de crater	D
	K7	Pori izolați, supraînălțare neregulată	C
	K8	Pori izolați pe toată lungimea, diametru maxim 0,2+0,25 mm, pătrundere completă	B
	K9	Pori distribuiți pe ½ din lungime, fisură de crater	D
	K10	Pori distribuiți pe ½ din lungime, fisură de crater, 2-3 pori izolați foarte mici 0,2+0,25 mm	D
	K11	Pori distribuiți pe ½ din lungime, fisură de crater	D
	K12	Depunere complet întreruptă pe toată lungimea	Neadmisă
s = 6 mm	KK1	Pori aliniați pe lungime	B
	KK2	Pori foarte fini izolați	B
	KK3	Pori mari izolați	B
	KK4	Fără imperfecțiuni	B
	KK5	Pori foarte fini izolați	B
	KK6	Pori izolați de diferite mărimi	B
	KK7	Pori distribuiți pe lungime foarte fini, diametru maxim 0,2+0,25 mm	B
	KK8	Pori de diferite mărimi	B
	KK9	Pori distribuiți uniform pe lungime	B
	KK10	Pori foarte fini și izolați	B

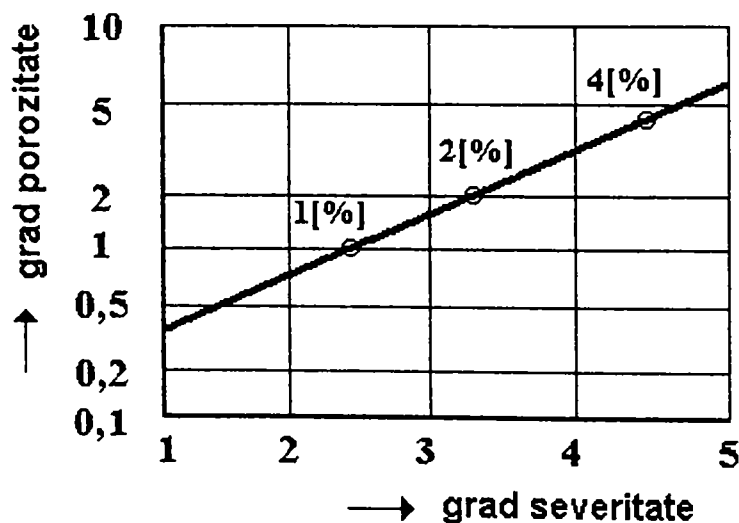


Figura 12. Distribuția porilor la îmbinările din aluminiu

Pe baza unor cercetări a distribuției porilor la îmbinări sudate din aluminiu de 3 mm grosime [135], s-au stabilit corelații între fracțiunea de arie ocupată de pori în secțiunea longitudinală a îmbinării și gradul de severitate definit din considerente de tehnică de prelucrare automată. Corelația reprezentată într-un

sistem de coordonate semilogaritmice indică o legătură liniară (figura 12), cu o plajă de variație suficient de strânsă.

Pe figură au fost marcate punctele corespunzătoare nivelelor de punctaj de porozitate admise de norma europeană [124], la îmbinările sudate din oțel.

Pe baza celor de mai sus, gradul de severitate a probelor experimentale se încadrează sub nivelul 3. Superioare calitativ s-au dovedit condițiile în care s-au obținut probele de la pozițiile K1, K7 și K8 din tabelul 6, al căror grad de severitate este cuprins între 1 și 2.

6. Concluziile

- ◆ Măsurarea parametrilor geometrici ai depunerilor prin sudare cu ajutorul calculatorului în secțiuni transversale ale probelor scanate la mărimi de 15x, au permis stabilirea următoarelor corelații de semnificație statistică în cazul depunerilor pe table de 6 mm grosime: $h_s=f(L)$; $h_p=f(L)$; $b=f(L)$; $l_{ZIT}=f(L)$ și $k_p=f(L)$.
- ◆ La grosimea de 2 mm nu s-au obținut astfel de corelații ceea ce impune o adaptare punctuală a parametrilor de sudare în domeniul grosimilor mici. Totuși, datorită energiei liniare relativ scăzute arcul pulsant aduce avantaje certe și prin micșorarea pericolului străpungerii pieselor subțiri de 2 mm.
- ◆ Semnificații statistice superioare valorii $R^2 \geq 0,8$ s-au obținut numai în cazul corelațiilor dintre adâncimea de pătrundere și lungimea liberă $h_p=f(L)$ și coeficientul de participare a metalului de adaos funcție de lungimea liberă $k_p=f(L)$, ceea ce permite maximizarea și/sau optimizarea parametrilor respectivi, în vederea asigurării unei rezistențe mecanice superioare a profilelor caroseriei.
- ◆ Valorile relative ale pătrunderii în plaja de regimuri de sudare cercetată, se situează în intervalul $(0,25 \div 0,33) \cdot s$, pe câtă vreme cele ale supraînălțării în intervalul $(0,38 \div 0,42) \cdot s$.
- ◆ Analiza metalografică a îmbinărilor experimentale a scos în evidență o structură granulară cu particule de $MgSi_2$ fin dispersate. Structura zonei influențate termic se diferențiază de cea a materialului de bază neafectat, doar printr-un singur punct pe scara punctajului de mărime.
- ◆ Rezultatul analizei metalografice este confirmat de încercările de duritate HV1, care au arătat o variație lentă între zonele specifice îmbinării sudate, diferențele maxime fiind de numai $9 \div 16,6\%$ la grosimea de 6 mm, respectiv de $16,5 \div 38,0\%$ la grosimea de 2 mm.
- ◆ Examinarea radiografică a unui număr de 22 plăci sudate permite încadrarea imperfecțiunilor detectate în clasa superioară B, după standardele internaționale, la grosimea de 6 mm, respectiv în clasele de calitate B, C și chiar D la grosimea de 2 mm. Se atestă și pe această cale că procesul de sudare este mai dificil de stăpânit la grosimea de 2 mm.

- ◆ Ținând seama de ansamblul cercetărilor experimentale, domeniul recomandat pentru lungimea liberă este $L = 9-25$ mm, ceea ce extinde recomandările literaturii de specialitate, de la 20 la 25 mm.

RELEVAREA CONTRIBUȚILOR PERSONALE ȘI CONCLUZIILE

Abordând o tematică de pionierat în execuția caroseriilor de automobile și a confecțiilor speciale din aliaje de aluminiu și beneficiind de suportul tehnico-material al SLV-Fellbach din Germania, teza de doctorat aduce numeroase contribuții originale la dezvoltarea procedurii de sudare în impulsuri de curent în medii de gaze inerte.

Din punctul de vedere al cercetării fundamentale sa rețin următoarele realizări originale ale autorului:

1. Adaptarea analizei sistemului de forțe care acționează în arcul electric de polaritate DC⁺, aplicat în cazul sudării în impulsuri de curent a aliajelor de aluminiu.
2. Folosirea modelării vâsco-plastice a fenomenului de curgere în perioada formării și desprinderii picăturii pe suprafața frontală a sârmei electrod și modificarea formei relației forței de stricțiune, ceea ce permite evaluarea cantitativă a transferului masic prin arcul electric cu ajutorul filmării rapide și ultrarapide și măsurarea alungirii picăturii pe direcția axială.
3. Introducerea estimatorului v_D/f în analiza transferului masic prin arcul electric, a cărui utilitate s-a adeverit în exprimarea dependenței de mărimea relativă a picăturii de metal.
4. Punerea în evidență a concordanței de fază dintre fenomenul de formare și de desprindere a picăturii de metal topit pe de o parte și variația de tensiune de pe ramura descendentă a ciclogramei $U=f(t)$ pe de altă parte, precum și identificarea momentului producerii oscilației de retracție a picăturii în concordanță cu poziția în timp a ramurii crescătoare și a picului secundar din oscilogramă.
5. Elaborarea unui program de calcul automat în mediul MS Visual Basic, în vederea analizei statistice complete a rezultatelor experimentale, cu ajutorul căruia a fost posibilă determinarea parametrilor integratori în funcție de cei de reglaj ai procesului de sudare MIG în impulsuri de curent.

În planul cercetărilor aplicative și al soluțiilor practice, elaborate pe parcursul prezentului demers, se subliniază următoarele contribuții originale:

1. În vederea analizării procesului de sudare MIG în impulsuri de curent la aliaje de aluminiu, autorul a elaborat un program experimental complex, urmărind pe de o parte corelarea parametrilor de reglaj cu

cei de bază, iar pe de altă parte, aprecierea cantitativă a principalilor parametri calimetrice ai sudurii.

2. Investigațiile s-au bazat pe utilizarea unei celule experimentale realizată de autor la SLV Felbach, condusă de un robot ASEA, o sursă de sudare în impulsuri de curent sinergică de tip Fronius Transpuls, o interfață de măsurare cuplată la calculator prin cartela de măsurare Scope T512 având capacitatea de prelucrare concomitentă a 8 semnale analogice. În scopul urmăririi în timp real a procesului de sudare, în special a transferului masic prin arcul electric, s-a folosit o instalație de filmare rapidă condusă de o videocameră Canonvision Ex8.
3. Analizându-se un număr de 11 factori ai regimului de sudare MIG în impulsuri de curent, se definesc condițiile realizării unei îmbinări de calitate superioară, evidențiindu-se avantajele procedurii ales.
4. Dintre parametri regimului de sudare, intensitatea curentului, timpul de puls și frecvența pulsului, joacă un rol determinant în realizarea unui transfer masic favorabil – picătură pe puls – cu consecințe directe atât asupra productivității, cât și a calității procedurii. Relația directă frecvență - viteză de avans, condiționează diametrul picăturii, cu alte cuvinte finețea transferului masic prin arcul electric.
5. Analiza statistică a cuprins dependențele tensiunii efective U_{ef} , ale curentului efectiv I_{ef} , ale puterii efective P_{ef} , ale puterii de bază P_G și ale puterii de puls P_p de următorii parametri ai regimului de sudare: frecvența f , intensitatea curentului de puls I_p , intensitatea curentului de declanșare I_T , respectiv a curentului de bază I_G , durata pulsului t_p și viteza de avans a sârmei electrod v_D . S-au obținut astfel un număr de 50 de corelații statistice monoparametrice și 10 corelații statistice multiparametrice pentru cele două grosimi de tablă de aluminiu studiate, 2 mm și 6 mm. Relațiile sunt prezentate analitic și grafic în cadrul capitolului 5, tabelele 3-7, figurile 2-26.
6. În toate cazurile coeficientul de intensitate a corelației s-a situat peste valoarea 0,8 (în majoritatea cazurilor peste 0,9), ceea ce indică legături statistice foarte strânse. Analiza influenței reciproce dintre parametrii de sudare a relevat, cu un nivel de încredere de 99%, absența acestora la oricare pereche de parametri.
7. Corelațiile stabilite permit aprofundarea sub toate aspectele a aplicării procedurii de sudare MIG în impulsuri de curent la sudarea aluminiului și aliajelor acestuia, atât sub aspect tehnologic nemijlocit, cât și sub aspectul ierarhizării importanței fiecărui parametru.
8. Dependențele tensiunii efective de frecvență, de curent și de durată de puls sunt de tip liniar crescătoare. Fac excepție dependențele $U_{ef}=f(I_T)$ la grosimea de 2 mm, unde funcția este de tip parabolic, precum și dependențele tensiunii efective de viteza de avans, reprezentate de

- regresii liniare descrescătoare. Parametrul durată de puls diferențiază semnificativ dependențele obținute la cele două grosimi 2 și 6 mm.
9. Dependențele curentului efectiv de frecvență, curent și durată de puls, curent de declanșare și de viteza de avans la grosimea de 2 mm sunt reprezentate de regresii liniare crescătoare. Dependența $I_{ef}=f(v_D)$ la grosimea de 6 mm este reprezentată de o funcție parabolică.
 10. Funcțiile puterii efective, ale puterii de bază și ale puterii de puls, de frecvență, de curent și durată de puls, și de curent de declanșare la grosimi de 6 mm reprezintă regresii liniar crescătoare. Aceleași dependențe de viteza de avans, sunt reprezentate prin funcții liniar descrescătoare.
 11. Din compararea varianței funcțiilor de putere, rezultă diferențe semnificative între grosimi la mai mulți parametri de reglaj analizați.
 12. S-a confirmat faptul că în sistemele de modulație utilizate la sursele moderne, intervalul de variație a lungimii libere este suficient de larg, fiind cuprins în limitele 10-20 mm. În cazul modulației I_p/I_G sursa de sudare trebuie să conțină suplimentar un sistem de reglare a lungimii arcului, pentru a evita zone de funcționare instabilă.
 13. Cercetarea influenței lungimii libere a sârmei electrod la un număr de 55 de variante de sudare ale căror rezultate sunt prezentate în anexele 4.3 și 4.4, a permis obținerea corelațiilor statistice între mediile tensiunii pe de o parte, și lungimea liberă, pe de altă parte. În intervalul analizat 7÷25 mm, funcțiile de regresie sunt liniar descrescătoare.
 14. Măsurarea parametrilor geometrici ai depunerilor prin sudare cu ajutorul calculatorului, în secțiuni transversale ale probelor scanate la mărimi de 15x, a permis stabilirea următoarelor corelații de semnificație statistică în cazul depunerilor pe table de 6 mm grosime: $h_s=f(L)$, $h_p=f(L)$, $b=f(L)$, $l_{ZIT}=f(L)$ și $k_p=f(L)$. La grosimea de 2 mm nu s-au obținut astfel de corelații, ceea ce impune o adaptare punctuală a parametrilor de sudare în domeniul grosimilor mici.
 15. Semnificații statistice superioare valorii $R^2 \geq 0,8$ s-au obținut numai în cazul corelațiilor dintre adâncimea de pătrundere și lungimea liberă $h_p=f(L)$ și coeficientul de participare a metalului de adaos funcție de lungimea liberă $k_p=f(L)$, ceea ce permite maximizarea și/sau optimizarea parametrilor respectivi, în vederea asigurării unei rezistențe mecanice superioare a profilelor caroseriei.
 16. Analiza metalografică a îmbinărilor experimentale a scos în evidență o structură granulară cu particule de $MgSi_2$, fin dispersate. Structura zonei influențate termic se diferențiază de cea a materialului de bază neafectat, doar printr-un singur punct pe scara punctajului de mărime.
 17. Rezultatul analizei metalografice este confirmat de încercările de duritate HV1, care au arătat o variație monotonă între zonele specifice

îmbinării sudate, diferențele maxime înregistrate fiind de numai $4 \div 16,6\%$ la grosimea de 6 mm, respectiv de $16,5 \div 38,0\%$ la grosimea de 2 mm.

18. Examinarea radiografică a unui număr de 22 plăci sudate a permis încadrarea imperfecțiunilor detectate în clasa superioară de calitate B, după standardele internaționale la grosimea de 6 mm, respectiv în clasele de calitate B,C și chiar D la grosimea de 2 mm. Se confirmă astfel, și pe această cale, că procesul de sudare este mai dificil de stăpânit la grosimea de 2mm.

BIBLIOGRAFIA

1. Aendenrooer J.R, G. Oudeb: Weld Pool Oscillation as a Tool for Penetration Sensing during Pulsed GTA Welding, Welding Res. Suppl 1998 nr.5 p. 181s-187s
2. AD-Merkblatt W 6/1: Aluminium und Aluminiumlegierungen, Knetwerkstoffe
3. AD-Merkblatt HP 7/4: Wärmebehandlung, Aluminium und Aluminium-legierungen
4. AD-Merkblatt HP8/1: Prüfung von Preßteilen aus Stahl sowie Aluminium und Aluminiumlegierungen
5. Altenpohl, D.: „Aluminium von innen betrachtet“, Aluminium-Verlag, Düsseldorf, 1957
6. ***: Aluminium-Merkblatt W2: Aluminium-Knetwerkstoffe, Aluminium-Zentrale e.V.
7. ***: Aluminium-Merkblatt V2: Lichtbogenschweißen von Aluminium, Aluminium-Zentrale e.V
8. ***: Aluminium Taschenbuch, Band 1, Aluminium-Verlag 1992
9. Anik, S., Dorn, L.: Metallphysikalische Vorgänge beim Schweißen von Aluminiumwerkstoffe, Schweißen & Schneiden, vol.43/1991
10. ASM Special Handbook Aluminium and Aluminium Alloys
11. ASTM-E155-85: Reference radiographs for aluminium castings
12. Baum, L., Fichter, V.: „Der Schutzgasschweißer“, Teil II, DVS-Verlag 1990
13. Bold, R.: Beitrag zur Porenbildung beim Schutzgasschweißen, DVS-Bericht 30, S.157/58, DVS-Verlag 1973
14. Brezing, H., Dellori, W., Winckler, R.: „Anwendungen des MIG/MAG - Impulslichtbogenschweißens mit programmierten Transistorstromquellen“, DVS-Berichte, Band 112, DVS-Verlag, Düsseldorf 1988
15. Burcă M. și colab.: Determinarea experimentală a formei impulsului de curent generat cu ajutorul sistemelor de avans prin impulsuri a sârmei electrod, Vol. celei de a IX Conferințe Univ. Galați, 1996, p.65-70
16. Burcă M., Safta V., Negoîtescu St.: Considerații asupra transferului de metal la sudarea MIG/MAG cu avans prin impulsuri a sârmei electrod, Sudura 1999, nr.2
17. ***: Catalog de echipamente pentru sudare ș.a., Editura OID-ICM, 1984
18. Cerjak H., Easterling K.E.: Mathematical modeling of weld phenomena, Inst. of Materials, Graz, 1993
19. Dehelean D.: Sudarea prin topire, Editura Sudura, Timișoara 1998
20. ***: „Der Aluminiumfachmann“ - Fachkunde, Teil2: Fertigungstechnik, Aluminium Verlag GmbH, Düsseldorf, 1978
21. Dilthey, U., Reising, U., Grave, M.: „MIG - Impulslichtbogenschweißen von Dünoblechen verschiedener Aluminiumlegierungen“, DVS-Berichte 146/1992, p.227-232
22. Dilthey, U., Matzner, H.: „Neue Lichtbogenlängeregelung sichert spritzerarmen Werkstoffübergang beim MIG Schweißen mit Impulslichtbogen unter Schutzgas“, Schweißen und Schneiden Nr.45/1993, S.502-506

23. Dilthey, U, Killing, R.: Verminderung der Porenanfälligkeit beim Metall Schutzgasschweißen durch Anwendung des Impulslichtbogens, CLOOS Fachthema
24. DIN 1725/1, Beiblatt 1: Aluminiumlegierungen, Knetlegierungen, Beispiele für Anwendung
25. DIN 1725/2: Aluminiumlegierungen, Gußlegierungen - Sandguß, Kokillenguß, Druckguß, Feinguß
26. DIN 1725/2, Beiblatt1: Aluminiumlegierungen, Gußlegierungen-Sandguß, Kokillenguß, Druckguß, Feinguß, Anhaltsangaben über mechanische und physikalische Eigenschaften sowie gießtechnische Hinweise
27. DIN 1725/3: Aluminiumlegierungen, Vorlegierungen
28. DIN 1732/1: Schweißzusätze für Aluminium und Aluminiumlegierungen Zusammensetzung, Verwendung und technische Lieferbedingungen
29. DIN 1732/2: Schweißzusätze für Aluminium und Aluminiumlegierungen - Prüfstücke, Proben, mechanisch-technologische Mindestwerte der Schweißverbindungen
30. DIN 1732/3: Schweißzusätze für Aluminium und Aluminiumlegierungen - Prüfstücke Proben, mechanisch-technologische Mindestwerte des reinen Schweißgutes
31. DIN 1783: Bänder und Bleche aus Aluminium - Knetlegierungen mit Dicken über 0,35 mm, kaltgewalzt, Maße
32. DIN 1788: Bänder und Bleche aus Aluminium - Knetlegierungen mit Dicken von 0,021 bis 0,350 mm
33. DIN EN 288/4: Anforderung und Anerkennung von Schweißverfahren für metallische Werkstoffe. Schweißverfahrenprüfung für das Lichtbogenschweißen von Aluminium und seinen Legierungen
34. DIN 4113/1: Aluminiumkonstruktionen unter vorwiegend ruhender Belastung, Berechnung und bauliche Durchbildung
35. DIN 4113/2: Aluminiumkonstruktionen unter vorwiegend ruhender Belastung, Berechnung und bauliche Durchbildung und Herstellung geschweißter Aluminiumkonstruktionen
36. DIN 8552/1: Schweißnahtvorbereitung Fugenformen an Aluminium und Aluminiumlegierungen, Gasschweißen und Schutzgasschweißen
37. DIN ISO 10 042, Lichtbogenschweißverbindungen an Aluminium und seinen schweißgeeigneten Legierungen, Richtlinie für die Bewertungsgruppen von Unregelmäßigkeiten
38. DIN 32 525/1: Prüfung von Schweißzusätzen mittels Schweißgutproben - Lichtbogengeschweißte Prüfstücke, Proben für mechanisch-technologische Prüfungen
39. DIN 32 525/4: Prüfung von Schweißzusätzen mittels Schweißgutproben - Prüfstück für die Ermittlung der Härte für Auftragschweißungen
40. DIN 32 526: Gase zum Schutzgasschweißen und zum Schneiden
41. DIN 50 120/100: Stumpfschweißverbindungen an metallischen Werkstoffen - Längszugversuch des Schweißgutes
42. DIN 50 121: Stumpfschweißverbindungen an metallischen Werkstoffen - Biegeversuch

43. DIN 50 121/1: Prüfung metallischer Werkstoffe - Technologischer Biegeversuch an Schweißverbindungen und Schweißplattierungen, Schmelzschweißverbindungen
44. DIN 50 122: Prüfung metallischer Werkstoffe - Kerbschlagbiegeversuch an Schweißverbindungen - Probenlage und Kerblage
45. DIN 50 122: Schweißverbindungen an metallischen Werkstoffen - Probenlage und Kerbrichtung bei Kerbschlagbiegeprüfungen
46. DIN 50 123: Prüfung von Nichteisenmetalle, Zugversuch an Schweißverbindungen- Schmelzgeschweißte Stumpfnähte
47. Dorn, L., Schultze, F.: „MSG Schweißen unter Kohlendioxid mit Impulslichtbogen und Transistorstromquellen - Analyse des Lichtbogenverhaltens und des Werkstoffübergangs“, Schweißen und Schneiden, Nr.40/1988, p.332-338
48. Dorn, L.U., u.a.: „Fügen von Aluminiumwerkstoffen“, Band 114: Schweißen Löten und Kleben, Expert Verlag Esslingen, 1992
49. DVS Merkblatt 0706: Bewertung von Stumpf- und Kehlnähten an Aluminium und Aluminiumlegierungen nach DIN 8563 Teil 30
50. DVS Merkblatt 0707: Anleitung zum Gebrauch der CE-Normen für Schmelzschweißerprüfung an Stahl und Aluminium
51. DVS Merkblatt 0708: Anleitung zum Gebrauch der CEN-Normen über die Eignung von Schmelzschweißverfahren
52. DVS Merkblatt 0913 (Ausgabe 04/1994): MIG - Schweißen von Aluminium
53. DVS Merkblatt 0933: MIG-Schweißen von Aluminium-Werkstoffe, Parameter
54. DVS Merkblatt Nr.0916: Metall-Schutzgasschweißen von Feinkornbaustählen
55. DVS Merkblatt Nr.0908/2: Metall-Schutzgasschweißen von Stahl, Einflußfaktoren auf die Nahtform, Prüfen-Auswerten
56. Einsfeld, U.: Erläuterung zu den „Richtlinien für den Nachweis der Befähigung zum Schweißen von tragenden Aluminiumbauteilen und die Ausstellung des Befähigungsausweises“, Mitteilungen des Instituts für Bautechnik
57. EN 1592/1: Aluminium und Aluminiumlegierungen - HF-geschweißte Rohre, Teil 1 - Technische Lieferbedingungen
58. EN 10002/1: Metallische Werkstoffe - Zugversuch - Teil1: Prüfverfahren
59. Farwer A., Wehner H.: DVS-Berichte, Bol.100,1985
60. Farwer A.: DVS-Berichte, Bol.112,1988
61. Fleşer T., Safta V. jr.: Asigurarea calității. Îndrumător de laborator, Editura Politehnica Timișoara, 1995
62. Fleşer T., Herman R., Safta V. jr.: Cercetări privind comportarea îmbinărilor sudate din oțeluri aliate forjate, supuse solicitării de lungă durată, Conf. ASR Arad, 2000, Editura Sudura, p. 155-161.
63. Granjon, H.: „Werkstoffkundliche Grundlagen des Schweißens“, DVS-Verlag 1993
64. Gregory E.N.: Shielded Metal Arc Welding of Galvanised Steel, Welding Journal, vol.48 (1969), nr.8
65. Haas, B.: „Schutzgasschweißen von Aluminium und seinen Legierungen“, LINDE-Technische Gase, Sonderdruck 103
66. Haas, B.: Schutzgasschweißen von Aluminiumwerkstoffen, Linde Technische Gase - Sonderdruck 22/93,

67. Habenicht, H., Hoffmann, H. K., Knoch, R. Nentwig: Metall-Aktivgasschweißen von Steignähten in Intervalltechnik mit Impulslichtbogen, SLV München Mitteilung Nr.99/1994
68. Hantsch, H., Norbert von Heesen, Helwig, R., Heuser, H.: Metall-Inertgasschweißen von Aluminiumwerkstoffen mit zwei getrennt zugeführten Schutzgasströmen, Schweißen & Schneiden vol. 42/1990
69. Hauck, G., Sandner, G.: Qualitätsanforderungen an Drahtelektroden für den T.I.M.E. Prozeß und mechanisch technologische Eigenschaften des Schweißgutes bei hoher Abschmelzleistung - DVS Berichte, Band 146
70. Heald P.R. și colab.: Mapping the Droplet Transfer Modes for an ER 100S-1 GMAW Electrode, Welding Journal, vol 73 (1994), nr.2, p. 38s-43s
71. Hedeş A., Şora I.: Echipamente cu înaltă frecvență pentru sudarea cu arc electric, Editura Orizonturi Universitare, Timișoara 2001
72. Hoffmann, S: Ermittlung von Schweißparametern beim Metallaktivgasschweißen, Schweißen & Schneiden, vol.43/1991
73. Iovănaş R.: Bazele Cercetării Experimentale în Sudură, Litografia Universității Braşov, 1985.
74. ***: Jahrbuch Schweißtechnik 1994, 1995, DVS-Verlag
75. Jochum, V., Kunz, W., Sönnichsen, H.: Impulstechnik beim Metall-Aktivgasschweißen von Baustählen mit verschiedenen Gasmischen, DVS-Bericht Nr.90
76. Jones L.A. și colab.: The temporal nature of forces acting on metal shapes in gas metal arc welding, ASM-International, Materials Park Ohio, 1996, p. 365-370
77. Killing R., Schäfermolte: DVS-Berichte, Bd 16,1985
78. Killing R.: Handbuch der Schweissverfahren Teil I, DVS-Verlag, 1984
79. Killing, R.: „Günstige Strom- Spannungsbereiche beim MIG/MAG Impulslichtbogenschweißen von Stahl und Aluminium unter verschiedenen Schutzgasen, DVS-Berichte, Band 131/1990
80. Killing, R.: Beitrag zur Verdampfung von Magnesium und zur Wahl der Schweißparameter beim Metall-Inertgasschweißen von Aluminium-Magnesium Legierungen, Schweißen & Schneiden vol. 42/1990
81. Killing, R.: „Die Regelung beim Metall-Schutzgasschweißen mit Impulslichtbogen“, Der Praktiker, Nr.42 1990, S.73-75
82. Kim Z.S., Eagar W.:Metal Transfer in Pulsed Current Gas Metal Arc Welding Res. Suppl., 1993, nr.7, p.279s-287s
83. Knoch, R.: Verbesserung der Zünd- und Anlaufphase beim Metall-Aktivgasschweißen, SLV München Mitteilung Nr.75/1985
84. Knoch, R., Welz, W.: Metallaktivgas - Impulslichtbogenschweißen mit transistorisierten Stromquellen, SLV München Mitteilung Nr.76/1986
85. Knoch, R.: Meßgrößen und Meßgeräte beim Metall-Schutzgasschweißen, SLV München Mitteilung Nr.79/1986,
86. Knoch, R. und Welz, W.: MIG-Hochstrom-Schweißen von dicken AlMgMn-Bleichen, SLV München Mitteilung Nr.56/1977
87. Ko S.H și colab.: Effects of Surface Depression Pool Convection and Geometry in Stationary GTAW, Welding Res. Suppl. vol 80 (2001), nr.2, p. 39s-45s

88. Krüger, U., Laudien, U., Lemke, F., Nogosseck, P.W.: DVS-Gefügekatalog Schweißtechnik, Nichteisenmetalle, Fachbuchreihe Schweißtechnik Band 71
89. Lahnsteiner, R., Wels-Thalheim: T.I.M.E. Process - ein neues Hochleistungs-MAG-Schweißverfahren
90. Langenbahn, H.W.: „Steuerung eines definierten Werkstoffübergangs beim MIG/MAG Schweißen mit Stromimpulsen, Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen der RWTH Aachen, 1986
91. Limmaneevichith C., Kou S.: Visualization of Marangoni Convection in Simulated Weld Pools Containing a Surface-Active Agent, Welding Journal vol. 79 (2000), nr.11, p. 324s-330s
92. Lincoln Electric Co.***: What You Should Know about Welding Aluminium, Welding Journal vol 79 (2000), nr.1, p. 54-58
93. *** Linde Sonderdruck: MIG Schweißen von Aluminium Schweißen, 1994
94. Lovke J.J.: Prediction of electrode properties in gas tungsten arc welding and gas metal arc welding, Trans JWRI, vol.25 (1996), nr.2, p.1-8
95. Lovke J.J. și colab.: Theory of free- burning arc columns including the influence of the cathode, J Phys, Appl. Phys. vol 25 (1992), p. 1600-1606
96. ***: Metalle - Nachrichtendienst der Wirtschaftsvereinigung, Ausgabe Januar 1996
97. ***: Metall-Schutzgasschweißen mit Impulsbetrieb, Schweißtechnisches Fachwissen, Nr.3/1994
98. Micloși V. și colab.: Bazele proceselor de sudare, Editura didactică, București, 1982
99. Mitelea I., Budău V.: Materiale și tratamente termice pentru structuri sudate, Editura de Vest, Timișoara, 1991.
100. Mootz, A., Schulz, A., Zürn, H.D.E.: Werkstoffübergang im MIG- und MAG Impulslichtbogen - Erfassung durch ein neuartiges visuelles Sensorsystem
101. Müller, S., Müller, M., Müller, R.: Vermeidung des Werkstoffniederschlags neben der Schweißnaht beim MIG-Impulsschweißen von AlMg-Werkstoffen, Diplomarbeit, SLV Fellbach
102. Müller, S.: „Metall-Schutzgasschweißen mit Impulslichtbogen“, Unterrichtsunterlagen der SLV Fellbach, 1995
103. Nanu, A.: Tehnologia materialelor, Editura didactica si pedagogica, Bucuresti 1977
104. Nentwig, A.W.E., Knoch, R., Queren-Lieth, W.: Datenbank „Metall-Schutzgasschweißen“, SLV München Mitteilung Nr.98/1993
105. Neumann, A.: „Bewertungsgruppen für Schmelzschweißverbindungen aus Aluminiumwerkstoffen, DIN EN 30 042
106. ***: Oerlikon Lichtbogenschweisstechnik, Verlag Moderne Industrie, Bibliothek der Technik, Bb.57
107. Palfalvi A., Breștin A. și colab.: Tehnologia Materialelor, Editura Didactică și Pedagogică București, 1986.
108. Pomaska, H.U.: Mit Einknopfbedienung impulslichtbogengeschweißt - ein Vorteil?, der Praktiker, Nr.2/1990
109. Pomaska, H. U.: „Gesteuertes Wärmeeinbringen durch Impulslichtbogen“, Der Praktiker, Schweißen und Schneiden, Band 42/1990, S.555-559
110. Pomaska, H.U.: „MAG-Schweißen - kein Buch mit sieben Siegeln“, LINDE - Ausdruck, 1992
111. Prinz, M.: MSG - Impulsschweißen, Diplomarbeit, Fachschule Esslingen, 1995

112. Radaj D.: Schweissprozess-simulation, DVS-Verlag, Düsseldorf, 1999
113. Radu I., Safta V. jr., Botiș M.: Calculul și construcția utilajului tehnologic pentru industriei de proces, Îndrumător de proiectare, Editura Politehnica, 1994.
114. Rayasekaran S.: Weld Bead Characteristics in Pulsed GMA Welding of Al-Mg Alloys, Welding Res. Suppl. 1999, nr. 12, p. 397s-407s
115. RAPID ARC und RAPID MELT - MAG Hochleistungsschweißen, Wissenswertes für den Praktiker, AGA GmbH
116. Rehfeldt, D, Bremer, C.: „Untersuchungen zum Zündverhalten und zur Prozeßqualitt beim MIG-Schweißen von Aluminiumlegierungen“, Schweißen und Schneiden, Nr.45/1993
117. Richardson I.M., Bucknall P., Stores I.: The influence of Power Source Dynamics on Wire Melting Rate in Pulsed GMA Welding, Welding Res. Suppl., 1994, nr.2, p. 33s-37s
118. Richtlinie für das Schweißen von Aluminium und seinen Legierungen, Schweißen & Schneiden 1991
119. Safta V., Safta V. jr.: Defectoscopie nedistructivă industrială, Editura Sudura Timișoara 2001
120. Safta V. jr.: Tehnologia materialelor (limba germană). Îndrumător de lucrări de laborator, Editura Politehnica Timișoara, 1995
121. Safta V. jr.: Controlul îmbinărilor și produselor sudate. Îndrumător de lucrări de laborator, Editura Politehnica Timișoara, 1996
122. Safta V., Dumbravă D., Safta V. jr.: Contribuții teoretice și experimentale la studiul distribuției tensiunilor în îmbinări sudate de colț frontale, Lucr. VII a Conf. de Sudură și încercări de materiale, LC-SIM 89, Editura OID-MICM, p. 374-379
123. Safta V., colab., Safta V. jr.: Sisteme de avans a sârmei electrod pentru sudarea în medii de gaze protectoare, Sudura vol. I (1991), nr.4, p. 16-20
124. Safta V., Safta V. jr.: Analyse der Bewertungsgruppen der Schweissverbindungen gemass ISO 5817/EN 25817, anhand der Fähigkeit der allgemeinen zertönungsfreien Prüfverfahren, 98 Jahrbuch Schweisstechnik, DVS Verlag, Düsseldorf, 1998, p.273-286
125. Safta V., Safta V. jr.: Wechselbeziehungen zwischen mechanischer Zahigkeit und der Ausbreitung von Ultraschallwellen, IX Symposium “Verformung und Bruch”, Magdeburg, 1997, pag.66
126. Safta V. jr.: Variația parametrilor la sudarea MIG a tablelor subțiri de aluminiu în funcție de modificarea caracteristicilor de puls, Simp. Tehnologii moderne de sudare și procedee conexe, Zilele Academice Timișene 1999
127. Safta V., Safta V. jr.: Analiza claselor de calitate ale îmbinărilor sudate conform ISO5817/EN25817, Consfăt. ASR-DVS, Brașov, 1994
128. Sălăgean T.: Fenomene fizice și metalurgice la sudarea cu arcul electric a oțelurilor, Editura Academiei, 1963
129. Sălăgean, T.: Tehnologia procedeeleor de sudare cu arc, Editura tehnica, Bucuresti 1985
130. Santos O., Quintino L.: Processos de soldatura, vol I, Editura ISQ Lisboa, 1992
131. Siewert T.A. și colab: Quantitative Evaluation of Distributed Pores in Reference Radiographs, Welding Journal, 1992, nr.8, p. 31-33
132. SR EN 1043-1-97: Încercarea de duritate a îmbinărilor cu arc electric

133. SR EN 30042-96: Îmbinări sudate cu arc electric de aluminiu și aliaje sudabile ale acestuia. Ghid pentru nivelurile de acceptare a imperfecțiunilor
134. SR EN 26520-20: Clasificarea imperfecțiunilor din sudurile prin topire ale metalelor
135. SR ISO 146-2-96: Încercare de duritate Vickers
136. STAS 10952/1-77: Analiza metalografică a îmbinărilor sudate prin topire
137. Stenke, V.: Metall-Schutzgasschweißen mit Impulsbetrieb, Linde Technische Gase: Sonderdruck 132
138. Stenke, V.: Besonderheiten und Eigenschaften von Mehrkomponentengasen in der Schweißtechnik, Linde Technische Gase - Sonderdruck 20/92
139. Subramanian S. și colab.: Droplet Transfer in Pulsed Gas Metal Arc Welding of Aluminium, *Welding Journal*, 1998, nr.11, p. 458s-464s
140. Subramanian S. și colab.: Analysis of arc voltage, current and light signals in pulsed gas metal arc welding of aluminium, *Sci. Technology of Welding and Joining* vol 3 (1998), nr. 6, p. 304-311
141. Subramanian S. și colab.: Experimental Approach to Selection of Pulsing Parameters in Pulsed GMAW, *Welding Res. Suppl.* 1999, p. 166s-172s
142. ***: Sudarea metalelor, Culegere de standarde comentate, vol. III, Editura OID-ICM, 1989
143. ***: Sudarea sinergică, SID 115, Editura OID-ICM, 1992
144. ***: Schweissen von Aluminium, DVS-Bericht, nr.13, 1970
145. ***: Schweissversuchergebnisse SLV-München, Werkstoff Datenblätter für Aluminiumlegierungen, Taschenbuchausgabe, 1990
146. Takeuchi Y., Shinoda T.: Spatter and blowhole formation in pulsed gas shielded metal arc welding, *Materials Science and Technology*, vol.9 (1991), nr.7, p.869-876
147. Thamodharan M., Beck H., Wolf A.: Steady and Pulsed Direct Current Welding With a Single Converter, *Welding Res. Suppl.* 1999, nr.3, p.75s-79s
148. ***: The Physics of Welding, Pergamon Press, 1984
149. ***: T.I.M.E. - Process - Ein neues MAG-Schweißverfahren, IGM Robotersystem AG
150. Udrescu L.: Transfer termic și masic la aliaje metalice, Editura Politehnica Timișoara, 1999
151. ***: Welding Handbook, ed.8, vol.2 și vol.3, Editura VAWS, Miami, 1996
152. Welz, W., Knoch, R.: Einstellen und Klassifizieren von Impulslichtbogen zum Metall-Aktivgasschweißen, SLV München Mitteilung Nr.86/1989
153. Yang Y.P. și colab.: A Hot-Cracking Mitigation Technique for Welding High-Strenth Aluminium Alloy, *Welding Journal* vol.79 (2000), nr.1, p.9s-17s
154. Zgură Gh. și colab.: Tehnologia sudării prin topire, Editura didactică și pedagogică, București 1983
155. Zhang Y.M., Li P.J.: Modified Active Control of Metal Transfer and Pulsed GMAW of Titanium, *Welding Res. Suppl.* vol.80 (2001), nr.2, p. 54s-61s
156. Zhu P., Simpson S.W.: A Theoretical Study of Gas Metal Arc Welding System, *Sci. Technology*, vol. 4 (1995), p.495-500
157. Zschötge, S.: Kleine Werkstoffkunde der Nichteisenmetalle, Fachbuchreihe Schweißtechnik, Band 50

ANEXA 4.1.

**EXEMPLIFICĂRI ALE EXPERIMENTELOR RELATIV LA
VALORILE PARAMETRILOR DE PULS (FRECVENȚA) –
TABLĂ DE 2MM GROSIME**

= vezi tabelul 1 din capitolul IV =

Date generale:

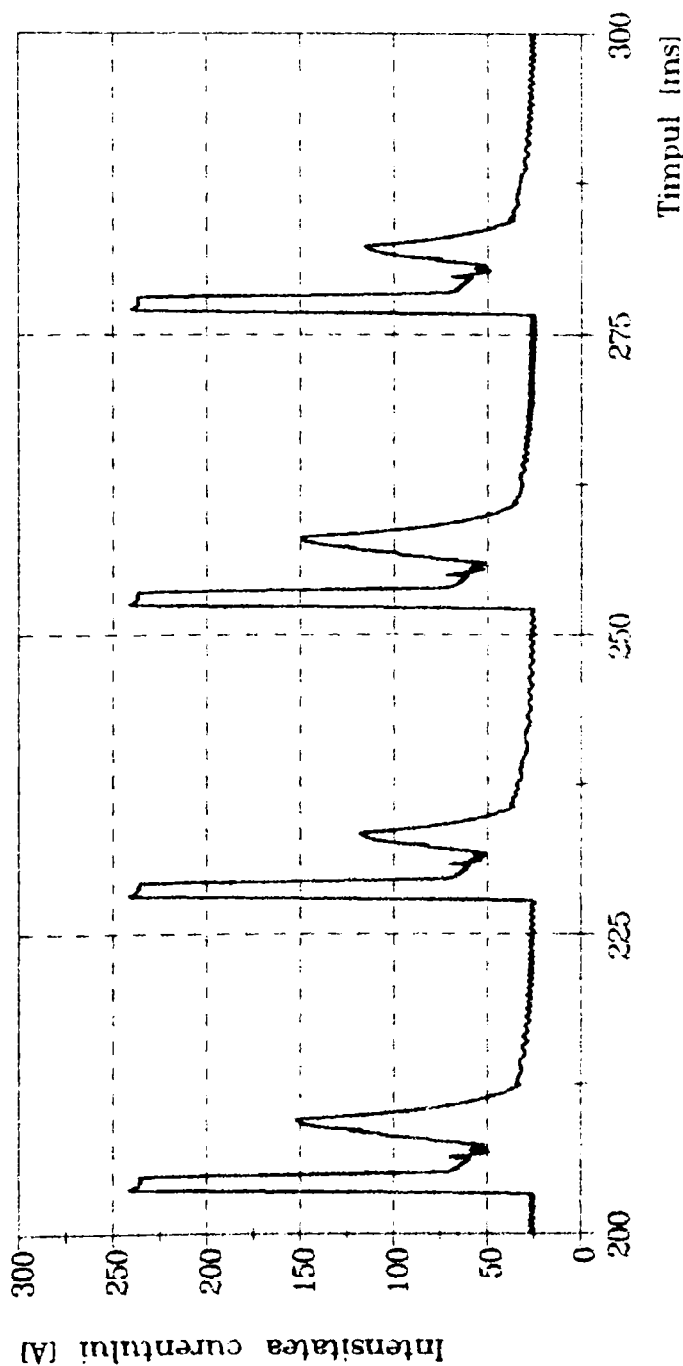
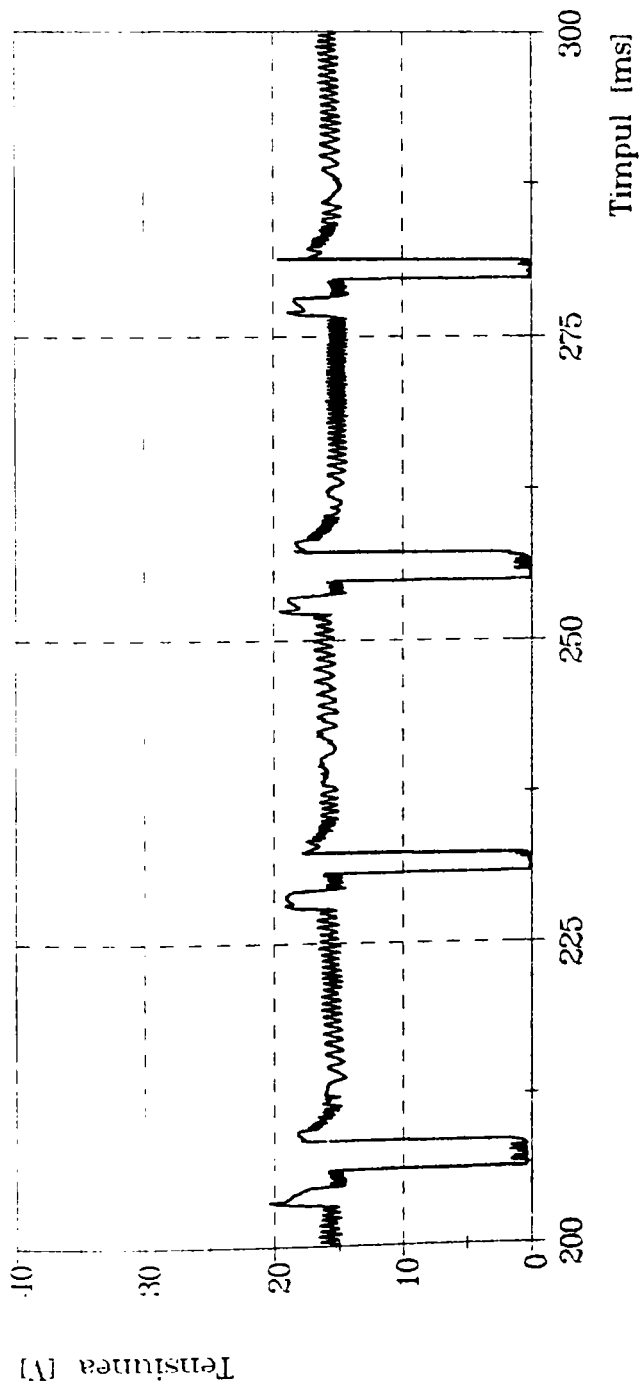
Materialul de baza: AlMgSi0,5
 Grosimea [s]: 2 mm
 Lungimea libera [l]: 13 mm
 Materialul de adaos: AlSi5
 Gazul protector: Argon
 Debitul gazului [D]: 18 l/min
 Tipul imbinarii: depunere
 Pozitia de sudare: PA-orizontala
 Sursa de sudare: TPS 450
 Data: 08.03.1995

Parametrii de sudare:

Vit. de sudare [vs]: 60 cm/min
 Vit. de avans [vD]: 2,9 m/min
 Frecventa [f]: 40 Hz
 Curentul de baza [IG]: 25 A
 Curentul de puls [IP]: 238 A
 Timpul de puls [tpl]: 1,5 ms

Marimi determinate:

Tensiunea (med.arit.): 14,52 V
 Tensiunea (med.geom.): 15,16 V
 Curentul (med.arit.): 54,80 A
 Curentul (med.geom.): 25,66 A



Date generale:

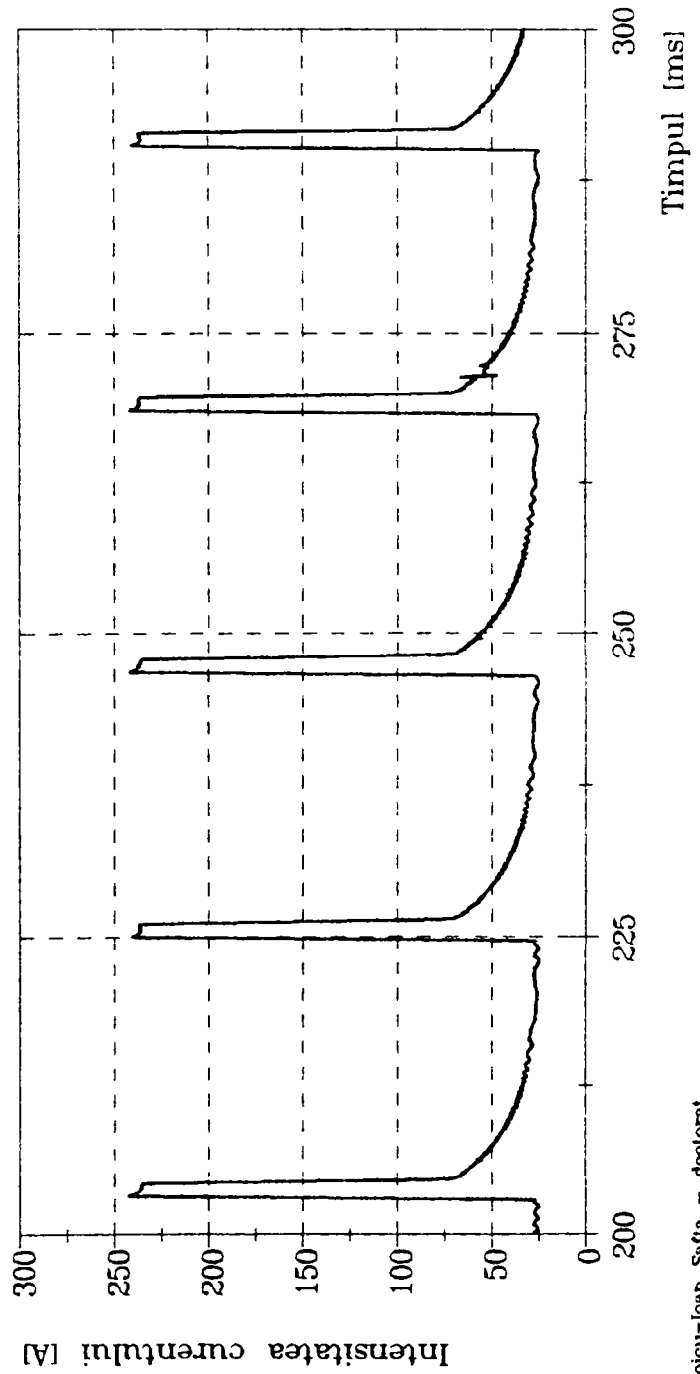
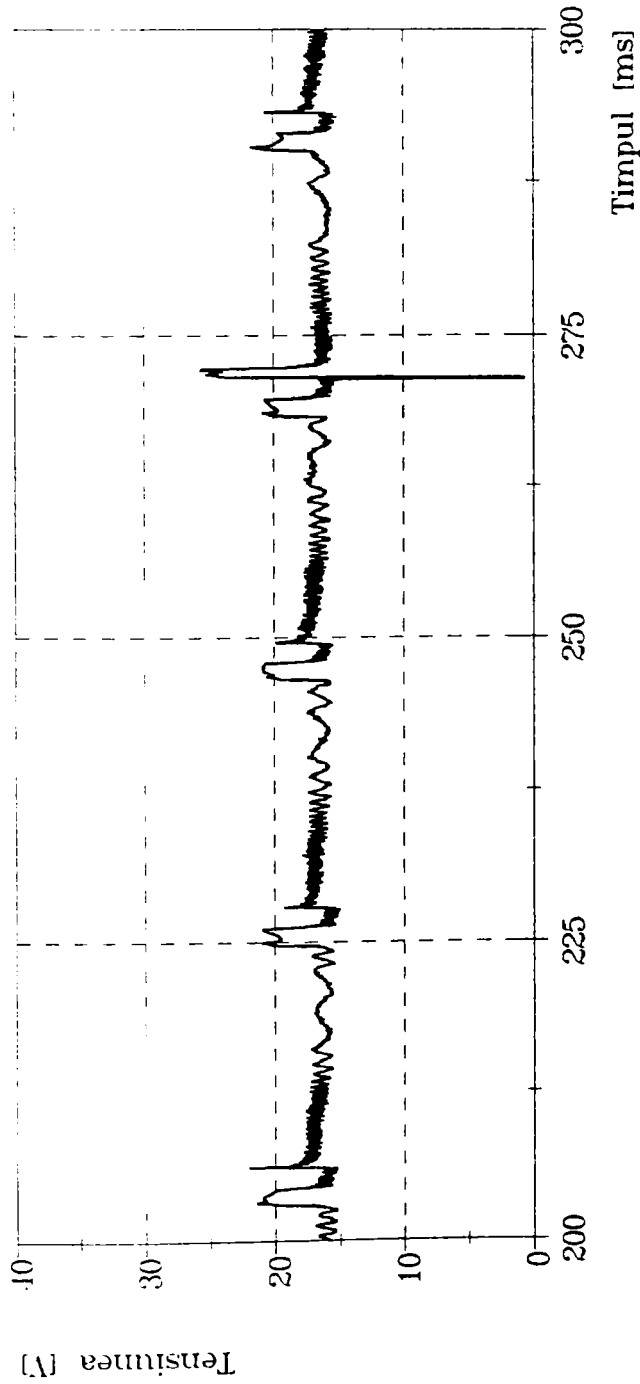
Materialul de baza: AlMgSi0,5
 Grosimea [s]: 2 mm
 Lungimea libera [l]: 13 mm
 Materialul de adaos: AlSi5
 Gazul protector: Argon
 Debitul gazului [D]: 18 l/min
 Tipul imbinarii: depunere
 Pozitia de sudare: PA-orizontal
 Sursa de sudare: TPS 450
 Data: 08.03.1996

Parametrii de sudare:

Vit. de sudare [vs]: 60 cm/min
 Vit. de avans [vD]: 2,9 m/min
 Frecventa [f]: 45 Hz
 Curentul de baza [IG]:25 A
 Curentul de puls [IP]:238 A
 Timpul de puls [tp]: 1,5 ms

Marimi determinate:

Tensiunea (med.arit.):16,08 V
 Tensiunea (med.geom.):16,44 V
 Curentul (med.arit.): 52,06 A
 Curentul (med.patr.): 72,59 A



Date generale:

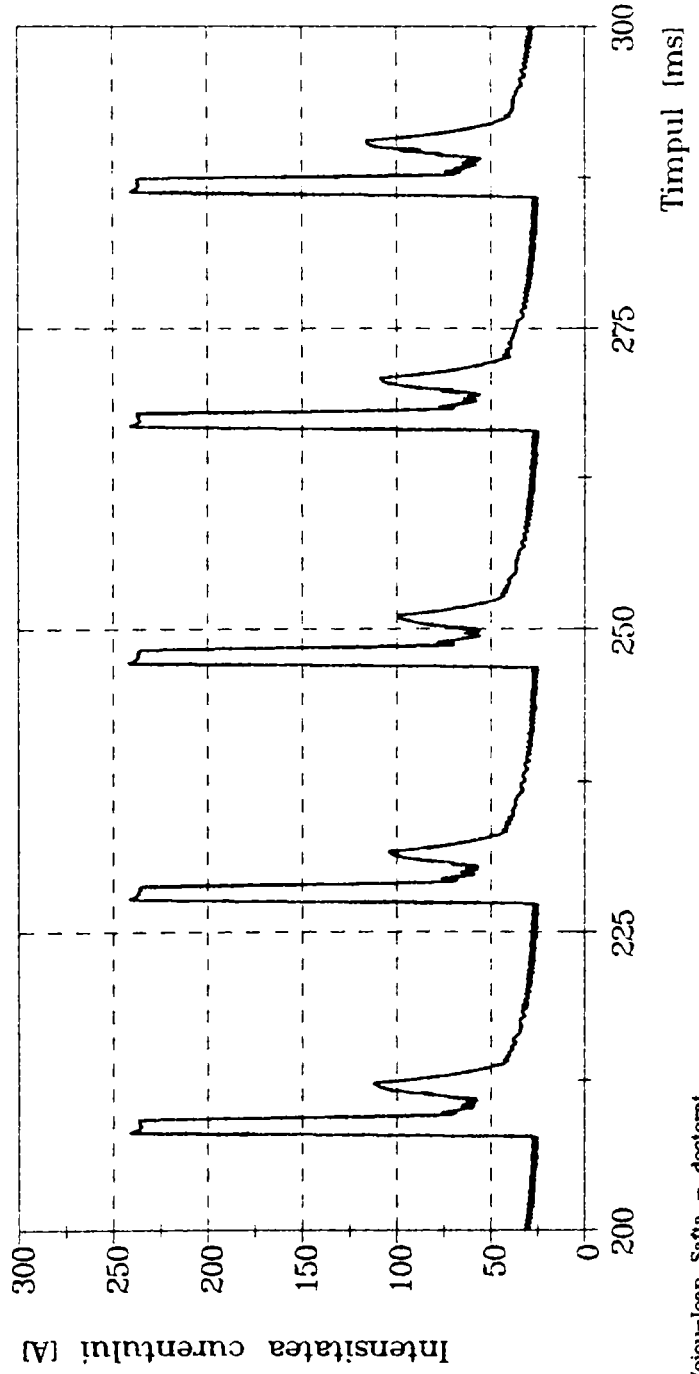
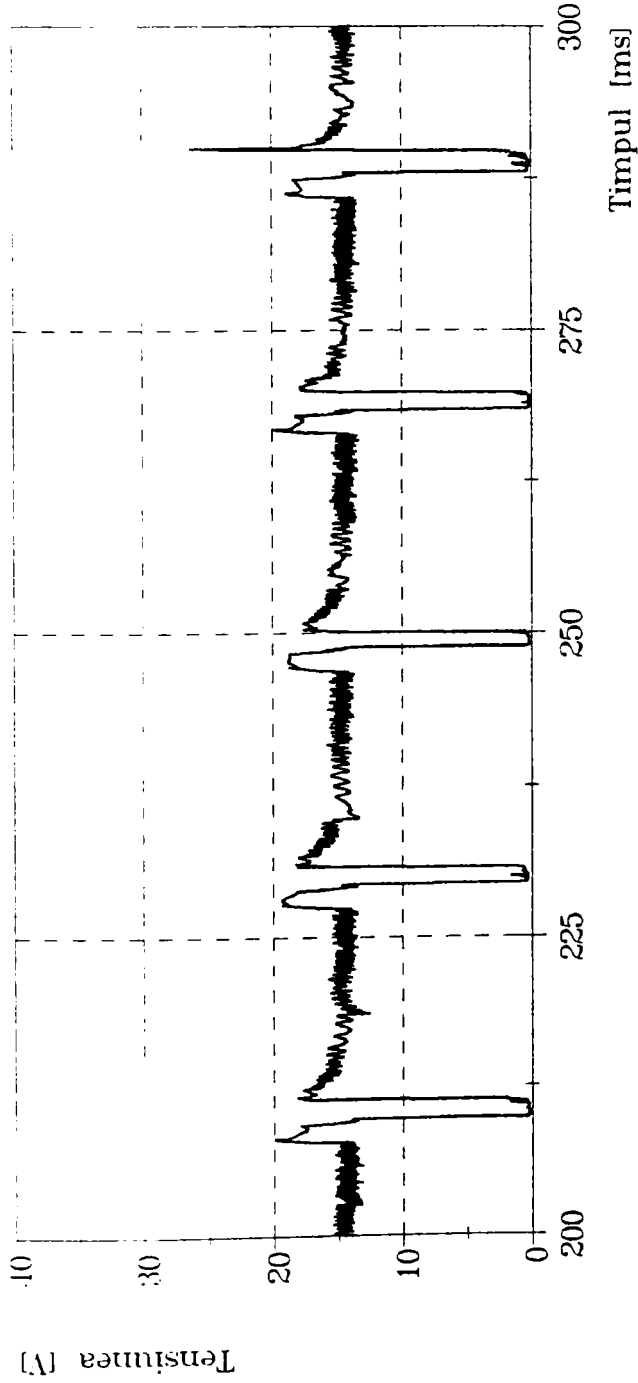
Materialul de baza: AlMgSi0,5
 Grosimea [s]: 2 mm
 Lungimea libera [l]: 13 mm
 Materialul de adaos: AlSi5
 Gazul protector: Argon
 Debitul gazului [D]: 18 l/min
 Tipul imbinarii: depunere
 Pozitia de sudare: PA-orizontal
 Sursa de sudare: TPS 450
 Data: 08.03.1996

Parametrii de sudare:

Vit. de sudare [vs]: 60 cm/min
 Vit. de avans [vD]: 2,9 m/min
 Frecventa [f]: 50 Hz
 Curentul de baza [IG]:25 A
 Curentul de puls [IP]:238 A
 Timpul de puls [tp]: 1,5 ms

Marimi determinate:

Tensiunea (med.arit.):14,32 V
 Tensiunea (med.geom.):14,87 V
 Curentul (med.arit.): 54,95 A
 Curentul (med.patr.): 75,99 A



Universitatea "Politehnica" Timisoara

Facultatea de Mecanica

Catedra de Tehnologie Mecanica

Date generale:

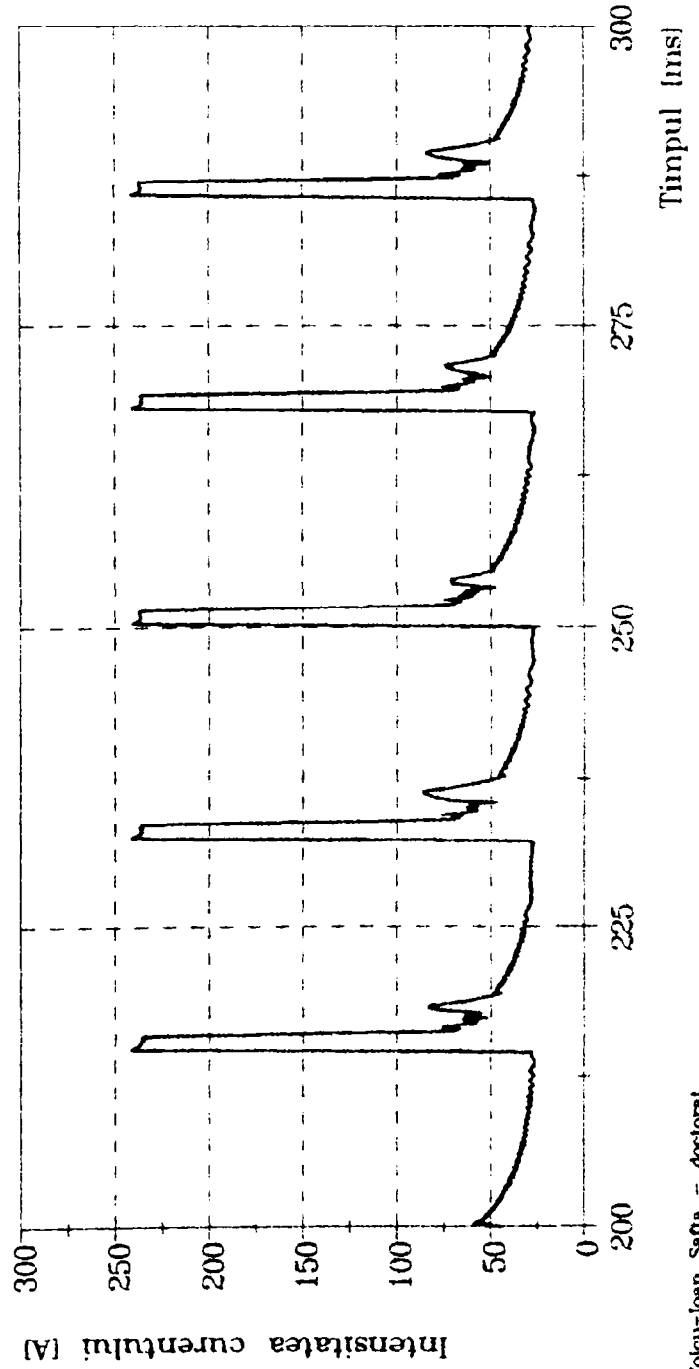
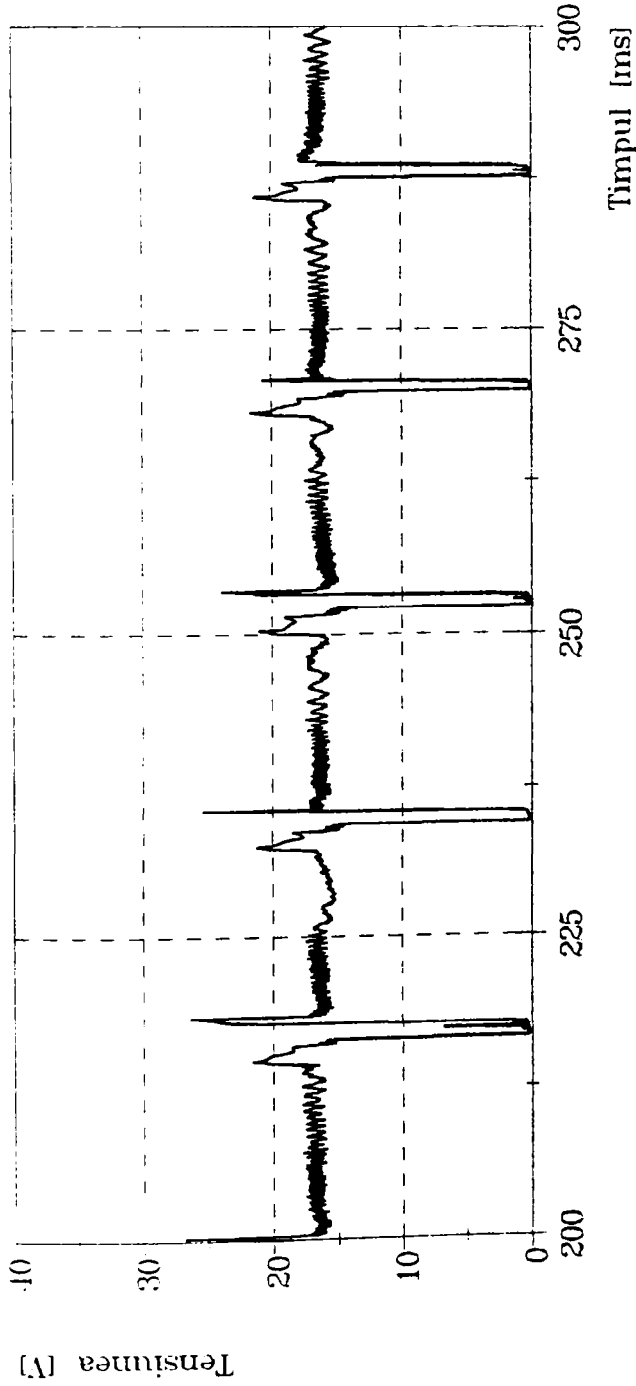
Materialul de baza: AlMgSi0,5
Grosimea [s]: 2 mm
Lungimea libera [l]: 13 mm
Materialul de adaos: AISi5
Gazul protector: Argon
Debitul gazului [D]: 18 l/min
Tipul imbinarii: depunere
Pozitia de sudare: PA-orizontal
Sursa de sudare: TPS 450
Data: 08.03.1996

Parametrii de sudare:

Vit. de sudare [vs]: 60 cm/min
Vit. de avans [vD]: 2,9 m/min
Frecventa [f]: 55 Hz
Curentul de baza [IG]:25 A
Curentul de puls [IP]:238 A
Timpul de puls [tp]: 1,5 ms

Marimi determinate:

Tensiunea (med.arit.):15,79 V
Tensiunea (med.geom.):16,30 V
Curentul (med.arit.): 56,36 A
Curentul (med.patr.): 78,30 A



Volcu-Ioan Saffa - doctorat

Date generale:

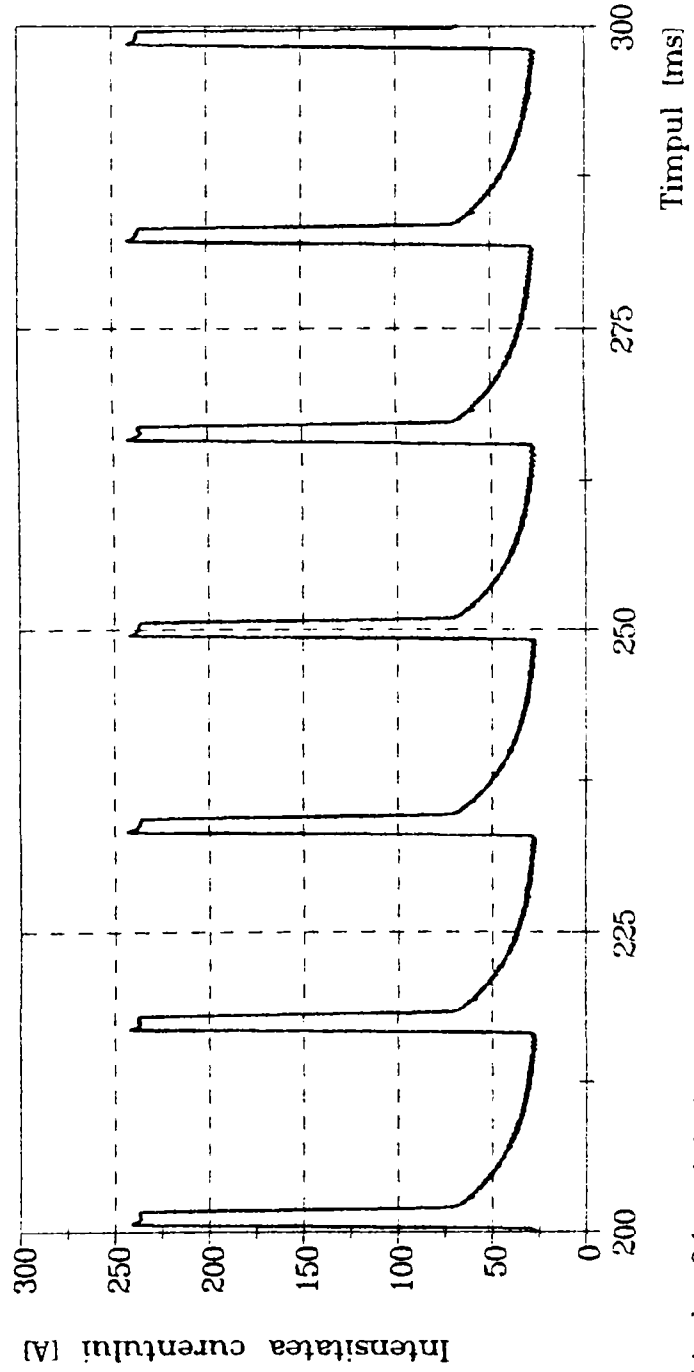
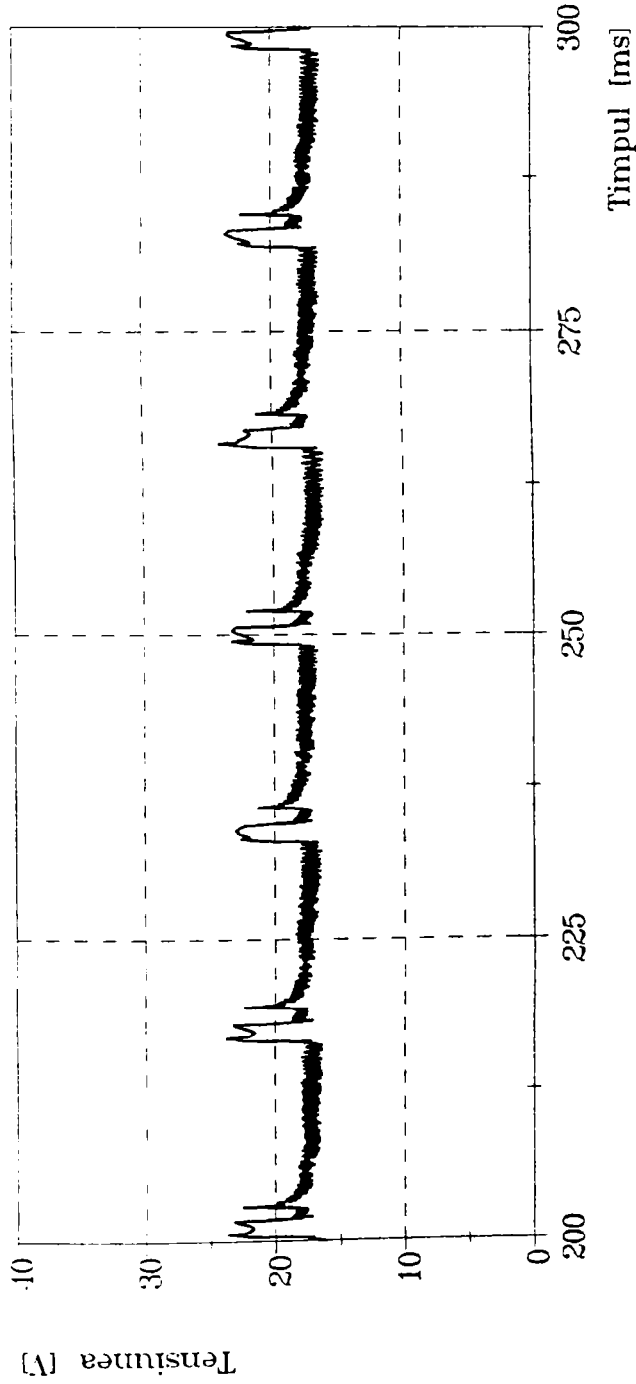
Materialul de baza: AlMgSi0,5
 Grosimea [s]: 2 mm
 Lungimea libera [l]: 13 mm
 Materialul de adaos: AlSi5
 Gazul protector: Argon
 Debitul gazului [D]: 18 l/min
 Tipul imbinarii: depunere
 Pozitia de sudare: PA-orizontal
 Sursa de sudare: TPS 450
 Data: 08.03.1996

Parametrii de sudare:

Vit. de sudare [vs]: 60 cm/min
 Vit. de avans [vD]: 2,9 m/min
 Frecventa [f]: 60 Hz
 Curentul de baza [IG]:25 A
 Curentul de puls [IP]:238 A
 Timpul de puls [tp]: 1,5 ms

Marimi determinate:

Tensiunea (med.arit.):18,13 V
 Tensiunea (med.geom.):18,21 V
 Curentul (med.arit.): 57,64 A
 Curentul (med.patr.): 80,14 A



Date generale:

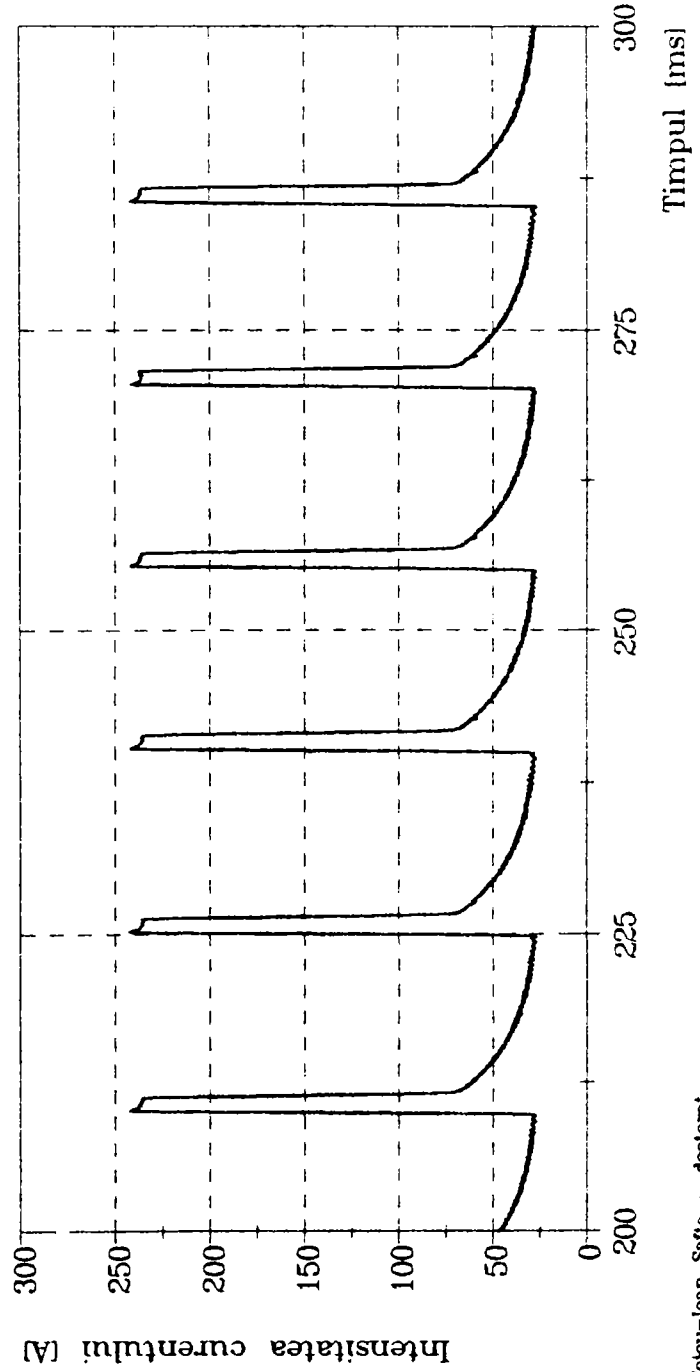
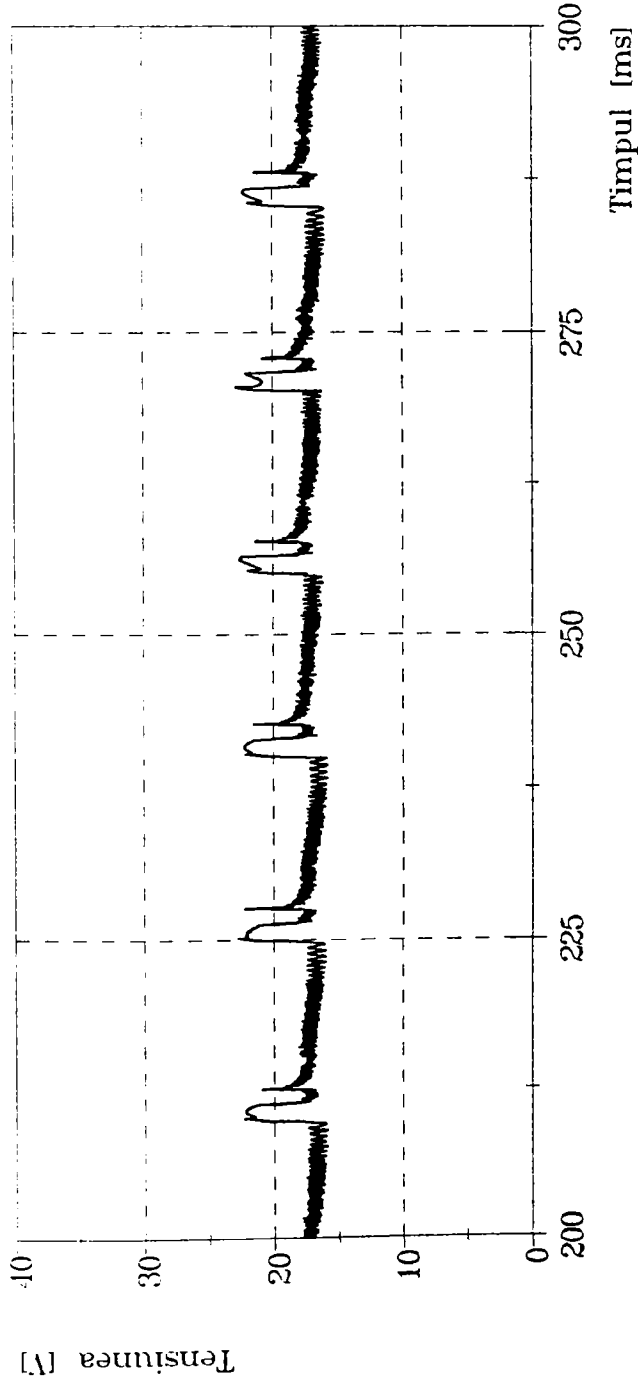
Materialul de baza: AlMgSi0,5
 Grosimea [s]: 2 mm
 Lungimea libera [l]: 13 mm
 Materialul de adaos: AlSi5
 Gazul protector: Argon
 Debitul gazului [D]: 18 l/min
 Tipul imbinarii: depunere
 Pozitia de sudare: PA-orizontal
 Sursa de sudare: TPS 450
 Data: 08.03.1996

Parametrii de sudare:

Vit. de sudare [vs]: 60 cm/min
 Vit. de avans [vD]: 2,9 m/min
 Frecventa [f]: 65 Hz
 Curentul de baza [IG]:25 A
 Curentul de puls [IP]:238 A
 Timpul de puls [tp]: 1,5 ms

Marimi determinate:

Tensiunea (med.arit.):17,67 V
 Tensiunea (med.geom.):17,73 V
 Curentul (med.arit.): 59,58 A
 Curentul (med.patr.): 82,71 A



Date generale:

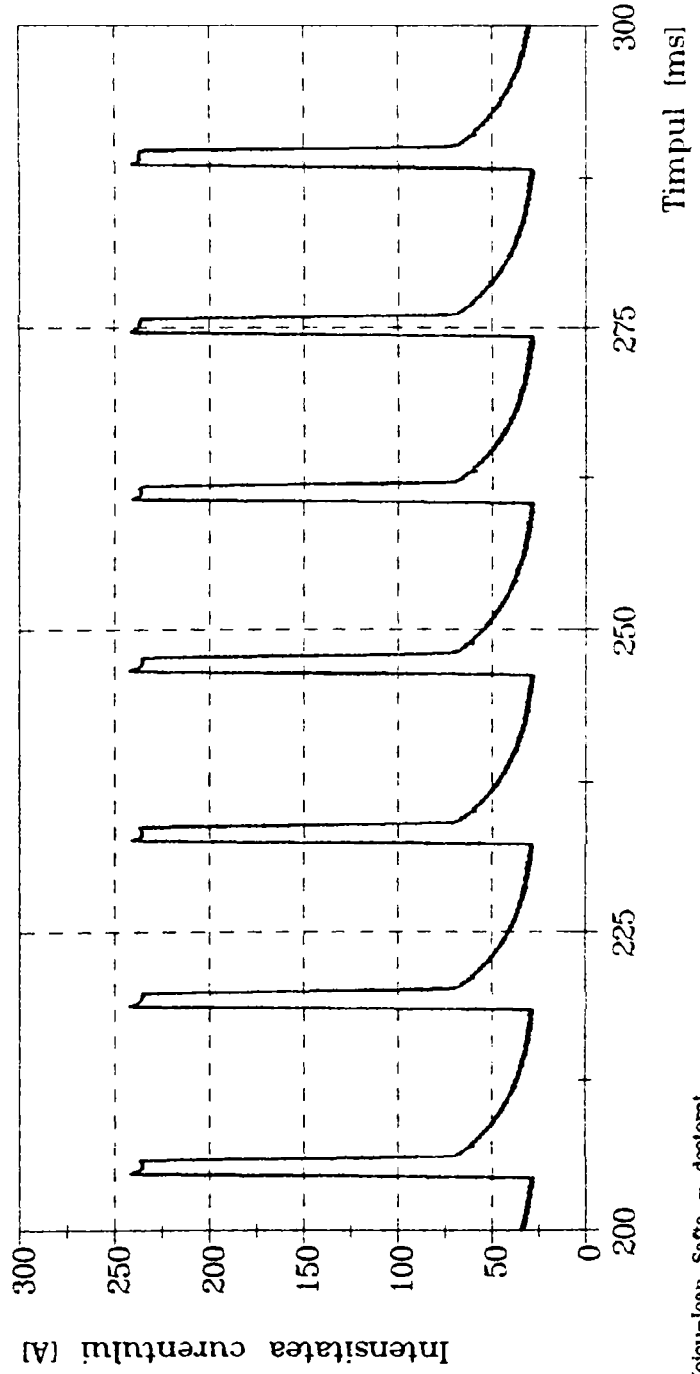
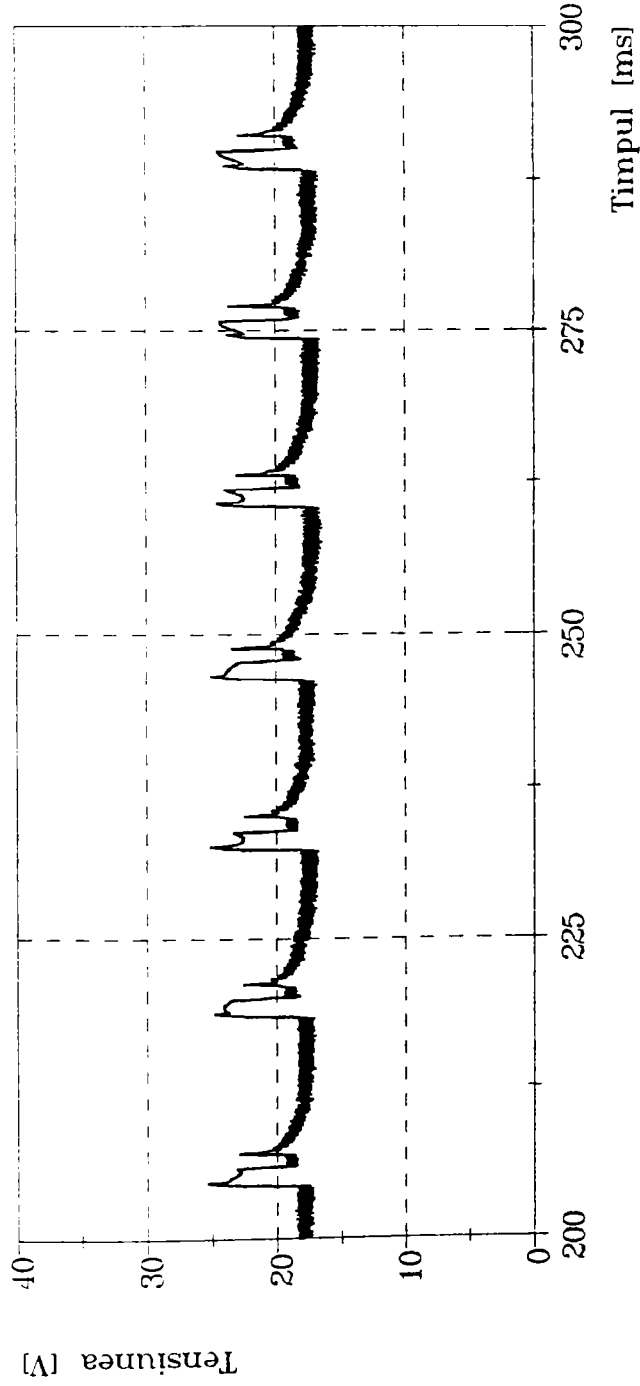
Materialul de baza: AlMgSi10,5
 Grosimea [s]: 2 mm
 Lungimea libera [l]: 13 mm
 Materialul de adaos: AISi5
 Gazul protector: Argon
 Debitul gazului [D]: 18 l/min
 Tipul imbinarii: depunere
 Pozitia de sudare: PA-orizontal
 Sursa de sudare: TPS 450
 Data: 08.03.1996

Parametrii de sudare:

Vit. de sudare [vs]: 60 cm/min
 Vit. de avans [vD]: 2,9 m/min
 Frecventa [f]: 70 Hz
 Curentul de baza [IG]: 25 A
 Curentul de puls [IP]: 238 A
 Timpul de puls [tp]: 1,5 ms

Marimi determinate:

Tensiunea (med.arit.): 18,69 V
 Tensiunea (med.geom.): 18,78 V
 Curentul (med.arit.): 61,88 A
 Curentul (med.patr.): 85,40 A



Catedra de Tehnologie Mecanica

Date generale:

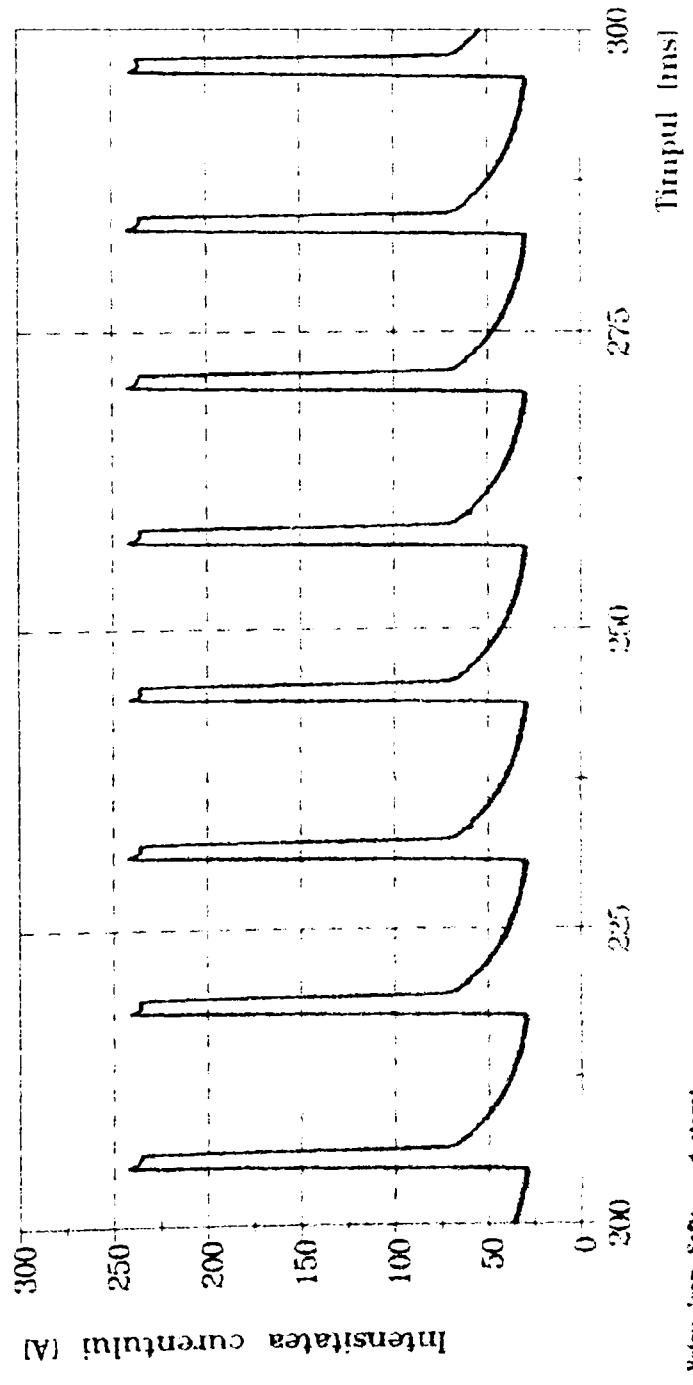
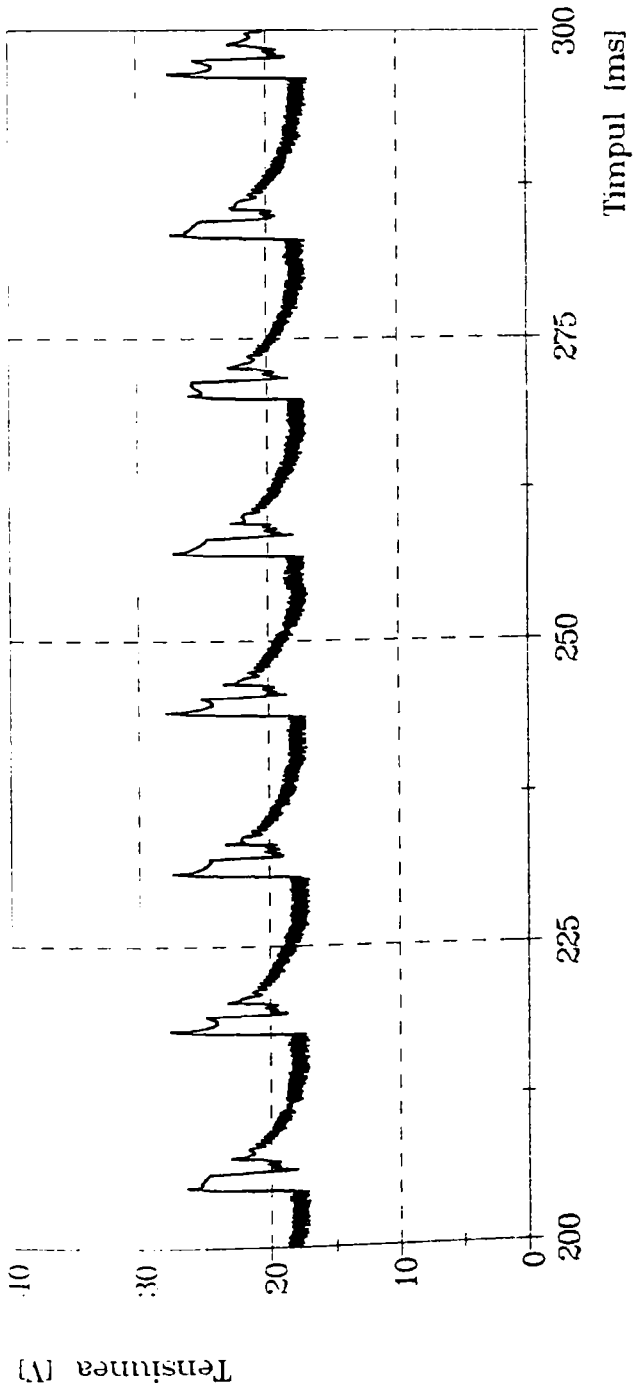
Materialul de baza: AlMgSi0,5
Grosimea [s]: 2 mm
Lungimea libera [l]: 13 mm
Materialul de adaos: AISi5
Gazul protector: Argon
Debitul gazului [D]: 18 l/min
Tipul imbinarii: depunere
Pozitia de sudare: PA-orizontal
Sursa de sudare: TPS 450
Data: 08.03.1996

Parametrii de sudare:

Vit. de sudare [vs]: 60 cm/min
Vit. de avans [vD]: 2,9 m/min
Frecventa [f]: 75 Hz
Curentul de baza [IG]:25 A
Curentul de puls [IP]:238 A
Timpul de puls [tpt]: 1,5 ms

Marimi determinate:

Tensiunea mediana [U], V
Tensiunea varf [Uv], V
Curentul mediu [I], A
Curentul varf [Iv], A



Văcu-Ioan Saftă - doctorat

IMAGINI EXPERIMENTALE RELATIV LA VALORILE
PARAMETRILOR DE PULS (TABLA DE 2mm)

A. Variația frecvenței

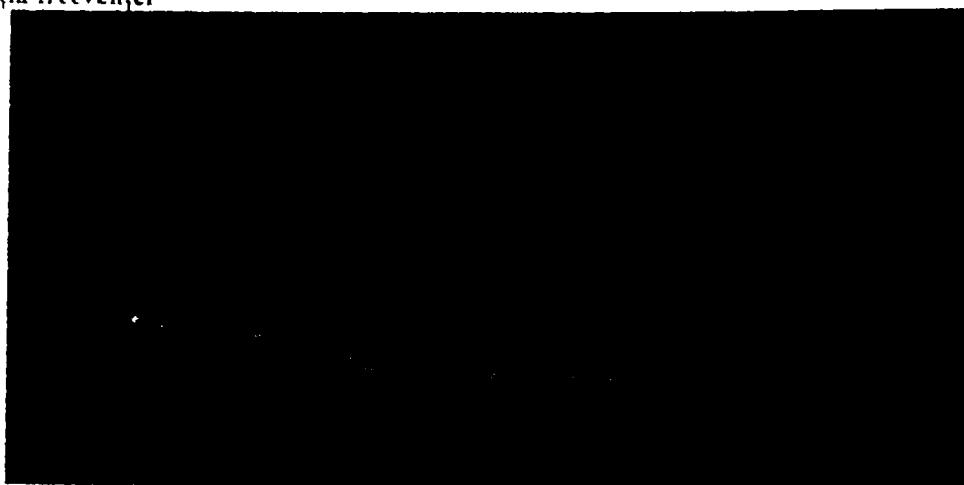


Figura.1. $f=60\text{Hz}$

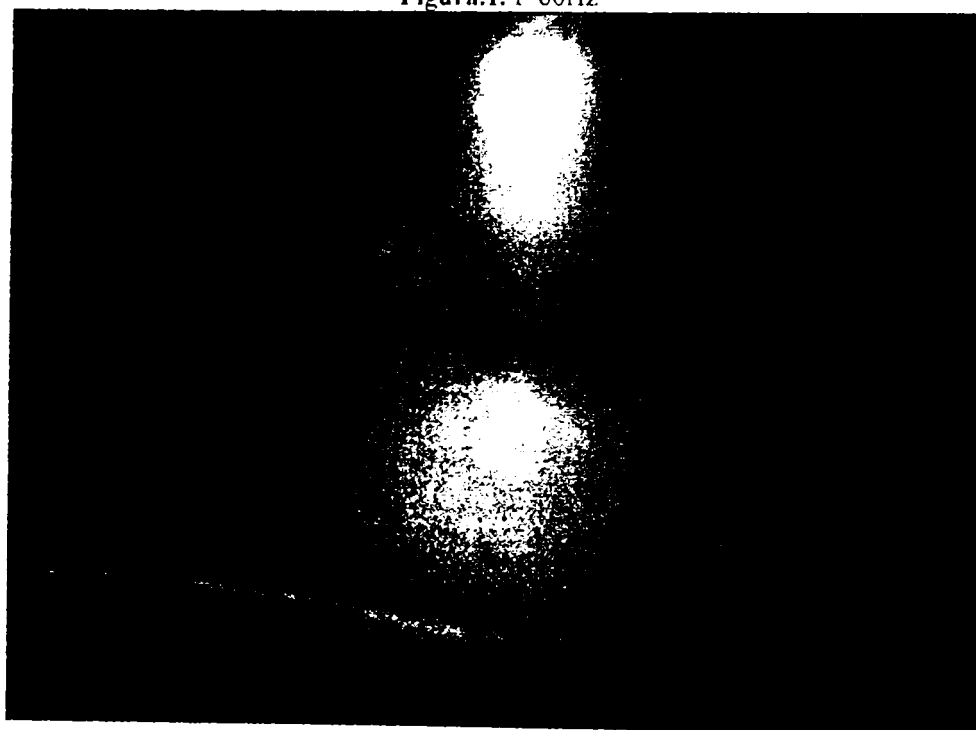


Figura.2. $f=75\text{Hz}$

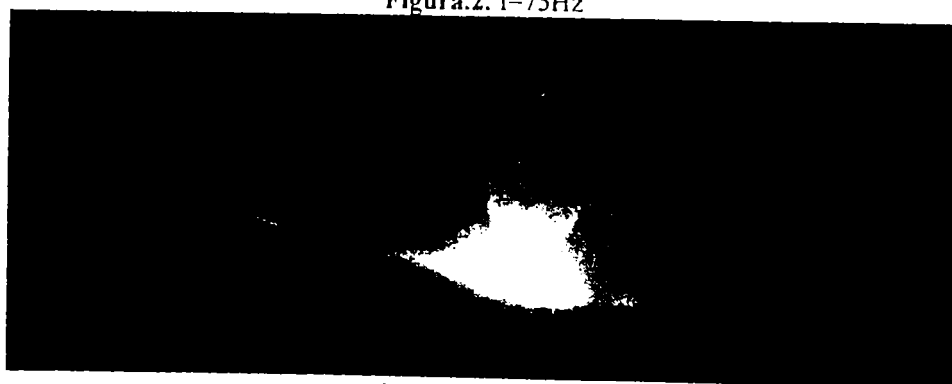


Figura.3. $f=40\text{Hz}$

B. Variația curentului de puls

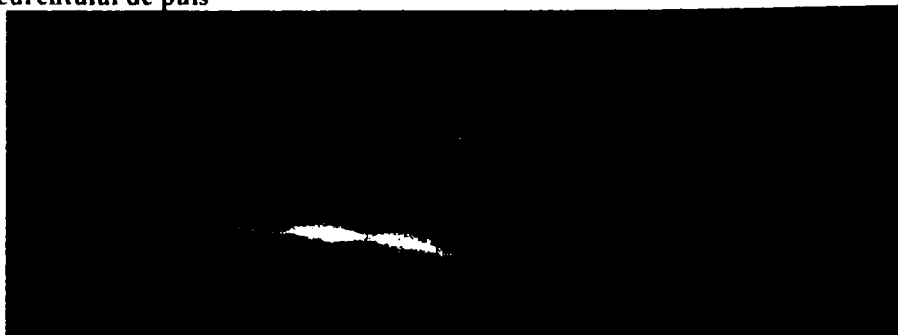


Figura 1. $I_p=238A$

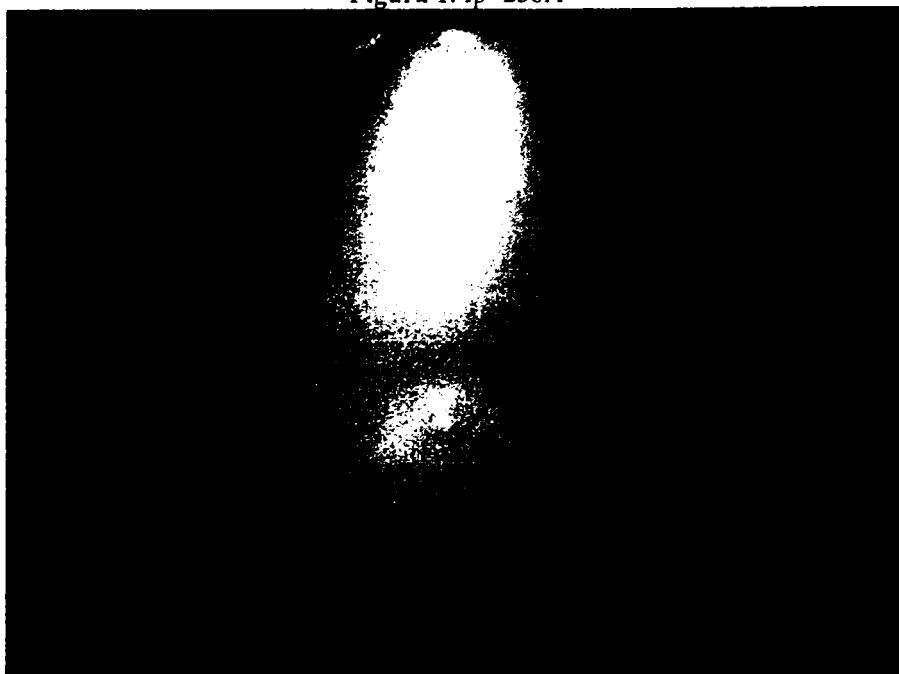


Figura 2. $I_p=280A$

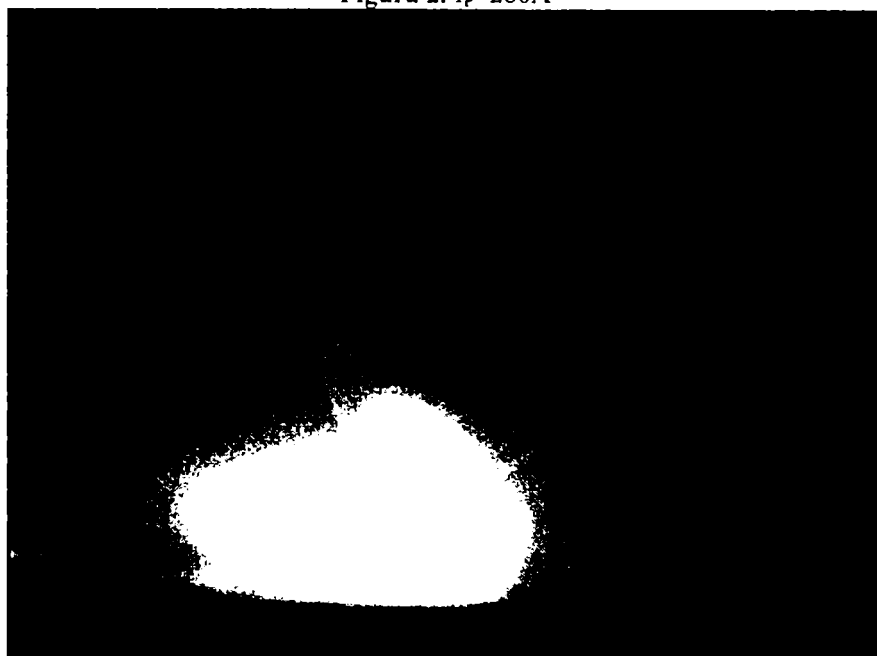


Figura 3. $I_p=210A$

C. Variația timpului de puls

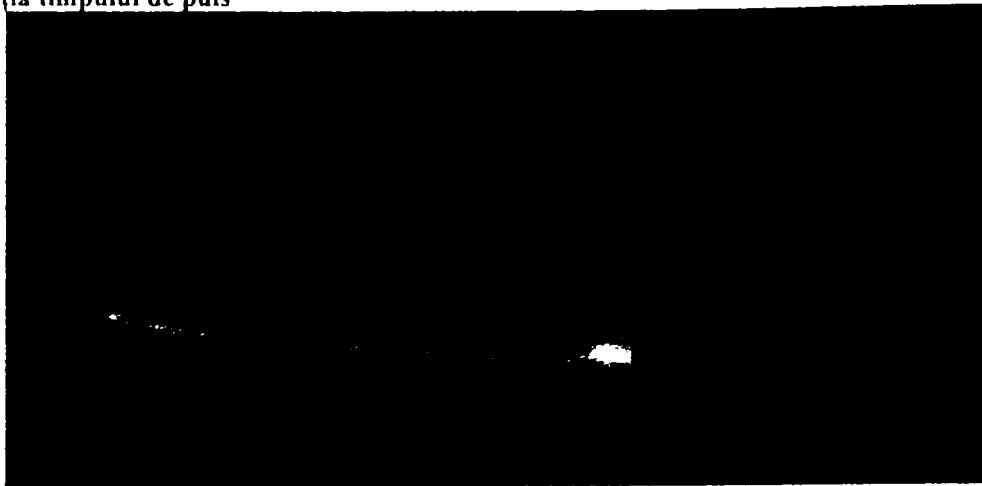


Figura 1. $t_p=1,5ms$

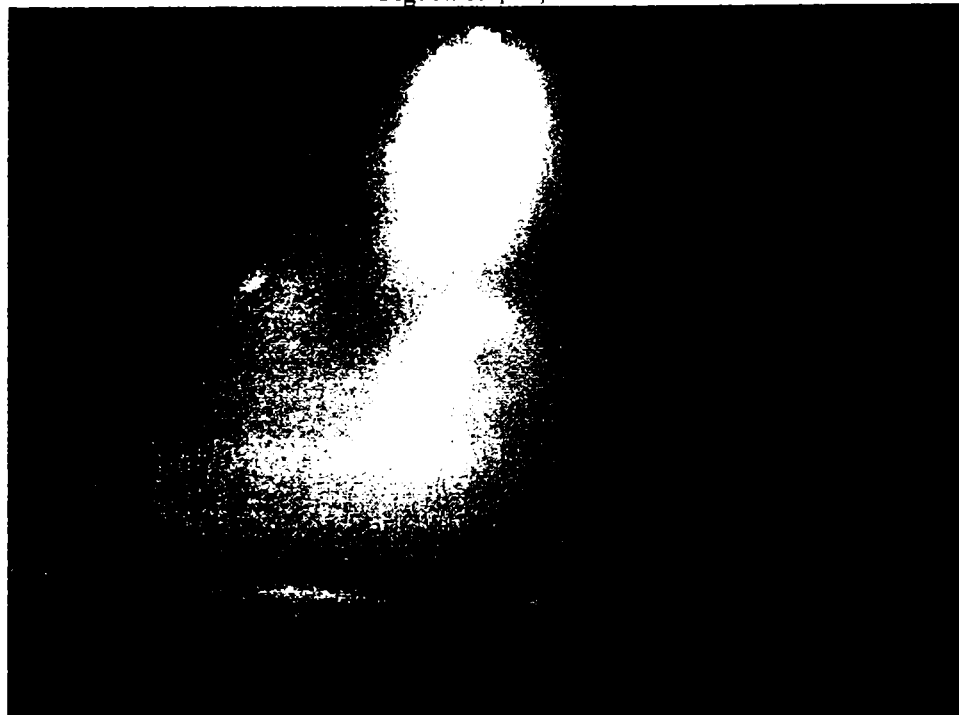


Figura 2. $t_p=1,9ms$

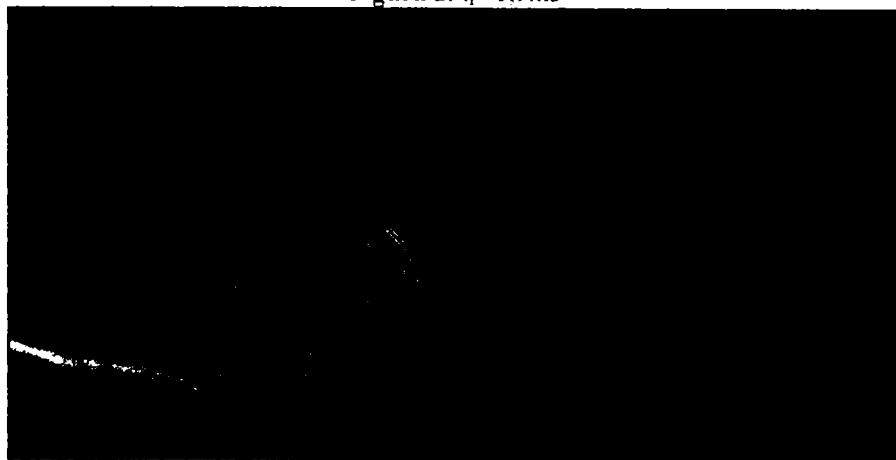
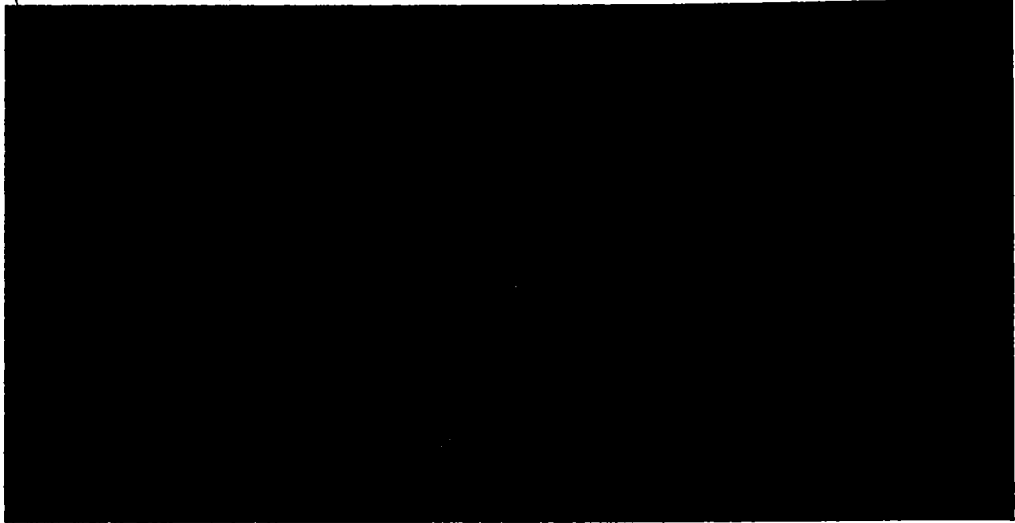
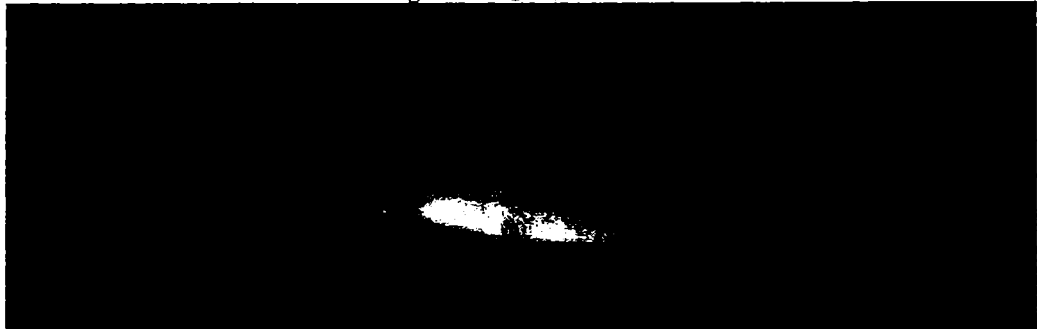
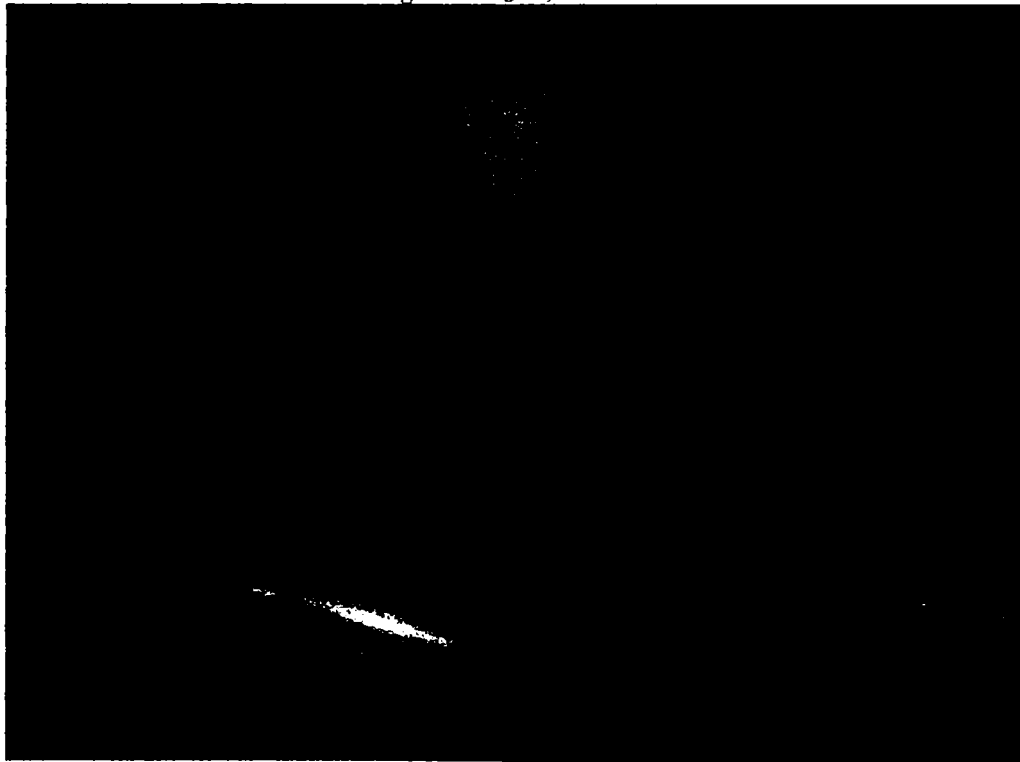


Figura 3. $t_p=1,3ms$

D. Variația vitezei de avans**Figura 1.** $v_D=2,9\text{cm/min}$ **Figura 2.** $v_D=3,3\text{cm/min}$ **Figura 3.** $v_D=2,6\text{cm/min}$

ANEXA 4.2.

**EXEMPLIFICĂRI ALE EXPERIMENTELOR RELATIV LA
VALORILE PARAMETRILOR DE PULS (FRECVENȚA) –
TABLĂ DE 6MM GROSIME**

= vezi tabelul 2 din capitolul IV =

Date generale:

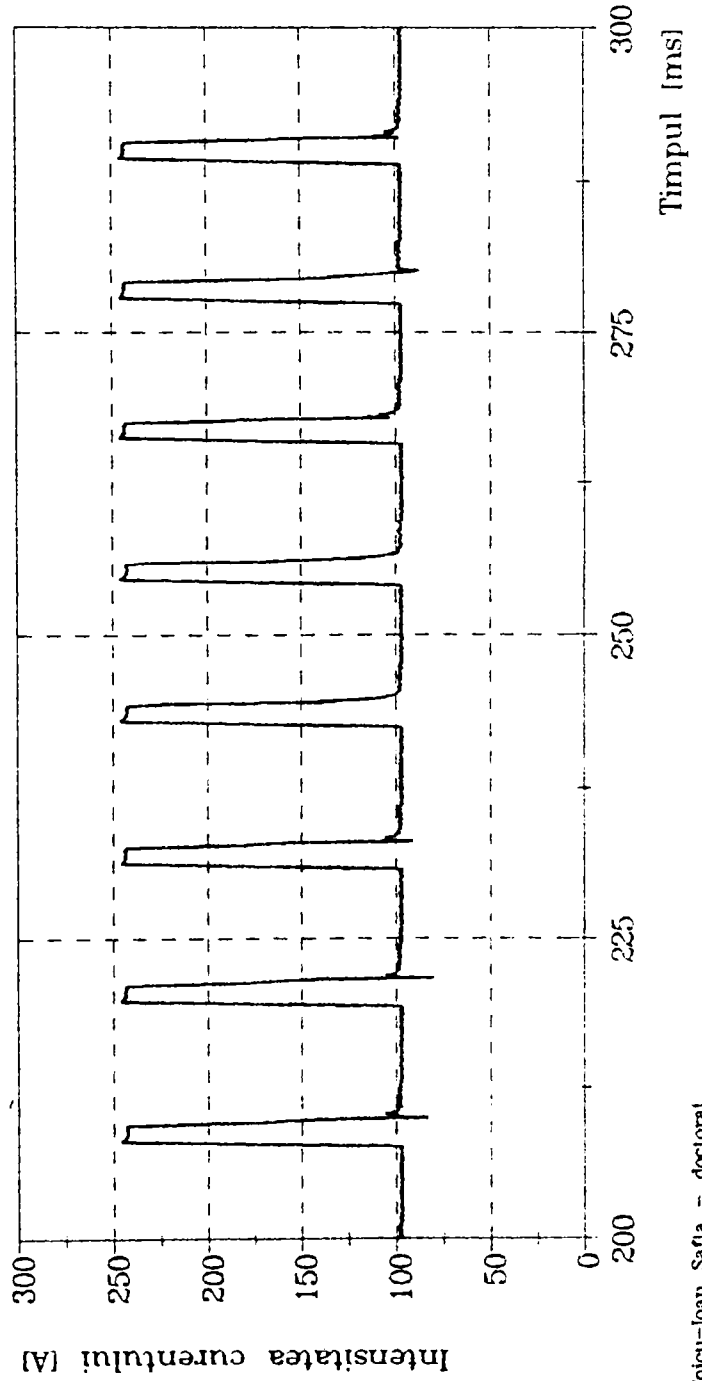
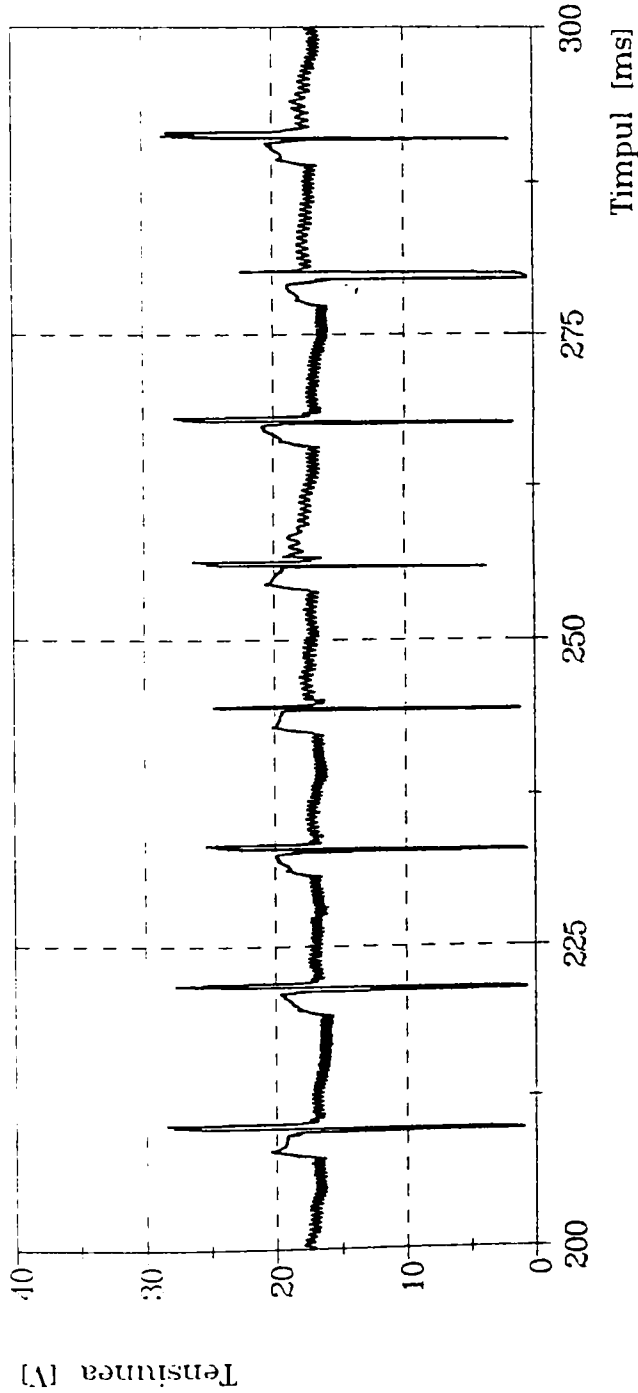
Materialul de baza: AlMgSi0,5
 Grosimea [s]: 6 mm
 Lungimea libera [l]: 17 mm
 Materialul de adaos: AlSi5
 Gazul protector: Argon
 Debitul gazului [D]: 18 l/min
 Tipul imbinarii: depunere
 Pozitia de sudare: PA-orizontal
 Sursa de sudare: TPS 450
 Data: 25.06.1996

Parametrii de sudare:

Vit. de sudare [vs]: 60 cm/min
 Vit. de avans [vD]: 5,7 m/min
 Frecventa [f]: 105 Hz
 Curentul de baza [IG]:98 A
 Curentul de puls [IP]:245 A
 Timpul de puls [tp]: 1,8 ms

Marimi determinate:

Tensiunea (med.arit.):17,65 V
 Tensiunea (med.geom.):17,79 V
 Curentul (med.arit.):120,56 A
 Curentul (med.patr.):130,55 A



Date generale:

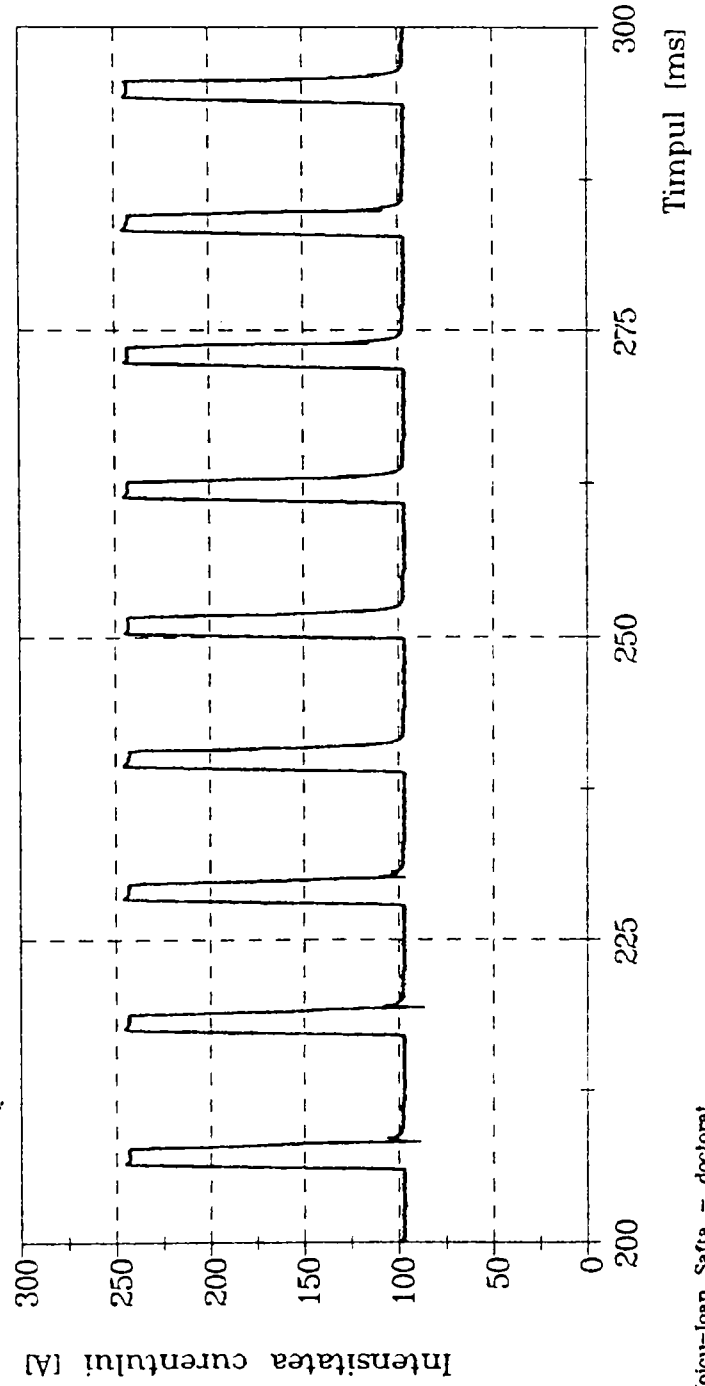
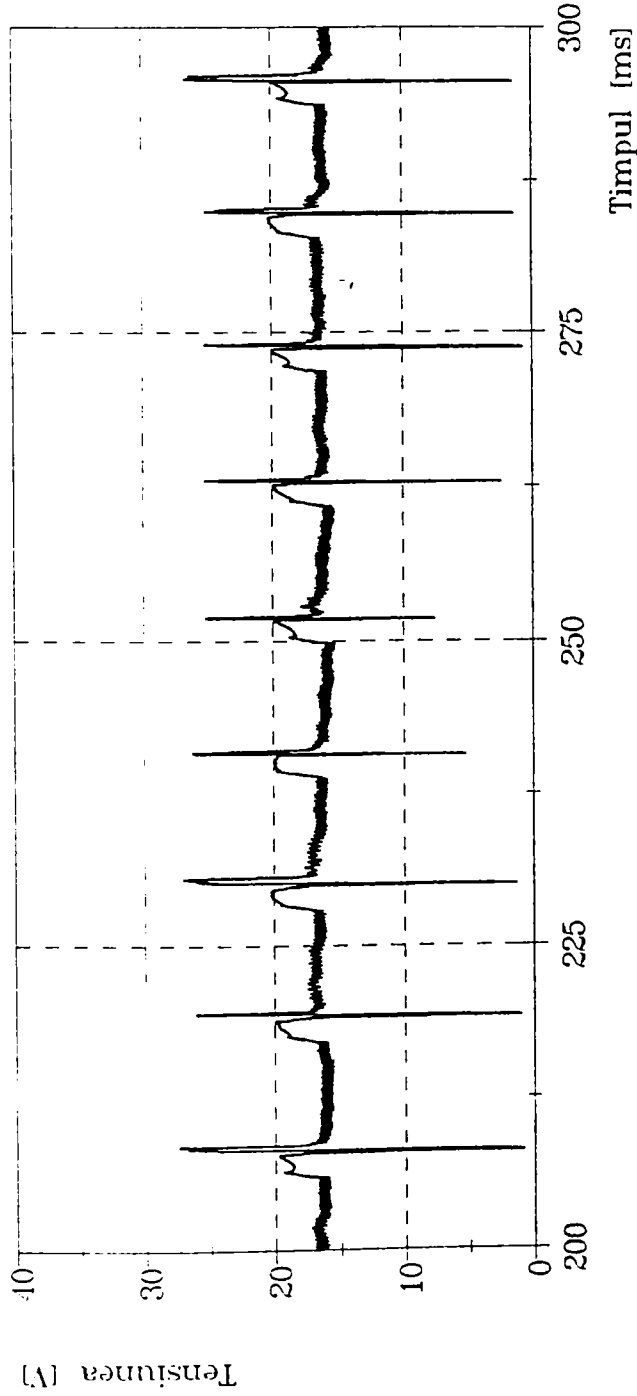
Materialul de baza: AlMgSi0,5
 Grosimea [s]: 6 mm
 Lungimea libera [l]: 17 mm
 Materialul de adaos: AlSi5
 Gazul protector: Argon
 Debitul gazului [D]: 18 l/min
 Tipul imbinarii: depunere
 Pozitia de sudare: PA-orizontal
 Sursa de sudare: TPS 450
 Data: 25.06.1996

Parametrii de sudare:

Vit. de sudare [vs]: 60 cm/min
 Vit. de avans [vD]: 5,7 m/min
 Frecventa [f]: 110 Hz
 Curentul de baza [IG]: 98 A
 Curentul de puls [IP]: 245 A
 Timpul de puls [tp]: 1,8 ms

Marimi determinate:

Tensiunea (med.arit.): 17,09 V
 Tensiunea (med.geom.): 17,26 V
 Curentul (med.arit.): 121,37 A
 Curentul (med.patr.): 131,61 A



Date generale:

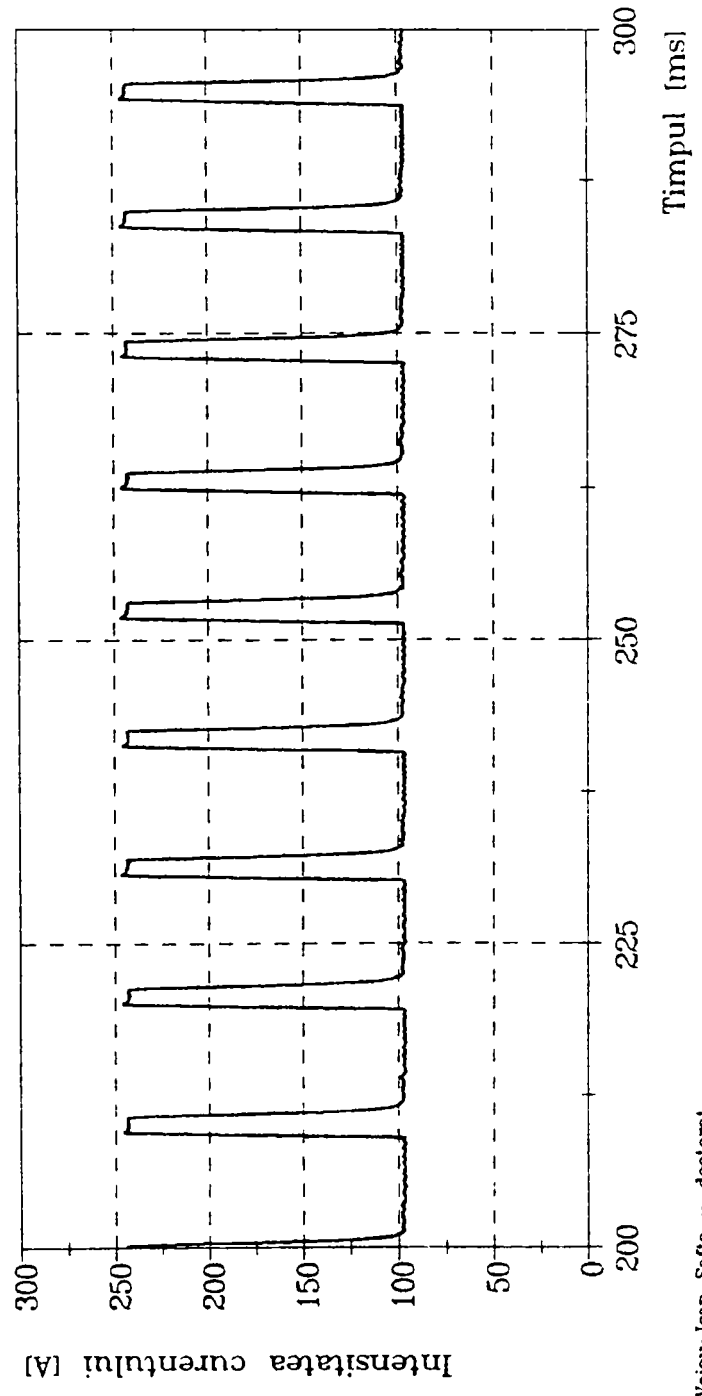
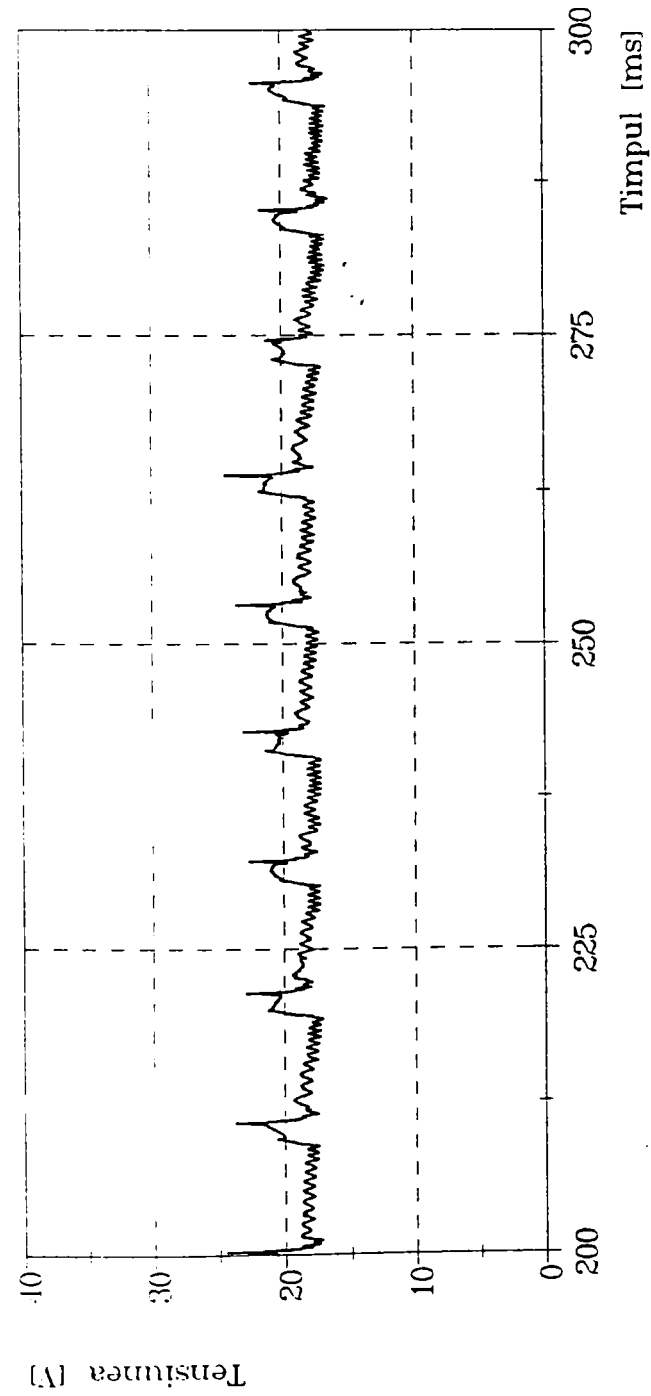
Materialul de baza: AlMgSi0,5
 Grosimea [s]: 6 mm
 Lungimea libera [l]: 17 mm
 Materialul de adaos: AlSi5
 Gazul protector: Argon
 Debitul gazului [D]: 18 l/min
 Tipul imbinarii: depunere
 Pozitia de sudare: PA-orizontal
 Sursa de sudare: TPS 450
 Data: 25.06.1996

Parametrii de sudare:

Vit. de sudare [vs]: 60 cm/min
 Vit. de avans [vD]: 5,7 m/min
 Frecventa [f]: 115 Hz
 Curentul de baza [IG]:98 A
 Curentul de puls [IP]:245 A
 Timpul de puls [tp]: 1,8 ms

Marimi determinate:

Tensiunea (med.arit.):18,55 V
 Tensiunea (med.geom.):18,59 V
 Curentul (med.arit.):122,48 A
 Curentul (med.patn.):132,94 A



Date generale:

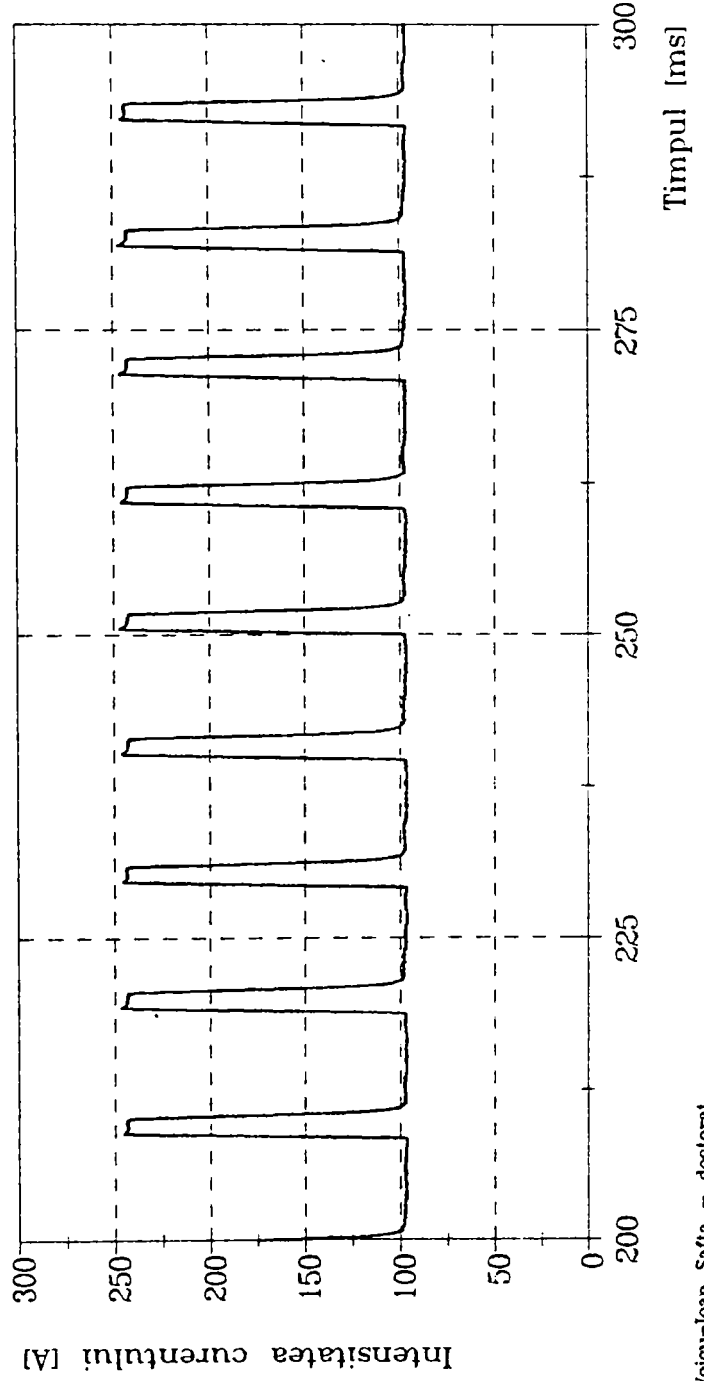
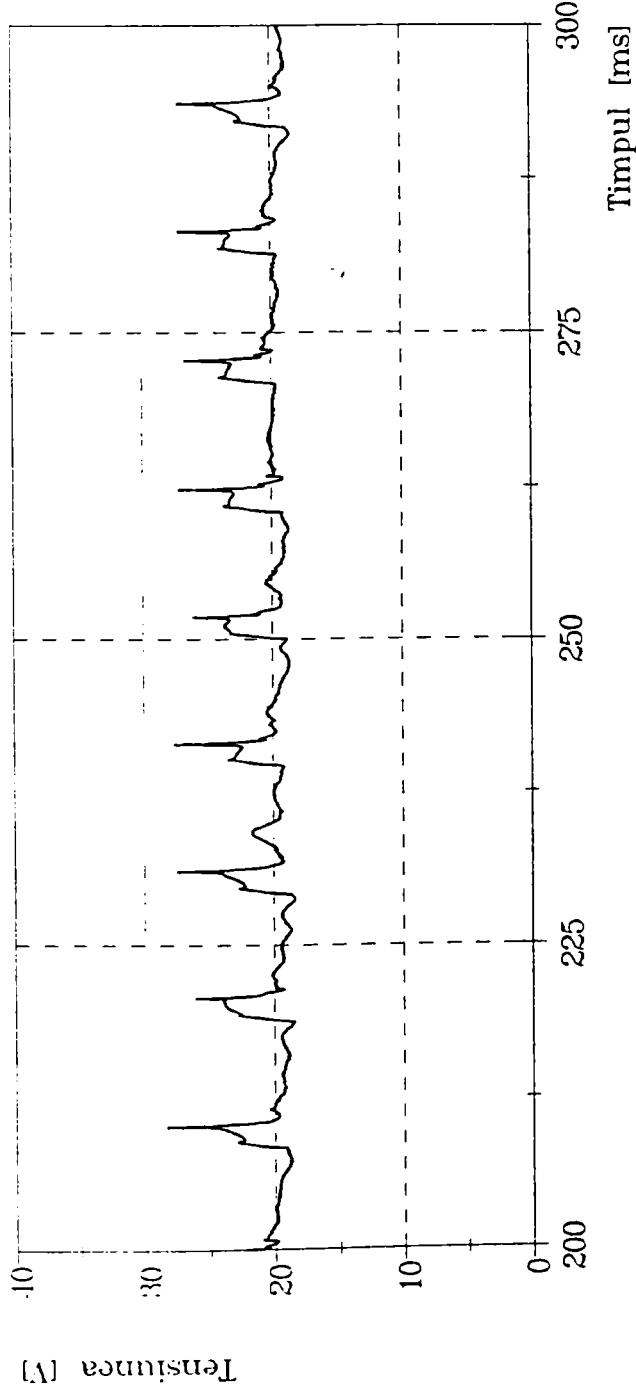
Materialul de baza: AlMgSi0,5
 Grosimea [s]: 6 mm
 Lungimea libera [l]: 17 mm
 Materialul de adaos: AISi5
 Gazul protector: Argon
 Debitul gazului [D]: 18 l/min
 Tipul imbinarii: depunere
 Pozitia de sudare: PA-orizontal
 Sursa de sudare: TPS 450
 Data: 25.06.1996

Parametrii de sudare:

Vit. de sudare [vs]: 60 cm/min
 Vit. de avans [vD]: 5,7 m/min
 Frecventa [f]: 120 Hz
 Curentul de baza [IG]: 98 A
 Curentul de puls [IP]: 245 A
 Timpul de puls [tp]: 1,8 ms

Marimi determinate:

Tensiunea (med.arit.): 20,13 V
 Tensiunea (med.geom.): 20,19 V
 Curentul (med.arit.): 122,57 A
 Curentul (med.patr.): 133,01 A



Date generale:

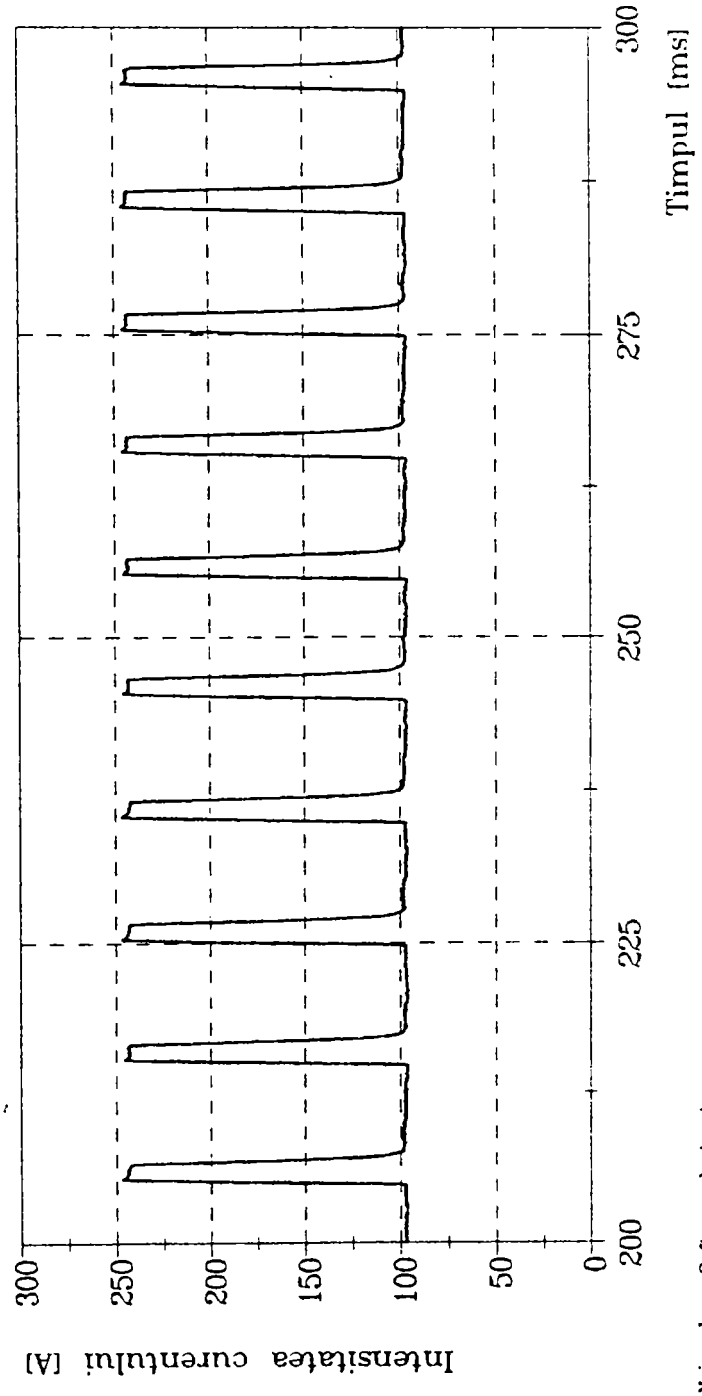
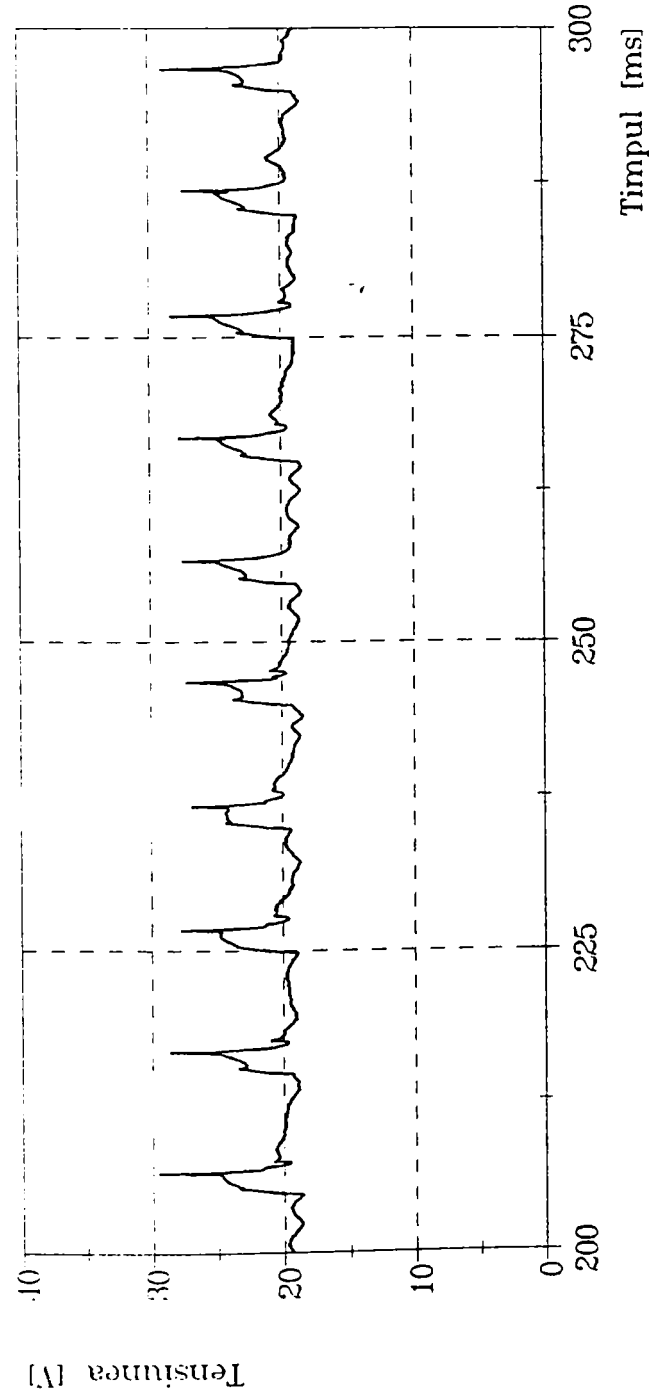
Materialul de baza: AlMgSi0,5
 Grosimea [s]: 6 mm
 Lungimea libera [l]: 17 mm
 Materialul de adaos: AlSi15
 Gazul protector: Argon
 Debitul gazului [D]: 18 l/min
 Tipul imbinarii: depunere
 Pozitia de sudare: PA-orizontala
 Sursa de sudare: TPS 450
 Data: 25.06.1996

Parametrii de sudare:

Vit. de sudare [vs]: 60 cm/min
 Vit. de avans [vD]: 5,7 m/min
 Frecventa [f]: 125 Hz
 Curentul de baza [IG]: 98 A
 Curentul de puls [IP]: 245 A
 Timpul de puls [tp]: 1,8 ms

Marimi determinate:

Tensiunea (med.arit.): 20,39 V
 Tensiunea (med.geom.): 20,46 V
 Curentul (med.arit.): 123,90 A
 Curentul (med.patr.): 134,64 A



Date generale:

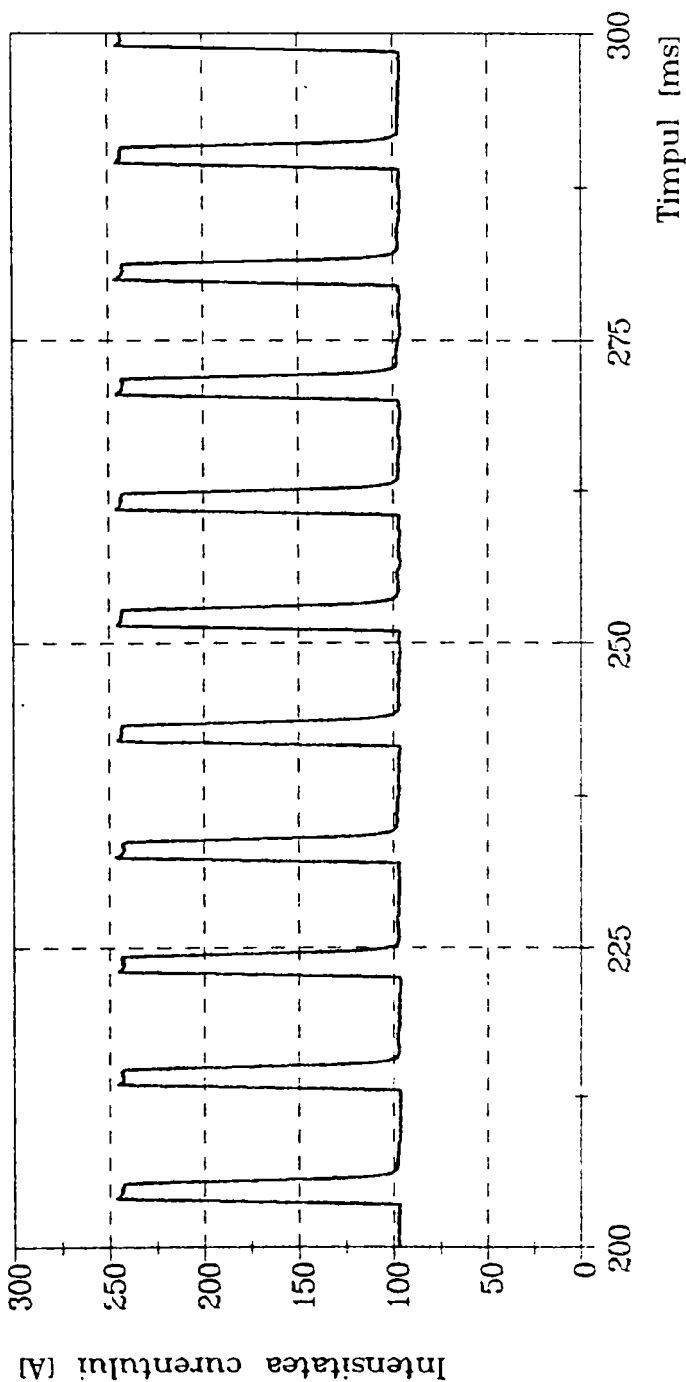
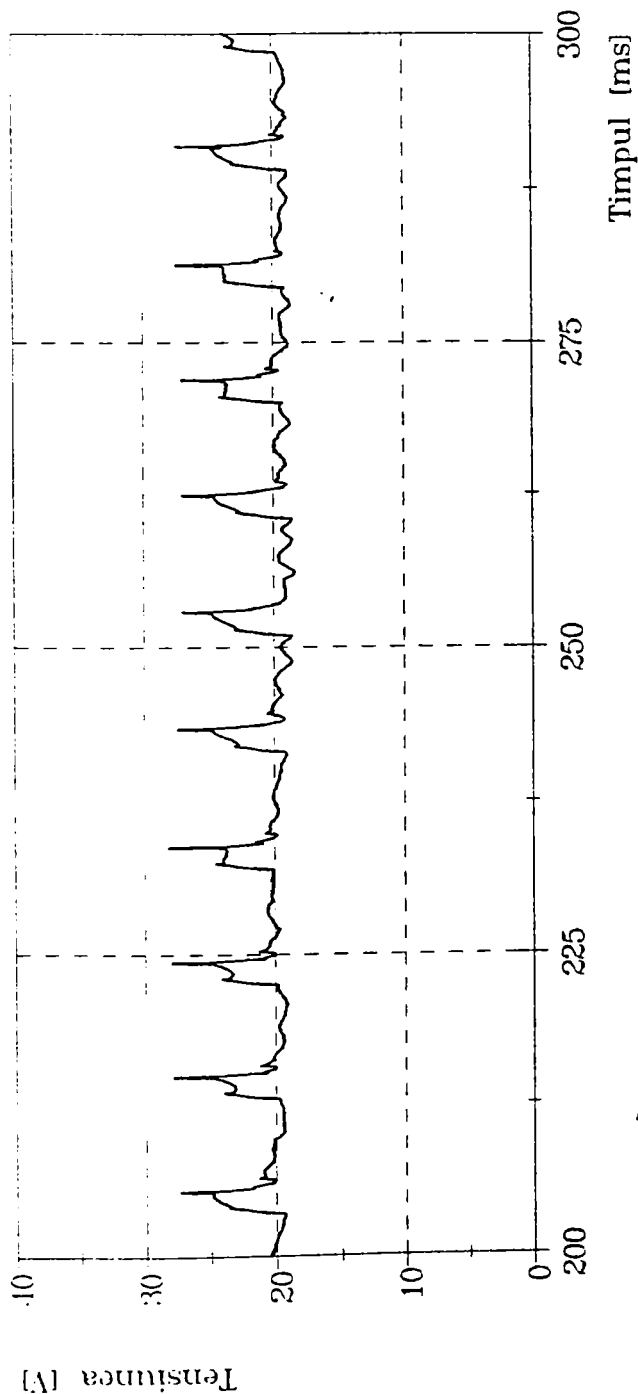
Materialul de baza: AlMgSi0,5
 Grosimea [s]: 6 mm
 Lungimea libera [l]: 17 mm
 Materialul de adaos: AlSi5
 Gazul protector: Argon
 Debitul gazului [D]: 18 l/min
 Tipul imbinarii: depunere
 Pozitia de sudare: PA-orizontala
 Sursa de sudare: TPS 450
 Data: 25.06.1996

Parametrii de sudare:

Vit. de sudare [vs]: 60 cm/min
 Vit. de avans [vD]: 5,7 m/min
 Frecventa [f]: 130 Hz
 Curentul de baza [IG]: 98 A
 Curentul de puls [IP]: 245 A
 Timpul de puls [tp]: 1,8 ms

Marimi determinate:

Tensiunea (med.arit.): 20,51 V
 Tensiunea (med.geom.): 20,59 V
 Curentul (med.arit.): 125,45 A
 Curentul (med.patr.): 136,54 A



Date generale:

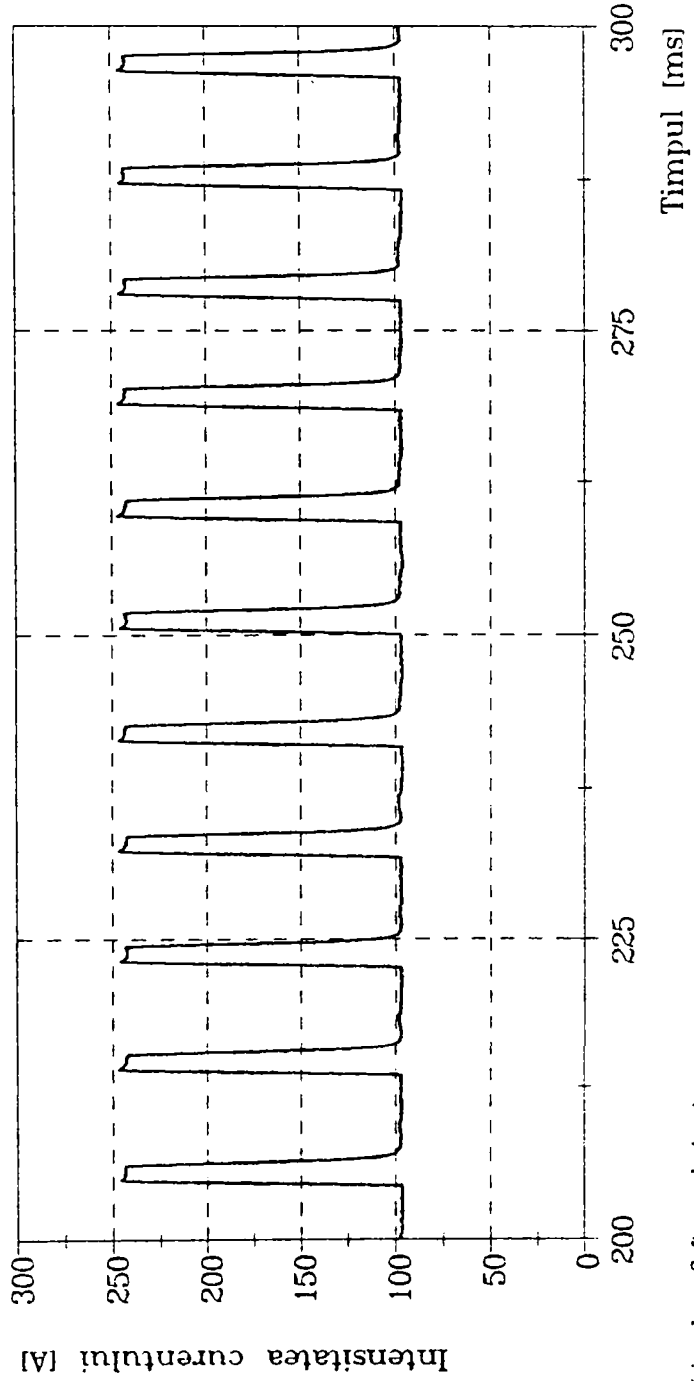
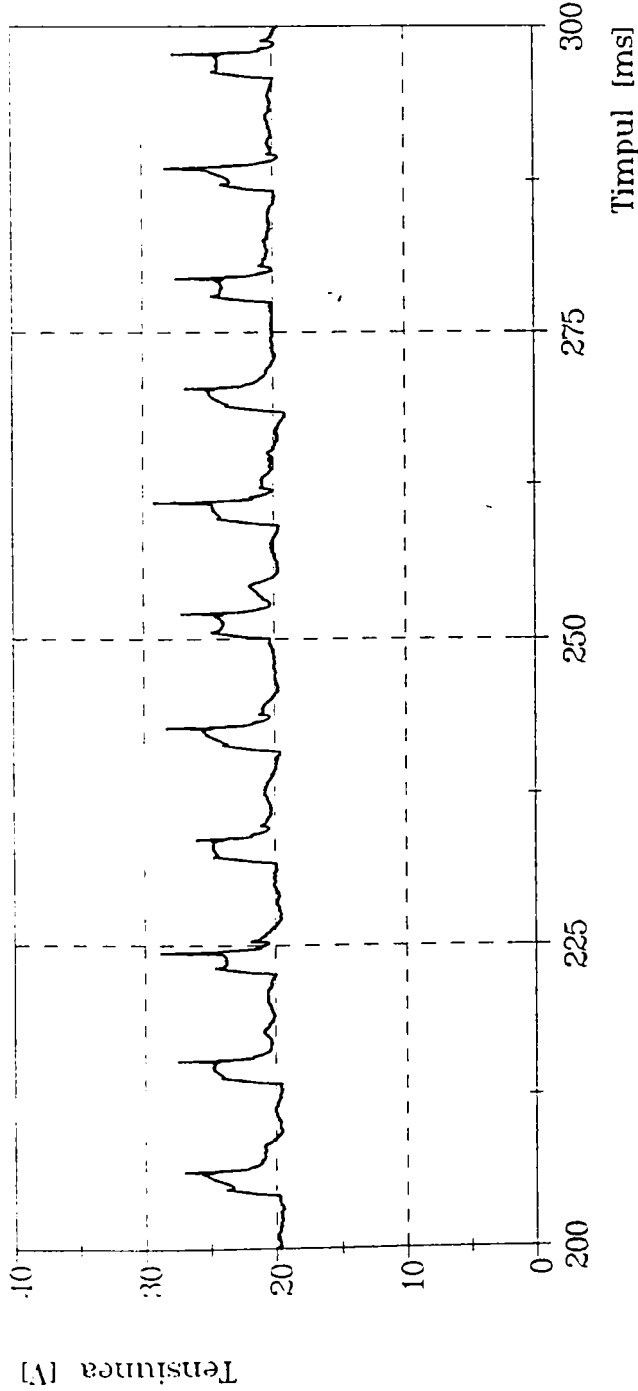
Materialul de baza: AlMgSi0,5
 Grosimea [s]: 6 mm
 Lungimea libera [l]: 17 mm
 Materialul de adaos: AlSi5
 Gazul protector: Argon
 Debitul gazului [D]: 18 l/min
 Tipul imbinarii: depunere
 Pozitia de sudare: PA-orizontala
 Sursa de sudare: TPS 450
 Data: 25.06.1996

Parametrii de sudare:

Vit. de sudare [vs]: 60 cm/min
 Vit. de avans [vD]: 5,7 m/min
 Frecventa [f]: 135 Hz
 Curentul de baza [IG]:98 A
 Curentul de puls [IP]:245 A
 Timpul de puls [tp]: 1,8 ms

Marimi determinate:

Tensiunea (med.arit.):21,12 V
 Tensiunea (med.geom.):21,19 V
 Curentul (med.arit.):126,56 A
 Curentul (med.patr.):137,80 A



Date generale:

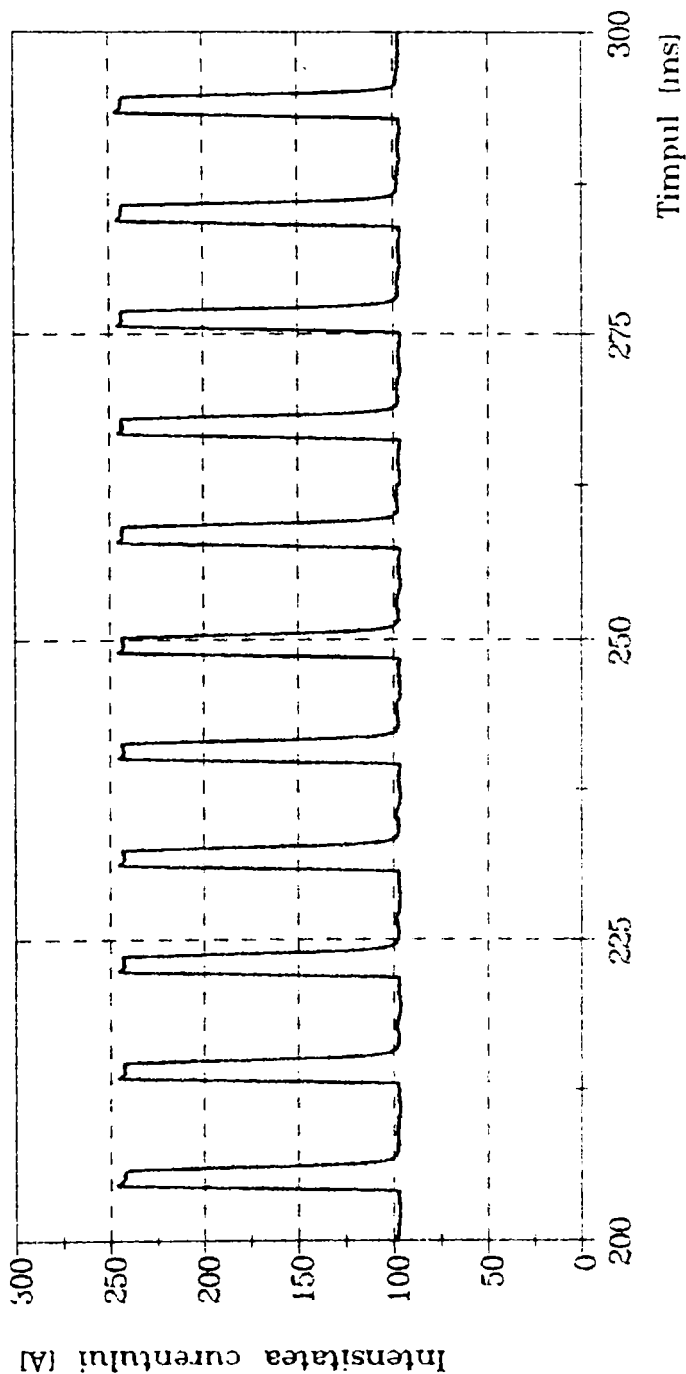
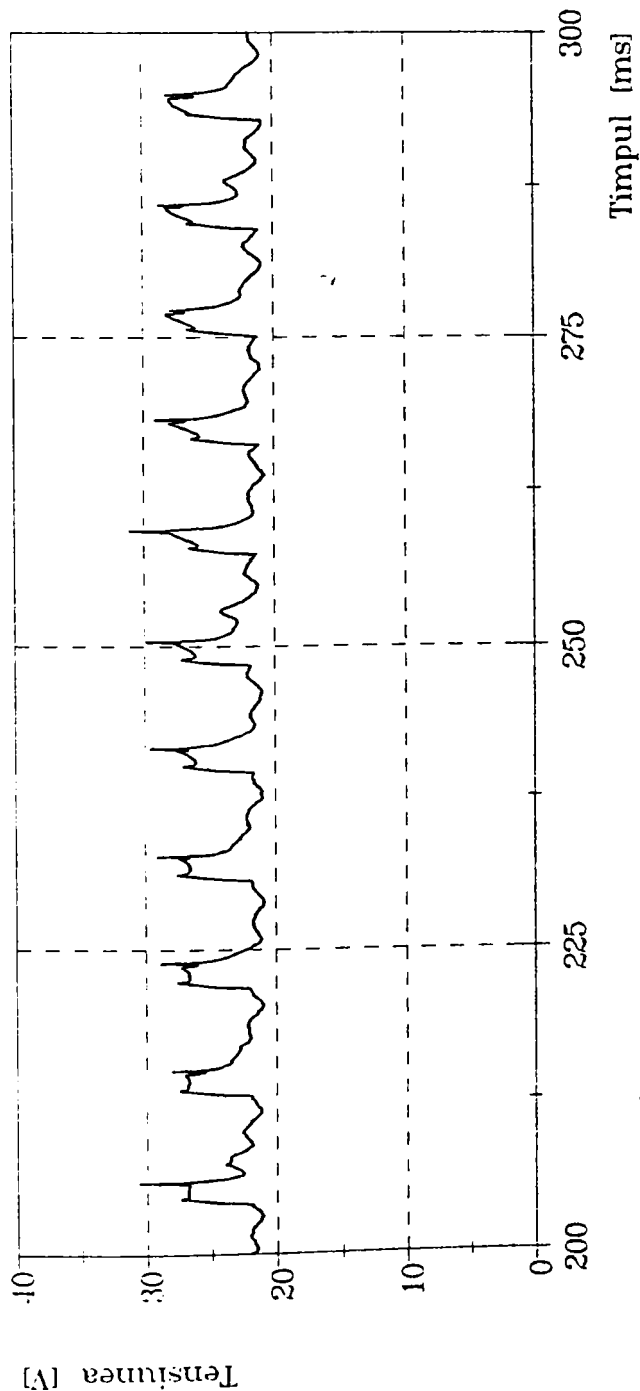
Materialul de baza: AlMgSi0,5
 Grosimea [s]: 6 mm
 Lungimea libera [l]: 17 mm
 Materialul de adaos: AISi5
 Gazul protector: Argon
 Debitul gazului [D]: 18 l/min
 Tipul imbinarii: depunere
 Pozitia de sudare: PA-orizontal
 Sursa de sudare: TPS 450
 Data: 25.06.1996

Parametrii de sudare:

Vit. de sudare [vs]: 60 cm/min
 Vit. de avans [vD]: 5,7 m/min
 Frecventa [f]: 140 Hz
 Curentul de baza [IG]: 98 A
 Curentul de puls [IP]: 245 A
 Timpul de puls [tp]: 1,8 ms

Marimi determinate:

Tensiunea (med.arit.): 23,16 V
 Tensiunea (med.geom.): 23,26 V
 Curentul (med.arit.): 127,28 A
 Curentul (med.patr.): 138,63 A



Date generale:

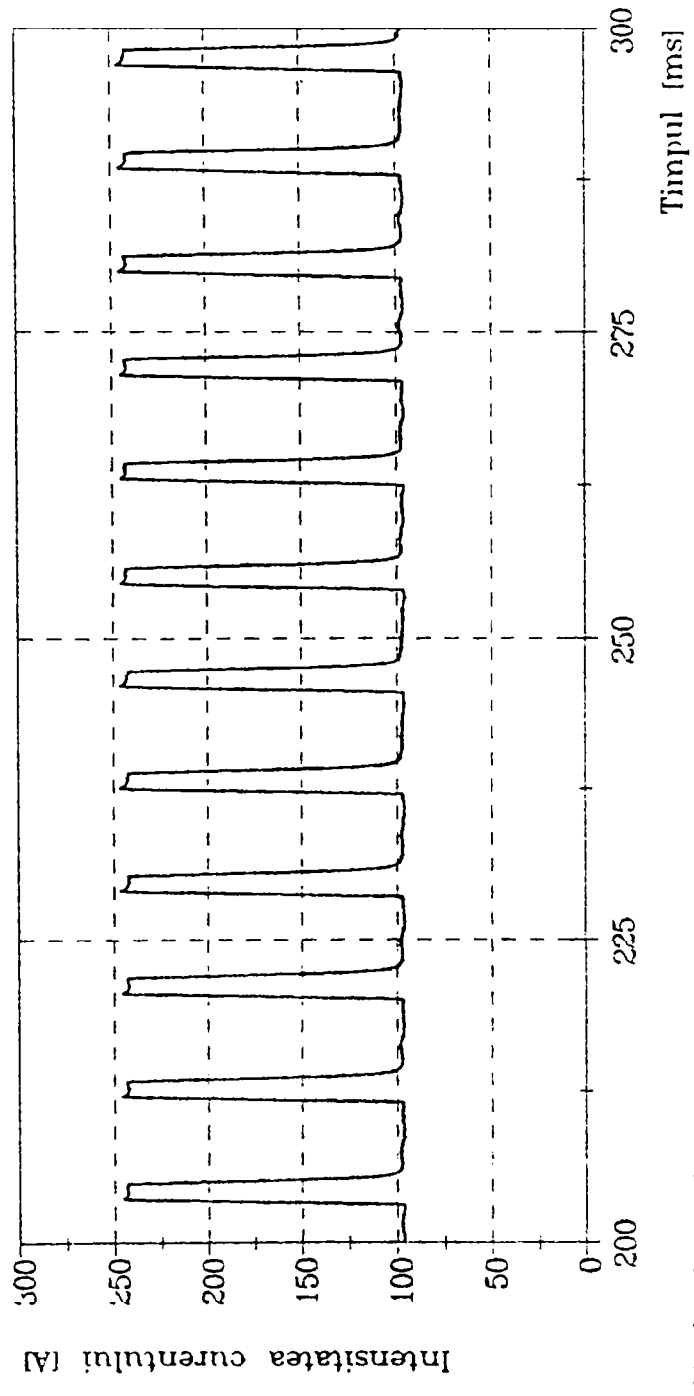
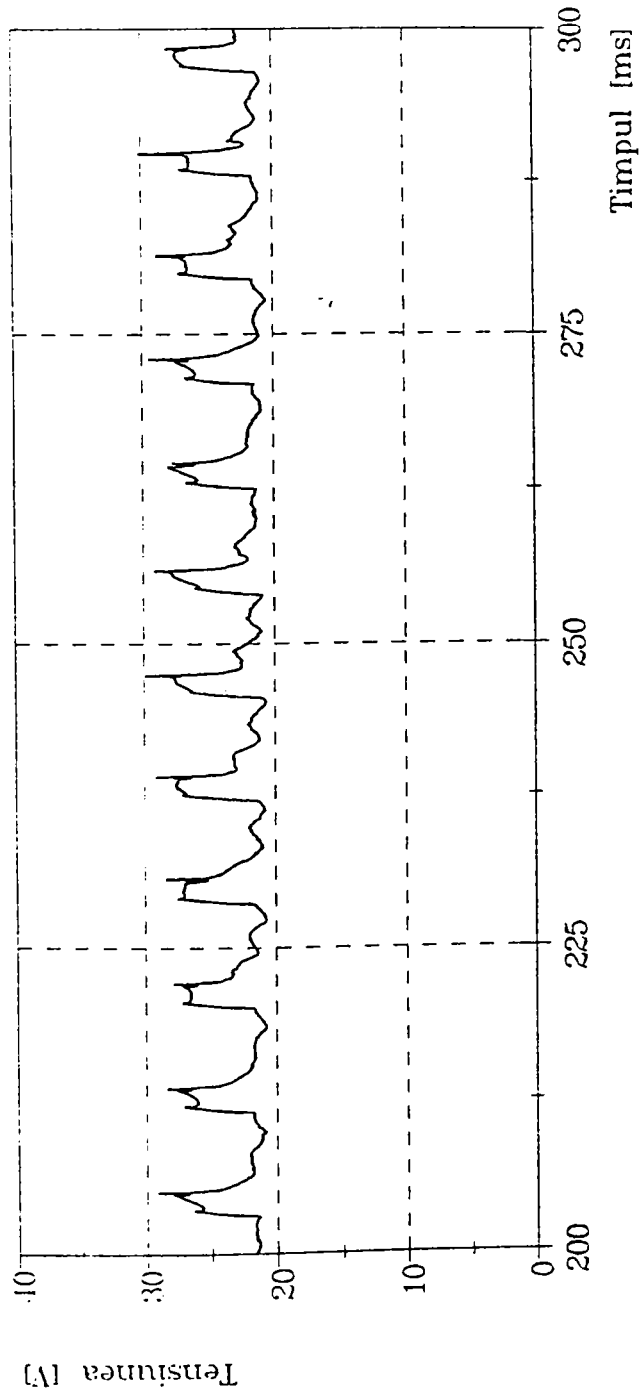
Materialul de baza: AlMgSi0,5
 Grosimea [s]: 6 mm
 Lungimea libera [l]: 17 mm
 Materialul de adaos: AISi5
 Gazul protector: Argon
 Debitul gazului [D]: 18 l/min
 Tipul imbinarii: depunere
 Pozitia de sudare: PA-orizontal
 Sursa de sudare: TPS 450
 Data: 25.06.1996

Parametrii de sudare:

Vit. de sudare [vs]: 60 cm/min
 Vit. de avans [vD]: 5,7 m/min
 Frecventa [f]: 145 Hz
 Curentul de baza [IG]: 98 A
 Curentul de puls [IP]: 245 A
 Timpul de puls [tp]: 1,8 ms

Marimi determinate:

Tensiunea (med.arit.): 23,05 V
 Tensiunea (med.geom.): 23,15 V
 Curentul (med.arit.): 128,43 A
 Curentul (med.patr.): 140,02 A



IMAGINI EXPERIMENTALE RELATIV LA VALORILE
PARAMETRILOR DE PULS (TABLA DE 6mm)

A. Variația timpului de puls

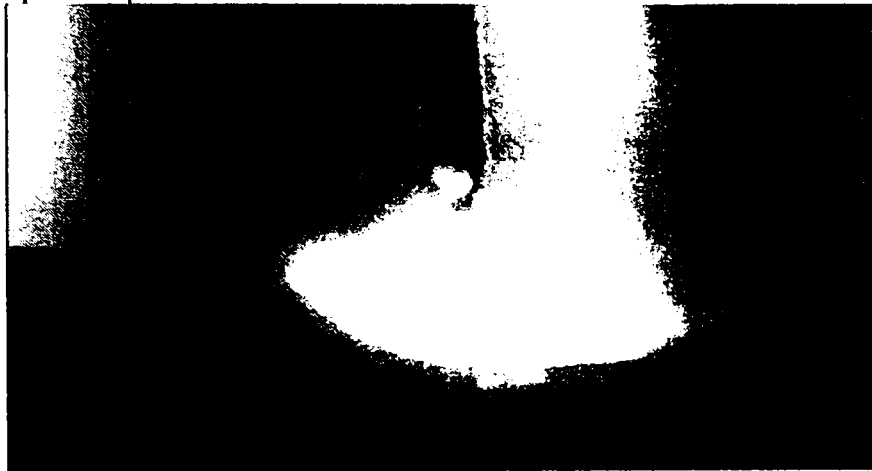


Figura 1. $t_p=1,8ms$

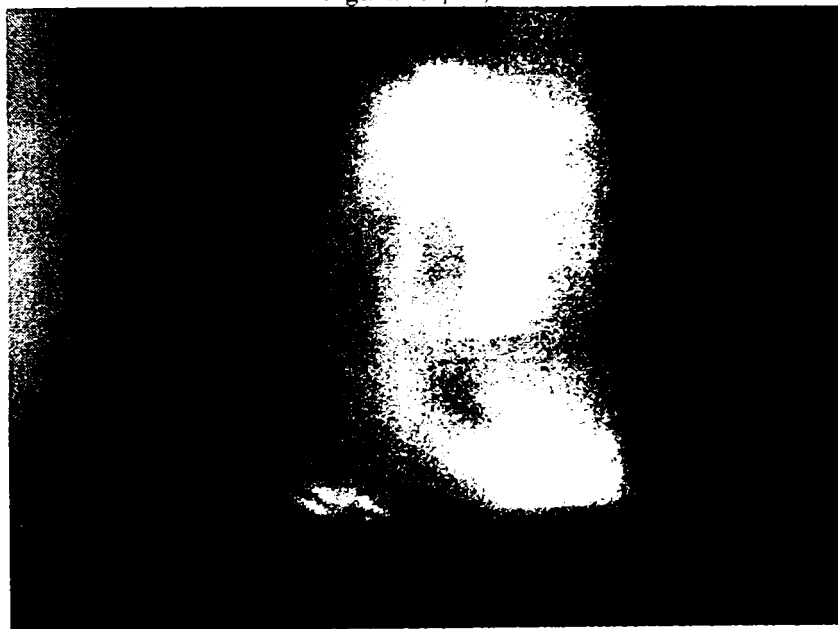


Figura 2. $t_p=2,1ms$

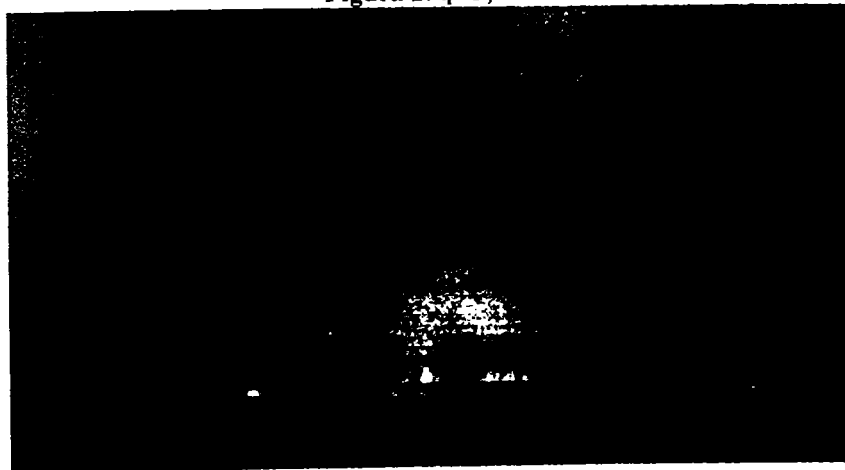


Figura 3. $t_p=1,6ms$

B. Variația curentului de puls



Figura 1. $I_p=256A$

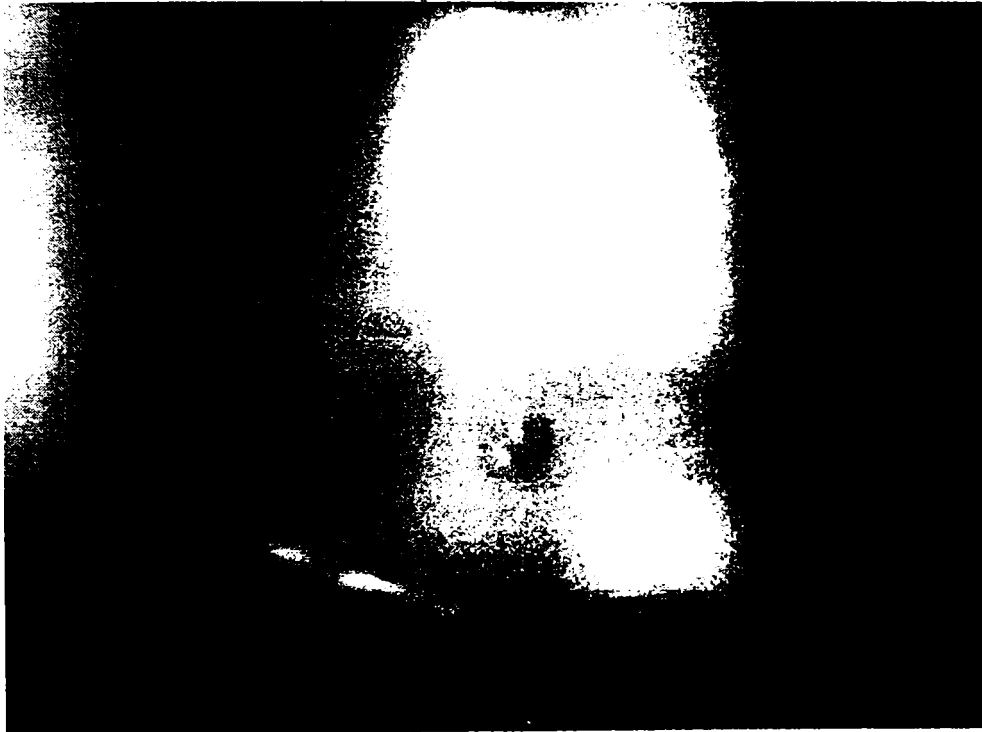


Figura 2. $I_p=265A$

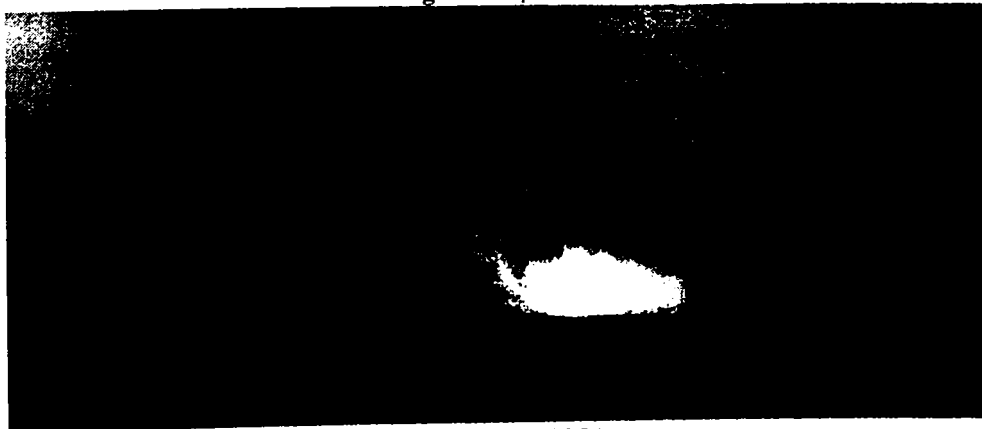


Figura 3. $I_p=235A$

ANEXA 4.3.

EXPERIMENTE RELATIV LA VARIAȚIA LUNGIMII
LIBERE – TABLĂ DE 2MM GROSIME

Date generale:

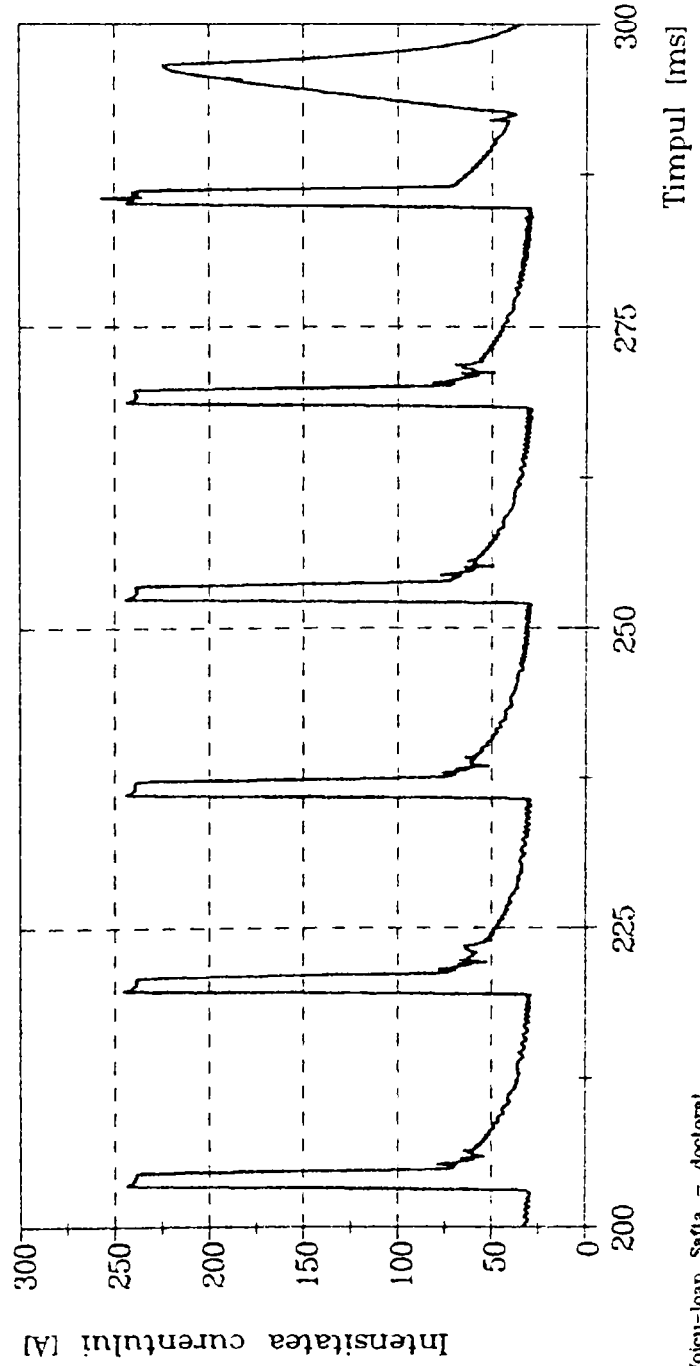
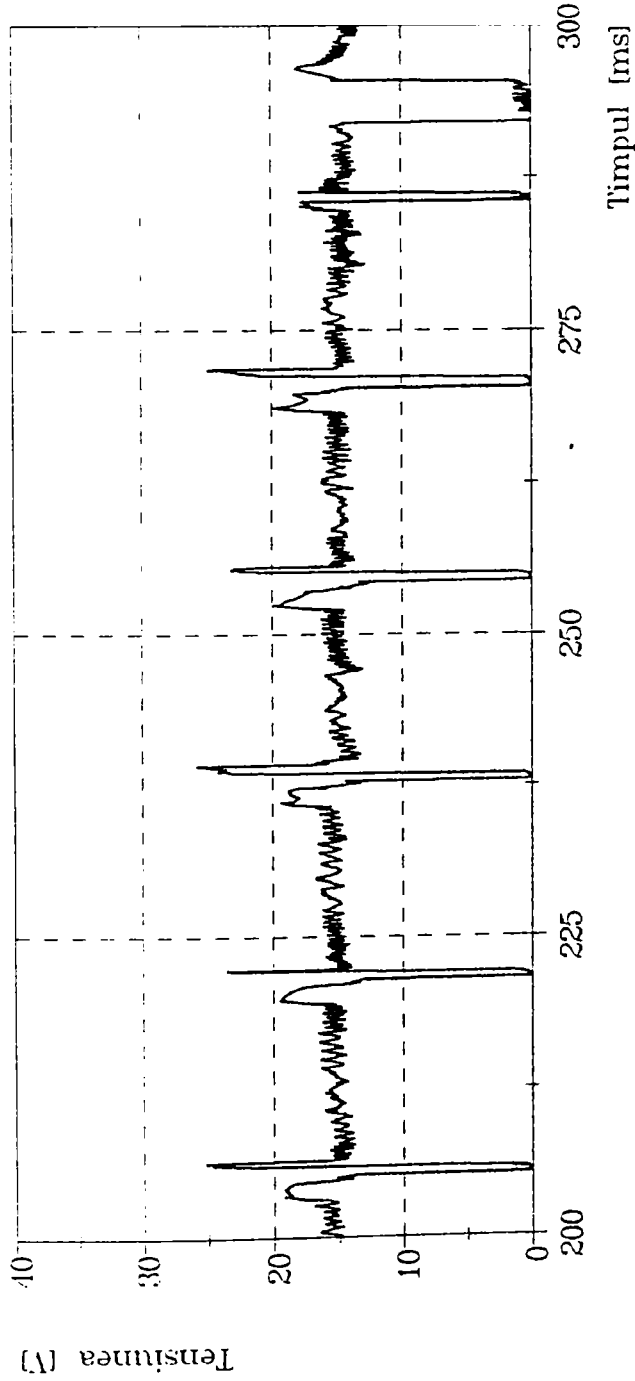
Materialul de baza: AlMgSi0,5
 Grosimea [s]: 2 mm
 Lungimea libera [l]: 5 mm
 Materialul de adaos: AlSi5
 Gazul protector: Argon
 Debitul gazului [D]: 18 l/min
 Tipul imbinarii: depunere
 Pozitia de sudare: PA-orizontal
 Sursa de sudare: TPS 450
 Data: 03.04.1996

Parametrii de sudare:

Vit. de sudare [vs]: 60 cm/min
 Vit. de avans [vD]: 2,9 m/min
 Frecventa [f]: 60 Hz
 Curentul de baza [IG]:25 A
 Curentul de puls [IP]:238 A
 Timpul de puls [tp]: 1,5 ms

Marimi determinate:

Tensiunea (med.arit.):14,85 V
 Tensiunea (med.patr.):15,43 V
 Curentul (med.arit.): 64,26 A
 Curentul (med.patr.): 86,47 A



Date generale:

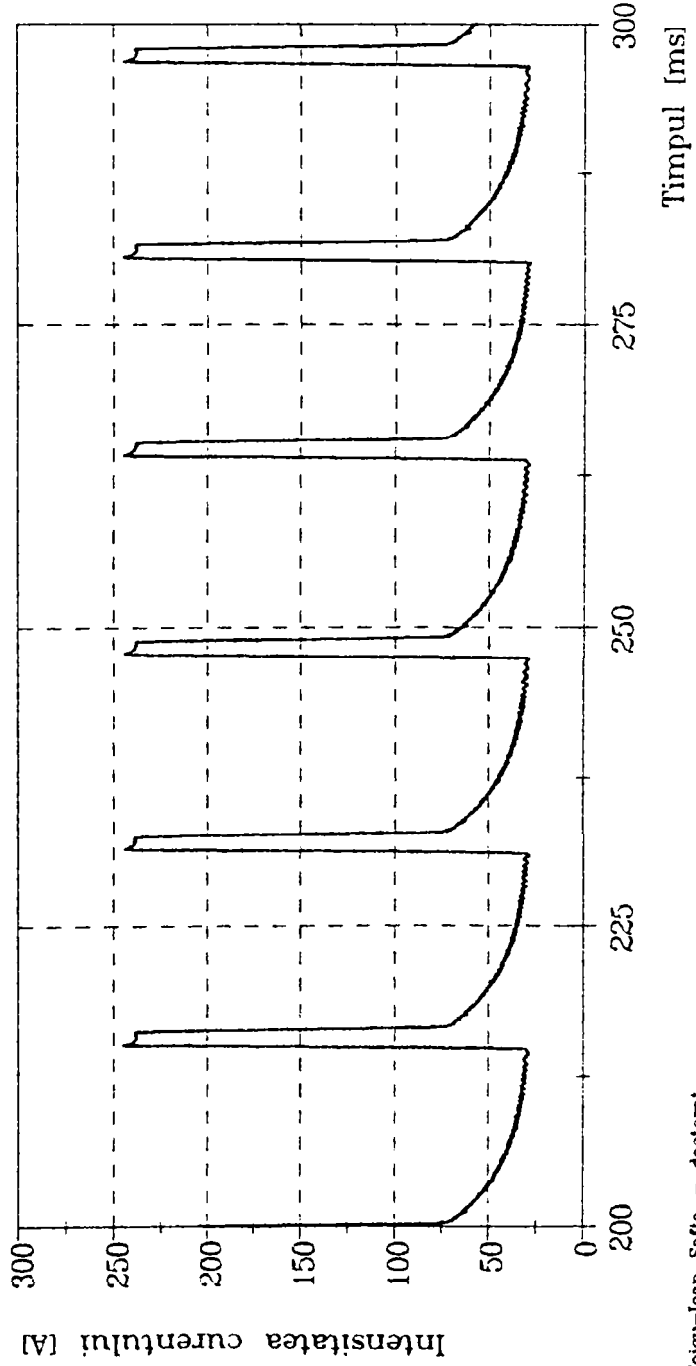
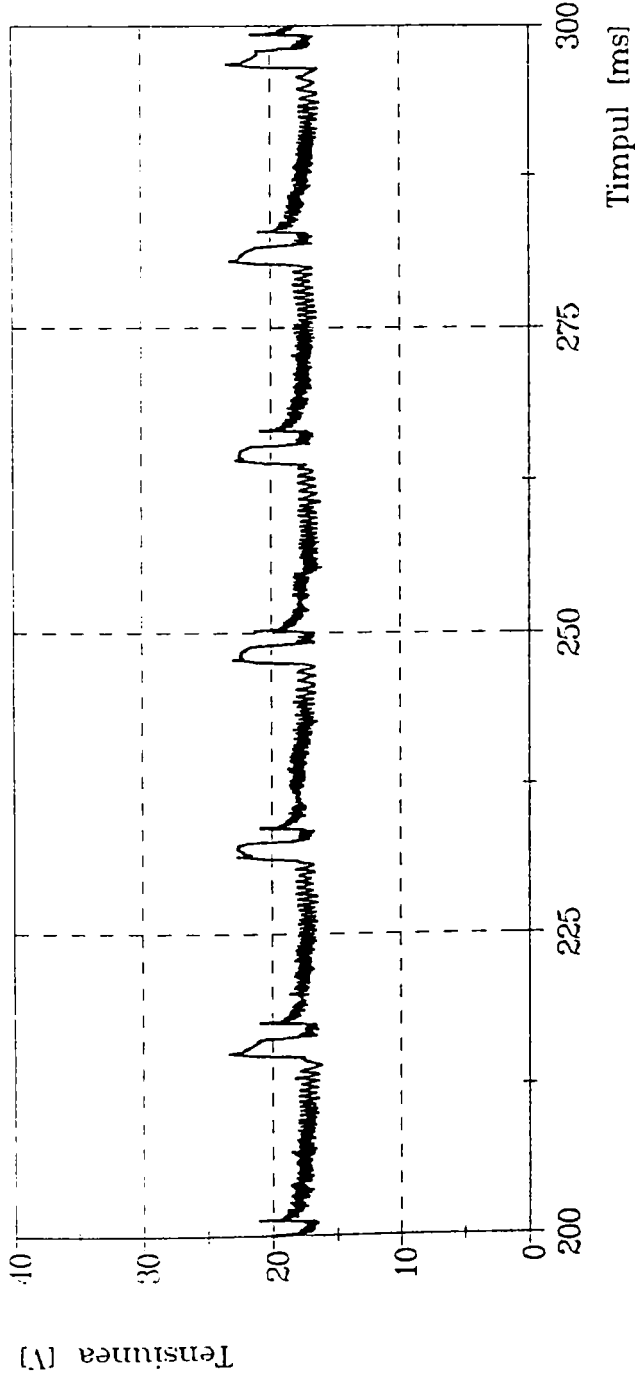
Materialul de baza: AlMgSi0,5
Grosimea [s]: 2 mm
Lungimea libera [l]: 7 mm
Materialul de adaos: AlSi5
Gazul protector: Argon
Debitul gazului [D]: 18 l/min
Tipul imbinarii: depunere
Pozitia de sudare: PA-orizontal
Sursa de sudare: TPS 450
Data: 03.04.1996

Parametrii de sudare:

Vit. de sudare [vs]: 60 cm/min
Vit. de avans [vD]: 2,9 m/min
Frecventa [f]: 60 Hz
Curentul de baza [IG]: 25 A
Curentul de puls [IP]: 238 A
Timpul de puls [tp]: 1,5 ms

Marimi determinate:

Tensiunea (med.arit.): 17,95 V
Tensiunea (med.patr.): 18,00 V
Curentul (med.arit.): 59,82 A
Curentul (med.patr.): 81,79 A



Dale generale:

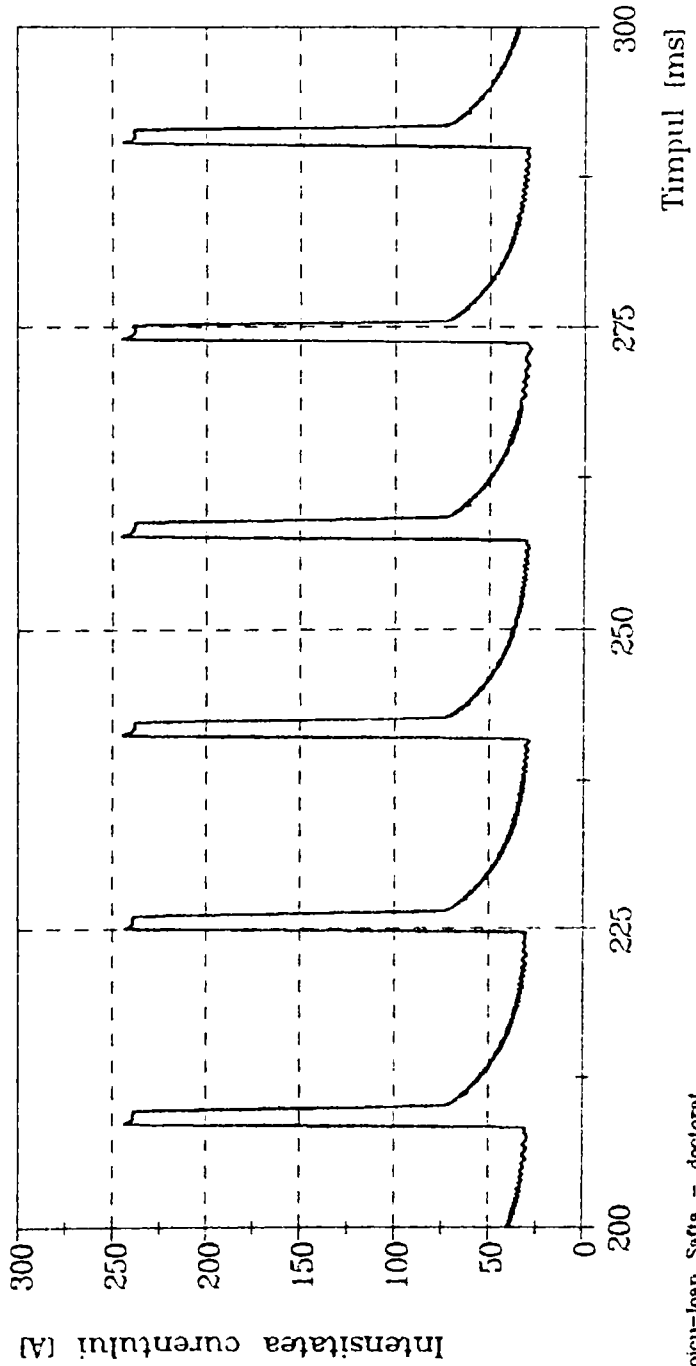
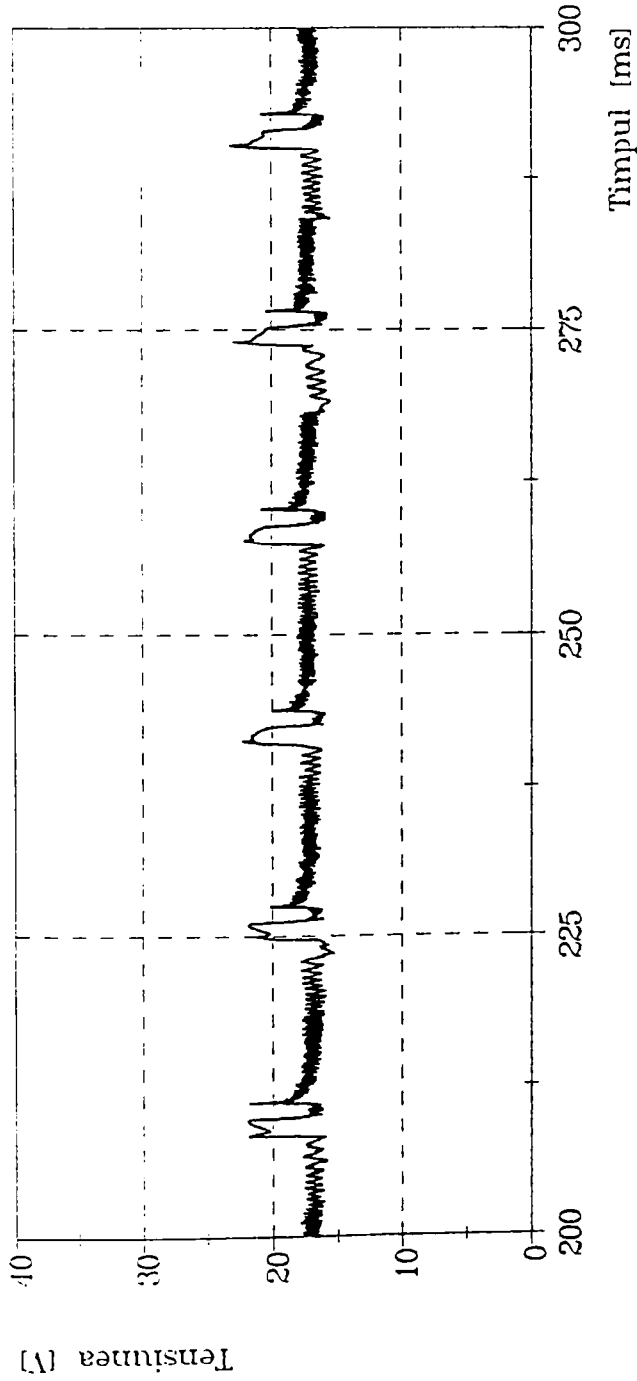
Materialul de baza: AlMgSi0,5
 Grosimea [s]: 2 mm
 Lungimea libera [l]: 9 mm
 Materialul de adaos: AlSi5
 Gazul protector: Argon
 Debitul gazului [D]: 18 l/min
 Tipul imbinarii: depunere
 Pozitia de sudare: PA-orizontal
 Sursa de sudare: TPS 450
 Data: 03.04.1996

Parametrii de sudare:

Vit. de sudare [vs]: 60 cm/min
 Vit. de avans [vD]: 2,9 m/min
 Frecventa [f]: 60 Hz
 Curentul de baza [IG]: 25 A
 Curentul de puls [IP]: 238 A
 Timpul de puls [tp]: 1,5 ms

Marimi determinate:

Tensiunea (med.arit.): 17,63 V
 Tensiunea (med.patr.): 17,68 V
 Curentul (med.arit.): 58,06 A
 Curentul (med.patr.): 80,47 A



Voicu-Ioan Safta - doctorant

Date generale:

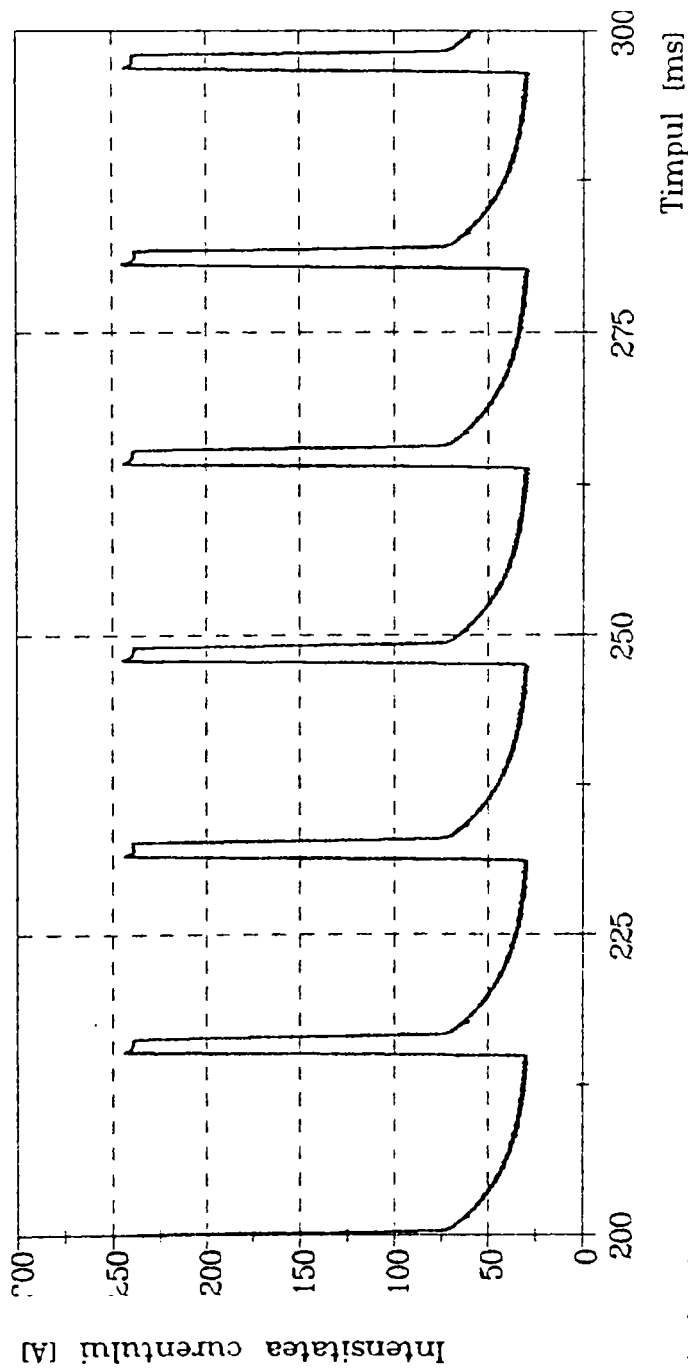
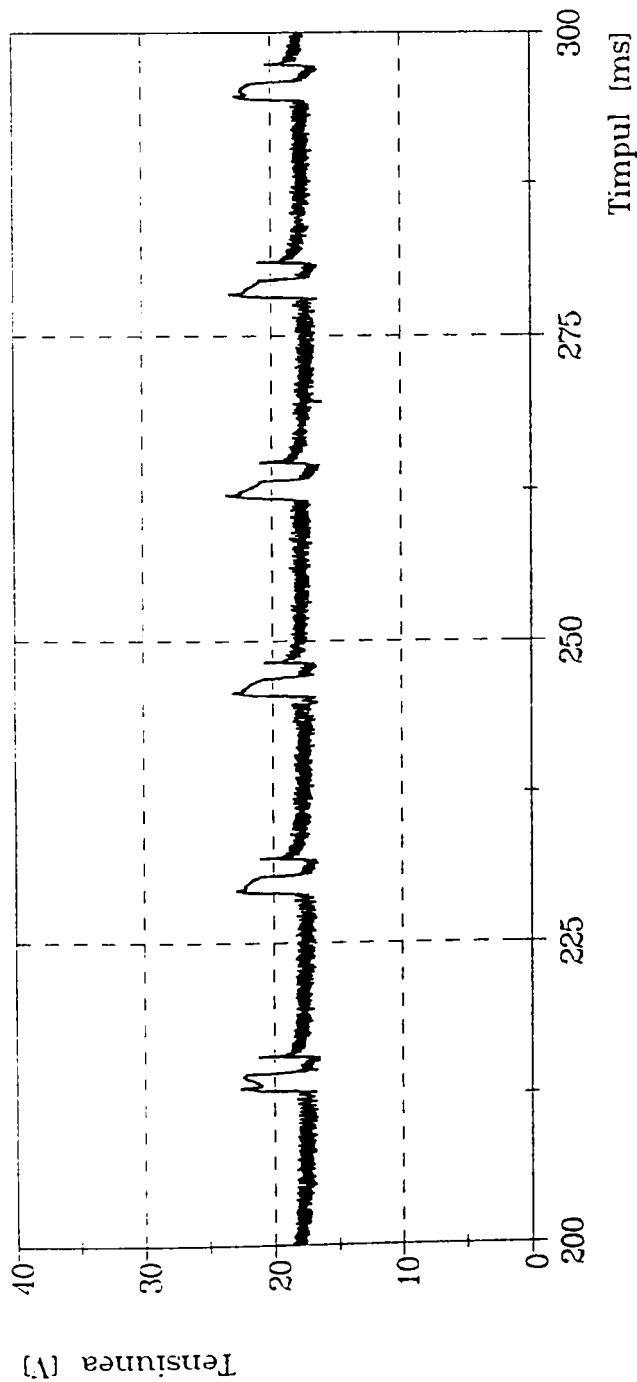
Materialul de baza: AlMgSi0,5
 Grosimea [s]: 2 mm
 Lungimea libera [l]: 11 mm
 Materialul de adaos: AISi5
 Gazul protector: Argon
 Debitul gazului [D]: 18 l/min
 Tipul imbinarii: depunere
 Pozitia de sudare: PA-orizontal
 Sursa de sudare: TPS 450
 Data: 03.04.1996

Parametrii de sudare:

Vit. de sudare [vs]: 60 cm/min
 Vit. de avans [vD]: 2,9 m/min
 Frecventa [f]: 60 Hz
 Curentul de baza [IG]: 25 A
 Curentul de puls [IP]: 238 A
 Timpul de puls [tp]: 1,5 ms

Marimi determinate:

Tensiunea (med.arit.): 18,09 V
 Tensiunea (med.patr.): 18,14 V
 Curentul (med.arit.): 59,85 A
 Curentul (med.patr.): 81,84 A



Date generale:

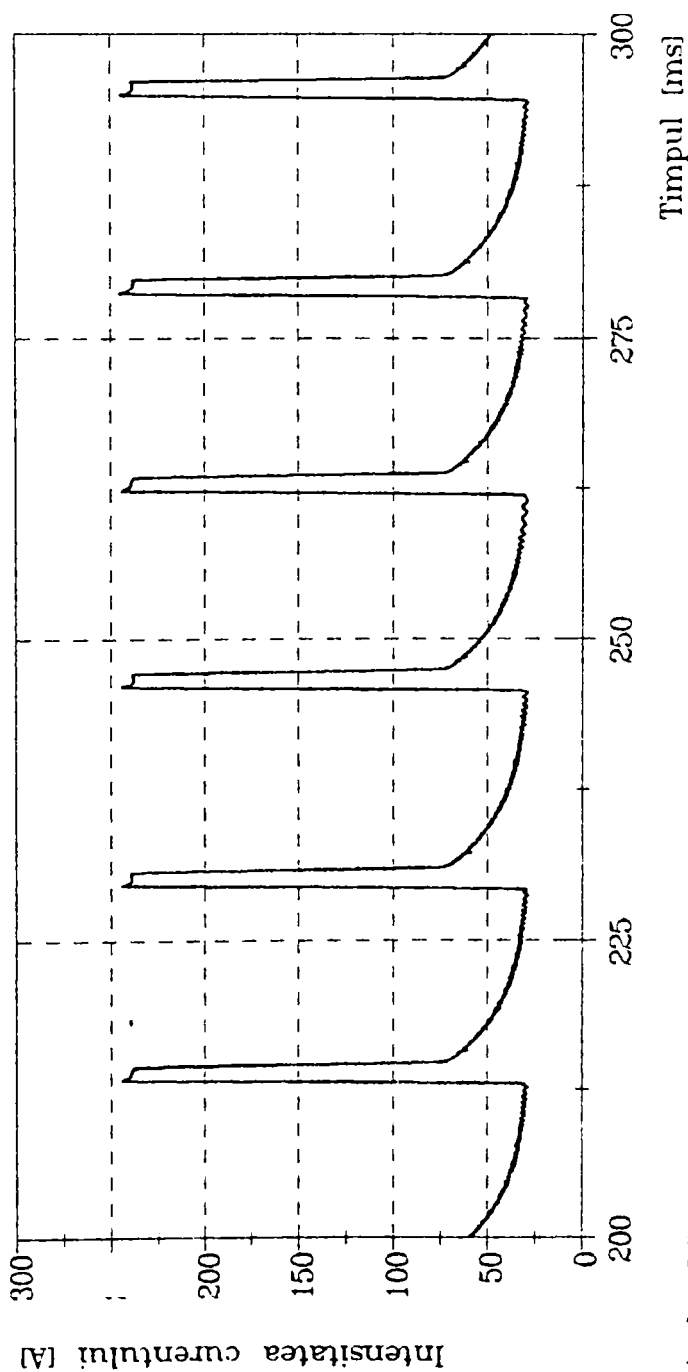
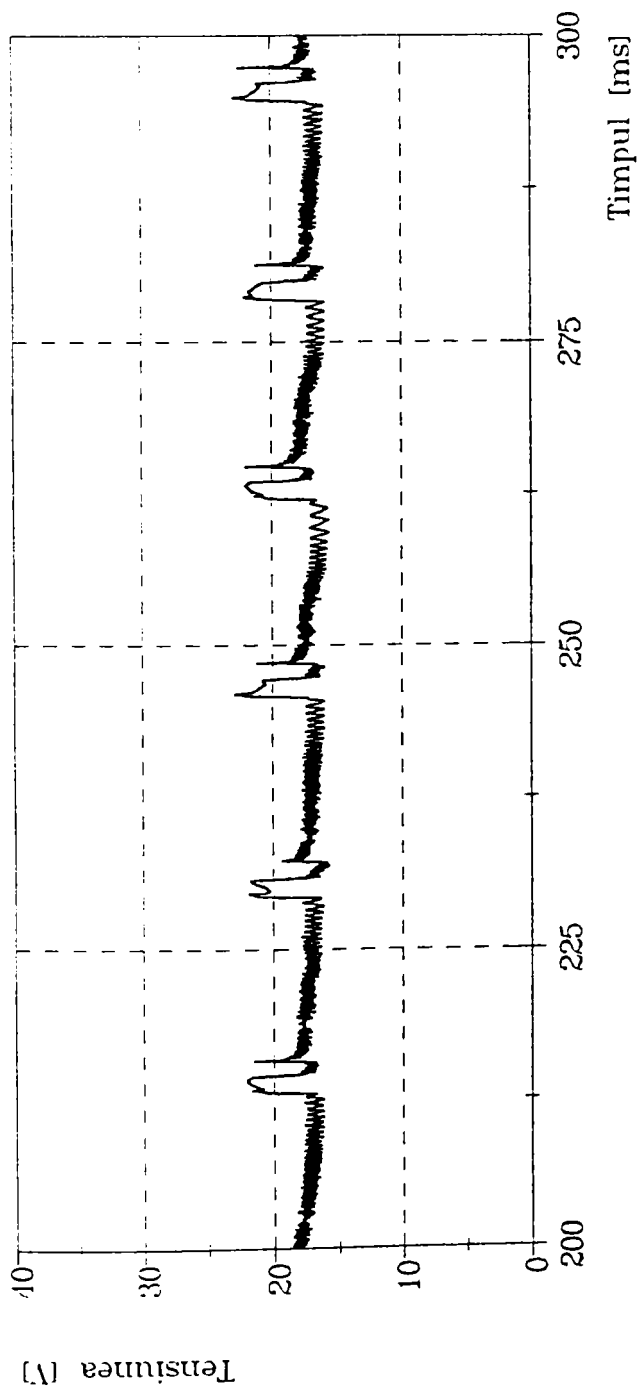
Materialul de baza: AlMgSi0,5
 Grosimea [s]: 2 mm
 Lungimea libera [l]: 13 mm
 Materialul de adaos: AlSi5
 Gazul protector: Argon
 Debitul gazului [D]: 18 l/min
 Tipul imbinarii: depunere
 Pozitia de sudare: PA-orizontal
 Sursa de sudare: TPS 450
 Data: 03.04.1996

Parametrii de sudare:

Vit. de sudare [vs]: 60 cm/min
 Vit. de avans [vD]: 2,9 m/min
 Frecventa [f]: 60 Hz
 Curentul de baza [IG]: 25 A
 Curentul de puls [IP]: 238 A
 Timpul de puls [tp]: 1,5 ms

Marimi determinate:

Tensiunea (med.arit.): 18,13 V
 Tensiunea (med.patr.): 18,21 V
 Curentul (med.arit.): 57,64 A
 Curentul (med.patr.): 80,14 A



Voicu-Ioan Safta - doctorat

Date generale:

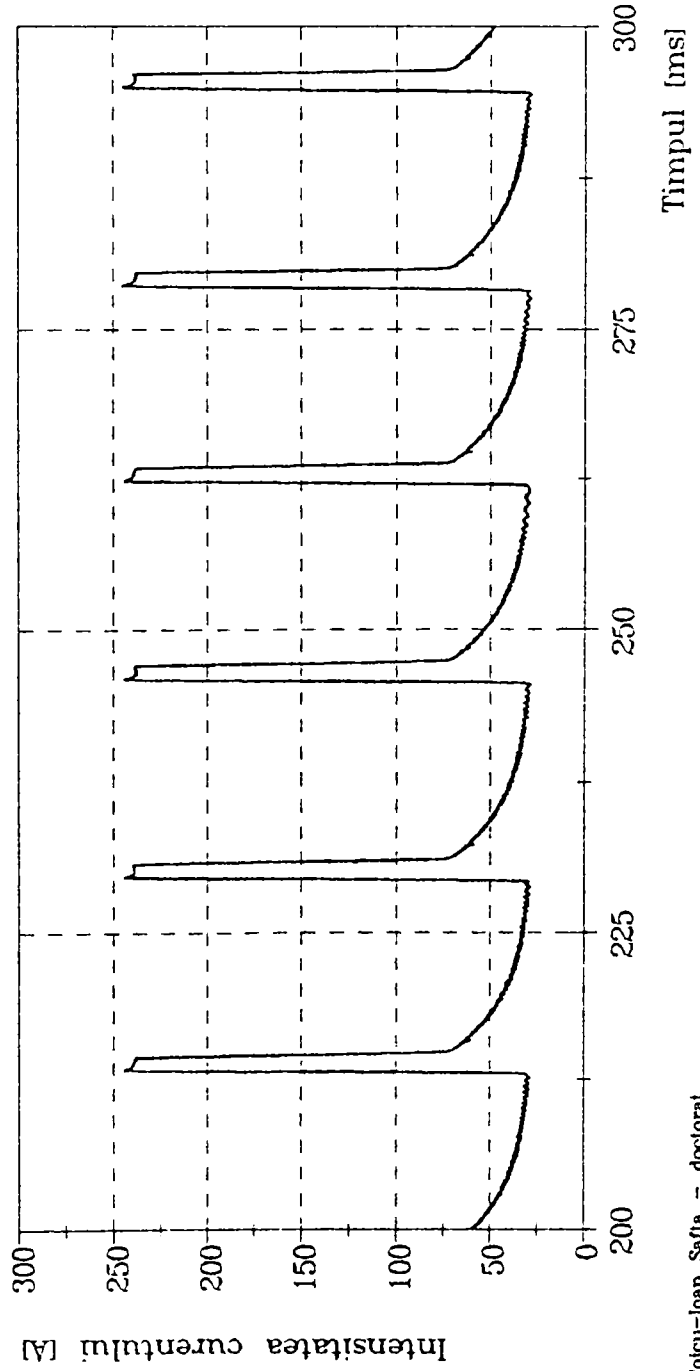
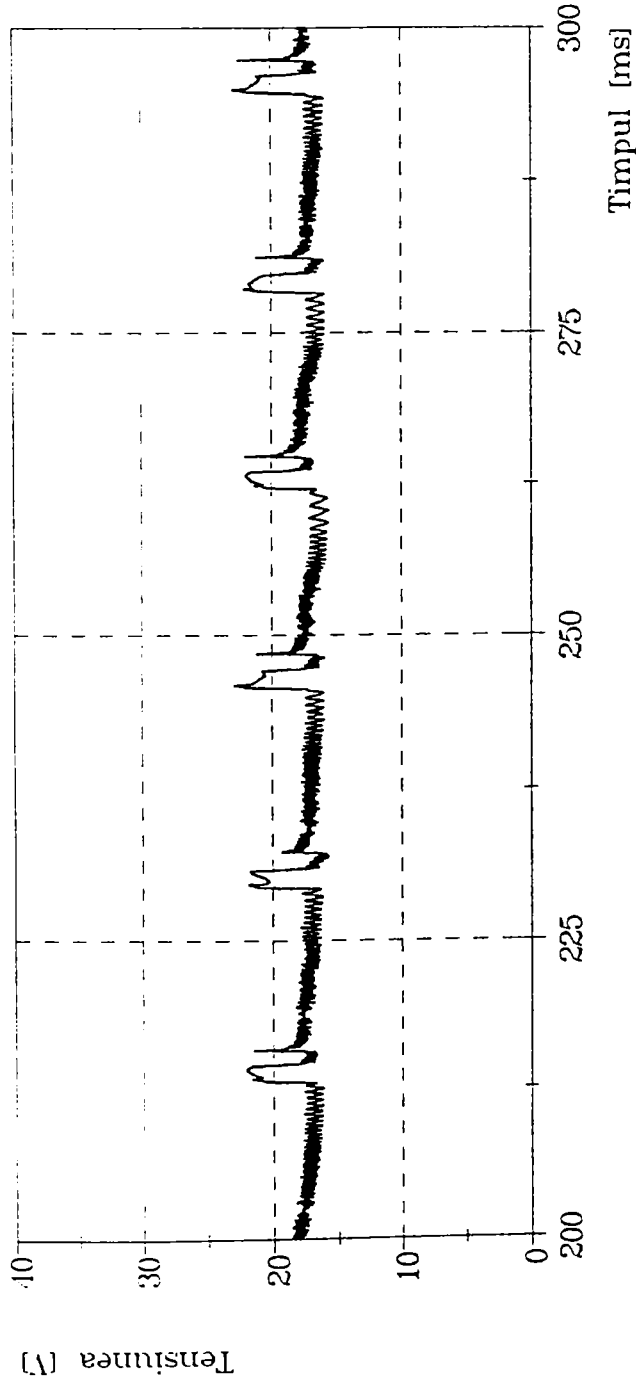
Materialul de baza: AlMgSi0,5
 Grosimea [s]: 2 mm
 Lungimea libera [l]: 15 mm
 Materialul de adaos: AlSi5
 Gazul protector: Argon
 Debitul gazului [D]: 18 l/min
 Tipul imbinarii: depunere
 Pozitia de sudare: PA-orizontal
 Sursa de sudare: TPS 450
 Data: 03.04.1996

Parametrii de sudare:

Vit. de sudare [vs]: 60 cm/min
 Vit. de avans [vD]: 2,9 m/min
 Frecventa [f]: 60 Hz
 Curentul de baza [IG]:25 A
 Curentul de puls [IP]:238 A
 Timpul de puls [tp]: 1,5 ms

Marimi determinate:

Tensiunea (med.arit.):17,56 V
 Tensiunea (med.pat.):17,61 V
 Curentul (med.arit.): 59,23 A
 Curentul (med.pat.): 80,81 A



Date generale:

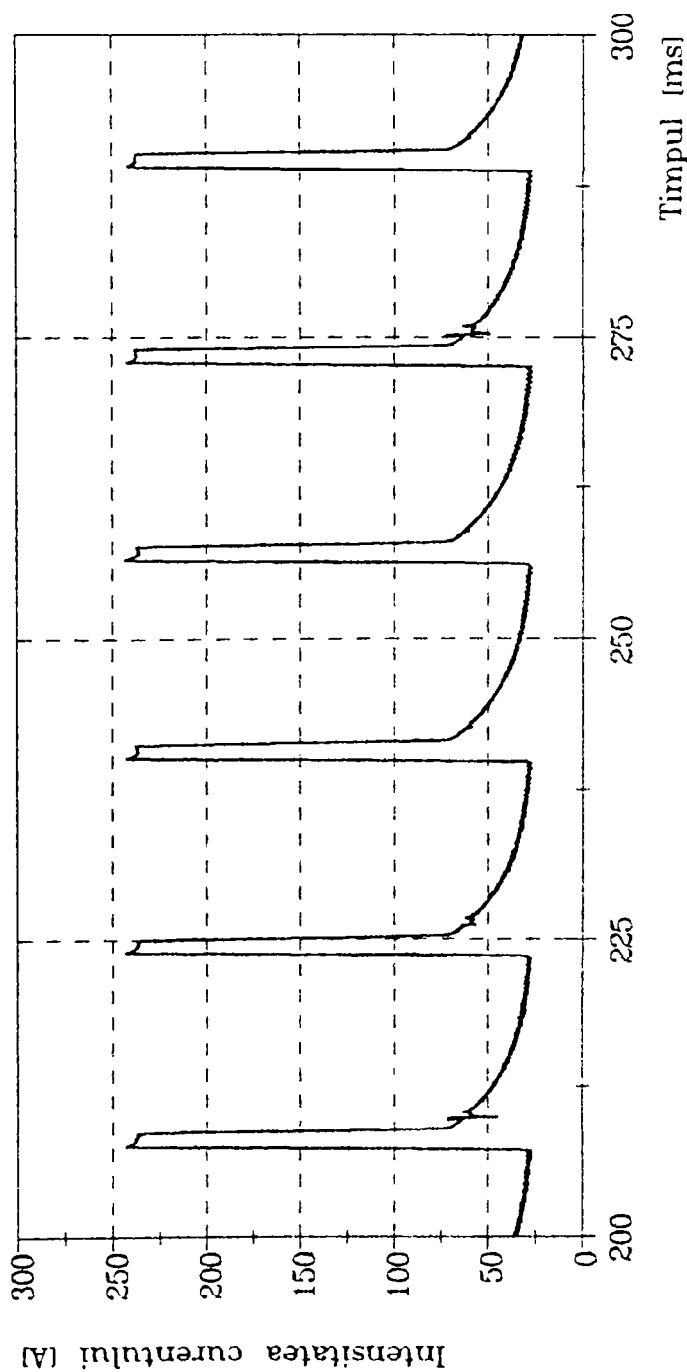
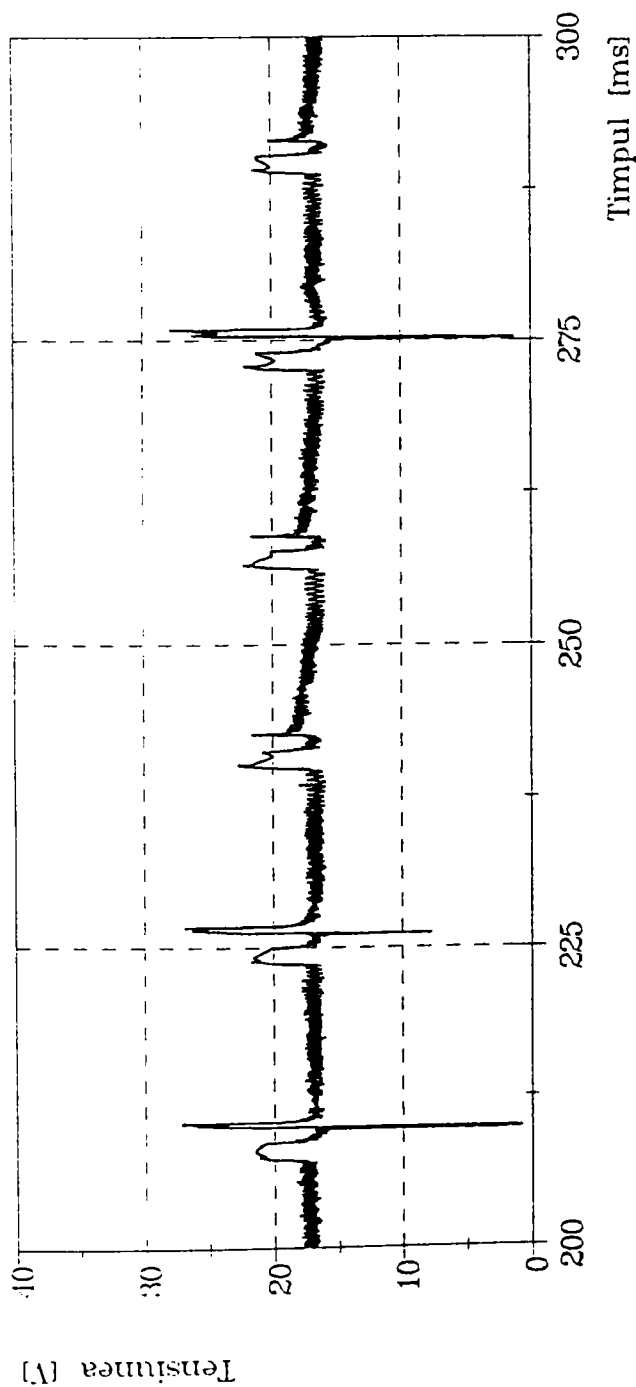
Materialul de baza: AlMgSi0,5
 Grosimea [s]: 2 mm
 Lungimea libera [l]: 17 mm
 Materialul de adaos: AlSi5
 Gazul protector: Argon
 Debitul gazului [D]: 18 l/min
 Tipul imbinarii: depunere
 Pozitia de sudare: PPA-orizontal
 Sursa de sudare: TPS 450
 Data: 03.04.1996

Parametrii de sudare:

Vit. de sudare [vs]: 60 cm/min
 Vit. de avans [vD]: 2,9 m/min
 Frecventa [f]: 60 Hz
 Curentul de baza [IG]: 25 A
 Curentul de puls [IP]: 238 A
 Timpul de puls [tp]: 1,5 ms

Marimi determinate:

Tensiunea (med.arit.): 17,49 V
 Tensiunea (med.patr.): 17,56 V
 Curentul (med.arit.): 57,13 A
 Curentul (med.patr.): 79,13 A



Date generale:

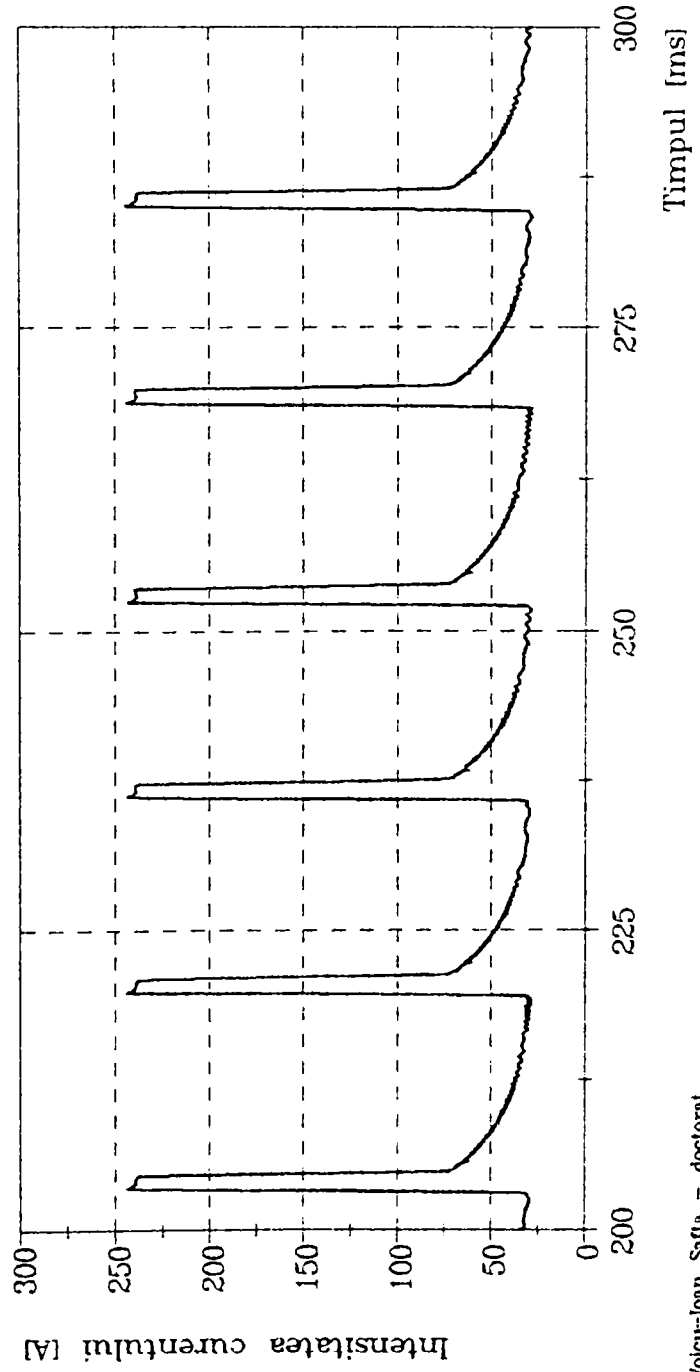
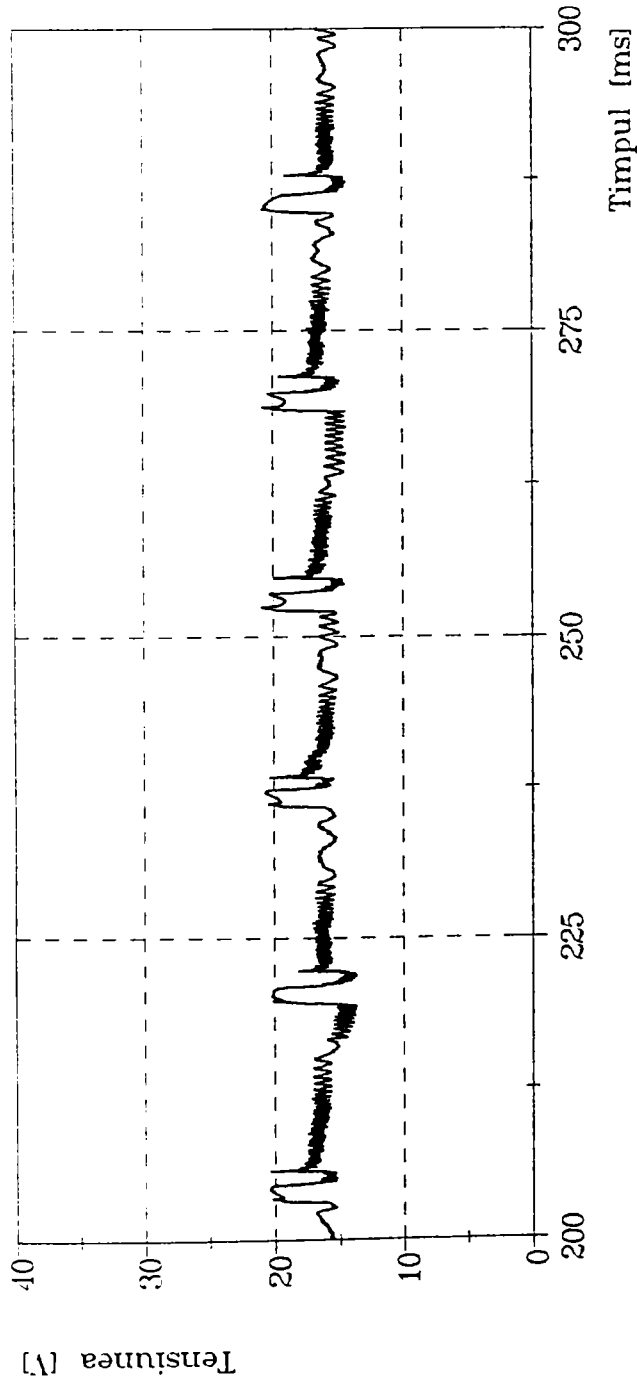
Materialul de baza: AlMgSi0,5
 Grosimea [s]: 2 mm
 Lungimea libera [l]: 19 mm
 Materialul de adaos: AlSi5
 Gazul protector: Argon
 Debitul gazului [D]: 18 l/min
 Tipul imbinarii: depunere
 Pozitia de sudare: PA-orizontal
 Sursa de sudare: TPS 450
 Data: 03.04.1996

Parametrii de sudare:

Vit. de sudare [vs]: 60 cm/min
 Vit. de avans [vD]: 2,9 m/min
 Frecventa [f]: 60 Hz
 Curentul de baza [IG]:25 A
 Curentul de puls [IP]:238 A
 Timpul de puls [tp]: 1,5 ms

Marini determinate:

Tensiunea (med.arit.):16,36 V
 Tensiunea (med.pat.):16,47 V
 Curentul (med.arit.): 59,70 A
 Curentul (med.pat.): 81,73 A



Date generale:

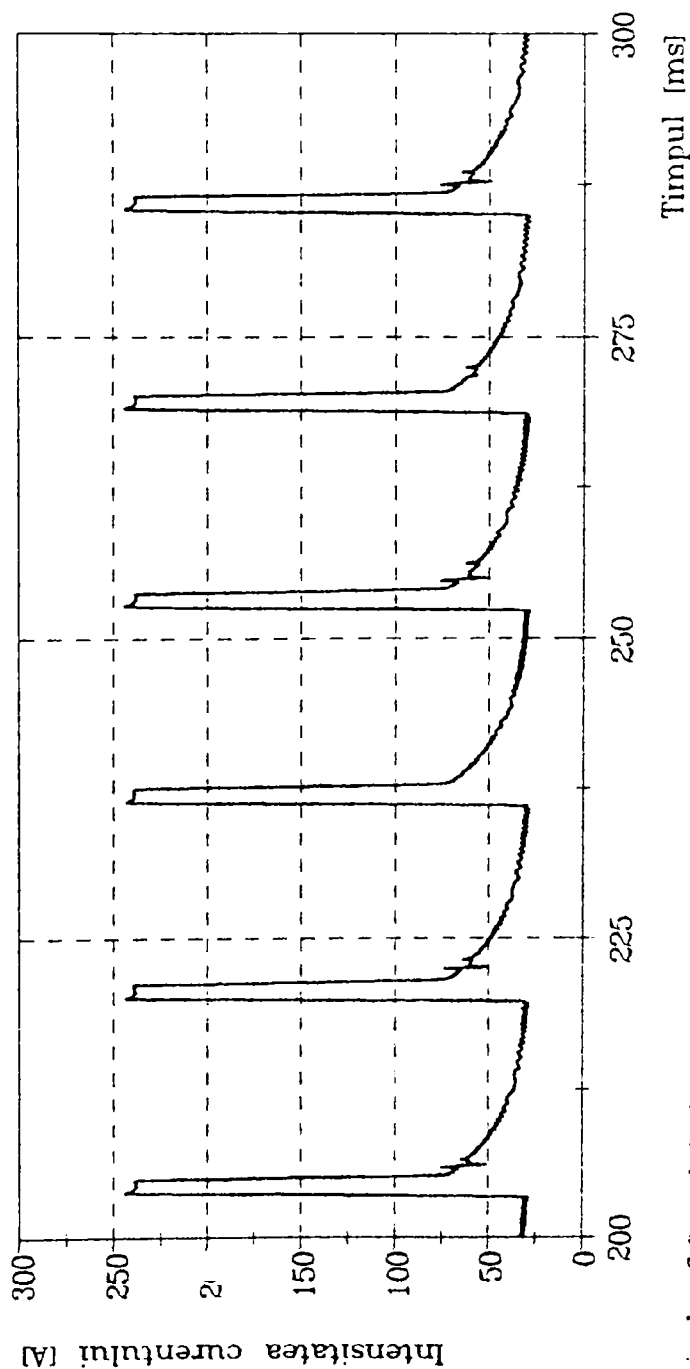
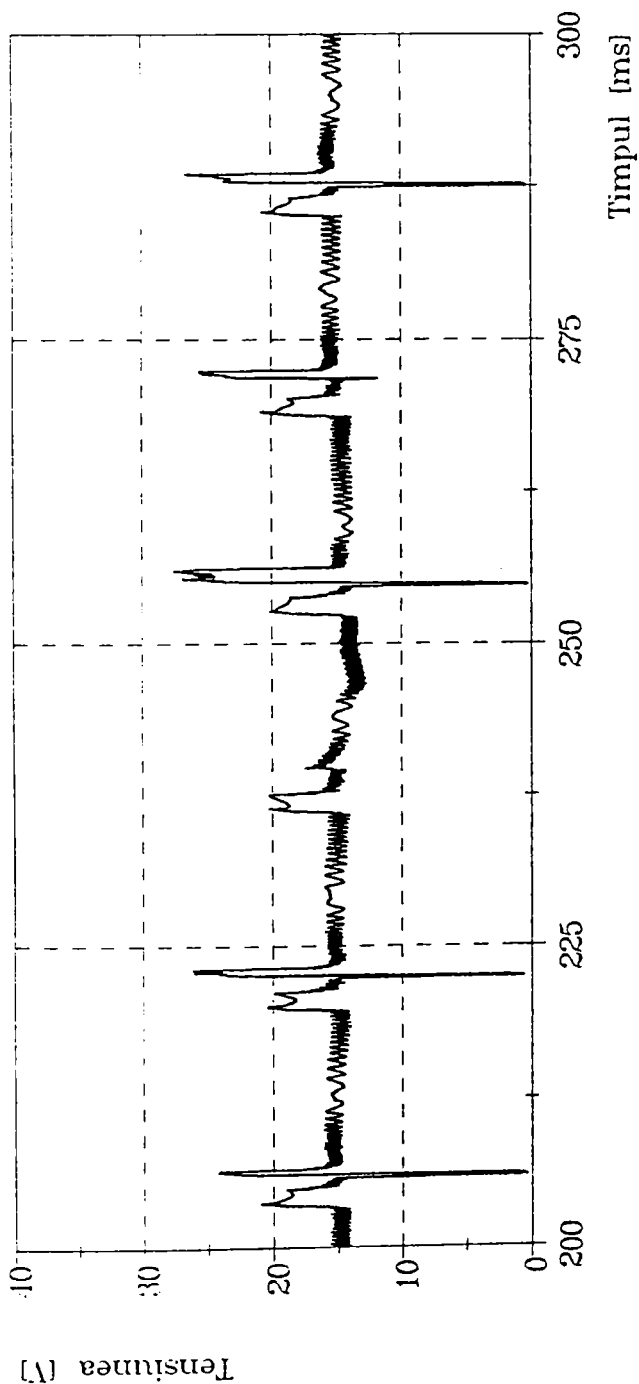
Materialul de baza: AlMgSi0,5
 Grosimea [s]: 2 mm
 Lungimea libera [l]: 21 mm
 Materialul de adaos: AISi5
 Gazul protector: Argon
 Debitul gazului [D]: 18 l/min
 Tipul imbinarii: depunere
 Pozitia de sudare: PFA-orizontal
 Sursa de sudare: TPS 450
 Data: 03.04.1996

Parametrii de sudare:

Vit. de sudare [vs]: 60 cm/min
 Vit. de avans [vD]: 2,9 m/min
 Frecventa [f]: 60 Hz
 Curentul de baza [IG]: 25 A
 Curentul de puls [IP]: 238 A
 Timpul de puls [tp]: 1,5 ms

Marimi determinate:

Tensiunea (med.arit.): 15,82 V
 Tensiunea (med.patr.): 16,00 V
 Curentul (med.arit.): 59,70 A
 Curentul (med.patr.): 81,72 A



Date generale:

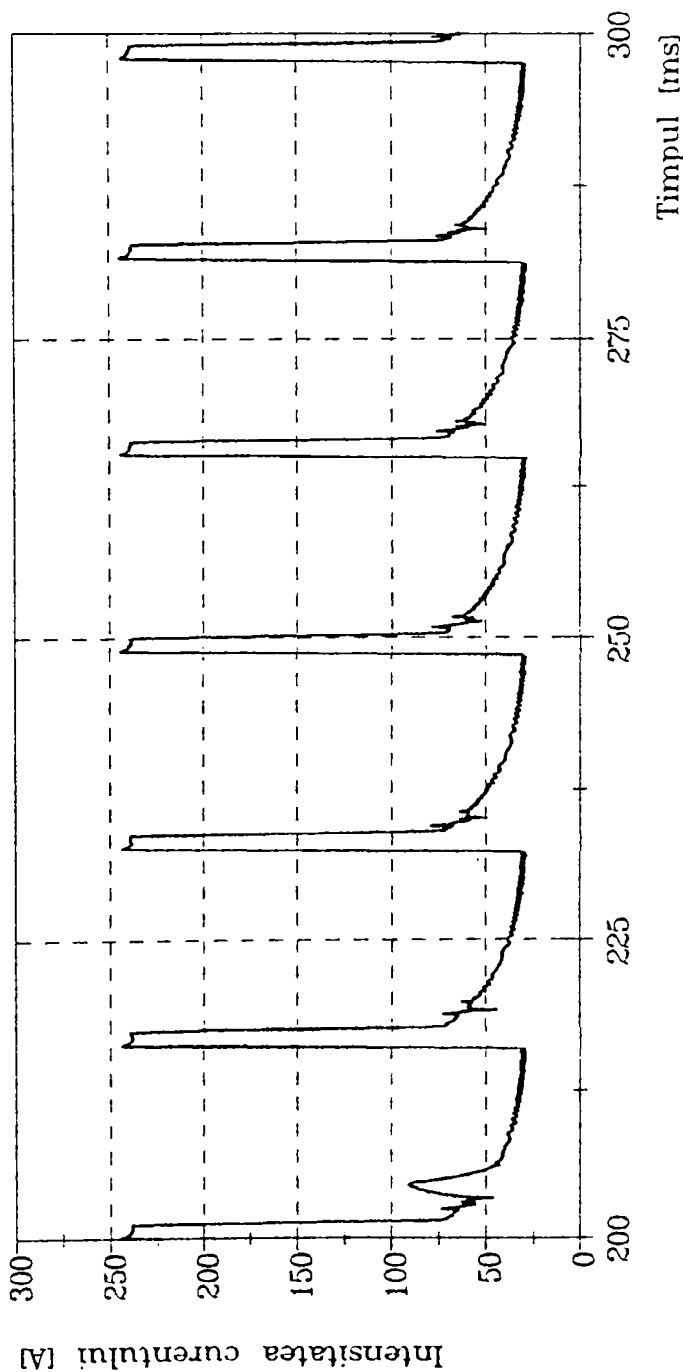
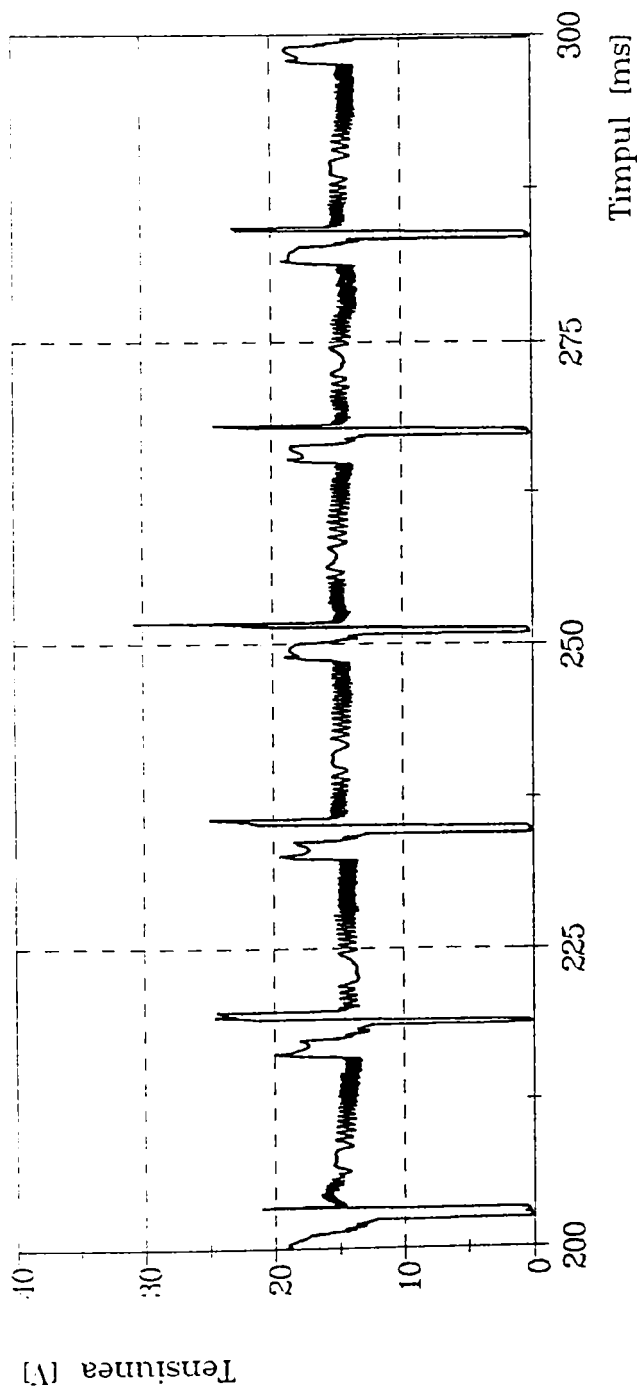
Materialul de baza: AlMgSi0,5
 Grosimea [s]: 2 mm
 Lungimea libera [l]: 23 mm
 Materialul de adaos: AlSi5
 Gazul protector: Argon
 Debitul gazului [D]: 18 l/min
 Tipul imbinarii: depunere
 Pozitia de sudare: PF-orizontal
 Sursa de sudare: TPS 450
 Data: 03.04.1996

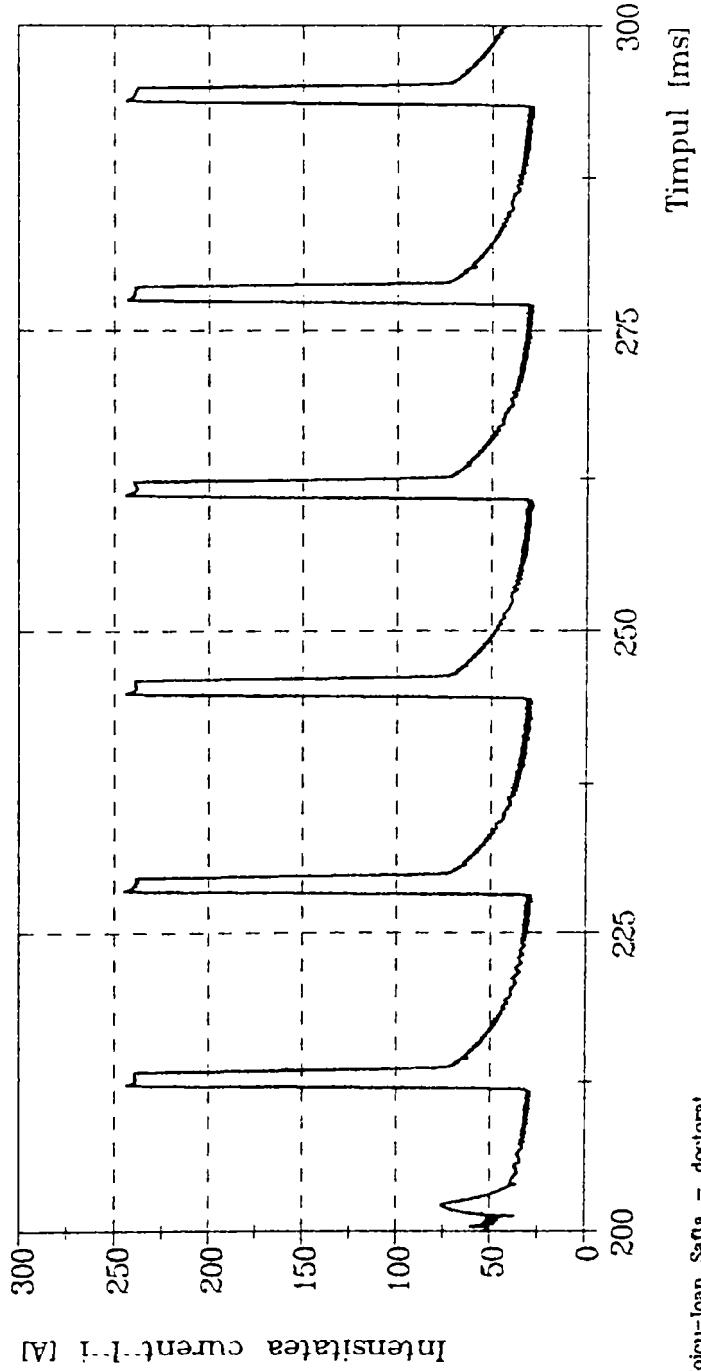
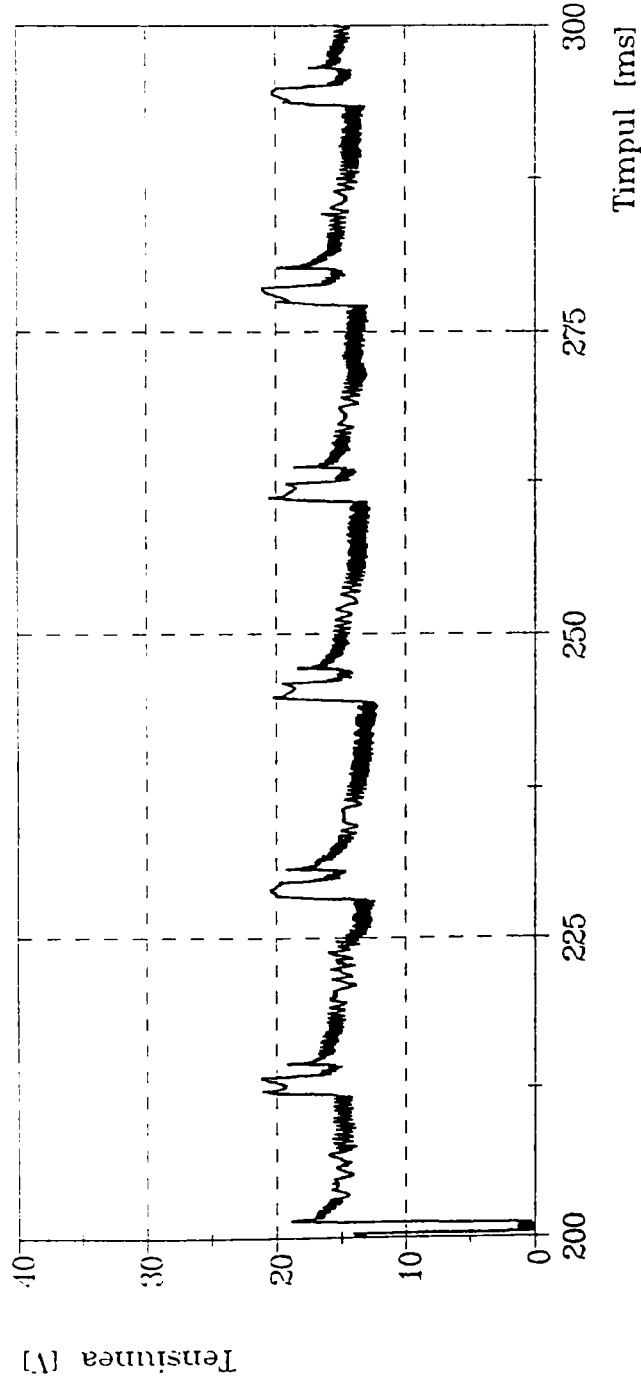
Parametrii de sudare:

Vit. de sudare [vs]: 60 cm/min
 Vit. de avans [vD]: 2,9 m/min
 Frecventa [f]: 60 Hz
 Curentul de baza [IG]: 25 A
 Curentul de puls [IP]: 238 A
 Timpul de puls [tp]: 1,5 ms

Marimi determinate:

Tensiunea (med.arit.): 13,87 V
 Tensiunea (med.patr.): 14,37 V
 Curentul (med.arit.): 64,26 A
 Curentul (med.patr.): 85,86 A





Voicu-Ioan Safta - doctorat

Universitatea "Politehnica" Timisoara

Facultatea de Mecanica

Catedra de Tehnologie Mecanica

Date generale:

Materialul de baza: AlMgSi0,5
 Grosimea [s]: 2 mm
 Lungimea libera [l]: 25 mm
 Materialul de adaos: AlSi5
 Gazul protector: Argon
 Debitul gazului [D]: 18 l/min
 Tipul imbinarii: depunere
 Pozitia de sudare: PA-orizontal
 Sursa de sudare: TPS 450
 Data: 03.04.1996

Parametrii de sudare:

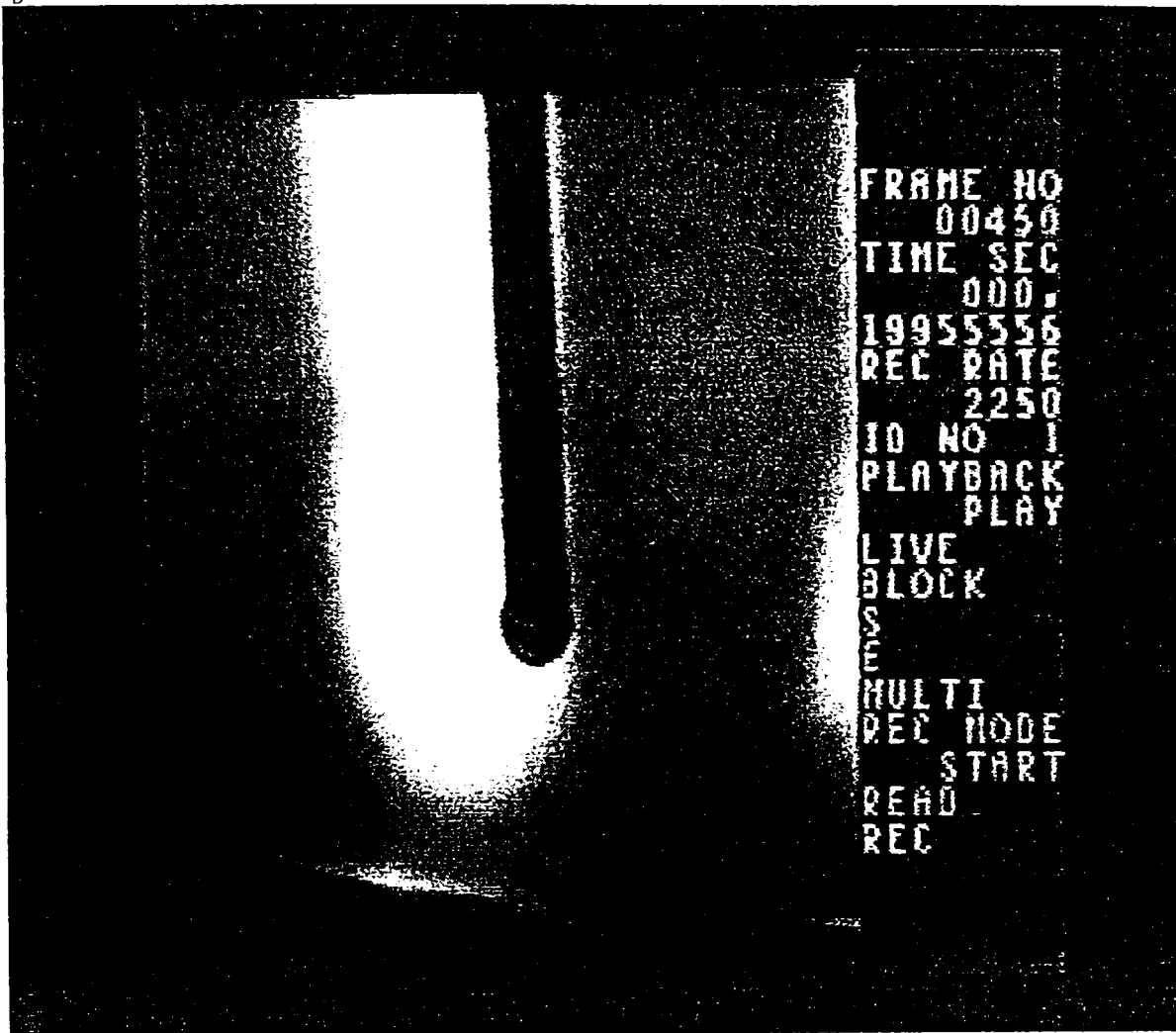
Vit. de sudare [vs]: 60 cm/min
 Vit. de avans [vD]: 2,9 m/min
 Frecventa [f]: 60 Hz
 Curentul de baza [IG]: 25 A
 Curentul de puls [IP]: 238 A
 Timpul de puls [tp]: 1,5 ms

Marimi determinate:

Tensiunea (med.arit.): 14,91 V
 Tensiunea (med.patr.): 15,04 V
 Curentul (med.arit.): 59,30 A
 Curentul (med.patr.): 80,69 A

EXEMPLU DE IMAGINE EXPERIMENTALĂ LA VARIAȚIA
LUNGIMII LIBERE (TABLA DE 2mm)

$I_D=1$



ANEXA 4.4.

EXPERIMENTE RELATIV LA VARIAȚIA LUNGIMII
LIBERE – TABLĂ DE 6MM GROSIME

Dale generale:

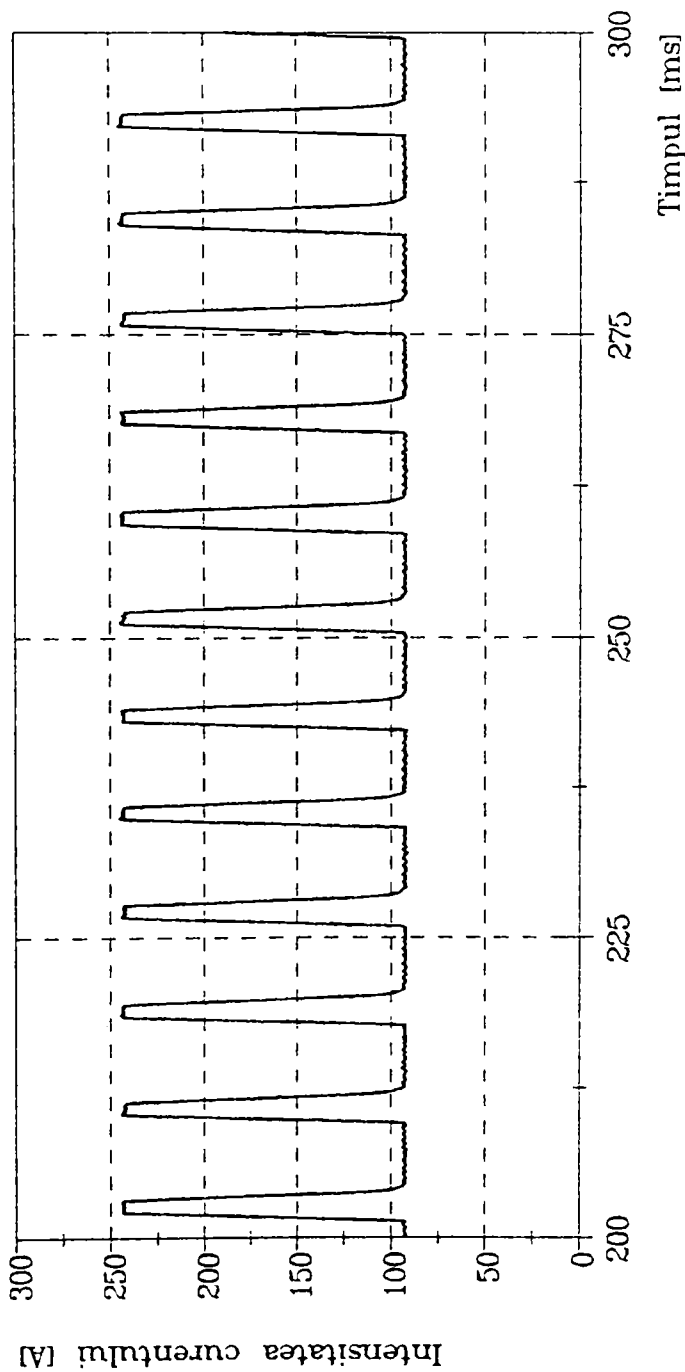
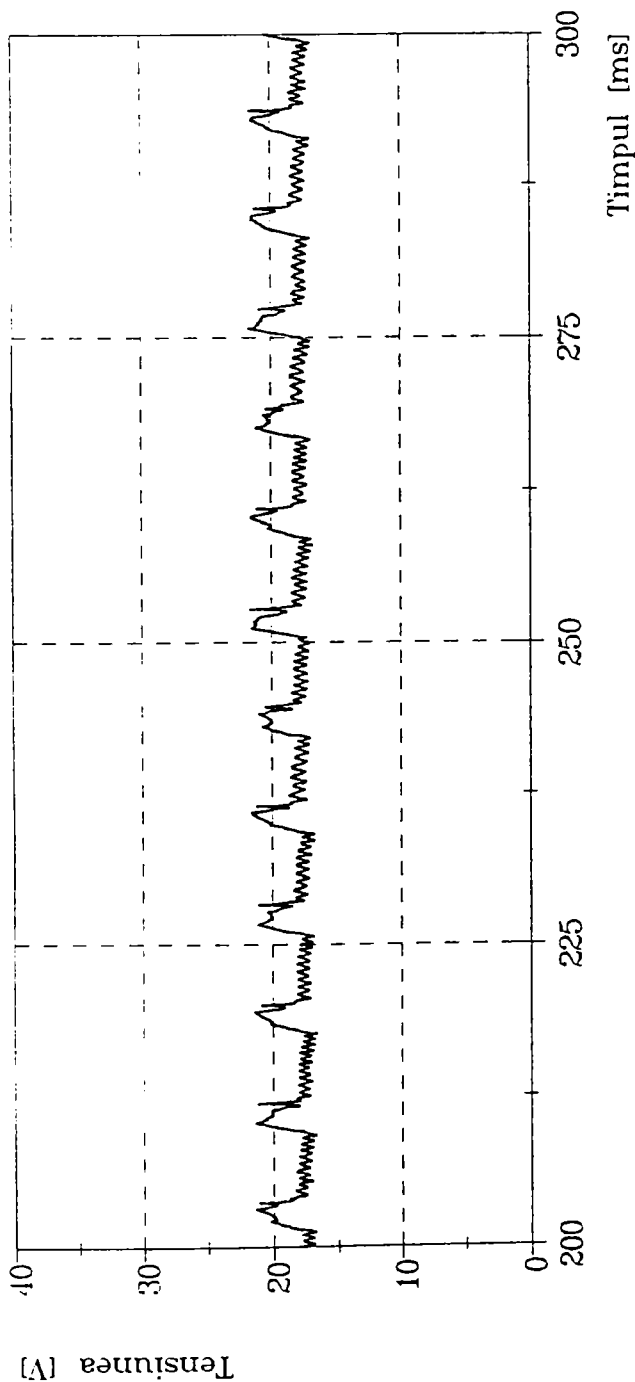
Materialul de baza: AlMgSi0,5
 Grosimea [s]: 6 mm
 Lungimea libera [l]: 7 mm
 Materialul de adaos: AlSi5
 Gazul protector: Argon
 Debitul gazului [D]: 18 l/min
 Tipul imbinarii: depunere
 Pozitia de sudare: PA-orizontal
 Sursa de sudare: TPS 450
 Data: 28.06.1996

Parametrii de sudare:

Vit. de sudare [vs]: 60 cm/min
 Vit. de avans [vD]: 5,7 m/min
 Frecventa [f]: 120 Hz
 Curentul de baza [IG]: 98 A
 Curentul de puls [IP]: 245 A
 Timpul de puls [tp]: 1,8 ms

Marimi determinate:

Tensiunea (med.arit.): 18,36 V
 Tensiunea (med.patr.): 18,41 V
 Curentul (med.arit.): 125,68 A
 Curentul (med.patr.): 137,55 A



Date generale:

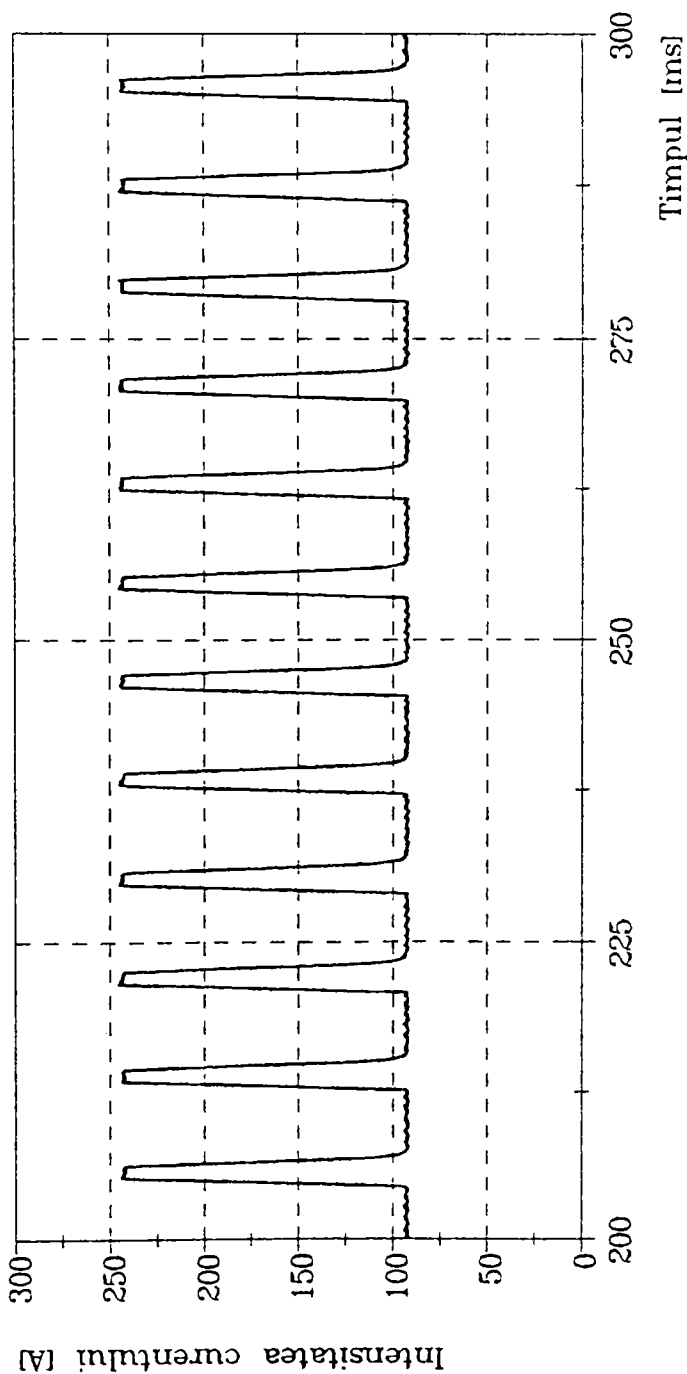
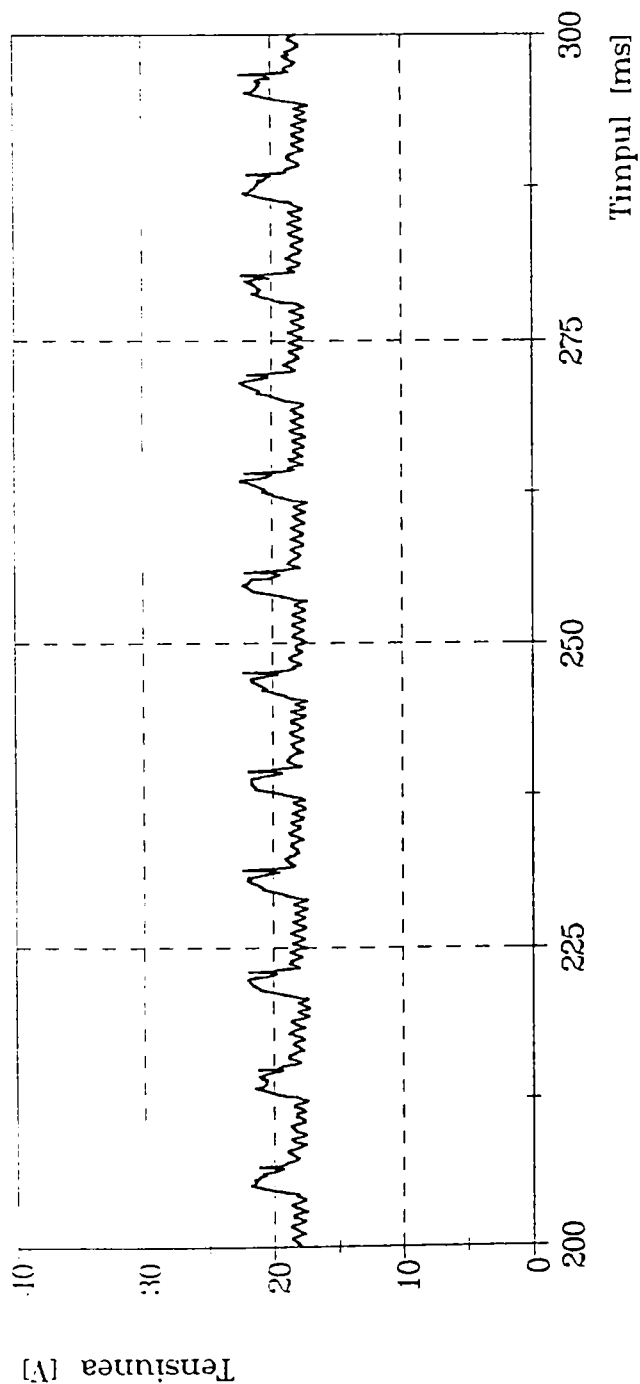
Materialul de baza: AlMgSi0,5
 Grosimea [s.]: 6 mm
 Lungimea libera [l]: 9 mm
 Materialul de adaos: AISi5
 Gazul protector: Argon
 Debitul gazului [D]: 18 l/min
 Tipul imbinarii: depunere
 Pozitia de sudare: PPA-orizontal
 Sursa de sudare: TPS 450
 Data: 28.06.1996

Parametrii de sudare:

Vit. de sudare [vs]: 60 cm/min
 Vit. de avans [vD]: 5,7 m/min
 Frecventa [f]: 120 Hz
 Curentul de baza [IG]: 98 A
 Curentul de puls [IP]: 245 A
 Timpul de puls [tp]: 1,8 ms

Marimi determinate:

Tensiunea (med.arit.): 18,85 V
 Tensiunea (med.patr.): 18,90 V
 Curentul (med.arit.): 125,48 A
 Curentul (med.patr.): 137,29 A



Date generale:

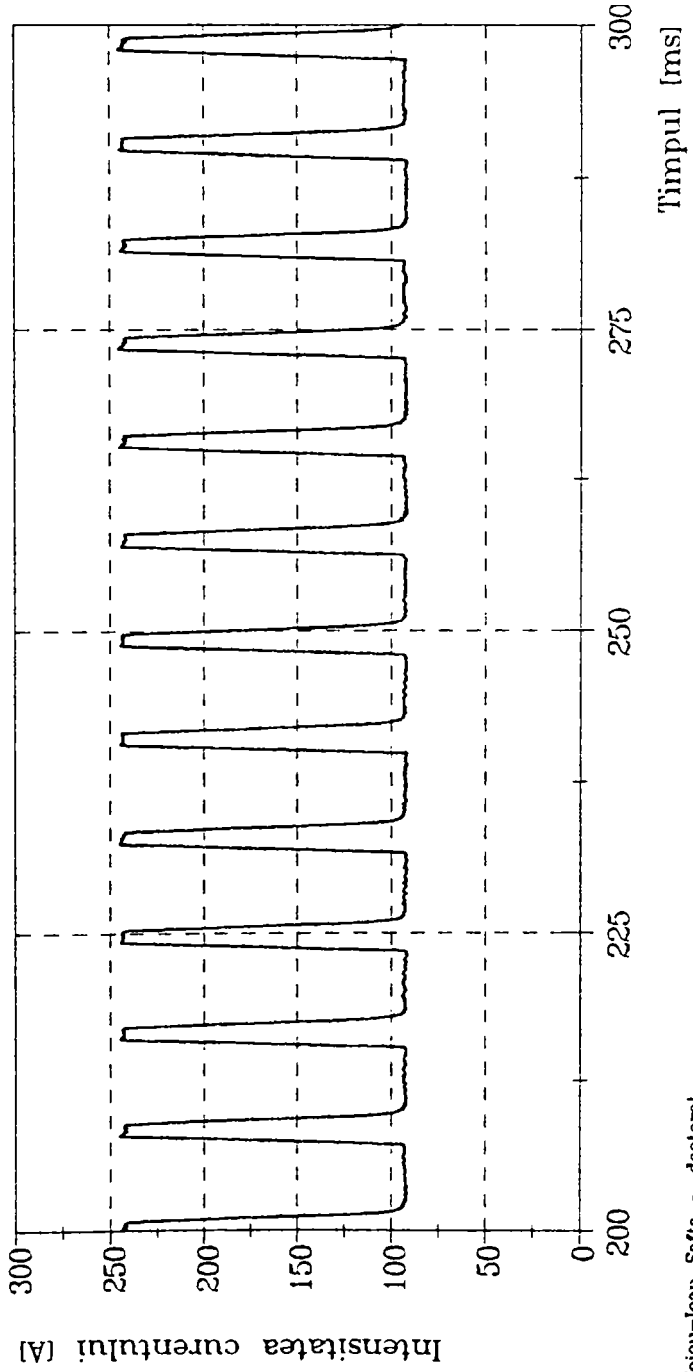
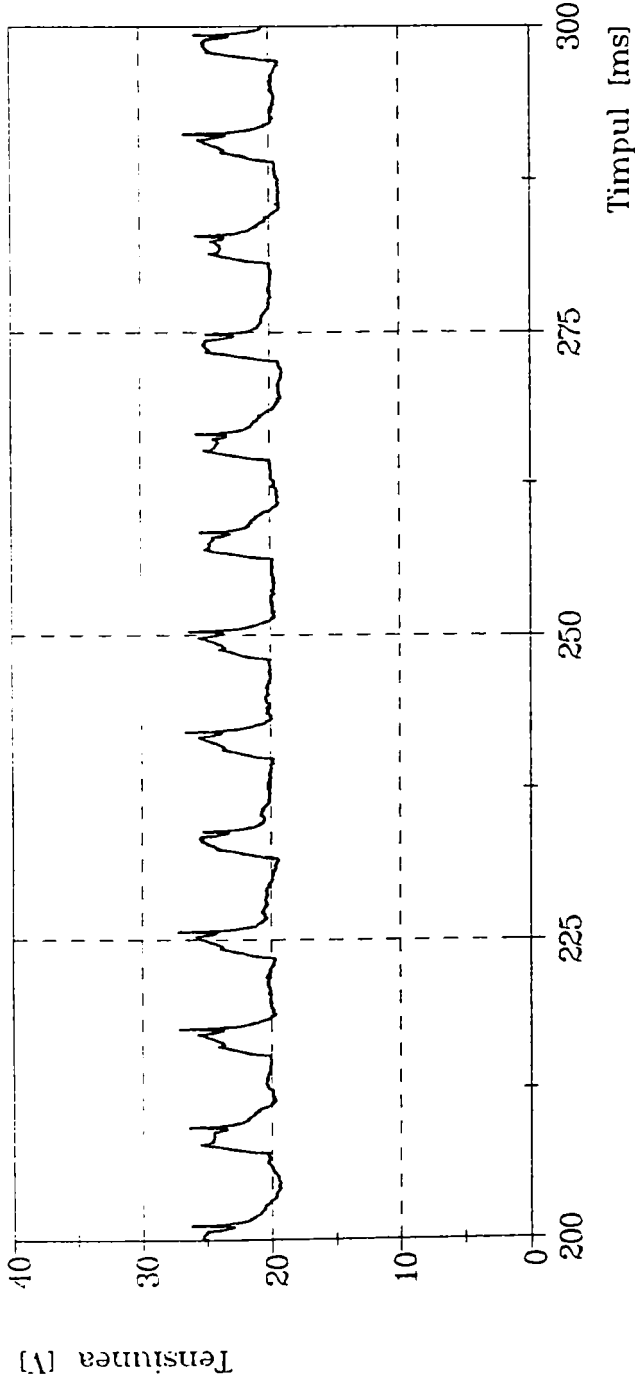
Materialul de baza: AlMgSi0,5
 Grosimea [s]: 6 mm
 Lungimea libera [l]: 11 mm
 Materialul de adaos: AlSi5
 Gazul protector: Argon
 Debitul gazului [D]: 18 l/min
 Tipul imbinarii: depunere
 Pozitia de sudare: PA-orizontal
 Sursa de sudare: TPS 450
 Data: 28.06.1996

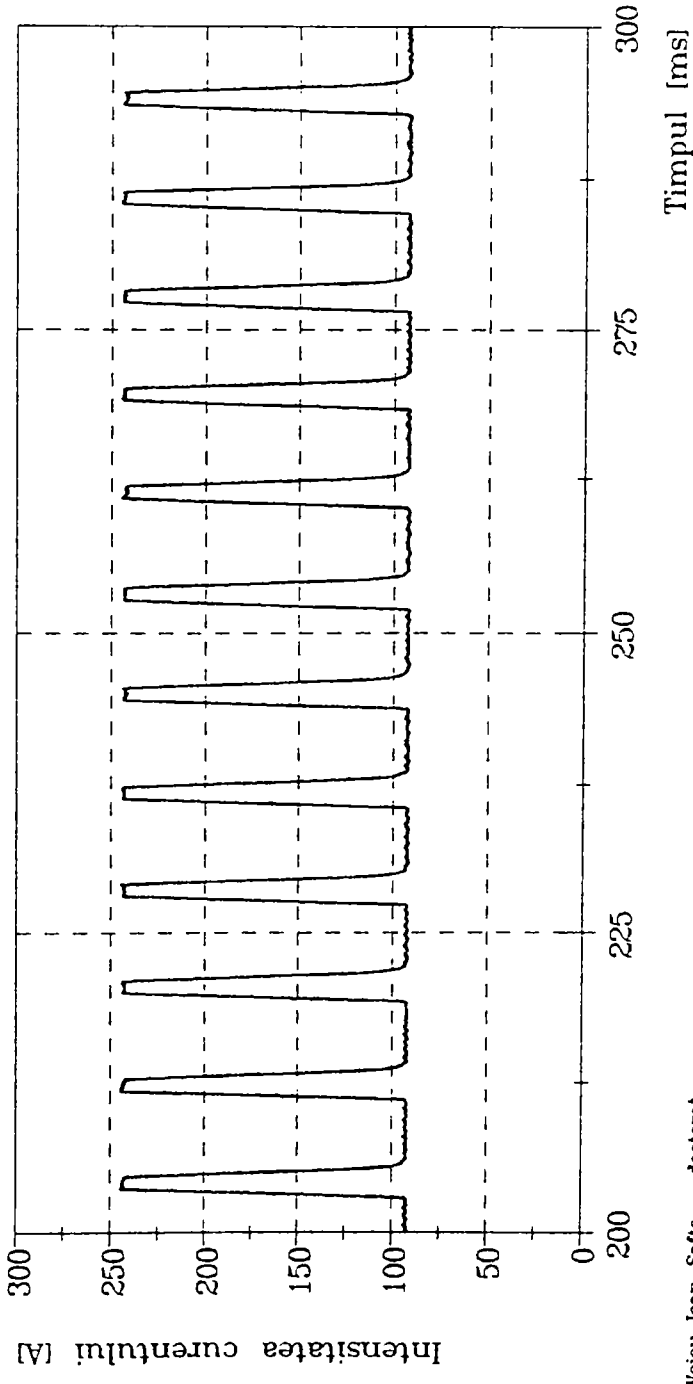
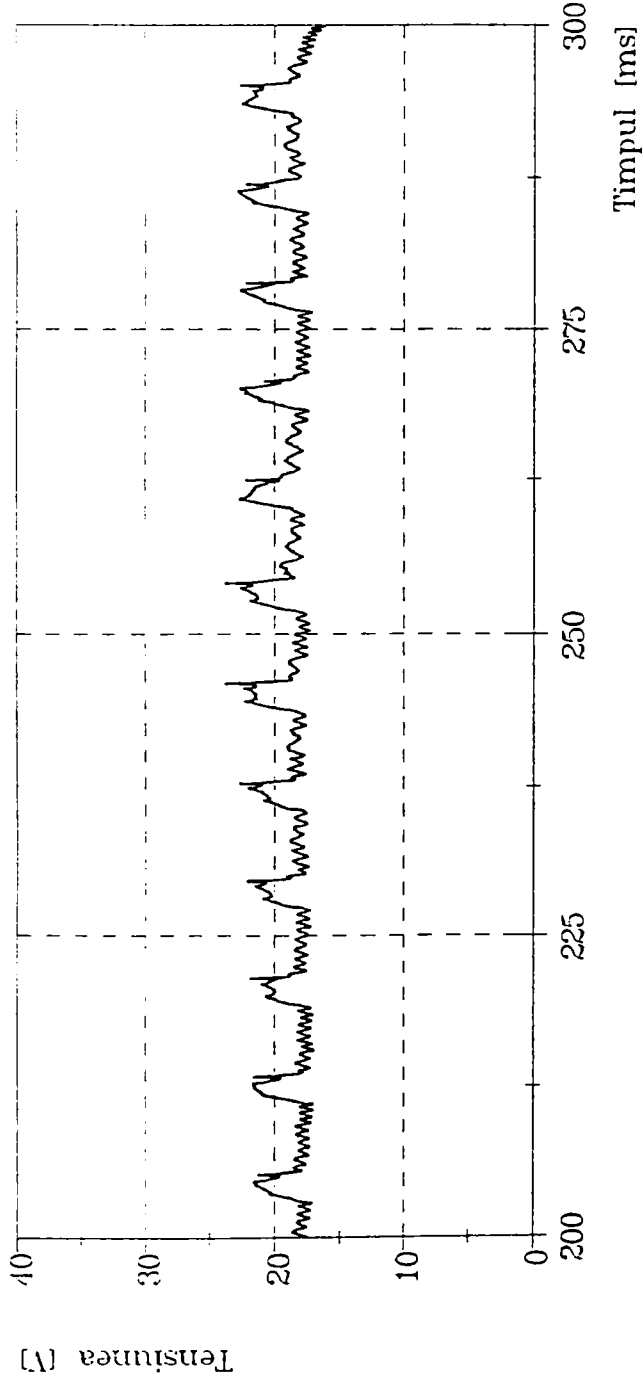
Parametrii de sudare:

Vit. de sudare [vs]: 60 cm/min
 Vit. de avans [vD]: 5,7 m/min
 Frecventa [f]: 120 Hz
 Curentul de baza [IG]: 98 A
 Curentul de puls [IP]: 245 A
 Timpul de puls [tp]: 1,8 ms

Marimi determinate:

Tensiunea (med.arit.): 21,20 V
 Tensiunea (med.patr.): 21,28 V
 Curentul (med.arit.): 125,66 A
 Curentul (med.patr.): 137,51 A





Voicu-Ioan Safta - doctorant

Universitatea "Politehnica" Timisoara
 Facultatea de Mecanica
 Catedra de Tehnologie Mecanica

Date generale:

Materialul de baza: AlMgSi0,5
 Grosimea [s]: 6 mm
 Lungimea libera [l]: 13 mm
 Materialul de adaos: AISi5
 Gazul protector: Argon
 Debitul gazului [D]: 18 l/min
 Tipul imbinarii: depunere
 Pozitia de sudare: PA-orizontal
 Sursa de sudare: TPS 450
 Data: 28.06.1996

Parametrii de sudare:

Vit. de sudare [vs]: 60 cm/min
 Vit. de avans [vD]: 5,7 m/min
 Frecventa [f]: 120 Hz
 Curentul de baza [IG]: 98 A
 Curentul de puls [IP]: 245 A
 Timpul de puls [tp]: 1,8 ms

Marimi determinate:

Tensiunea (med.arit.): 18,30 V
 Tensiunea (med.pat.): 19,00 V
 Curentul (med.arit.): 125,67 A
 Curentul (med.pat.): 137,55 A

Date generale:

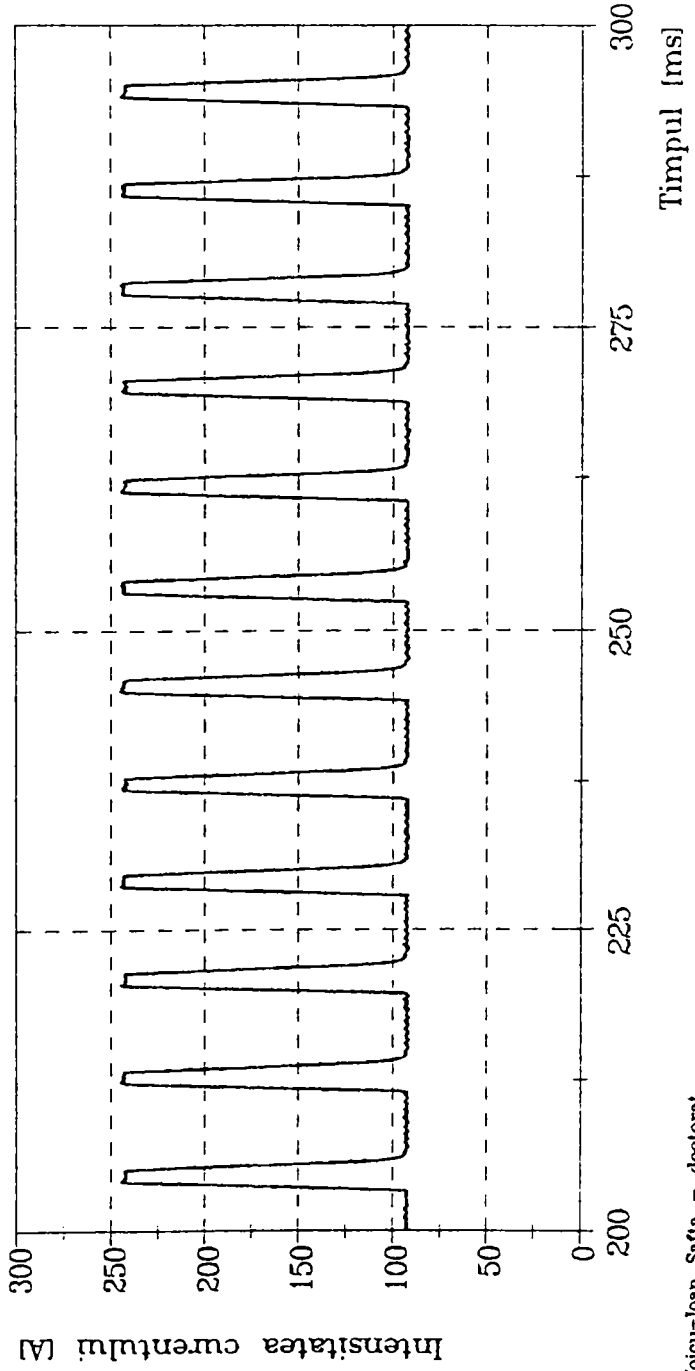
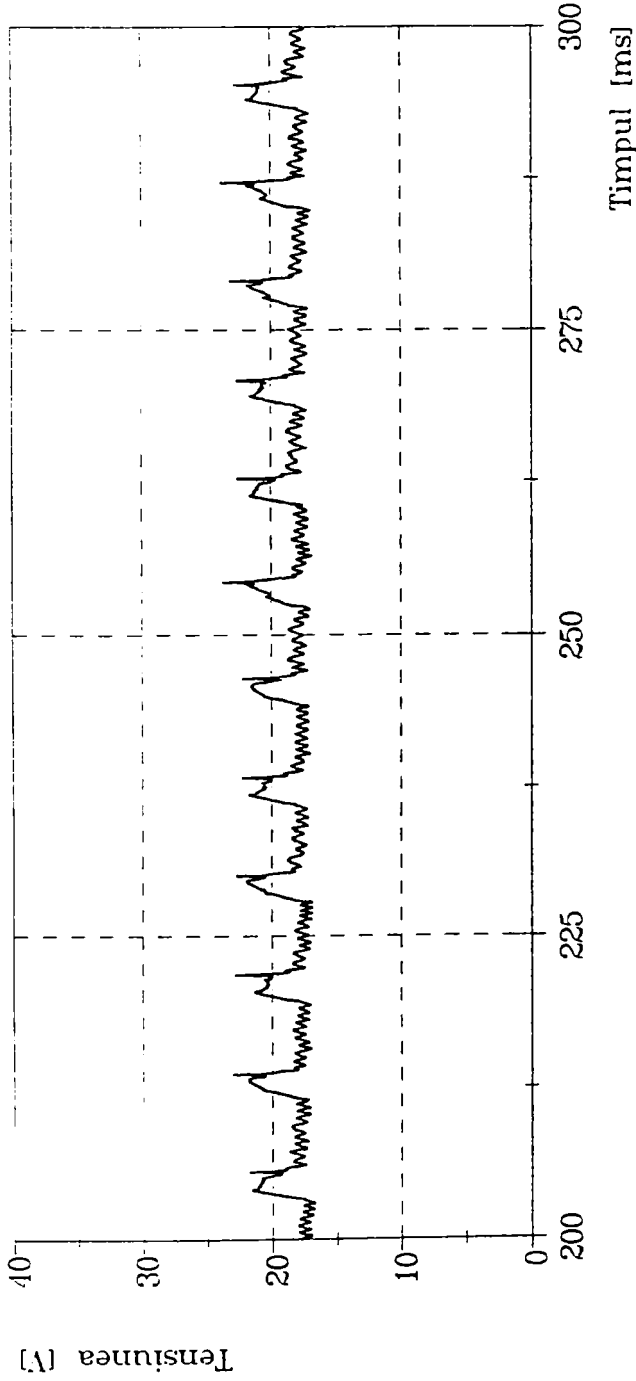
Materialul de baza: AlMgSi0,5
 Grosimea [s]: 6 mm
 Lungimea libera [l]: 15 mm
 Materialul de adaos: AISi5
 Gazul protector: Argon
 Debitul gazului [D]: 18 l/min
 Tipul imbinarii: depunere
 Pozitia de sudare: PA-orizontal
 Sursa de sudare: TPS 450
 Data: 28.06.1996

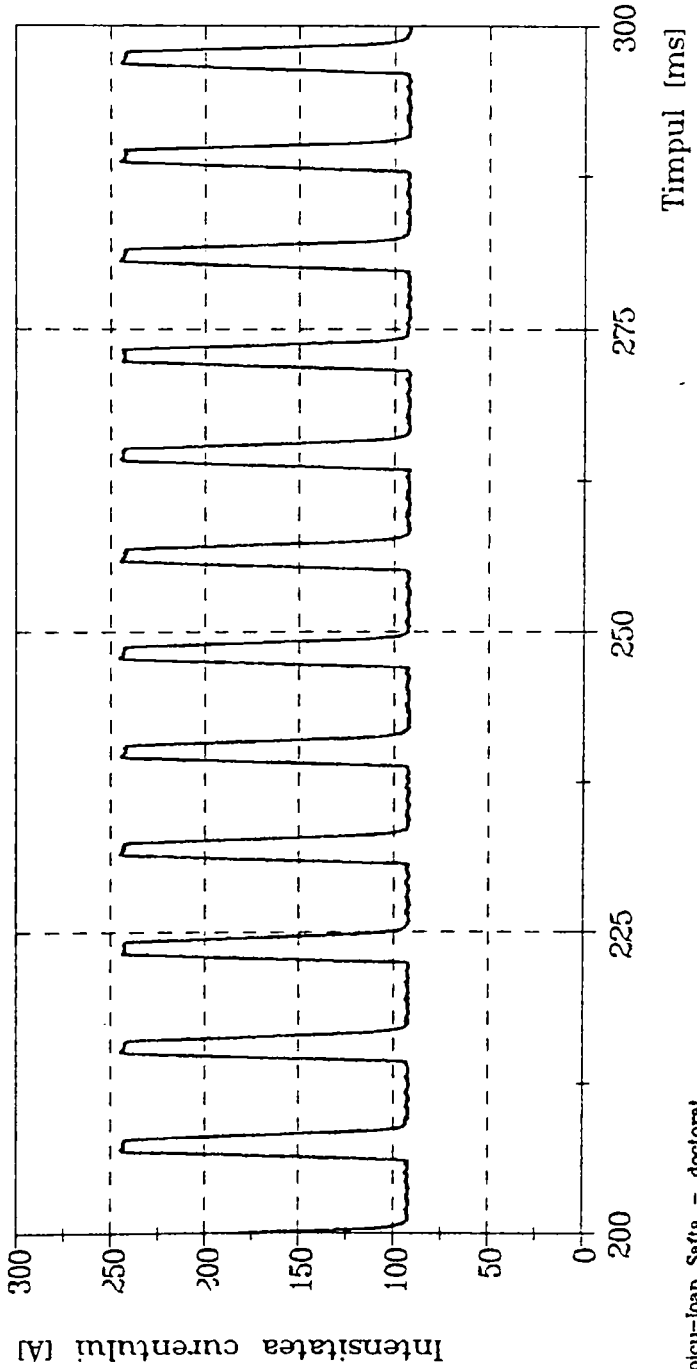
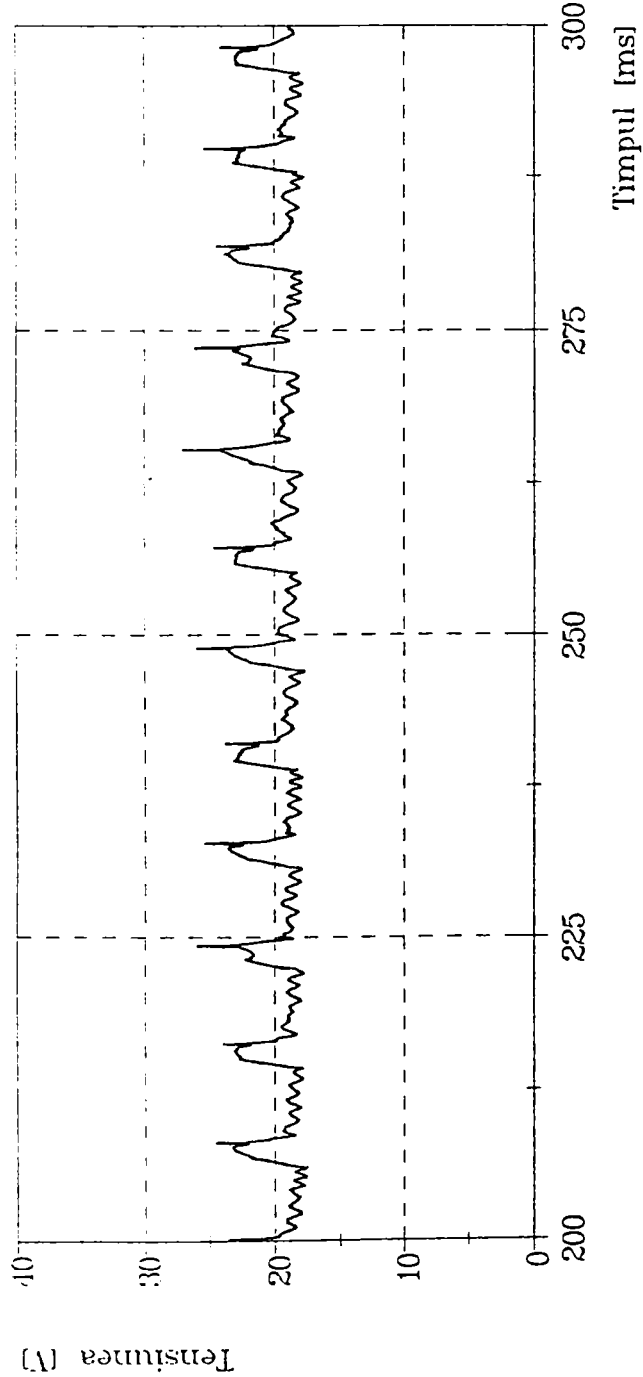
Parametrii de sudare:

Vit. de sudare [vs]: 60 cm/min
 Vit. de avans [vD]: 5,7 m/min
 Frecventa [f]: 120 Hz
 Curentul de baza [IG]: 98 A
 Curentul de puls [IP]: 245 A
 Timpul de puls [tp]: 1,8 ms

Marimi determinate:

Tensiunea (med.arit.): 18,70 V
 Tensiunea (med.geom.): 18,75 V
 Curentul (med.arit.): 125,67 A
 Curentul (med.patr.): 137,53 A





Voicu-Ioan Safta - doctorat

Universitatea "Politehnica" Timisoara

Facultatea de Mecanica

Catedra de Tehnologie Mecanica

Date generale:

Materialul de baza: AlMgSi0,5
 Grosimea [s]: 6 mm
 Lungimea libera [l]: 17 mm
 Materialul de adaos: AlSi5
 Gazul protector: Argon
 Debitul gazului [D]: 18 l/min
 Tipul imbinarii: depunere
 Pozitia de sudare: PA-orizontal
 Sursa de sudare: TPS 450
 Data: 28.06.1996

Parametrii de sudare:

Vit. de sudare [vs]: 60 cm/min
 Vit. de avans [vD]: 5,7 m/min
 Frecventa [f]: 120 Hz
 Curentul de baza [IG]: 98 A
 Curentul de puls [IP]: 245 A
 Timpul de puls [tp]: 1,8 ms

Marimi determinate:

Tensiunea (med.arit.): 19,64 V
 Tensiunea (med.geom.): 19,71 V
 Curentul (med.arit.): 125,65 A
 Curentul (med.patr.): 137,52 A

Universitatea tehnica
 TIMISOARA
 Biblioteca centrala

Date generale:

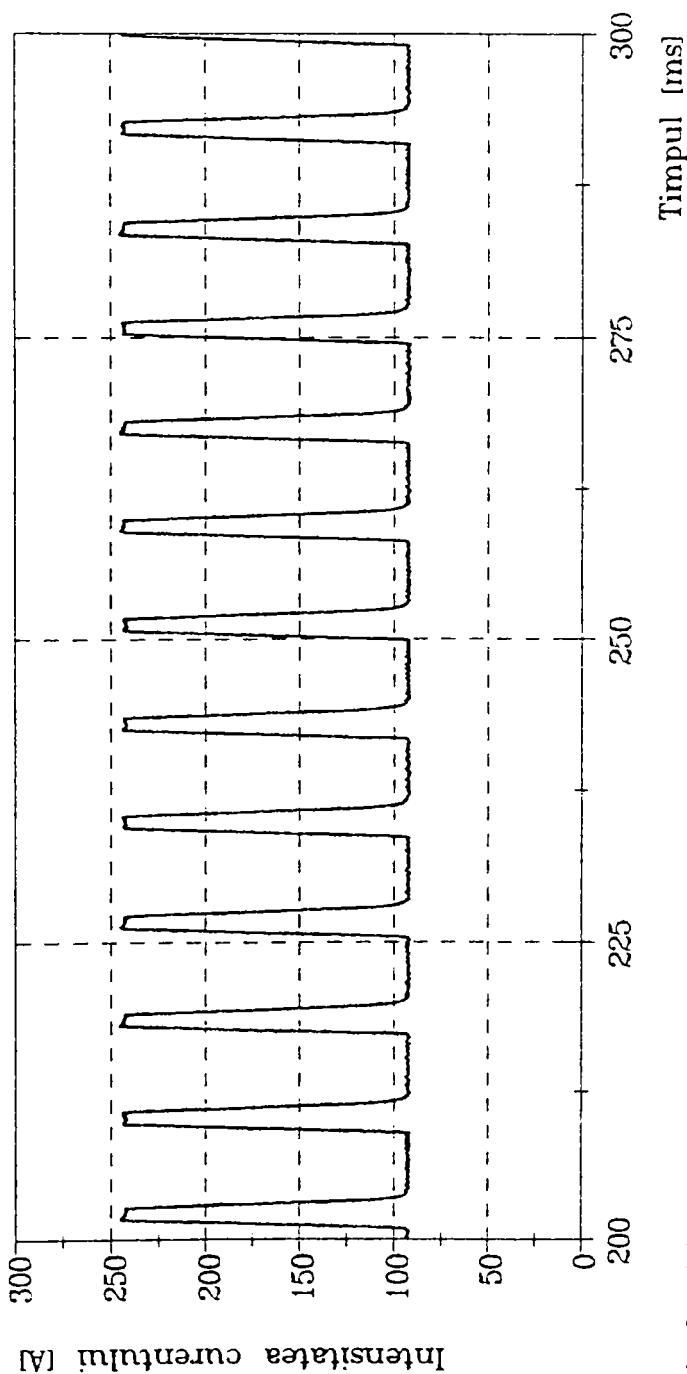
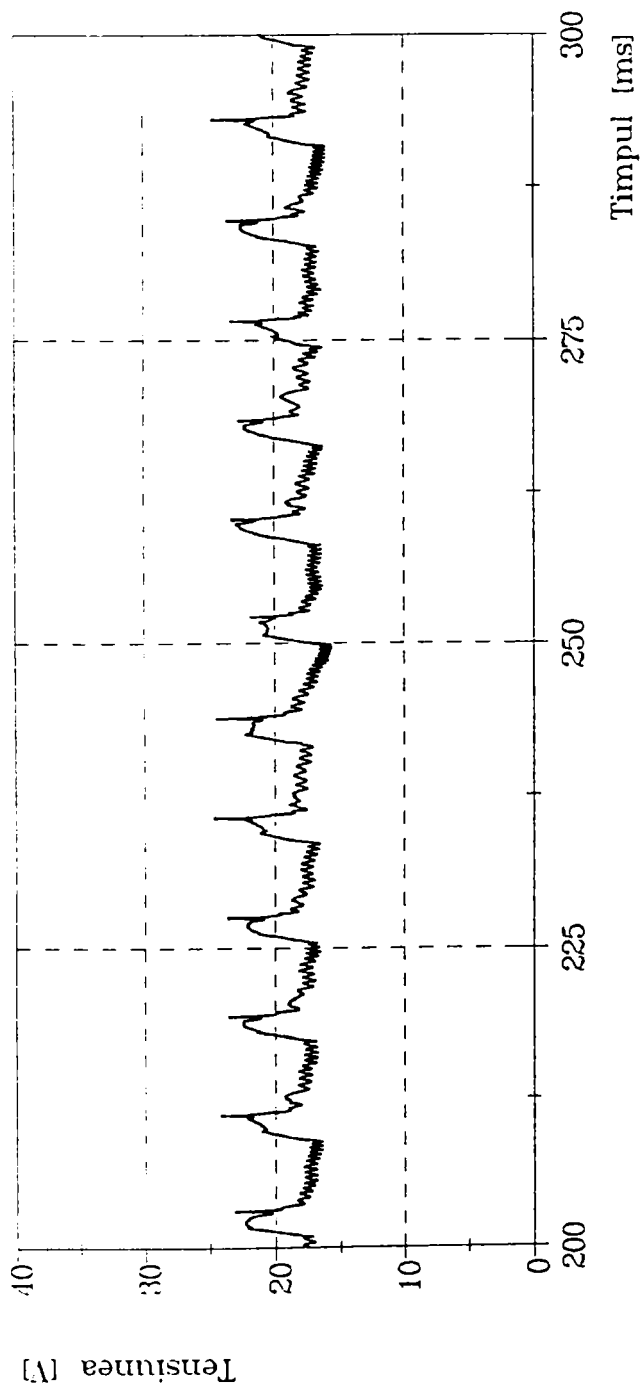
Materialul de baza: AlMgSi0,5
 Grosimea [s]: 6 mm
 Lungimea libera [l]: 19 mm
 Materialul de adaos: AISi5
 Gazul protector: Argon
 Debitul gazului [D]: 18 l/min
 Tipul imbinarii: depunere
 Pozitia de sudare: PA-orizontal
 Sursa de sudare: TPS 450
 Data: 28.06.1996

Parametrii de sudare:

Vit. de sudare [vs]: 60 cm/min
 Vit. de avans [vD]: 5,7 m/min
 Frecventa [f]: 120 Hz
 Curentul de baza [IG]:98 A
 Curentul de puls [IP]:245 A
 Timpul de puls [tp]: 1,8 ms

Marimi determinate:

Tensiunea (med.arit.):18,34 V
 Tensiunea (med.geom.):18,41 V
 Curentul (med.arit.):125,65 A
 Curentul (med.patr.):137,52 A



Date generale:

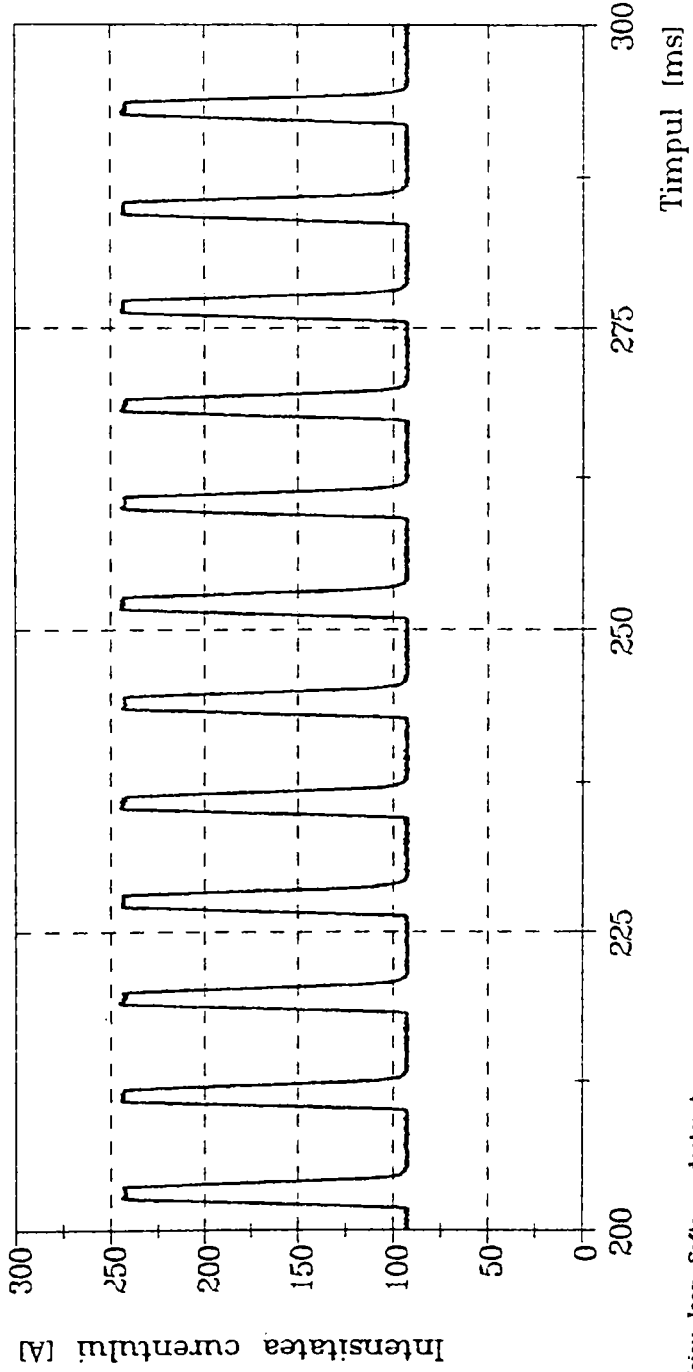
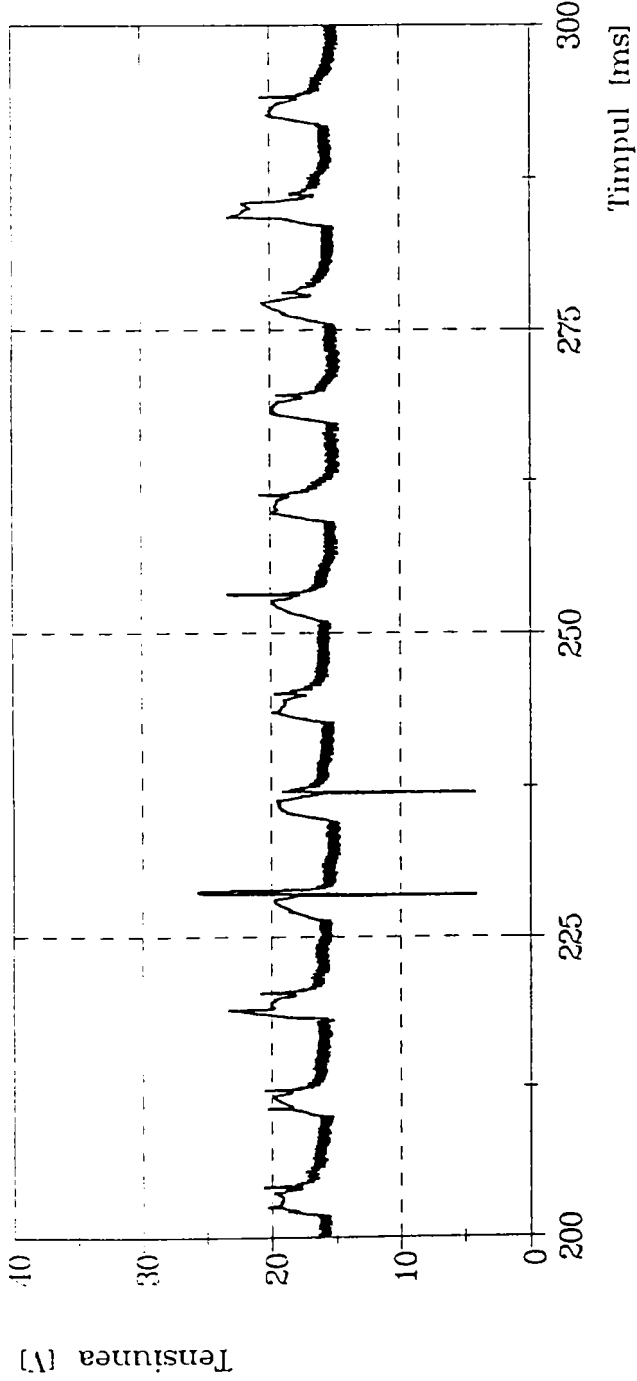
Materialul de baza: AlMgSi0,5
 Grosimea [s]: 6 mm
 Lungimea libera [l]: 21 mm
 Materialul de adaos: AISi5
 Gazul protector: Argon
 Debitul gazului [D]: 18 l/min
 Tipul imbinarii: depunere
 Pozitia de sudare: PA-orizontal
 Sursa de sudare: TPS 450
 Data: 28.06.1996

Parametrii de sudare:

Vit. de sudare [vs]: 60 cm/min
 Vit. de avans [vD]: 5,7 m/min
 Frecventa [f]: 120 Hz
 Curentul de baza [IG]:98 A
 Curentul de puls [IP]:245 A
 Timpul de puls [tp]: 1,8 ms

Marimi determinate:

Tensiunea (med.arit.):16,68 V
 Tensiunea (med.geom.):16,79 V
 Curentul (med.arit.):125,88 A
 Curentul (med.patr.):137,73 A



Date generale:

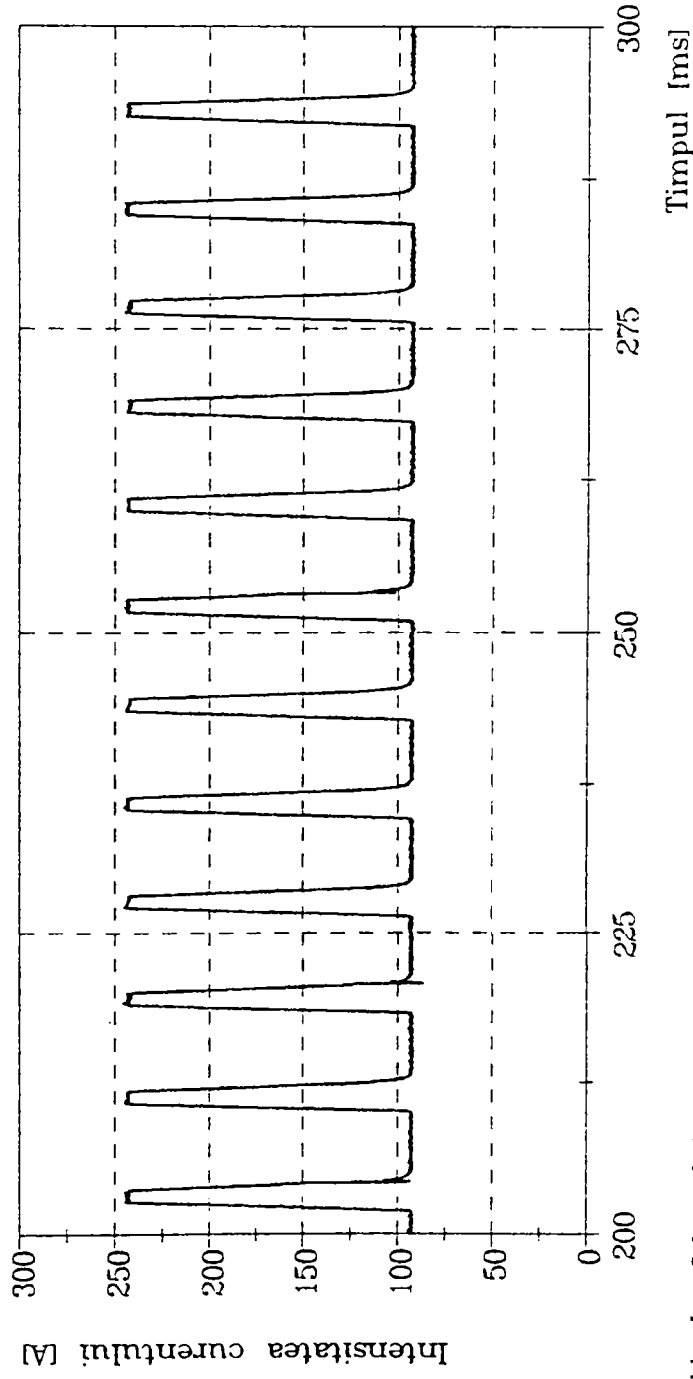
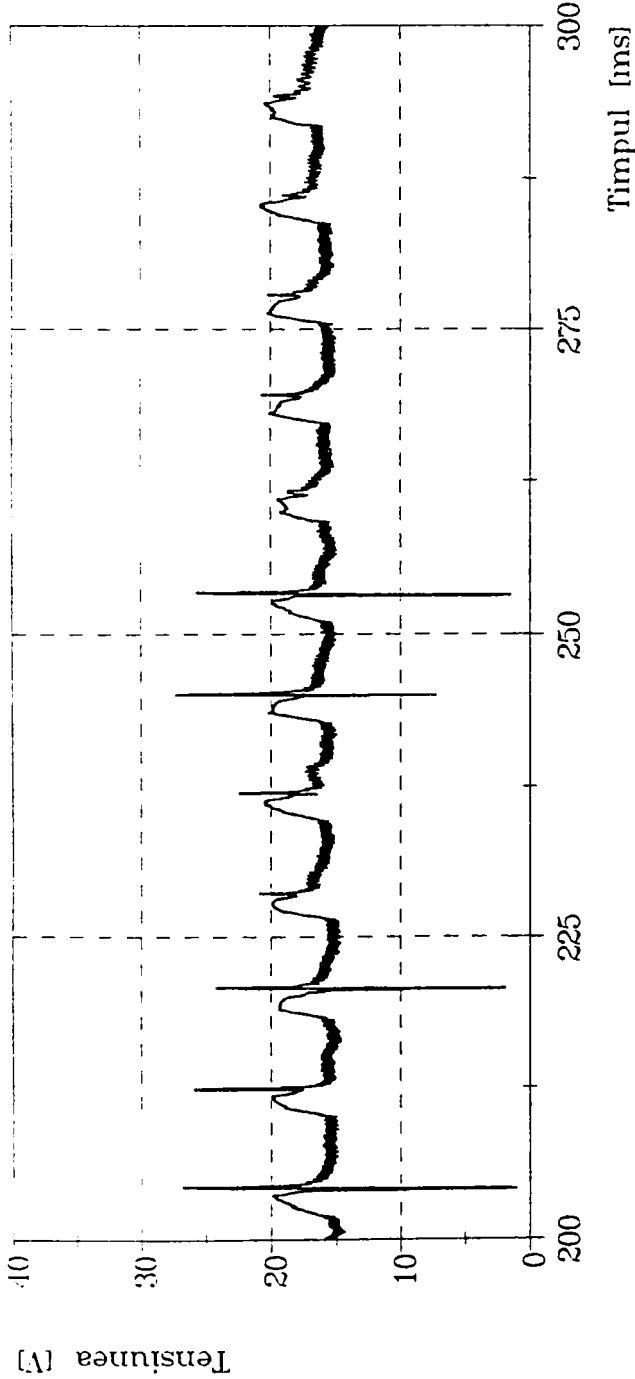
Materialul de baza: AlMgSi0,5
 Grosimea [s]: 6 mm
 Lungimea libera [l]: 23 mm
 Materialul de adaos: AlSi5
 Gazul protector: Argon
 Debitul gazului [D]: 18 l/min
 Tipul imbinarii: depunere
 Pozitia de sudare: PA-orizontal
 Sursa de sudare: TPS 450
 Data: 28.06.1996

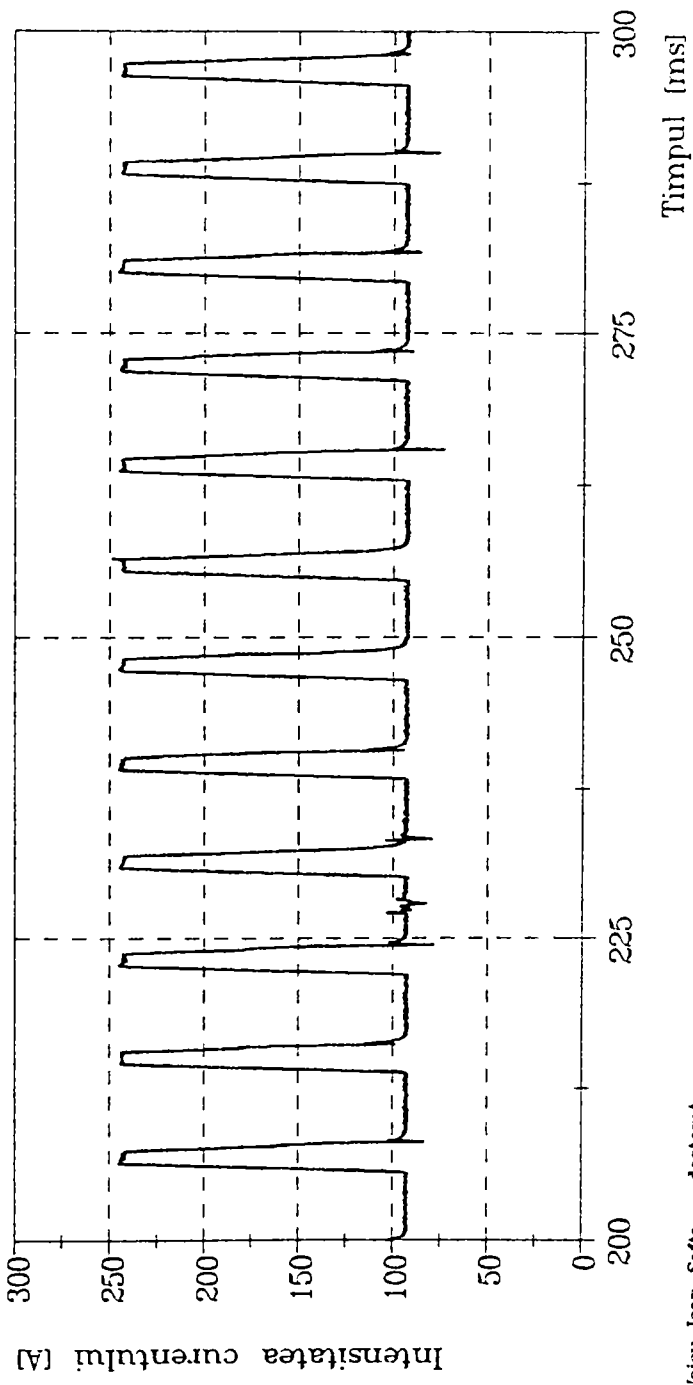
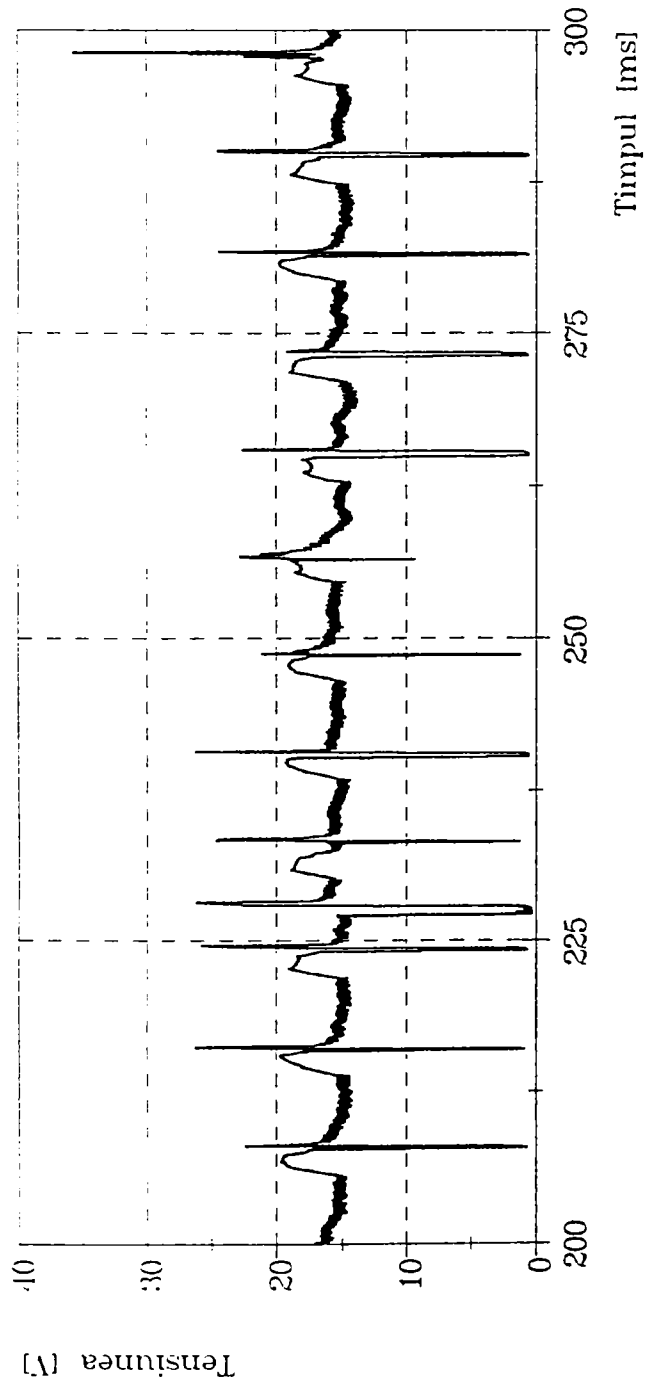
Parametrii de sudare:

Vit. de sudare [vs]: 60 cm/min
 Vit. de avans [vD]: 5,7 m/min
 Frecventa [f]: 120 Hz
 Curentul de baza [IG]: 98 A
 Curentul de puls [IP]: 245 A
 Timpul de puls [tp]: 1,8 ms

Marimi determinate:

Tensiunea (med.arit.): 16,78 V
 Tensiunea (med.geom.): 16,90 V
 Curentul (med.arit.): 125,79 A
 Curentul (med.patr.): 137,65 A





Voicu-Ioan Safta - doctorat

Universitatea "Politehnica" Timisoara
 Facultatea de Mecanica
 Catedra de Tehnologie Mecanica

Date generale:

Materialul de baza: AlMgSi0,5
 Grosimea [s]: 6 mm
 Lungimea libera [l]: 25 mm
 Materialul de adaos: AlSi5
 Gazul protector: Argon
 Debitul gazului [D]: 18 l/min
 Tipul imbinarii: depunere
 Pozitia de sudare: PA-orizontal
 Sursa de sudare: TPS 450
 Data: 28.06.1996

Parametrii de sudare:

Vit. de sudare [vs]: 60 cm/min
 Vit. de avans [vD]: 5,7 m/min
 Frecventa [ff]: 120 Hz
 Curentul de baza [IG]: 98 A
 Curentul de puls [IP]: 245 A
 Timpul de puls [tp]: 1,8 ms

Marimi determinate:

Tensiunea (med.arit.): 16,18 V
 Tensiunea (med.geom.): 16,42 V
 Curentul (med.arit.): 125,88 A
 Curentul (med.patr.): 137,74 A

EXEMPLU DE IMAGINE EXPERIMENTALĂ LA VARIAȚIA
LUNGIMII LIBERE (TABLA DE 6mm)

$I_0=1$

