

**UNIVERSITATEA "POLITEHNICA" DIN TIMIȘOARA
FACULTATEA DE MECANICĂ
COLECTIVUL UTILAJUL ȘI TEHNOLOGIA SUDĂRII**

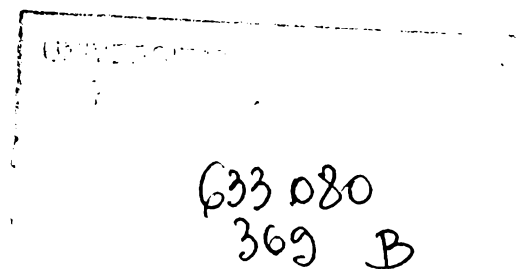
Ing. Mircea BURCĂ

**STUDII ANALITICE ȘI EXPERIMENTALE
ASUPRA SISTEMELOR DE AVANS PRIN IMPULSURI
ALE SÂRMEI ELECTROD LA
SUDAREA ÎN MEDIU DE GAZE PROTECTOARE**

Teză de doctorat

**BIBLIOTECA CENTRALĂ
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"
TIMIȘOARA**

**Conducător științific:
Prof. dr. ing. Voicu SAFTA,
m.c. ai Academiei de Științe Tehnice din România**



**Timișoara
– 2001 –**

CUPRINS

Cuprins.....	1
Introducere.....	4
1. Cap. I. ANALIZA TRANSFERULUI DE METAL LA SUDAREA MIG/MAG	9
1.1. Descrierea procedurii de sudare MIG/MAG.....	10
1.1.1. Definierea procedurii	10
1.1.2. Materiale de sudare.....	11
1.1.2.1. Sârma electrod	11
1.1.2.2. Gazul de protecție	11
1.2. Forțele dezvoltate în arcul electric și acțiunea lor asupra transferului de metal la sudarea MIG/MAG.....	21
1.2.1. Forța electromagnetică.....	22
1.2.2. Forța tensiunilor superficiale	25
1.2.3. Forța gravitațională.....	26
1.2.4. Forța de reacție anodică	28
1.2.5. Forța electrodinamică	29
1.2.6. Forța jetului de plasmă.....	30
1.2.7. Forța inerțială.....	32
1.3. Moduri de transfer a picăturii de metal topit la sudarea MIG/MAG.....	34
1.3.1. Transferul prin scurtcircuit	36
1.3.2. Transferul prin pulverizare	42
1.3.3. Transferul globular	46
1.3.4. Transferul intermediar	49
1.3.5. Transferul sinergic în curent pulsant	52
1.3.5.1. Principiul procedurii.....	52
1.3.5.2. Parametrii tehnologici ai curentului pulsant.....	52
1.3.5.3. Avantajele sudării MIG/MAG în curent pulsant	59
1.3.5.4. Caracterizarea transferului în curent pulsant	59
1.3.6. Transferul prin tensiune superficială STT	61
1.3.6.1. Principiul transferului STT	62
1.3.6.2. Stabilitatea transferului picăturii la sudarea STT	63
1.3.6.3. Avantajele transferului STT	65
1.3.6.4. Caracterizarea transferului STT.....	65
1.3.7. Transferul inerțial al picăturii de metal.....	66
2. CAP. II. ECHIPAMENTE PENTRU SUDAREA MIG/MAG	69
2.1. Alcătuirea echipamentului de sudare MIG/MAG	70
2.2. Sursa de sudare	71
2.3. Surse de sudare sinergice-Invertoare.....	73
2.4. Surse pentru sudarea MIG/MAG în curent pulsant	73
2.5. Dispozitivul de avans al sârmei electrod	76
2.6. Pupitrul de comandă	76
2.7. Pistoletul de sudare.....	77
2.8. Alimentarea cu gaz de protecție	79
2.9. Insalatația de răcire cu apă.....	79

3. CAP. III. SISTEME DE AVANS PRIN IMPULSURI ALE SÂRMEI ELECTROD	80
3.1. Orientări în direcția perfecționării sistemelor de acționare ale sârmei electrod la sudarea MIG/MAG.....	81
3.1.1. Sisteme de avans cu mișcări suplimentare ale sârmei electrod	81
3.1.2. Perfecționarea tuburilor flexibile de ghidare	84
3.1.3. Sisteme de avans prin impulsuri axiale ale sârmei electrod	85
3.1.3.1. Soluții constructive de prindere (apucare) a sârmei electrod.....	85
3.1.3.2. Calculul dispozitivelor de prindere ale sârmei electrod.....	88
3.1.3.2.1. Calculul dispozitivului de prindere cu bile	89
3.1.3.2.2. Calculul dispozitivului de prindere cu excentric	90
3.1.3.2.3. Calculul dispozitivului de prindere cu șaibă.....	91
3.1.3.3. Soluții constructive de sisteme de avans prin impulsuri ale sârmei electrod.	93
3.2. Proiectarea unor sisteme de avans prin impulsuri ale sârmei electrod	98
3.2.1. Sistem de avans prin impulsuri al sârmei electrod cu dispozitiv de prindere cu șaibă	98
3.2.2. Sistem de avans prin impulsuri al sârmei electrod cu dispozitiv de prindere cu bile	101
3.2.3. Sistem de avans prin impulsuri al sârmei electrod electromecanic cu electromagneți	105
3.2.3.1. Schema de principiu a sistemului de avans	105
3.2.3.2. Proiectarea electromagnetului.....	105
3.2.3.3. Alimentarea electromagnetului.....	108
3.2.4. Proiectarea cutiei de comandă a sistemelor de avans prin impulsuri	112
4. CAP. IV. GENERAREA IMPULSURILOR DE CURENT CU AJUTORUL SISTEMELOR DE AVANS PRIN IMPULSURI	115
4.1. Principiul generării impulsurilor de curent cu ajutorul sistemelor de avans prin impulsurile sârmei electrod.....	116
4.2. Determinarea analitică a formei impulsurilor de curent generate cu ajutorul sistemelor de avans prin impulsuri ale sârmei electrod	118
4.2.1. Stabilirea legii de mișcare a sistemului de avans prin impulsuri cu dispozitiv de prindere cu șaibă.....	118
4.2.2. Stabilirea legii de mișcare a sistemului de avans prin impulsuri cu dispozitiv de prindere bile.....	121
5. CAP V. CERCETĂRI EXPERIMENTALE	128
5.1. Cercetări privind funcționarea sistemelor de avans și influența avansului prin impulsuri asupra modului de transfer al picăturii și a îmbinării sudate	129
5.1.1. Instalația de sudare.....	129
5.1.2. Analiza sudării în dioxid de carbon	130
5.1.3. Analiza sudării în amestecuri de gaze.....	137
5.2. Înregistrarea formei impulsului de curent.....	139
5.2.1. Osciloscopul numeric cu memorie Hameg.....	139
5.2.1.1. Caracteristici tehnice.....	139
5.2.1.2. Setarea osciloscopului	140
5.2.1.3. Schema bloc de măsurare și înregistrare.....	141
5.2.2. Tahometrul digital.....	131
5.3. Analiza experimentală a formei impulsului de curent	133
5.4. Interpretarea rezultatelor experimentale	143
5.5. Cercetări privind funcționarea sistemului de avans prin impulsuri cu electromagnet și determinarea experimentală a formei impulsurilor de alimentare ale acestuia	154
5.5.1. Stabilirea frecvenței de lucru a electromagnetului	154
5.5.2. Analiza experimentală a formei impulsurilor de alimentare a electromagnetului...	155

5.6. Cercetări experimentale privind utilizarea sistemelor de avans prin impulsuri cu electromagneți la sudarea WIG.....	162
5.6.1. Motivație.....	162
5.6.2. Instalația de sudare.....	163
5.6.3. Analiza rezultatelor experimentale	167
5.6.4. Perspective	170
5.7. Cercetări experimentale privind utilizarea sistemelor mecanice de avans prin impulsuri ale sârmei electrod la sudarea WIG.....	172
5.7.1. Sudarea mecanizată WIG cu I_s constant și v_{as} pulsant.....	174
5.7.2. Sudarea mecanizată WIG cu I_s pulsant și v_{as} pulsant	174
Concluzii finale	178
Sinteza contribuțiilor personale	181
Bibliografie	186

Coperta 2. Aspectul modurilor de transfer ale picăturii la sudarea MIG/MAG

Coperta 3. Structura genealogică a procedeelor de sudare prin topire cu arcului electric în mediu de gaze protectoare

În decursul secolului al XX-lea sudarea s-a impus ca unul din cele mai universale procese tehnologice aplicate în producția industrială și de bunuri materiale. Există puține procese care să fi cunoscut o dezvoltare atât de importantă și care să poată fi comparate prin diversitate și volum de aplicare ca sudarea. Soluționarea multor probleme de importanță majoră, revoluționară, este indisolubil legată de realizarea unor îmbinări capabile să opereze în condiții dintre cele mai diverse, complexe și extreme. Prin urmare există motive întemeiate să se creadă că sudarea va continua să se dezvolte și să progreseze cu aceeași intensitate și în secolul al XXI-lea, care va aduce în fața omenirii noi provocări dintre cele mai ispititoare, în toate domeniile de activitate, terestru, submarin sau spațial, atât la nivel micro cât și macrocosmic și la care sudarea va avea un rol decisiv.

Studiile întreprinse în țările puternic industrializate ale lumii, ca S.U.A., Japonia sau Comunitatea Europeană, privind dinamica de dezvoltare a procedeelelor de sudare prin topire în ultimii 25 de ani, respectiv ponderea acestor procedee la sfârșitul secolului al XX-lea arată fără echivoc că sudarea în mediu de gaze protectoare cu electrod fuzibil MIG/MAG este procedeul cu cea mai spectaculoasă dinamică, respectiv cu cel mare volum de aplicare la ora actuală. Analiza cuprinde perioada anilor 1975 – 1992 fiind luate în considerare următoarele procedee de sudare prin topire: *sudarea manuală cu electrod învelit (SE)*, *sudarea în mediu de gaze protectoare MIG/MAG*, *sudarea cu sârmă tubulară (ST)*, respectiv *sudarea sub strat de flux (SF)*.

În figura 1, [4], [5], se prezintă evoluția ponderii acestor procedee în perioada analizată, iar în tabelul 1, [32], se prezintă în sinteză aceste date la începutul perioadei considerate, anul 1975, respectiv la sfârșitul acesteia, anul 1992. Analiza efectuată s-a făcut pe baza criteriului *consumului de materiale de sudare*. Se apreciază că situația existentă la nivelul anului 1992 nu va suferi modificări esențiale în perioada următoare putând fi considerată reprezentativă pentru începutul de mileniu III.

Estimarea făcută la începutul anilor '90 este confirmată de analiza cea mai recentă efectuată în această direcție care cuprinde în plus perioada 1990 – 1999, ceea ce confirmă justetea previziunilor făcute în urmă cu un deceniu, respectiv evoluția acestora în perioada imediat următoare [5].

Tabelul 1. Ponderea procedeelelor de sudare prin topire pe plan mondial

Țara	Procedeul de sudare				Total (%)	Anul
	SE (%)	MIG/MAG (%)		SF (%)		
		Sârmă plină	Sârmă tubulară			
Comunitatea Europeană (CE)	58	28	4	10	100	1975
	20	65	6	9		1992
S.U.A.	51	23	17	9	100	1975
	33	42	19	6		1992
Japonia	70	16	2	12	100	1975
	18	54	20	8		1992

Analiza graficului din figura 1 permite desprinderea unor concluzii interesante:

- ✓ Volumul de aplicare a sudării manuale cu electrod învelit a cunoscut o scădere substanțială în toate țările analizate. Se observă însă diferențieri evidente de la o țară la alta. Cea mai mare scădere se constată în Japonia și anume de la aprox. 70% în 1975 la mai puțin de 20% în 1992, iar cea mai mică scădere în S.U.A., de la 51% la 33%, în timp ce în Comunitatea Europeană această scădere a variat de la 58% la 20%.
- ✓ Locul sudării manuale cu electrod învelit a fost luat în exclusivitate de către sudarea în mediu de gaze protectoare MIG/MAG cu sârmă plină și cu sârmă tubulară, ponderea cumulată a acestora fiind la nivelul anului 1992 de aprox. 60% în S.U.A., respectiv de peste 70% în Comunitatea Europeană și Japonia.
- ✓ Ponderea de utilizare a sârmei tubulare diferă mult de la o țară la alta, respectiv de la o perioadă la alta. În S.U.A. sudarea cu sârmă tubulară a fost larg răspândită de mulți ani menținându-se la un procent de aprox. 18% în toată perioada analizată. În Japonia utilizarea timidă a sârmei tubulare la

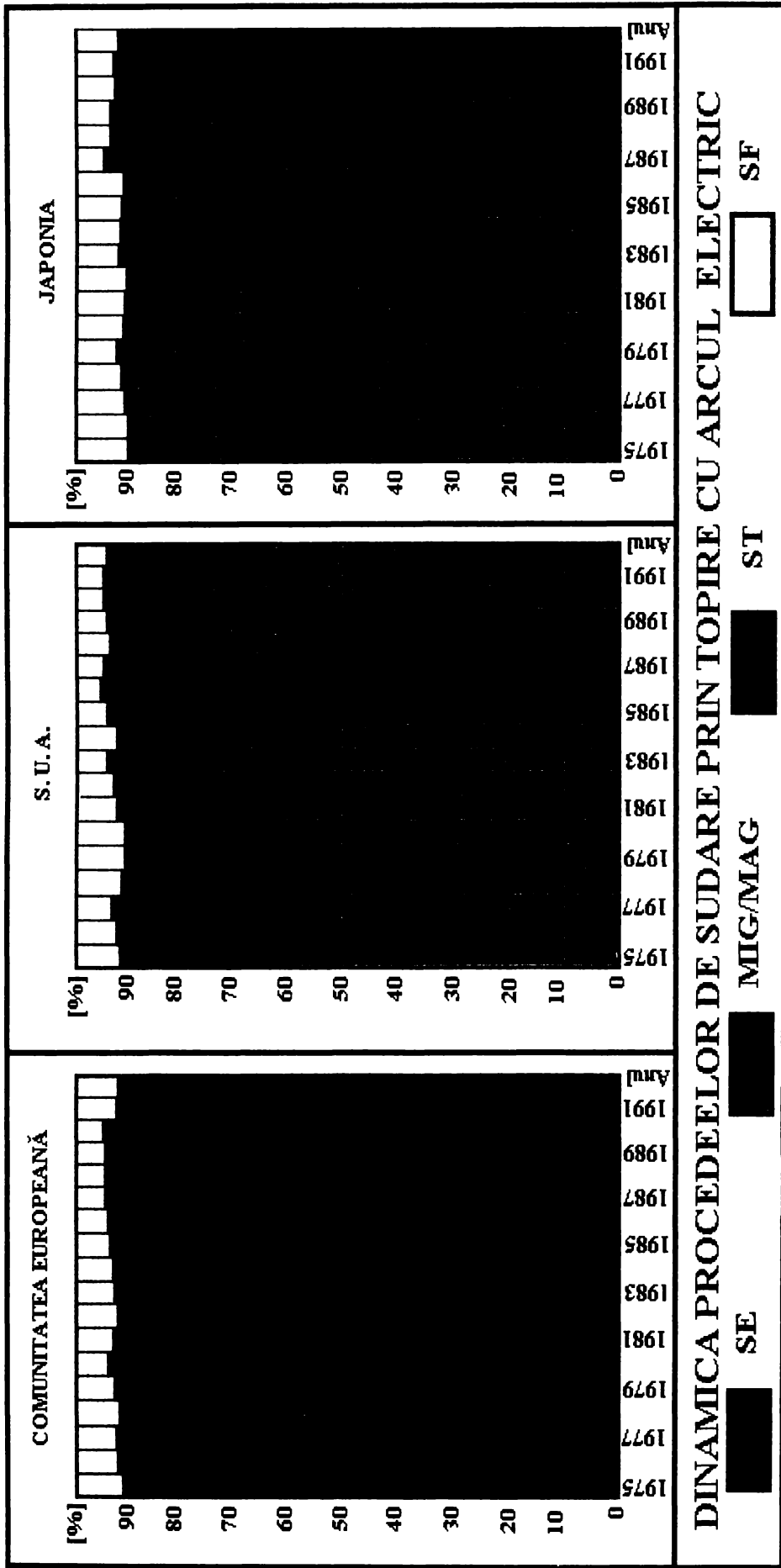


Figura 1. Evoluția procedeeilor de sudare prin topire 1975 – 1992

sfârșitul anilor '70 și începutul anilor '80, a cunoscut o dezvoltare explozivă din a doua jumătate a anilor '80 atingând un procent de 20% după anii '90. În Comunitatea Europeană ponderea utilizării sârmei tubulare s-a menținut la un nivel scăzut, în această perioadă, de sub 5%. În ultimii ani se manifestă însă și aici o creștere rapidă asemănătoare cu cea din Japonia, dar cu o întârziere de aprox. 10 ani.

- ✓ Sudarea MIG/MAG cu sârmă plină și sârmă tubulară se va diversifica în direcții ca: utilizarea amestecurilor de gaze, lărgirea gamei de sârme tubulare cu miez rutilic, bazic sau cu pulbere de fier, extinderea gamei de sârme tubulare cu protecție de CO₂ (estimată la un procent de aprox. 50% în Europa și chiar mai mult în S.U.A. și Japonia) și a sârmei tubulare cu autoprotecție.
- ✓ Sudarea manuală cu electrod învelit se va stabiliza la începutul mileniului III la valori de 20-30%, ca efect a principalelor avantaje conferite de procedeu și anume calitatea deosebită a îmbinării sudate, respectiv flexibilitatea ridicată a procedeului. În acest context un pericol real l-ar putea prezenta doar sârma tubulară cu autoprotecție.
- ✓ Sudarea sub strat de flux SF s-a menținut constantă în toată perioada analizată cu o pondere de 8-10%, cu mici fluctuații de la o țară la alta și se estimează că nici pe viitor nu va cunoaște modificări esențiale rămânând în jurul valorii de 10%.
- ✓ În tabelul 1 este prezentată dinamica principalelor procedee de sudare prin topire din țările puternic industrializate, estimată pentru următorii ani, pe baza consumului de materiale de sudare, prin raportarea la evoluția acestora în ultimii 25 de ani (perioada 1975 – 1999), [61]. Se observă aceleași tendințe dar într-un ritm mult mai lent.

Tabelul 1. Perspectiva de dezvoltare a procedeelor de sudare raportată la evoluția din ultimii 25 de ani

Consum de materiale de adaos/procedeu	Comunitatea Europeană	S.U.A.	Japonia
	(%/an)		
SE (MMA)	-5,56	-4,29	-5,45
MIG/MAG	3,37	3,80	5,27
ST (FCW)	4,51	1,20	12,74
SF (SAW)	-1,00	-1,96	-1,59

Această dezvoltare obiectivă a volumului de aplicare a sudării MIG/MAG în detrimentul sudării SE are la bază principalele avantaje ale sudării în mediu de gaze protectoare:

- *Productivitatea ridicată a procedeului determinată de rata mare a depunerii ($A_D = 2-4g/s$), de pătrunderea ridicată ($j = 150-250 A/mm^2$), respectiv de posibilitatea sudării cu viteze de sudare mari ($v_s = 30-100 cm/min$);*
- *Posibilitatea mecanizării, automatizării sau robotizării cu ușurință a procedeului cu profunde implicații economice și de calitate privind îmbinarea sudată.*

În plus la această dinamică a procedeului MIG/MAG au contribuit indiscutabil și următorii factori:

- Dezvoltarea echipamentelor de sudare, care a cunoscut o adevărată revoluție la sfârșitul anilor '90. Dezvoltarea electronicii de putere și în principal a tranzistoarelor de mare putere (în primul rând IGBT-urile), utilizarea (și perfecționarea) invertoarelor în construcția echipamentelor de sudare a condus la creșterea vitezei de răspuns a sursei la apariția factorilor perturbatori, la posibilitatea modelării după dorință a parametrilor tehnologici de sudare, respectiv la reducerea gabaritului și chiar miniaturizarea surselor de sudare cu profunde implicații asupra calității, respectiv prețului de cost, într-un cuvânt la creșterea performanțelor echipamentelor de sudare MIG/MAG.
- Perfecționarea tehnicilor de filmare rapidă a arcului electric și a transferului de metal topit.
- Lărgirea gamei (mărcilor) de sârmă electrod ceea ce a condus la lărgirea domeniului de utilizare la un număr tot mai mare de materiale metalice.
- Dezvoltarea producției de sârmă tubulară și diversificarea tot mai mare a acesteia d.p.d.v. al destinației, (oțeluri nealiate, slab aliate sau înalt aliate), al caracterului miezului, (rutilic, bazic și mai nou cu pulberi metalice), a asigurării protecției (cu amestecuri de gaze, cu dioxid de carbon, cu autoprotecție). Se lărgiște astfel domeniul de aplicare a sudării în

mediu de gaze protectoare cu electrod fuzibil atât d.p.d.v. al materialului de bază cât mai ales al temperaturii de exploatare a îmbinării sudate (și la temperaturi negative), îmbunătățindu-se totodată caracteristicile mecanice și de tenacitate ale îmbinării sudate.

- Dezvoltarea sudării în amestecuri de gaze.
- Dezvoltarea tehnologiilor de sudare în curent pulsant. Dezvoltarea tehnologiilor de sudare cu puteri mari (curenți înalți).
- Perfecționarea continuă și permanentă de care a avut parte procedeul de sudare MAG/MAG în ultimele două decenii ca de exemplu: perfecționarea echipamentelor și a tehnologiilor de sudare prin utilizarea microprocesoarelor în elaborarea și conducerea procesului tehnologic de sudare, lărgirea gamei materialelor de sudare (sârmă electrod - gaze de protecție), dezvoltarea unui număr mare de variante noi de sudare desprinse din acest procedeu. Este interesant de observat că acest aspect este valabil și în viitor, posibilitățile de perfecționare ale procedurii fiind practic inepuizabile.

În ceea ce privește România, o analiză reală arată la nivelul anului de referință 1989, o situație diametral opusă și anume ponderea cea mai mare de aplicare dintre procedeele de sudare luate în considerare o deținea sudarea manuală cu electrod învelit cu un procent de peste 70%. În ceea ce privește sudarea în mediu de gaze protectoare MIG/MAG se poate spune că până la finele anilor '80 aceasta a cunoscut, cu mici excepții, o slabă dezvoltare, putându-se afirma fără teama de a greși că se găsea încă într-o fază de experimentare, de tatonare, cu un procent în jurul a 5-10%. Sudarea sub strat de flux deținea de asemenea o pondere în jurul valorii de 10%.

Creșterea productivității muncii, a nivelului tehnic a producției, reducerea manoperei și a costurilor de fabricație, implică necesitatea re tehnologizării fabricației de structuri sudate, respectiv creșterea gradului de mecanizare și automatizare a lucrărilor de sudare, [91]. O pondere importantă în acest sens o are desigur extinderea aplicării sudării în mediu de gaze protectoare MIG/MAG și la noi în țară.

În acest context, teza de doctorat își propune în primul rând să aducă o contribuție la dezvoltarea sudării în mediu de gaze protectoare la noi în țară, actualitatea unor astfel de preocupări fiind parcă mai mare ca oricând. Această contribuție vizează domenii diverse ca echipamente, tehnologii, cercetări privind fenomene fundamentale și aplicative specifice sudării în mediu de gaze protectoare. Demersul autorului are acoperire în activitatea didactică și de cercetare științifică pe care a desfășurat-o de-a lungul unei perioade de aproape 20 de ani, în domeniul sudării în general și a sudării în mediu de gaze protectoare în special, din care are a făcut o mare pasiune și căreia i-a acordat un mare timp din activitatea sa.

Subiectul tezei de doctorat, constituie o prioritate pe plan național și printre puținele abordări pe plan mondial. Rezultatele obținute în domeniul cercetării fundamentale și aplicative vin să lărgescă și să întregescă nivelul cunoștințelor acumulate *în domeniul sistemelor de avans prin impulsuri ale sârmei electrod* și, de ce nu, să contribuie la "redescoperirea" acestor echipamente sau la marcarea unui nou început în acest domeniu.

Tematica tezei de doctorat se poate înscrie totodată în preocupările susținute care au loc pe plan mondial, de lărgire și perfecționare continuă a procedurilor de sudare prin topire cu arcul electric în mediu de gaze protectoare, de creștere a performanțelor tehnologice și a echipamentelor de sudare din acest domeniu. Este elocventă în acest sens consultarea principalelor reviste de specialitate pentru a observa ponderea abordărilor tehnologice și de echipament aferente domeniului sudării în mediu de gaze protectoare. Lucrarea își propune să dovedească că și cercetarea românească se poate înscrie pe această linie, că mai poate să contribuie la îmbogățirea și dezvoltarea la un înalt nivel științific a unor domenii de vârf din domeniul sudării.

Teza de doctorat este structurată în 5 capitole, cuprinzând 190 pagini, 161 figuri, 28 tabele și 113 referințe bibliografice.

Capitolul I face o prezentare sistematică și unitară a principalelor moduri de transfer ale picăturii de metal la sudarea MIG/MAG, a mecanismelor și fenomenelor care le guvernează. Sunt analizate forțele care acționează în arcul electric și factorii care le influențează. Este enunțată și dezvoltată în premieră absolută teoria forței inerțiale și a transferului inerțial al picăturii specifice sistemelor de avans prin impulsuri ale sârmei electrod. Se analizează în premieră pentru literatura de specialitate românească transferul prin tensiune superficială a picăturii STT.

Capitolul II prezintă structura și particularitățile echipamentelor de sudare MIG/MAG standard, și la nivel de scheme bloc, structura echipamentelor moderne de sudare cu invertor.

Capitolul III analizează orientările și nivelul realizărilor pe plan mondial privind sistemele de avans prin impulsuri ale sârmei electrod la sudarea MIG/MAG. Sunt prezentate sistemele de avans prin impulsuri ale sârmei electrod proiectate și realizate în cadrul tezei: sistemul de avans prin impulsuri cu dispozitiv de prindere cu șaibă, sistemul de avans prin impulsuri cu dispozitiv de prindere cu bile, sistemul de avans prin impulsuri electromecanic cu electromagnet.

Determinarea analitică și grafică a formei impulsurilor de curent generate cu ajutorul sistemelor de avans prin impulsuri și stabilirea legilor de mișcare ale acestora se prezintă în capitolul IV.

Capitolul V cuprinde cercetările experimentale privind, funcționarea sistemelor de avans realizate, influența asupra modului de transfer, asupra stabilității arcului, asupra calității îmbinării sudate, etc.. Se realizează înregistrarea prin oscilografere, analiza experimentală a formei de variație a curentului și se interpretează rezultatele. Se evidențiază aspectele inedite ale sistemelor de avans prin impulsuri asupra fenomenelor de transfer: transferul inerțial sinergic la sudarea cu transfer prin scurtcircuit, respectiv modificarea transferului picăturii, fără scurtcircuit, în domeniul valorilor reduse și medii ale puterii arcului ca efect al acțiunii forței inerțiale. Se determină experimental forma impulsurilor de alimentare a electromagnetului pentru sistemul de avans realizat. Sunt prezentate cercetările, efectuate în premieră, privind utilizarea sistemelor de avans prin impulsuri pentru antrenarea sârmei electrod la sudarea WIG manuală, respectiv mecanizată și aspectele tehnologice aferente. Se definește teoria transferului sinergic la sudare WIG în curent pulsant, cu material de adaos, abordare absolut nouă pentru acest domeniu.

În încheiere se prezintă contribuțiile personale ale autorului desprinse din parcurgerea tezei de doctorat, respectiv concluziile finale și perspectivele privind utilizarea sistemelor de avans prin impulsuri ale sârmei electrod la sudarea în mediu de gaze protectoare MIG/MAG și WIG.

Activitatea interdisciplinară, laborioasă și complexă, desfășurată la elaborarea tezei s-a bucurat de colaborarea și sprijinul colegilor din catedra UTS și din Facultatea de Mecanică, cărora autorul le mulțumește și le păstrează o profundă recunoștință.

Autorul mulțumește în mod deosebit d-lui Prof. dr. ing. Voicu SAFTA, membru al Academiei Române de Științe Tehnice, conducătorul științific al lucrării, pentru competența cu care a fost îndrumat pe perioada elaborării tezei de doctorat, pentru sprijinul și încrederea acordată autorului în finalizarea acestei activități deloc facile. Cu această ocazie îi adresează mulțumiri și profunda recunoștință pentru fructuoasa colaborare de aproape 20 de ani pe tărâmul activității didactice și de cercetare științifică, dar și educaționale, și își exprimă disponibilitatea pentru colaborări viitoare la fel de fructuoase. Îi dorește să-și păstreze același spirit de fair play de care a dat dovadă cât a fost șef de catedră, să rămână la fel de apropiat de colaboratorii tineri, și nu în ultimul rând îi dorește multă sănătate și bucurii alături de cei dragi.

Pe această cale autorul mulțumește de asemenea colegilor din cadrul Colectivului Utilajul și tehnologia sudării din Facultatea de Mecanică a Universității "Politehnica" din Timișoara, în mijlocul cărora s-a format ca om și specialist, pentru colaborarea și ajutorul acordat, mulțumește conducerii facultății și institutului pentru sprijinul acordat în finalizarea și susținerea tezei.

Un gând aparte se îndreaptă spre colegul Ș.l.ing. Stelian Negoșescu alături de care autorul s-a desăvârșit ca specialist și căruia îi păstrează o profundă recunoștință pentru tot sprijinul, ajutorul, îndrumările și consultările acordate, pentru timpul nemăsurat și cu folos petrecut împreună de-a lungul acestor ani, într-un cuvânt pentru proverbialul altruism al d-lui Negoșescu.

Autorul mulțumește la acest moment de răscruce din viața lui părinților și familiei pentru sprijinul neobosit și dragostea cu care a fost înconjurat în toată viața și în toți acești ani de muncă, simțindu-i mereu aproape.

Nu în ultimul rând mulțumește bunului Dumnezeu pentru sănătatea, înțelepciunea și puterea de muncă de care a avut parte, pentru ducerea la bun sfârșit a acestei întreprinderi atât de dificile și totodată atât de plină de satisfacții.

CAPITOLUL I

ANALIZA TRANSFERULUI DE METAL LA SUDAREA MIG/MAG

(3 subcapitole, 60 pagini, 42 figuri, 13 tabele, 20 relații de calcul)

1.1. Descrierea procedurii de sudare MIG/MAG

1.1.1. Definierea procedurii

Procedura de sudare MIG/MAG face parte din grupa procedurilor de sudare prin topire cu arcul electric în mediu de gaze protectoare, [69]. În funcție de caracterul electrodului această grupă cuprinde două subgrupe mari:

- procedee de sudare cu electrod fuzibil;
- procedee de sudare cu electrod nefuzibil.

Structura genealogică a procedurilor de sudare prin topire cu arcul electric în mediu de gaze protectoare, coperta 3, [64], ilustrează varietatea mare a acestor procedee de sudare, respectiv dimensiunea ponderii lor în contextul procedurilor de sudare prin topire cu arc. Ramurile superioare ale arborelui genealogic cuprind principalele tipuri de arce, respectiv modurile de transfer a picăturii de metal specifice sudării în mediu de gaze protectoare MIG/MAG.

Sudarea MIG/MAG este un procedeu de sudare prin topire cu arcul electric cu electrod fuzibil, pentru protecția arcului și a băii de metal folosindu-se un gaz de protecție. În funcție de caracterul gazului de protecție se disting două variante ale procedurii:

- ✓ sudarea MAG (metal-activ-gaz) în cazul unui gaz activ;
- ✓ sudarea MIG (metal-inert-gaz) în cazul unui gaz inert.

Procedura este întâlnită cel mai frecvent în variantă semimecanizată (viteza de sudare manuală, viteza de avans a sârmei electrod întotdeauna mecanizată), dar procedura se pretează cu ușurință la mecanizare, automatizare și chiar robotizare.

Utilizare. Sudarea MIG/MAG are un grad mare de universalitate, putându-se suda în funcție de varianta de sudare (gazul de protecție) o gamă foarte largă de materiale, oțeluri nealiat cu puțin carbon, oțelurile slab aliate sau înalt aliate, metale și aliaje neferoase (cupru, aluminiu, nichel, titan, etc.), ponderea de aplicare fiind în continuă creștere pe măsura lărgirii și diversificării gamei de materiale de adaos (sârmă electrod), pentru o varietate tot mai mare de materiale metalice. Utilizarea procedurii se face cu prudență în cazul îmbinărilor sudate cu pretenții mari de calitate (îmbinări din clasele superioare de calitate I, II), la care se impune controlul nedistructiv (cu radiații penetrante sau cu ultrasunete), datorită incidenței relativ mari de apariție a defectelor, în principal de tipul porilor, microporilor și lipsei de topire și care pot depăși relativ frecvent limitele admise.

Avantajele procedurii. Principalele avantaje ale procedurii MIG/MAG sunt productivitatea ridicată și facilitatea mecanizării, automatizării sau robotizării.

Productivitatea mare este asigurată de puterea de topire ridicată a procedurii, pătrunderea mare la sudare, posibilitatea sudării cu viteze de sudare mari, respectiv eliminarea unor operații auxiliare. Aceste aspecte sunt determinate de densitățile mari de curent ce pot fi utilizate: 150-250 A/mm² la sudarea MIG/MAG standard, respectiv 300-350 A/mm² la sudarea cu sârmă tubulară.

Flexibilitatea în direcția mecanizării și robotizării este asigurată în principal de posibilitatea antrenării mecanizate a sârmei electrod (sârme subțiri), de modul de realizare a protecției la sudare (cu gaz), de ușurința reglării și controlului parametrilor tehnologici de sudare, de gabaritul relativ mic al capului de sudare, etc..

Performanțele procedurii. În tabelul 1.1 [31], se indică domeniile de valori ale parametrilor tehnologici de sudare MIG/MAG.

Tabelul 1.1. Performanțele procedurii de sudare MIG/MAG,

Nr. crt.	Parametrul tehnologic	Simbolul	U.M.	Domeniul de valori
1	Diametrul sârmei	d_s	mm	0,6...2,4
2	Curentul de sudare	I_s	A	60...500
3	Tensiunea arcului	U_a	V	15...35
4	Viteza de sudare	v_s	cm/min	15...150
5	Debitul gazului de protecție	Q	l/min	8...20

1.1.2. Materiale de sudare

Pentru sudarea MIG/MAG se utilizează ca materiale de sudare sârma electrod și gazul de protecție.

1.1.2.1. Sârma electrod

Sârma electrod se livrează sub formă de bobine, diametrele standardizate cele mai uzuale având valorile: 0,8; 1,0; 1,2; 1,6 mm. Compoziția chimică a sârmei electrod la sudarea MIG/MAG depinde în principal de materialul de bază care se sudează (compoziția chimică) și de gazul de protecție utilizat. La sudarea MIG compoziția chimică a sârmei se alege apropiată de a metalului de bază. În cazul sudării MAG sârma este aliată suplimentar cu elemente dezoxidante ca Mn, Si, Ti.

Clasificarea și simbolizarea sârmelor electrod și a materialului depus prin sudare în mediu de gaze protectoare cu electrod fuzibil pentru oțelurile nealiate și cu granulație fină este prezentată în SR EN 440/96 . În tabelul 1.2 sunt prezentate simbolul și compoziția chimică a sârmelor pentru oțelurile nealiate și cu granulație fină, [106].

1.1.2.2. Gazul de protecție

Gazul de protecție are în principal rolul de a asigura protecția băii metalice și a picăturii de metal topit din vârful sârmei electrod sau la trecerea acesteia prin coloana arcului, împotriva interacțiunii cu gazele din atmosferă, oxigen, hidrogen, azot, etc.. În același timp însă gazul de protecție are o mare influență asupra desfășurării procesului de sudare în ansamblul lui, acționând asupra stabilității arcului, parametrilor tehnologici de sudare, transferului picăturii de metal topit prin coloana arcului, reacțiilor metalurgice la nivelul băii și picăturii de metal, transformărilor structurale, proprietăților mecanice și de tenacitate ale îmbinării, formei și geometriei cusăturii sudate, stropirilor, productivității la sudare, etc.. Aceste influențe complexe sunt determinate de proprietățile termo-fizice și de activitatea chimică a gazelor de protecție, care diferă mult de la un gaz la altul. Prin urmare pentru alegerea corectă a gazului de protecție este necesară cunoașterea acestor proprietăți și efectele pe care acestea le au în procesul de sudare, [1], [3], [9], [12], [21], [31], [35], [40], [88].

Potențialul de ionizare. Acționează asupra condițiilor de amorsare și a stabilității arcului electric, respectiv asupra puterii arcului. Un potențial de ionizare de valoare redusă (argonul) ușurează amorsarea și crește stabilitatea arcului reducând stropirile, pe când un potențial de ionizare de valoare ridicată (heliul) mărește puterea arcului cu efecte asupra productivității la sudare (creșterea pătrunderii, respectiv a vitezei de sudare).

Energia de disociere-recombinare. Este specifică gazelor biatomice CO₂, H₂, O₂. Influențează în mod favorabil bilanțul termic în coloana arcului electric prin îmbunătățirea transferului de căldură spre componente cu efect asupra geometriei cusăturii, vitezei de sudare, etc.. În tabelul 1.3 se prezintă valorile caracteristice ale potențialului de ionizare, respectiv energiei de disociere-recombinare pentru principalele gaze utilizate la sudare, [102], [105].

Tabelul 1.3. Caracteristici ale gazelor de protecție

Gazul de protecție	Potențialul de ionizare	Energia de disociere	Gazul de protecție	Potențialul de ionizare	Energia de disociere
	(V)	(eV)		(V)	(eV)
Ar	15,8	-	CO ₂	14,4	4,3
He	24,6	-	H ₂	13,6	4,5
N ₂	14,5	9,8	O ₂	13,6	5,1

Conductibilitatea termică. Este proprietatea fizică cu cele mai cuprinzătoare efecte și influențe asupra desfășurării procesului tehnologic de sudare. Conductibilitatea termică a gazului de protecție acționează asupra modului de transfer a picăturii prin coloana arcului (este factorul principal care determină modificarea tipului de transfer, globular sau prin pulverizare), repartiției căldurii în coloana arcului și la suprafața componentelor, conductibilității electrice a arcului, parametrilor tehnologici de sudare (tensiunea arcului), puterii arcului (lungimea arcului), stabilității arcului, temperaturii maxime și repartiției acesteia în coloana arcului, formei și geometriei cusăturii, stropirilor, etc..

Tabelul 1.2. Simbolizarea sârmei electrod funcție de compoziția chimică, [106].

Simbolul	Compoziția chimică (%)									
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Mo	Al	Ti și Zr	
G0	Orice compoziție chimică convenită, care nu este specificată în standard									
G2Si	0,06-0,14	0,50-0,80	0,90-1,30	0,025	0,025	0,15	0,15	0,02	0,15	
G3Si1	0,06-0,14	0,70-1,00	1,30-1,60	0,025	0,025	0,15	0,15	0,02	0,15	
G4Si1	0,06-0,14	0,80-1,20	1,60-1,90	0,025	0,025	0,15	0,15	0,02	0,15	
G3Si2	0,06-0,14	1,00-1,30	1,30-1,60	0,025	0,025	0,15	0,15	0,02	0,15	
G2Ti	0,04-0,14	0,40-0,80	0,90-1,40	0,025	0,020	0,15	0,15	0,05-0,20	0,05-0,25	
G3Ni1	0,06-0,14	0,50-0,90	1,00-1,60	0,020	0,020	0,80-1,50	0,15	0,02	0,15	
2Ni2	0,06-0,14	0,40-0,80	0,80-1,40	0,020	0,020	2,10-2,70	0,15	0,02	0,15	
G2Mo	0,08-0,12	0,30-0,70	0,90-1,30	0,020	0,025	0,15	0,40-0,60	0,02	0,15	
G4Mo	0,06-0,14	0,50-0,80	1,70-2,10	0,025	0,025	0,15	0,40-0,60	0,02	0,15	
G2Al	0,08-0,12	0,30-0,50	0,90-1,30	0,025	0,025	0,15	0,15	0,35-0,70	0,15	

Variația conductibilității termice cu temperatura pentru principalele gaze de protecție folosite la sudare este prezentată în figura 1.1, [97], [102]. Se observă că argonul are conductibilitatea termică cea mai scăzută fiind denumit în tehnica sudării “gaz cald”, în timp ce dioxidul de carbon are conductibilitatea termică mult mai mare fiind denumit “gaz rece”. Cea mai mare conductivitate o are hidrogenul.

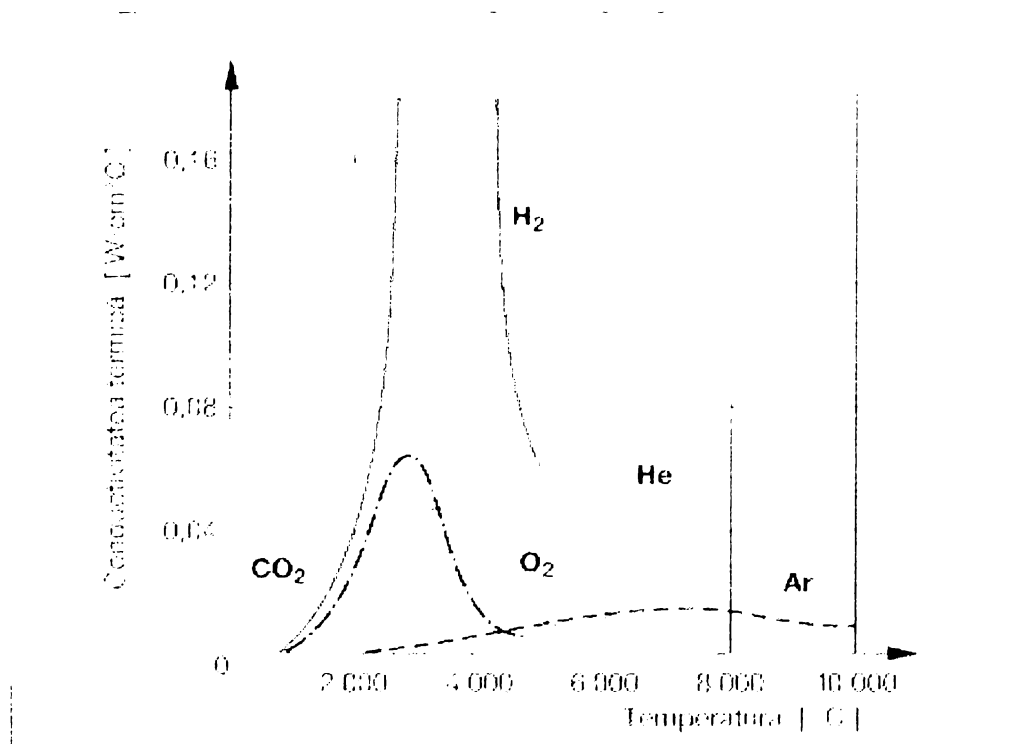


Figura 1.1. Conductivitatea termică a gazelor de protecție

Diversitatea influenței conductibilității termice asupra procesului de sudare este ușor de înțeles dacă analizăm distribuția gradientului de temperatură în coloana arcului în cazul argonului, respectiv dioxidului de carbon, figura 1.2, [9], [33].

Conductibilitatea termică scăzută a argonului determină un gradient mic de temperatură în arc electric ceea ce conduce la repartizarea liniilor de curent din arc pe o secțiune mărită a coloanei acestuia (vezi porțiunea hașurată), figura 1.2.a, având drept consecință creșterea conductibilității electrice a coloanei arcului electric (conductibilitatea electrică este invers proporțională cu conductibilitatea termică).

În cazul dioxidului de carbon miezul coloanei arcului (cel care conduce curentul electric) este foarte îngust ca efect a conductibilității termice mari a gazului, respectiv a fenomenului de disociere – recombinare. Pierderea rapidă a căldurii din coloana arcului este echivalentă cu o constrângere din exterior a zonei centrale a miezului coloanei ceea ce conduce la creșterea densității de curent din arc și prin urmare așa cum se poate observa, la creșterea temperaturii în axa coloanei arcului la valori mai mari decât cele corespunzătoare arcului în argon.

Conductibilitatea electrică diferită a coloanei arcului în cazul celor două gaze are consecințe asupra rezistenței electrice a acestuia. Astfel rezistența arcului în argon este mai mică decât în dioxid de carbon. Rezultă o cădere de tensiune mai redusă a arcului în Ar decât în CO₂ și prin urmare o valoare mai mică a valorii tensiunii arcului la sudarea în Ar comparativ cu sudarea în CO₂, cu toate că potențialul de ionizare al Ar este mai mare decât la CO₂. Într-adevăr la sudarea în Ar sau amestecuri de gaze Ar cu CO₂ tensiunea arcului se reduce cu 2 – 4 V în funcție de procentul de CO₂ din amestec, desigur luând în considerare aceeași valoare a curentului de sudare.

Repartiția liniilor de curent în cazul celor două gaze explică și influența asupra transferului de metal așa cum se va demonstra în continuare.

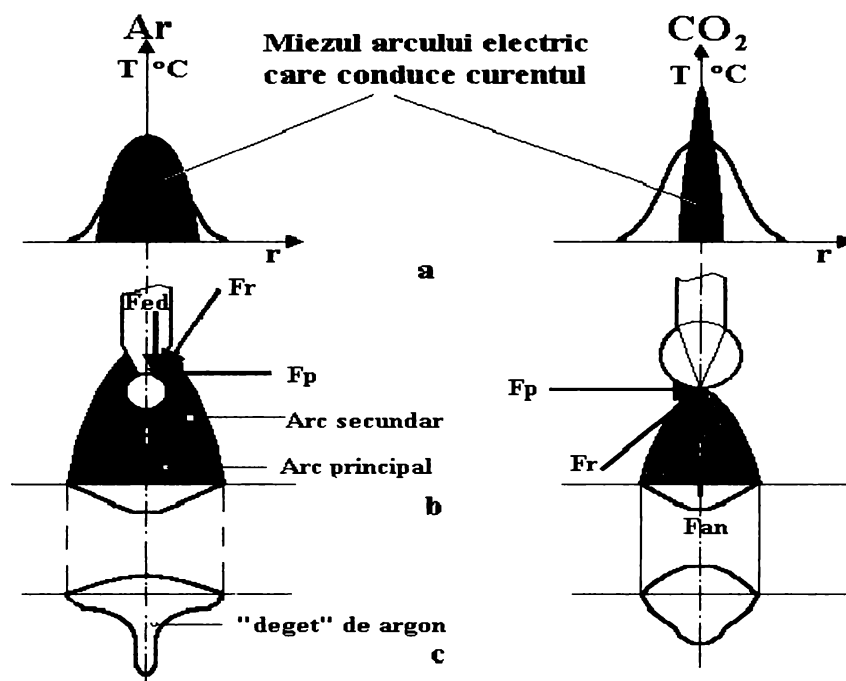


Figura 1.2. Gradientul de temperatură al arcului electric funcție de gazul de protecție, [9].

În cazul argonului miezul coloanei arcului face ca arcul electric să “îmbrățișeze” capătul liber a sârmei electrod, figura 1.2.b, extinzându-se de la vârful ei pe suprafața laterală a sârmei, datorită diametrului mic al acesteia. Practic arcul electric înconjoară sârma pe o anumită porțiune a capătului liber ceea ce determină transferul căldurii arcului la electrod atât prin suprafața frontală a sârmei cât și prin suprafața laterală a ei, conducând la încălzirea neuniformă și progresivă a capătului sârmei în zona de acțiune a arcului. Aceasta determină topirea capătului sârmei în toată secțiunea ei, la vârf, și o topire parțială pe secțiune, de la exterior spre interior, în funcție de nivelul temperaturii atinse în fiecare punct a secțiunii considerate. Intensitatea gradului de topire scade evident, o dată cu îndepărtarea de vârf. Sub acțiunea conjugată a forței de tensiune superficială și a forței electromagnetice (pinch) are loc concentrarea metalului topit în vârful sârmei sub forma unei picături sferice, însoțită de efectul de “autoascuțire” a electrodului pe porțiunea în care s-a produs topirea parțială a secțiunii sârmei, în zona de acțiune a arcului electric. Fenomenul de ascuțire a capătului sârmei determină reducerea secțiunii și în consecință creșterea densității de curent la interfața picătură de metal – sârmă ceea ce conduce la creșterea puternică a temperaturii până la atingerea temperaturii de evaporare a punții topite. Sub acțiunea vaporilor de metal picătura este împinsă în baia topită creindu-se premisele formării unei noi picături. Acest mecanism de formare și desprindere a picăturii din vârful sârmei determină formarea unor picături de dimensiuni mici ($d_p \leq d_s$), echivalente transferului prin pulverizare.

În cazul dioxidului de carbon miezul foarte îngust al arcului determină concentrarea punctiformă a acestuia în vârful sârmei (în pata anodică). Prin urmare transferul de căldură al arcului se face numai prin suprafața frontală a sârmei electrod. Totodată datorită temperaturii ridicate a miezului coloanei (mai mare ca la Ar) și a densității foarte mari a curentului în pata anodică (concentrare punctiformă) are loc creșterea locală a temperaturii petei atingând temperatura de vaporizare a fierului (aprox. 3200°C). Jetul de vapori formați acționează ca o forță de reacție împingând în sus și lateral metalul topit. Sub acțiunea forței de tensiune superficială și a forței de reacție a vaporilor de metal, metalul topit se acumulează în vârful sârmei sub forma unor picături mari de metal ($d_p > 1,2d_s$). Picătura crește în continuare până când sub acțiunea greutateii proprii se detașează și se transferă în baia metalică sub forma unor picături mari sau globule, așa numitul transfer globular specific sudării în CO_2 sau amestecurilor bogate în CO_2 . În cazul amestecurilor de gaze Ar + CO_2 fenomenul este insesizabil dacă proporția de CO_2 este mai mică de 20%, se manifestă tot mai pregnant dacă procentul depășește 20% și are o comportare similară cu cea a transferului în CO_2 100% dacă procentul depășește 30% CO_2 în amestec.

În fine, gradientul de temperatură diferit din coloana arcului în cazul celor două gaze de protecție influențează semnificativ și geometria cusăturii sudate, figura 1.2.c. În cazul argonului valoarea ridicată a temperaturii arcului electric este limitată doar la zona centrală corespunzătoare miezului coloanei după care temperatura scade brusc la valori reduse, ce nu pot produce o încălzire semnificativă a zonelor de incidență ale arcului pe componente. Concentrarea puternică a căldurii în miezul coloanei arcului, la argon, produce o încălzire locală a metalului de bază însoțită de o topire adâncă, respectiv o pătrundere mare, dar limitată la o zonă restrânsă. Aceasta este amplificată suplimentar de disiparea rapidă a căldurii în zonele adiacente (reci) ale metalului de bază fără să producă o încălzire semnificativă la nivelul temperaturii de topire a acestor zone. Efectul acestor fenomene este formarea unei zone topite înguste și adânci, așa numitul “*deget de argon*”, specific sudării în argon sau amestecuri bogate în argon, deosebit de defavorabil din punct de vedere tehnologic datorită pericolului de apariție a defectelor de îmbinare, lipsă de topire sau lipsă de pătrundere, respectiv pericol de fisurare (concentrator de tensiune).

În cazul dioxidului de carbon temperatura din coloana arcului se menține încă la valori ridicate, capabile să producă încălziri semnificative a zonelor de incidență, la distanțe mult mai mari față de axa coloanei decât în cazul argonului, (vezi repartitia temperaturii pe raza coloanei arcului, figura 1.2.a). Are loc astfel o încălzire și topire a metalului de bază pe o zonă mai extinsă atât în adâncime cât mai ales lateral, cu efecte asupra îmbunătățirii geometriei cusăturii caracterizată printr-o pătrundere uniformă. La această încălzire a metalului de bază contribuie de asemenea și căldura cedată prin fenomenul de recombinare a gazului ce are loc în zona componentelor, respectiv a băii metalice, ca efect a temperaturii scăzute din această zonă (1800-2000°C), propice reacțiilor de recombinare. Se apreciază că d.p.d.v. tehnologic geometria cusăturii la sudarea în CO₂ este cea mai favorabilă. Prin urmare amestecarea celor două gaze Ar și CO₂ va conduce și la modificarea geometriei cusăturii sudate. Aceasta este una din rațiunile principale care stau la baza sudării în amestecuri de gaze, Ar + CO₂, a oțelurilor nealiate sau slab aliate și anume obținerea unei geometrii mai favorabile a cusăturii sudate.

Densitatea. Influențează nivelul de protecție a arcului electric și a băii de metal topit, respectiv producerea fenomenului de microsablare la sudarea în mediu de gaze inerte. În tabelul 1.4 se prezintă caracteristicile gazelor utilizate la sudare, [105].

Tabelul 1.4. Proprietăți fizico – chimice ale gazelor de protecție utilizate la sudare

Tipul gazului	Simbolul chimic	Specificată la 0°C și 1,013barr (0,101MPa)		Punct de fierbere la 1,013 barr (°C)	Activitatea chimică
		Densitatea ($\rho_{aer}=1,293$) (kg/m ³)	Densitatea (relativă față de aer)		
		Argon	Ar	1,784	
Heliu	He	0,1784	0,1380	-268,9	Inert
Dioxid de carbon	CO ₂	1977	1,529	-78,5	Oxidant
Oxygen	O ₂	1,429	1,105	-183	Oxidant
Azot	N ₂	1,251	0,968	-195,8	Nereactiv
Hidrogen	H ₂	0,090	0,070	-252,8	Reducător

Densitatea heliului mult mai mică decât a argonului (de ≈ 10 ori), respectiv mai mică decât a aerului determină o protecție slabă a arcului și a băii metalice, heliul având tendința de ridicare reduce gradul de protecție la sudare. Prin urmare pentru a asigura un nivel de protecție corespunzător se impune creșterea (dublarea) debitului de heliu în comparație cu debitul de argon cu efecte majore asupra costului gazului de protecție.

Pe de altă parte heliul fiind mult mai ușor decât argonul nu produce fenomenul de microsablare (îndepărtarea peliculei de oxizii greu fuzibili de pe suprafața metalelor și aliajelor ușoare), ionii de heliu mult mai ușori decât ionii de argon nu au energie suficient de mare pentru dislocarea peliculei de oxizi.

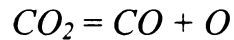
Activitatea chimică. Prin reacțiile chimice ce au loc în coloana arcului și la nivelul băii metalice activitatea chimică a gazului de protecție influențează comportarea metalurgică. Din acest punct de vedere la sudarea MIG/MAG se disting două categorii de gaze.

Gazele inerte sunt gazele care nu reacționează chimic cu elementele din coloana arcului și din baia metalică. Din această grupă fac parte argonul și heliul.

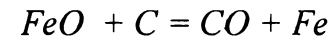
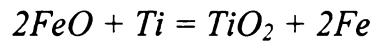
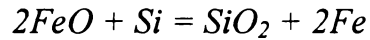
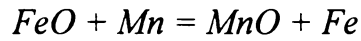
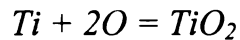
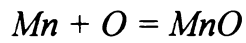
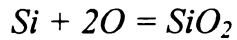
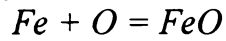
Gazele active sunt gazele care reacționează chimic cu elementele din arc și din baia de metal. Cel mai utilizat gaz din această grupă este dioxidul de carbon, la care se mai adaugă și oxigenul.

În acest caz în coloana arcului și la nivelul băii au loc următoarele reacții chimice, [26], [92]:

- disocierea dioxidului de carbon la $T > 1600^{\circ}\text{C}$ (disocierea este completă la $T > 4000^{\circ}\text{C}$):



- reacții de oxidare și reducere:



Se constată că prezența oxigenului în coloana arcului determină oxidarea sau arderea unor elemente de aliere. Aceasta conduce la pericolul formării oxizilor de fier în cusătură cu efecte nefavorabile asupra reducerii caracteristicilor mecanice și de reziliență. Diminuarea fenomenului se face prin alierea sârmei electrod cu elemente dezoxidante ca Mn, Si, Ti care au aviditate mai mare față de oxigen decât fierul, reducând pericolul de oxidare a acestuia. Cel mai puternic dezoxidant este titanul. Oxizii de mangan, siliciu, titan formați, fiind insolubili în metalul topit ies la suprafața băii și se regăsesc pe cusătură sub formă de mici “insule” de zgură de culoare brună cu aspect sticlos.

Reacțiile chimice la nivelul băii de metal topit pot conduce de asemenea la pericolul formării gazelor în baia metalică, ca de exemplu oxidul de carbon, având drept consecință pericolul apariției porilor în cusătura sudată. Evitarea apariției porilor în cusătură se poate realiza prin alegerea corectă a cuplului sâmbă -gaz de protecție, corelată și cu alegerea optimă a parametrilor tehnologici de sudare, în special tensiunea arcului

Prezența oxigenului în coloana arcului conduce la oxidarea suprafeței picăturilor de metal formate la capătul sârmei electrod și prin urmare la micșorarea tensiunilor superficiale ce acționează asupra picăturii. Prin urmare desprinderea picăturii din vârful sârmei electrod se face mult mai ușor și mai rapid. Efectul benefic este finisarea transferului picăturilor de metal, îmbunătățirea stabilității arcului și reducerea împrăștiilor de metal prin stropi. Se remarcă în acest sens utilizarea oxigenului în proporție de 1-3% sau a bioxidului de carbon în proporție de 2-5% în amestec cu argonul la sudarea oțelurilor inoxidabile. Procente mai mari de gaz oxidant nu sunt recomandate deoarece se produce o oxidare nepermisă a metalului cusăturii, respectiv la utilizarea bioxidului de carbon, în plus pericolul alierii cu carbon și prin urmare pericolul fragilizării cusăturii ca urmare a formării carburilor de crom.

Reacțiile de oxidare la nivelul băii de metal topit, fiind reacții exoterme, conduc la creșterea temperaturii băii (de la 1800°C la 2200°C) cu consecințe asupra creșterii fluidității acesteia, creșterii pătrunderii sau posibilității măririi vitezei de sudare. Corelată cu reducerea tensiunilor superficiale la interfața baie topită – metal solid, determină îmbunătățirea procesului de umectare cu efecte favorabile asupra lățirii, respectiv reducerii supraînălțării cusăturii sudate.

Tot d.p.d.v. a activității chimice remarcăm utilizarea hidrogenului ca și gaz reducător în amestecurile gazelor de protecție, ”*de formare*”, folosite la protecția rădăcinii pe partea opusă sudării, la sudarea oțelurilor aliate Inox și nu numai. Amestecul cel mai frecvent utilizat este format din azot plus 5...10 % hidrogen. Hidrogenul reduce eventualele urme de oxigen rămase în zona rădăcinii evitând astfel oxidarea acesteia cu consecințe asupra scăderii rezistenței la coroziune. Utilizarea hidrogenului trebuie făcută cu grijă având în vedere pericolul de explozie pentru anumite concentrații în aer.

Puritatea. Gazele utilizate la sudare trebuie să aibă o puritate foarte înaltă. În tabelul 1.5 se prezintă cerințele privind puritatea gazelor și amestecurilor de gaze utilizate la sudare, [105].

Lipsa de puritate a gazelor determină pericolul producerii defectelor în îmbinarea sudată, în special a porilor, creșterea stropirilor și a pierderilor de material de adaos prin stropi, pericolul fisurării

la rece, instabilitatea arcului electric etc.. Prezența apei în gazul de protecție produce pori, stropiri intense sau chiar pericolul “înghețării” reductorului de presiune cu formarea unui dop de gheață pe canalul fin al acestuia cu consecințe asupra obturării ieșirii gazului din butelie și a asigurării protecției necesare la sudare. Evitarea unor astfel de fenomene neplăcute se poate face prin purjarea buteliei înainte de utilizare, prin montarea unui deshidrator de gaz pe butelie care conține o substanță higroscopică (silicagel) care absoarbe umiditatea, respectiv prin montarea pe butelie a unui preîncălzitor alimentat la o tensiune de 24 V de la sursa de sudare. Ca regulă generală însă nu este recomandată utilizarea la sudare a unor gaze care nu satisfac condițiile de calitate impuse de norme.

Tabelul 1.5. Purități și puncte de rouă ale gazelor și amestecurilor de gaze

Grupa	Puritate minimă (%) în volum	Punct de rouă maxim la 1,013 barr (°C)	Umiditate maximă (ppm)
R	99,95	-50	40
I	99,99	-50	40
M1	99,70	-50	40
M2	99,70	-44	80
M3	99,70	-40	120
C	99,70	-35	200
F	99,50	-50	40
Oxigen	99,50	-35	200
Hidrogen	99,50	-50	40

Clasificarea gazelor de protecție utilizate la sudarea în mediu de gaze protectoare în conformitate cu caracteristicile chimice ale acestora și care constituie o bază pentru alegerea combinațiilor sârmă electrod – gaz de protecție la sudarea diferitelor materiale metalice este prezentată în standardul SR EN 439/96.

În tabelul 1.6 este prezentată clasificarea gazelor de protecție pentru sudarea cu arcul electric, în funcție de activitatea chimică, respectiv compoziția gazului, [105].

În tabelul 1.7 se prezintă principalele gaze de protecție produse la firma S.C. LINDE - Romania SRL utilizate la sudarea în mediu de gaze protectoare, [97].

Proprietățile termo-fizice ale gazelor de protecție acționează asupra procesului de sudare de o manieră complexă, în funcție de tipul gazului, respectiv de concentrația gazelor în amestec.

Efectele principalelor gaze de protecție asupra caracteristicilor pe ansamblu la sudarea MIG/MAG sunt prezentate sintetic în tabelul 1.8, [32], [97].

633.080
369B

Tabelul 1.6. Clasificarea gazelor de protecție pentru sudare și tăiere

Grupa	Nr. de identi- ficare	Constituenți, procente de volum						Aplicații tipice	Observații
		Oxidant		Inert		Redu- cător	Nere- activ		
		CO ₂	O ₂	Ar	He				
R	1							WIG, sudarea cu plasmă, tăiere cu plasmă, protecție la rădăcină	Reducător
	2			Rest ²⁾		H ₂	N ₂		
I	1			100				MIG, WIG, sudare cu plasmă, protecție la rădăcină	Inert
	2			Rest ²⁾	100				
	3			Rest ²⁾	0 - 95				
M1	1	0 - 5		Rest ²⁾		0 - 5		MAG	Mai puțin oxidant
	2	0 - 5		Rest ²⁾		-			
	3		0 - 3	Rest ²⁾		-			
	4	0 - 5	0 - 3	Rest ²⁾		-			
M2	1	5 - 25		Rest ²⁾				MAG	Mai mult oxidant
	2		3 - 10	Rest ²⁾					
	3	0 - 5	3 - 10	Rest ²⁾					
	4	5 - 25	0 - 8	Rest ²⁾					
M3	1	25 - 50		Rest ²⁾				MAG	Mai mult oxidant
	2		10 - 15	Rest ²⁾					
	3	5 - 50	8 - 15	Rest ²⁾					
C	1	100						Tăiere cu plasmă, Protecție la rădăcină	Nereactiv
	2	Rest	0 - 30			0 - 50	Rest		
F	1							Tăiere cu plasmă, Protecție la rădăcină	Nereactiv
	2								

1) În cazul în care se adaugă componente care nu sunt cuprinse în tabel, amestecul de gaze se notează ca un amestec de gaze special și poartă prefixul S.

2) Argonul poate fi înlocuit cu heliu până în proporție de 95%.

Tabelul 1.7. Gaze de protecție produse la S.C. LINDE România – SRL

Gaz de protecție	Conform SR EN 439	Ar	O ₂	CO ₂	He	N ₂	H ₂
		(%)					
Ar	I 1	100					
He	I 2				100		
CO ₂	C 1		100				
CORGON ^Σ 1	M 23	91	5	4			
CORGON ^Σ 2	M 24	83	13	4			
CORGON ^Σ 10	M 21	90	10				
CORGON ^Σ 15	M 21	85	15				
CORGON ^Σ 18	M 21	82	18				
CORGON ^Σ 20	M 21	80	20				
CORGON ^Σ 25	M 21	75	25				
CORGON ^Σ S 5	M 22	95		5			
CORGON ^Σ S 8	M 22	92		8			
T.I.M.E.	M 24(1)	65	8	0,5	26,5		
CORGON ^Σ He 30	M 21(1)	60	10		30		
CRONIGON ^Σ 2	M 12	97,5	2,5				
CRONIGON ^Σ He 50	M 12(2)	48	2		50		
CRONIGON ^Σ He 20	M 12(1)	78	2		20		
CRONIGON ^Σ He 30 S	M 11(1)	Rest	0,05		30		
CRONIGON ^Σ He 50 S	M 12(2)	Rest	0,05		50		
CRONIGON ^Σ S 1	M 13	99		1			
CRONIGON ^Σ S 3	M 13	97		3			
VARIGON ^Σ S	M 13	Rest		0,03			
VARIGON ^Σ He 30	I 3	70			30		
VARIGON ^Σ He 50	I 3	50			50		
VARIGON ^Σ He 70	I 3	30			70		
VARIGON ^Σ He 30 S	M 13(1)	Rest		0,03	30		
VARIGON ^Σ H 2	R 1	98					2
VARIGON ^Σ H 5	R 1	95					5
VARIGON ^Σ H 6	R 1	93,5					6,5
VARIGON ^Σ H 10	R 1	90					10
VARIGON ^Σ H 15	R 1	85					15
VARIGON ^Σ H 20	R 2	80					20
N ₂	F 1					100	
Gaz de formare 95/5	F 2					95	5
Gaz de formare 90/10	F 2					90	10
Gaz de formare 85/15	F 2					85	15
Gaz de formare 80/20	F 2					80	20

Tabelul 1.8. Efectele principalelor gaze de protecție asupra unor caracteristici la sudare.

Caracteristica	Gazul de protecție		
	Ar + CO ₂	Ar + O ₂	CO ₂
Pătrunderea: <ul style="list-style-type: none"> poziție normală poziții dificile 	<ul style="list-style-type: none"> bună mai sigură o dată cu creșterea proporției de CO₂ 	<ul style="list-style-type: none"> bună poate deveni critică datorită curgerii băii în fața arcului 	<ul style="list-style-type: none"> bună cea mai bună (sigură)
Solicitarea termică a pistolului	scade cu creșterea proporției de CO ₂	cea mai ridicată	cea mai redusă
Grad de oxidare (cantitatea de zgură)	crește cu creșterea proporției de CO ₂	ridicat (în special la amestecurile cu 8% O ₂)	ridicat
Porozitatea	scade cu creșterea proporției de CO ₂	cel mai sensibil	cel mai puțin sensibil
Stropirea	crește cu creșterea proporției de CO ₂	cea mai redusă	cea mai ridicată (crește o dată cu creșterea puterii arcului)
Aportul termic	crește cu creșterea proporției de CO ₂ , viteză de răcire mai scăzută, pericol de fisurare mai redus	cel mai mic, viteză de răcire mare, pericol de fisurare	ridicat, viteză de răcire scăzută, pericol de fisurare mic
Caracteristici mecanice și tehnologice	bune, respectiv medii la conținuturi mari de CO ₂ (30%)	bune, respectiv scăzute la conținuturi mari de O ₂ (12%)	medii
Umplerea rostului	scade cu creșterea proporției de CO ₂ mai lată și mai plană; zgură mai puțină dar cu "insule" mai mari;	cea mai bună	mai redusă decât la amestecuri
Aspectul cusăturii	<ul style="list-style-type: none"> prin scurtcircuit intermediar prin pulverizare (CO₂ < 20%) pulsat sinergic (CO₂ < 20%) arc rotitor 	<ul style="list-style-type: none"> prin scurtcircuit intermediar prin pulverizare pulsat sinergic arc rotitor 	<ul style="list-style-type: none"> prin scurtcircuit intermediar globular (arc lung)
Tipul de transfer a picăturii	<ul style="list-style-type: none"> prin scurtcircuit intermediar prin pulverizare (CO₂ < 20%) pulsat sinergic (CO₂ < 20%) arc rotitor 	<ul style="list-style-type: none"> prin scurtcircuit intermediar prin pulverizare pulsat sinergic arc rotitor 	<ul style="list-style-type: none"> prin scurtcircuit intermediar globular (arc lung)

1.2. Forțele dezvoltate în arcul electric și acțiunea lor asupra transferului de metal la sudarea MIG/MAG.

Transferul de metal la sudarea prin topire cu arcul electric cu electrod fuzibil este un proces complex, guvernat de o diversitate mare de fenomene de natură electrică, electromagnetică, mecanică, chimică, termodinamică, etc., respectiv de intensitatea de manifestare a acestor fenomene în anumite condiții date de sudare. Aceste fenomene se manifestă prin dezvoltarea în arcul electric a unor forțe, a căror orientare și mărime determină prin echilibrul realizat la un moment dat desprinderea sau menținerea picăturii de metal topit în vârful electrodului fuzibil. Prin urmare acțiunea acestor forțe poate fi în sens favorabil desprinderii picăturii sau a împiedicării acestei desprinderi, ruperea echilibrului de forțe prin creșterea ponderii unora în detrimentul celorlalte producând desprinderea picăturii de metal și transferul acesteia prin coloana arcului electric în baia metalică.

Modul de transfer a picăturii de metal la sudarea prin topire cu arcul electric cu electrod fuzibil diferă foarte mult de la un procedeu de sudare la altul, iar în cadrul aceluiași procedeu depinde de condițiile tehnologice concrete de sudare. Institutul Internațional de Sudură I.I.S./I.I.W. a făcut o clasificare a formelor de transfer a picăturii de metal, [77], [78].

În cazul sudării în mediu de gaze protectoare cu electrod fuzibil MIG/MAG, modul de transfer a metalului topit cunoaște cea mai mare varietate de forme, ceea ce determină creșterea complexității procesului tehnologic la sudare. Practic modul de transfer a metalului topit la sudarea MIG/MAG poate fi considerat un parametru tehnologic nou, specific acestui procedeu, de care trebuie să se țină cont la elaborarea tehnologiei de sudare, prin implicațiile tehnologice și nu numai pe care le are. Modul de transfer este o caracteristică principală a procedurii de sudare MIG/MAG.

Pentru explicarea și înțelegerea corectă a fenomenelor care guvernează transferul de metal topit prin coloana arcului este importantă cunoașterea principalelor tipuri de forțe care acționează asupra picăturii și factorii care influențează mărimea acestora. De valoarea și ponderea acestor forțe depinde în anumite condiții concrete de sudare modul de transfer a picăturii la sudarea MIG/MAG. În cele ce urmează se prezintă studiul și analizarea forțelor din arcul electric și a fenomenelor care le guvernează.

Diversitatea fenomenelor din arcul electric determină apariția următoarelor forțe care acționează în arc și asupra picăturii de metal topit, figura 1.3, [6], [10], [15], [32]:

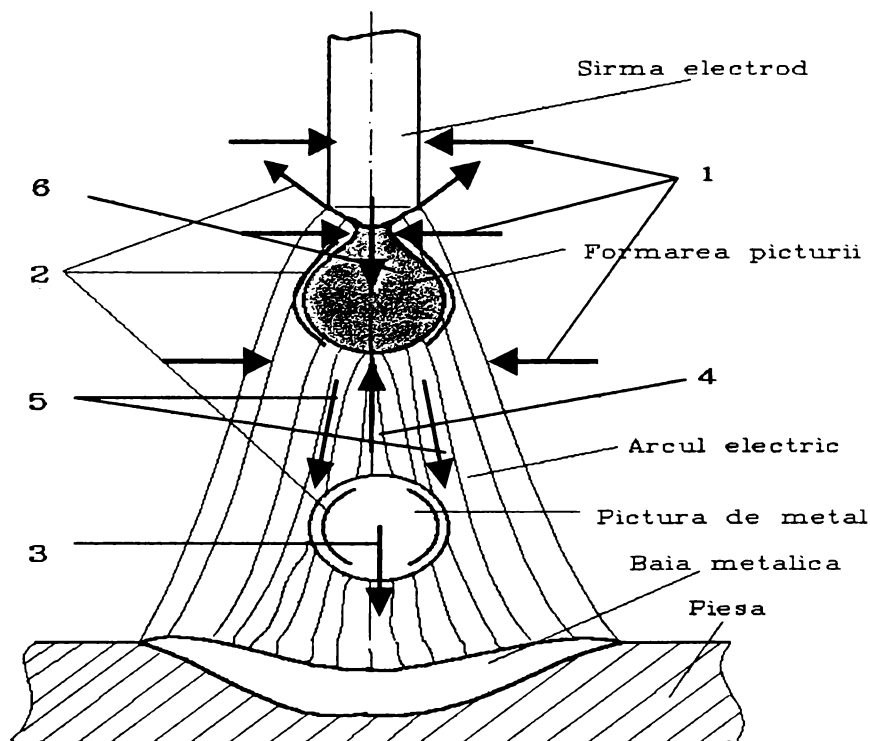


Figura 1.3. Forțele dezvoltate în arcul electric

- 1 – forța electromagnetică F_{em} (forța pinch F_p);
- 2 – forța tensiunii superficiale F_{σ} ;
- 3 – forța gravitațională F_g ;
- 4 – forța de reacție anodică F_{an} ;
- 5 – forța jetului de plasmă F_j ;
- 6 – forța electrodinamică F_{ed} ;

1.2.1. Forța electromagnetică F_{em} (forța pinch F_p)

Forța electromagnetică F_{em} sau forța pinch F_p așa cum mai este întâlnită în literatura de specialitate, este generată de interacțiunea liniilor de curent de același sens care parcurg un conductor electric (sârma electrod și coloana arcului), interacțiune manifestată prin tendința de apropiere a acestora. Fenomenul este vizibil la trecerea curentului printr-un mediu fluid (lichid sau gaz), fiind descoperit întâmplător în anul 1911 în cadrul unui experiment la trecerea unui curent electric printr-o vână de mercur, când s-a observat că o dată cu creșterea curentului electric din circuit are loc o strangulare a acesteia, iar peste o valoare critică a curentului se produce chiar ruperea vânei. De aici și denumirea de forță “pinch” dată de autorul descoperirii.

Parcursarea liniilor de curent prin mediul lichid așa cum este vârful topit a sârmei electrod determină constrângerea (strangularea) mediului respectiv însoțită de formarea și desprinderea unei picături de metal topit din vârful sârmei. Fenomenul este însoțit și de un efect de autoascuțire a vârfului sârmei electrod cu efecte favorabile asupra stabilității amorsării sau reaprinderii arcului electric. Acumularea sub influența forțelor de tensiune superficială a unei noi cantități de metal topit în vârful sârmei electrod, sub influența arcului electric, va produce prin același efect sub acțiunea forței “pinch” o nouă picătură de metal ș.a.m.d.. Cu cât valoarea acestei forțe este mai mare cu atât desprinderea picăturii din vârful sârmei se face mai repede, respectiv transferul metalului topit are loc în picături mai fine și cu o frecvență mai mare.

Modulul forței “pinch” depinde în principal de valoarea curentului de sudare, fiind direct proporțional cu pătratul acestuia. Pentru calculul forței de contracție “pinch” F_p care acționează la distanța r față de axa conductorului se folosește relația, [7],[80]:

$$F_p = \frac{20 \cdot \mu}{8 \cdot \pi^2} \cdot \frac{I^2 \cdot r^4}{a^4} \quad 1.1$$

Presiunea maximă în axa conductorului datorită forței radiale “pinch” este dată de relația, [80],[7]:

$$p_{max} = \frac{20 \mu I^2}{4 \pi^2 a^2} \quad 1.2$$

unde:

I_s – curentul de sudare;

μ – permeabilitatea magnetică;

r – distanța punctului de aplicație a forței pinch față de axa picăturii (sârmei);

a – raza conductorului (sârmei);

Pentru calculul aproximativ a forței F_p , ilustrativ pentru sudare, se poate folosi relația, [64]:

$$F_p = \frac{I_s^2}{2} \text{ [dyn]} \quad 1.3$$

Fiind direct proporțională cu pătratul curentului de sudare rezultă că ponderea forței “pinch” F_p la sudare este mare la utilizarea curenților de sudare de valori ridicate. Acesta este cazul sudării MIG/MAG cu transfer prin pulverizare (spray arc), și cazul sudării MIG/MAG în curent pulsant, unde forța “pinch” de valori ridicate favorizează transferul metalului topit în picături foarte fine, evitând pericolul scurtcircuitării băii metalice cu toate dezavantajele acesteia. Și în cazul transferului prin scurtcircuit influența forței “pinch” F_p se manifestă în faza de scurtcircuitare a arcului electric de către

picătura de metal topit ca urmare a creșterii valorii curentului de scurtcircuit la valori mari comparativ cu valoarea curentului de sudare. În acest caz forța pinch grăbește ruperea punții de metal dintre baia metalică și vârful sârmei electrod favorizând reamorsarea arcului și creșterea stabilității acestuia.

Direcția forței electromagnetice este normală la direcția liniilor de curent. Prin urmare modificarea direcției liniilor de curent, fenomen ce are loc în baia metalică din vârful sârmei pe toată perioada de formare a picăturii, va determina la rândul ei modificarea instantanee a direcției forței electromagnetice. Sub acțiunea forței “pinch” se produce curbarea liniilor de curent în baia metalică și prin urmare modificarea direcției de acțiune a forței electromagnetice. Această modificare determină descompunerea forței electromagnetice în două componente: o componenta radială după axa x, respectiv o componentă axială după axa y, cu acțiune distinctă asupra picăturii de metal.

În figura 1.4. se prezintă acțiunea forței electromagnetice asupra metalului lichid din vârful sârmei electrod în perioada formării unei picături de metal. Se observă două etape distincte în manifestarea forței electromagnetice.

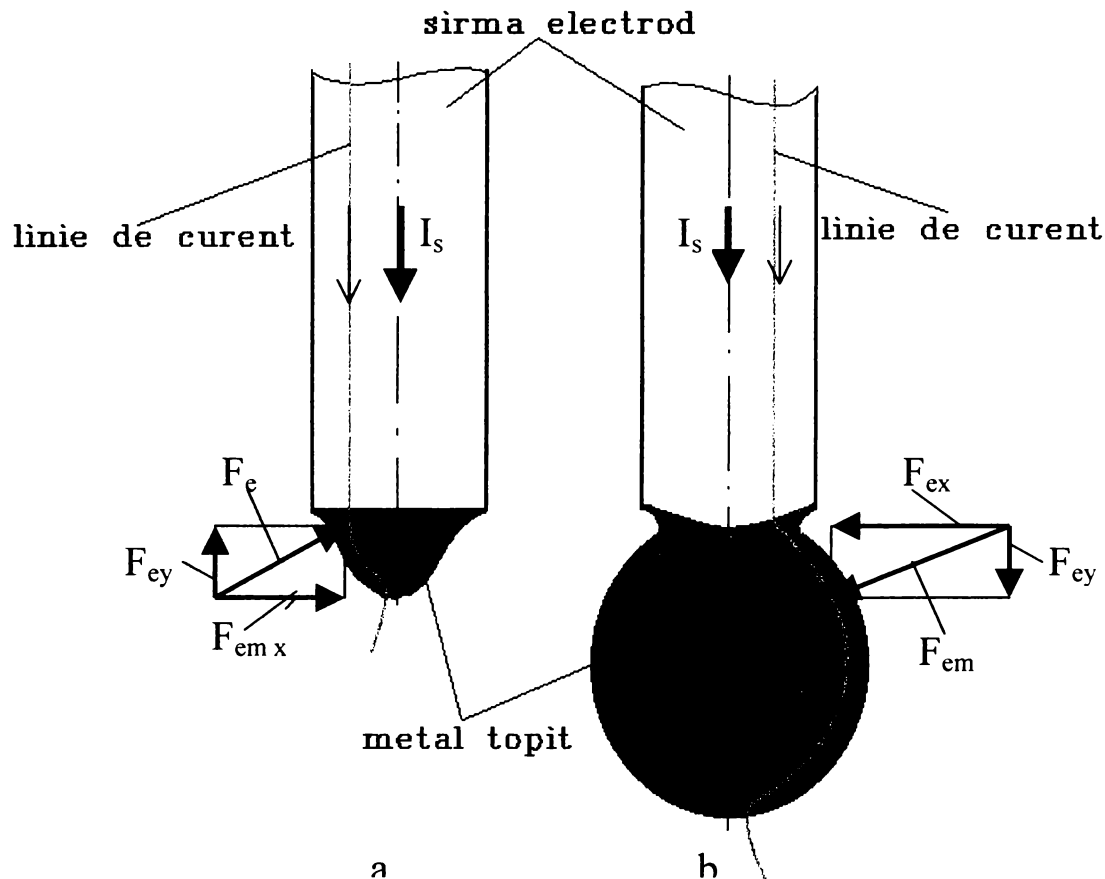


Figura 1.4. Acțiunea forței electromagnetice asupra metalului lichid

În prima fază de topire a vârfului sârmei electrod și de formare a picăturii, figura 1.4.a, componenta axială a forței electromagnetice $F_{em y}$ este orientată în sens contrar curentului de sudare (de jos în sus) opunându-se desprinderii picăturii. În această etapă are loc acumularea metalului topit la baza sârmei sub acțiunea conjugată a forței tensiunii superficiale care acționează pe suprafața metalului, respectiv a componentei axiale a forței electromagnetice. Componenta radială a forței $F_{em x}$ are o acțiune nesemnificativă datorită cantității reduse de metal topit. Totuși se observă o ușoară deformare a suprafeței exterioare a metalului topit concretizată prin țuguirea acestuia, pregătind etapa a doua.

În faza a doua acumularea de metal topit determină creșterea volumului picăturii și implicit creșterea diametrului acesteia la o valoare comparabilă cu diametrul sârmei sau ușor mai mare. Forța electromagnetică își schimbă direcția ca urmare a modificării curbării liniilor de curent, figura 1.4.b. Componenta radială a forței electromagnetice $F_{em x}$ produce prin efectul “pinch” strangularea picăturii

de metal acumulat în vârful sârmei, la baza acesteia (la interfața sârmă – picătură) și formarea unei punți de metal de dimensiuni foarte reduse (de ordinul zecimilor de mm) care face ca densitatea curentului în această zonă să crească foarte mult ceea ce conduce la vaporizarea instantanee a punții. Componenta axială a forței $F_{em y}$ de această dată, fiind orientată în sensul trecerii curentului de sudare (de sus în jos), acționează favorabil desprinderii picăturii de metal. Are loc acumularea de metal topit și formarea unei noi picături însoțită de reluarea fazelor prezentate mai sus.

Din analiza relației de calcul a forței electromagnetice, se observă dependența invers proporțională dintre mărimea forței și diametrul conductorului fluid străbătut de curent. Aceasta produce creșterea intensității forței “pinch” în zona strangulării incipiente, ceea ce echivalează cu o concentrare a acestei forțe în acel punct fix de pe suprafața ficăturii (de fapt pe o circumferință). Acest fenomen produce intensificarea procesului de desprindere a picăturii din vârful sârmei. Ilustrarea fenomenului este prezentată în figura 1.5.

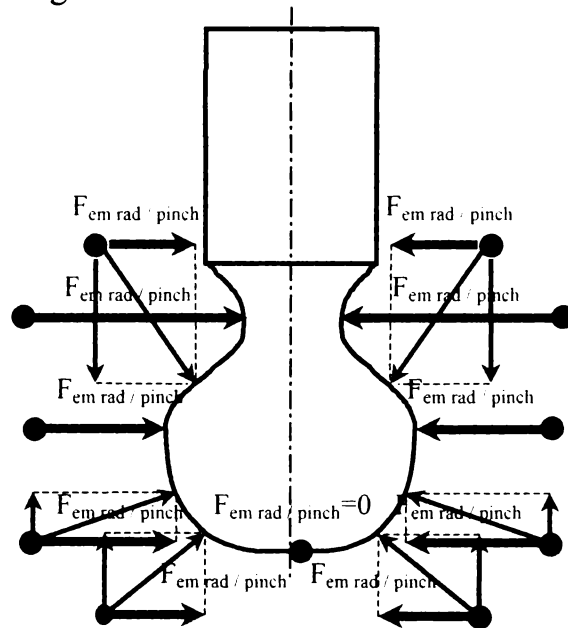


Figura 1.5. Acțiunea forței electromagnetice asupra picăturii de metal

Acțiunea complexă a forței electromagnetice și ponderea acesteia la producerea mecanismului de desprinderii picăturii fac ca această forță să fie considerată cea mai importantă forță dezvoltată în arcul electric cu implicațiile ce mai mari asupra modului de transfer a picăturii la sudarea prin topire cu arcul electric în general și la sudarea MIG/MAG în special.

În concluzie forța electromagnetică sau forța “pinch” favorizează desprinderea picăturii de metal din vârful sârmei electrod la sudarea MIG/MAG, producând finisarea transferului picăturilor de metal și prin urmare este de dorit să fie cât mai mare.

1.2.2. Forța tensiunilor superficiale (F_{σ})

Tensiunea superficială σ acționează cu o forță F_{σ} . Această forță acționează în toate fazele de transfer a picăturii de metal topit în baia metalică. În prima fază sub acțiunea ei are loc acumularea metalului topit și formarea picăturii în vârful sârmei, [39]. Punctul de aplicație a forței se află pe circumferința picăturii în zona de contact dintre picătură și sârmă, acționând ca o forță uniformă, orientată în sus. Prin urmare în această etapă forța se opune desprinderii picăturii din vârful sârmei electrod și este forța principală, răspunzătoare în cel mai înalt grad de formarea picăturii de metal. În faza a doua după desprinderea picăturii din vârful sârmei, la trecerea prin coloana arcului, tensiunea superficială acționează pe suprafața picăturii menținând forma sferică a acesteia. În faza a treia în momentul atingerii băii metalice de pe suprafața piesei, sub acțiunea tensiunii superficiale din zona de contact dintre picătură și baie, are loc atragerea (absorbția) picăturii în baie. Valoarea forței în primă fază este cu atât mai mare cu cât suprafața incipientă de contact dintre picătură și baie este mai mare. Valoarea ei crește continuu pe măsură ce suprafața de contact se extinde până la absorbția totală a picăturii în baia metalică. În această etapă acțiunea tensiunii superficiale este favorabilă facilitând trecerea picăturii în baie.

În cazul transferului prin scurtcircuit forța dată de tensiunea superficială F_{σ} , este considerată forța principală care determină transferul picăturii de metal topit în baia metalică. Cu toate acestea datorită importanței ei la formarea picăturii în vârful sârmei și acțiunii pe care o are în această fază forța dată de tensiunea superficială este percepută în general la sudare, ca fiind o forță care se opune desprinderii picăturii.

Tensiunea superficială (σ) este în principal o caracteristică de material. Cunoașterea ordinului de mărime a acesteia permite înțelegerea mai bună a fenomenelor de transfer la sudarea acestor materiale. Valorile tensiunii superficiale pentru cele mai importante materiale metalice utilizate la sudare sunt: $\sigma = 1,2 \text{ N/m}$ pentru oțel carbon nealiat sau slab aliat; $\sigma = 0,9 \text{ N/m}$ pentru cupru; $\sigma = 0,6 \text{ N/m}$; $\sigma = 1,7 - 1,9 \text{ N/m}$ pentru oțel înalt aliat inoxidabil.

Tensiunea superficială este puternic influențată de starea suprafeței picăturii, respectiv a băii metalice. Suprafețele oxidate se caracterizează prin tensiuni superficiale mult mai reduse. De exemplu în cazul oxizilor de siliciu tensiunea superficială a valoarea $\sigma = 0,2 - 0,26 \text{ N/m}$. Reducerea tensiunilor superficiale determină desprinderea mai ușoară a picăturii din vârful sârmei și prin urmare o picătură mai mică, respectiv un transfer mai fin. În consecință utilizarea gazelor de protecție cu caracter oxidant conduce la finisarea picăturilor de metal formate în vârful sârmei. De exemplu la sudarea oțelurilor inoxidabile adăugarea unei cantități de 1...3% O_2 sau 2...5% CO_2 , gaze cu caracter oxidant, duce la îmbunătățirea transferului de metal, creșterea stabilității arcului și reducerea stropirilor. De exemplu la sudarea oțelurilor inoxidabile, caracterizate prin tensiunea superficială cea mai ridicată, adăugarea în argon a unei cantități de 1...3 % O_2 sau 2...4 % CO_2 , gaze cu pronunțat caracter oxidant, duce la îmbunătățirea transferului de metal prin finisarea picăturilor, crește stabilitatea arcului și reduce stropirile. Acesta este rațiunea folosirii amestecurilor de gaze, argon plus oxigen, respectiv argon plus dioxid de carbon la sudarea oțelurilor inoxidabile. Ponderea gazelor de protecție cu caracter oxidant în argon trebuie însă menținută la nivelul de mai sus pentru evitarea degradării caracteristicilor mecanice și de plasticitate a acestor oțeluri prin oxidare, respectiv prin îmbogățirea cu carbon și pericolul formării carburilor de crom dure și fragile sau a apariției coroziunii intercrystaline.

Pentru calculul forței date de tensiunile superficiale F_{σ} se folosește următoarea relație, [107]:

$$F_{\sigma} = m_h \cdot g \quad (1.4)$$

unde:

- m_h – masa maximă a picăturii ce se poate forma la vârful sârmei electrod, înainte de desprinderea acesteia;
- g – accelerația gravitațională.

Masa m_h este însă foarte greu de determinat. Se se poate măsura însă mult mai ușor masa m_p – masa picăturii desprinse din vârful sârmei electrod. Între cele două mase m_h și m_p există o relație empirică, și anume raportul m_p/m_h care poate fi definit ca o funcție între raza sârmei electrod r și constanta de capilaritate a materialului a :

$$\frac{m_d}{m_h} = f\left(\frac{r}{a}\right) \text{ cu } a = \frac{2 \cdot \sigma}{\rho \cdot g} \quad (1.5)$$

și deci:

$$F_\gamma = \frac{m_p \cdot g}{f\left(\frac{r}{a}\right)} \quad (1.6)$$

Pentru $\frac{r}{a} \leq 1,0$ funcția are expresia:

$$f\left(\frac{r}{a}\right) = 1 - 0,4 \cdot \left(\frac{r}{a}\right) \quad (1.7)$$

În cazul picăturilor mari forța dată de tensiunea superficială are expresia, [107]:

$$F_\sigma = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \sigma \cdot f\left(\frac{r}{a}\right) \quad (1.8)$$

unde:

- σ – tensiunea superficială a metalului lichid al picăturii;
- r – raza sârmei electrod;
- f – funcție complexă ce depinde de raportul (r/a);
- a – constanta de capilaritate a materialului lichid.

dacă: $\frac{r}{a} < 0,15 \Rightarrow f\left(\frac{r}{a}\right) = (1 - 2,5) \cdot r \quad (1.9)$

dacă: $0,5 \leq \frac{r}{a} < 1 \Rightarrow f\left(\frac{r}{a}\right) = (0,6 - 5) \cdot r \quad (1.10)$

Alături de forța electromagnetică, forța datorită tensiunilor superficiale este considerată o forță foarte importantă în mecanismul de transfer a picăturii de metal topit la sudarea MIG/MAG.

Importanța acestei forțe asupra mecanismului de transfer a picăturii de metal se poate observa și din apariția în ultimul timp a unui nou mod de transfer bazat exclusiv acțiunea tensiunilor superficiale, care – i poartă numele și anume *transferul prin tensiune superficială sau S.T.T. (Surface Tension Transfer)*, care va fi prezentat într-un subcapitol ulterior.

1.2.3. Forța gravitațională (F_g)

Forța gravitațională (F_g) acționează în general ca o forță care favorizează desprinderea picăturii, cu excepția sudării în poziții dificile (peste cap). Valoarea ei este determinată în principal de mărimea picăturii conform relației:

$$G = m_p \cdot g \quad (1.11)$$

unde:

- m_p - masa picăturii;
- g - accelerația gravitațională.

Este forța predominantă la sudarea cu arc lung, respectiv la sudarea cu arc intermediar când picăturile sunt mari. Cu cât masa picăturii este mai mare cu atât valoarea forței gravitaționale este mai ridicată. Desprinderea picăturii din vârful sârmei are loc când volumul acesteia este suficient de mare pentru ca forța gravitațională să învingă acțiunea forțelor care se opun desprinderii ei, forța de reacție anodică și forța datorită tensiunii superficiale). Transferul gravitațional, specific sudării cu puteri mari ale arcului electric în mediu de dioxid de carbon, este legat de numele acestei forțe datorită rolului ei important la producerea transferului de metal.

1.2.4. Forța de reacție anodică (F_{an})

Forța de reacție anodică (F_{an}) este generată de presiunea vaporilor de metal care se degajă ca urmare a temperaturii locale ridicate care apare pe suprafața picăturii (în pata anodică), [64] datorită concentrării arcului electric pe o zonă foarte mică așa cum este extinderea petei anodice, $10^{-8} - 10^{-6}$ m. În plus este îndeobște cunoscut că datorită neconsumării de energie pentru emisia de particole (electroni), temperatura petei anodice este superioară temperaturii petei catodice $T_{an} = T_k + (400 - 600)^\circ\text{C}$, [67].

Intensitatea forței de reacție anodică depinde în principal de gazul de protecție utilizat la sudare și apoi de intensitatea curentului electric. Influența gazului de protecție este determinată de conductibilitatea termică a gazului, care diferă mult de la un gaz la altul. Pentru analiza fenomenului vom lua în considerare gazele cele mai utilizate la sudarea MIG/MAG și anume argonul și dioxidul de carbon, figura 1.6.

Conductibilitatea termică mică (cea mai mică) a argonului determină un gradient de temperatură redus în coloana arcului. Aceasta face ca miezul coloanei arcului, cel care conduce curentul electric (în care sunt concentrate liniile de curent), să se extindă pe o zonă relativ mare în secțiunea coloanei arcului. Practic arcul electric cuprinde (îmbrățișează) vârful sârmei, figura 1.6.a. Densitatea redusă a liniilor de curent din miezul coloanei arcului determină o anumită valoare a temperaturii în această zonă, constantă însă într-o secțiune relativ mare. Temperatura picăturii metalice în zona petei anodice va atinge o temperatură ridicată $2800 - 3000^\circ\text{C}$, [7], dar sub temperatura de fierbere a fierului, $\approx 3200^\circ\text{C}$ [67]. Totuși mici vaporizări pe suprafața picăturii este posibil să apară.

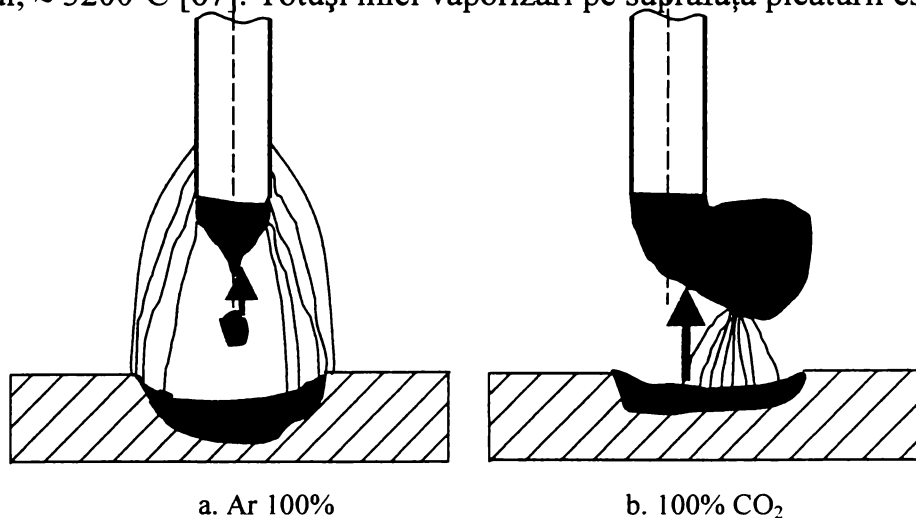


Figura 1.6. Mecanismul generării forței de reacție

Conductibilitatea termică mai mare a dioxidului de carbon decât a argonului determină un gradient de temperatură mult mai mare în coloana arcului. Prin urmare miezul coloanei arcului în acest caz va fi la rândul lui foarte redus. Practic arcul electric este concentrat punctiform pe suprafața picăturii ce se formează în vârful sârmei, figura 1.6.b. Creșterea densității curentului în miezul coloanei arcului determină creșterea temperaturii în axa coloanei arcului la valori superioare arcului în argon. Această concentrare aproape punctiformă a unei temperaturi ridicate pe suprafața picăturii în pata anodică determină depășirea temperaturii locale de fierbere a fierului. Vaporizarea intensă a metalului topit din această zonă generează un jet de vapori care va produce o forță de reacție (conform principiului oricărui jet) care va împinge picătura în sus opunându-se desprinderii ei sub acțiunea celorlalte forțe favorabile din arc. Direcția jetului de vapori produce dezaxarea picăturii din axa coloanei arcului ceea ce conduce la formarea picăturii lateral față de această axă. În aceste condiții volumul picăturii crește foarte mult, rezultând niște picături mari de formă globulară, iar nivelul stropirilor din arc este ridicat. Totodată creșterea curentului de sudare în aceste condiții determină amplificarea forței și prin urmare creșterea volumului picăturii.

În concluzie forța de reacție anodică se manifestă foarte puternic în cazul sudării în dioxid de carbon 100%, sau în amestecuri bogate în CO_2 , și are o intensitate foarte redusă în cazul sudării în

argon sau amestecuri de gaze bogate în argon, cu mai mult de 80% procente de argon în amestec, [6]. Este forța direct răspunzătoare de imposibilitatea sudării cu transfer prin pulverizare sau în curent pulsant în cazul folosirii dioxidului de carbon 100%, sau a amestecurilor de gaze bogate în dioxid de carbon ca și gaze de protecție. Este forța care se opune desprinderii picăturii din vârful sârmei, favorizând formarea picăturilor mari, nedorite la sudare. Acest lucru este unul din motivele pentru care în ultimul timp s-a renunțat aproape total la sudarea în CO₂, în special la puteri ridicate) ale arcului electric (curenți de sudare mari).

Cu alte cuvinte forța de reacție anodică este specifică sudării MAG în dioxid de carbon, sau a amestecurilor bogate în dioxid de carbon (peste 20% CO₂), acționând în sens contrar desprinderii picăturii din vârful sârmei, favorizând creșterea volumului acesteia. Are o pondere importantă în cazul transferului cu arc lung, sau transferului globular.

1.2.5. Forța electrodinamică (F_{ed})

Forța electrodinamică apare ca efect conjugat a două acțiuni. Punctul de aplicație al forței se găsește pe interfața picătură – sârmă în axa sârmei electrod. În prima fază acțiunea de strangulare a picăturii sub efectul forțelor “pinch” determină o reducere puternică a suprafeței de contact dintre sârmă și picătură cu formarea unei punți de metal foarte înguste cu un diametru de ordinul zecimilor de mm, [7]. Această punte de metal determină creșterea puternică a densității de curent în această zona ceea ce conduce la creșterea importantă a temperaturii până la temperatura de vaporizare a metalului. Vaporizarea instantanee a punții de metal determină apariția unei forțe reactive ca efect al jetului de vapori generat în acel spațiu foarte îngust. De această dată forța reactivă este orientată în sens favorabil, spre deosebire de forța de reacție anodică, sub acțiunea ei picătura plonjează prin coloana arcului spre baia metalică.

Forța electrodinamică are o pondere importantă în cazul transferului prin pulverizare (curenți mari de sudare), transferului în curent pulsant, în perioada timpului de puls și în cazul transferului prin scurtcircuit când apariția curentului de scurtcircuit determină creșterea importantă a forțelor pinch, respectiv creșterea densității de curent din zona punții de metal topit la vârful sârmei.

Această forță poate fi amplificată în unele cazuri (sârme de sudare cu mult carbon) de efectul acumulării în zona punții a unor punți de gaze (oxid de carbon) care prin dilatare sub efectul căldurii produc “microexplozii” măbind forța de împingere a picăturii înspre baie, respectiv fragmentează picătura în picături foarte fine, așa numitul transfer prin explozie.

Prin urmare forța electrodinamică este favorabilă desprinderii picăturii picăturii din vârful sârmei, respectiv este forța care asigură transferul picăturii la sudarea în poziții dificile, sudarea peste cap, sudarea verticală, etc., învingând efectul gravitației care acționează asupra picăturii.

1.2.6. Forța jetului de plasmă (F_j)

Forța jetului de plasmă F_j este determinată de curgerea cu viteză foarte mare a plasmei generate în coloana arcului ca urmare a temperaturilor foarte mari atinse în miezul coloanei. Acțiunea jetului de plasmă asupra picăturii poate fi comparată cu acțiunea unei vâne de fluid (lichid sau gaz) care se deplasează printr-o conductă asupra unui corp de formă sferică, așa cum se consideră că este picătura de metal, aflată în interiorul ei. Viteza jetului de plasmă poate atinge valori de peste 100 m/s în axa coloanei arcului și de aproximativ 20 m/s la o distanță de 3 mm fața de axă. Repartiția radială a vitezei de curgere a plasmei prin coloana arcului este prezentată în figura 1.7.

Forța care acționează asupra picăturii de metal desprinse din vârful sârmei electrod și aflată în jetul de plasmă deplasat cu o viteză foarte mare se poate calcula cu relația, [107]:

$$F_j = \frac{\pi}{2} \cdot v^2 \cdot \rho_p \cdot R_d^2 \cdot C_p^2 \quad (1.12)$$

unde:

- v – viteza de curgere a jetului de plasmă;
- ρ_p – densitatea jetului de plasmă;

R_d – raza picăturii;

C_p – coeficient de curgere a jetului de plasmă, invers proporțional cu numărul Reynolds:

$$Re = \frac{R_d \cdot v}{\nu} \quad (1.13)$$

unde:

ν - vâscozitatea jetului de plasmă.

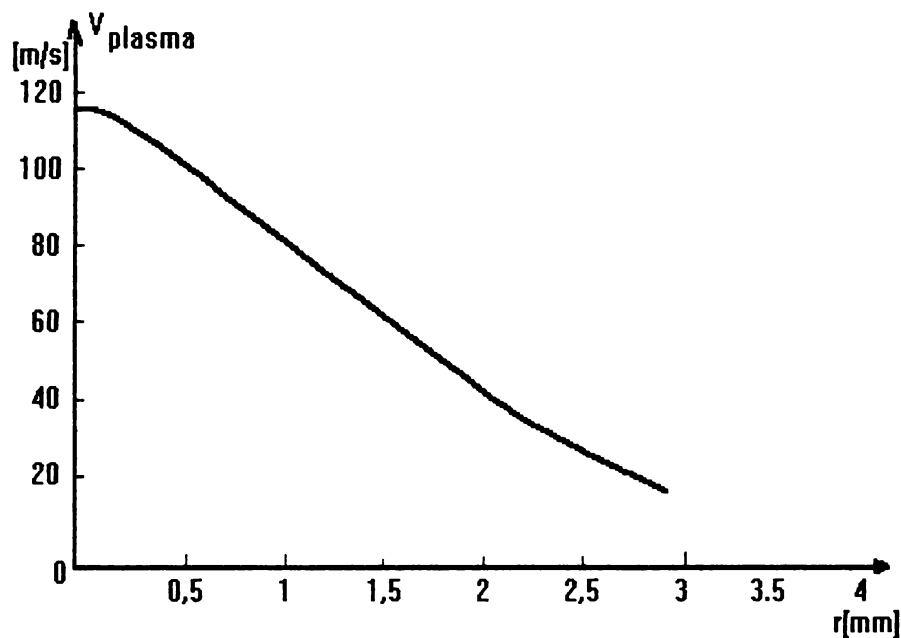


Figura 1.7. Repartiția vitezei jetului de plasmă în coloana arcului electric

Coeficientul de curgere a jetului de plasmă C_p se determină din grafice specializate în funcție de numărul Reynolds, figura 1.8.

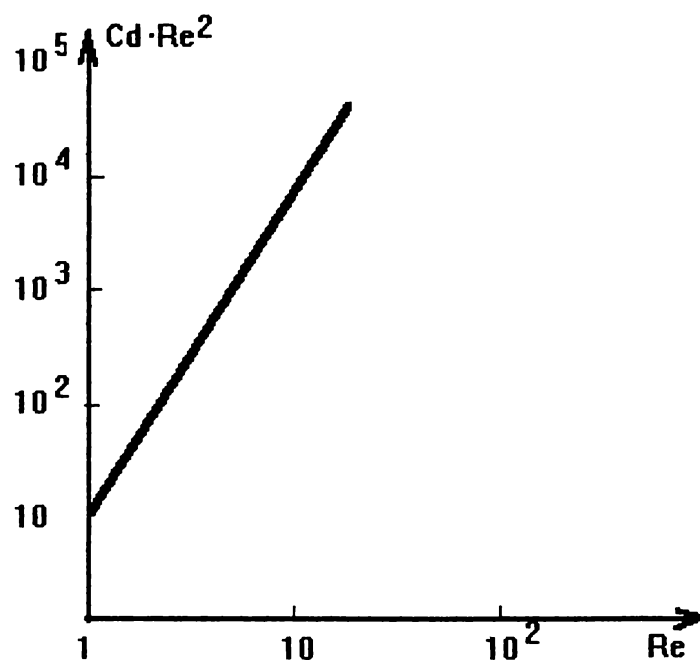


Figura 1.8. Determinarea coeficientului de curgere a jetului de plasmă

Această forță determină accelerarea picăturii prin coloana arcului la valori foarte mari în funcție de curentul de sudare (densitatea curentului), [41].

În tabelul 1.9 sunt prezentate valorile accelerației picăturii de metal determinată de acțiunea jetului de plasmă în funcție de curentul prin arc, la care se adaugă și accelerația gravitațională.

Tabelul 1.9. Accelerația picăturii de metal în jetul de plasmă

I_e (A)	R_e (mm)	v_{ef} (m/s)	Re	C_p	a (m/s^2)	$a-g$ (m/s^2)
60	2.35	7.5	5.2	6.66	0.54	10.35
100	2.12	21	13.1	3.25	2.33	12.14
150	1.53	47.5	21.4	2.18	11.12	20.93
200	1.06	85	26.6	1.98	46.6	56.4
220	0.9	103	27.3	2.01	81.7	91.5

Această accelerație puternică a picăturii poate avea efecte nefavorabile prin stropirile pe care le poate produce la plonjarea picăturii în baie, respectiv prin defectele produse în îmbinarea sudată (crestături marginale). Din acest motiv valoarea curentului de sudare nu poate fi crescută oricât de mult.

1.2.7. Forța inerțială F_i

Forța inerțială F_i este proprie sistemelor de avans prin impulsuri ale sârmei electrod, cap. III. Specific acestor sisteme de avans este faptul că antrenarea sârmei electrod se face sub forma unor impulsuri axiale (vibrații) periodice caracterizate printr-o anumită amplitudine și frecvență, și nu continuu așa cum se întâmplă în cazul sistemelor de avans standard. În timpul unui impuls viteza de avans a sârmei variază între două valori extreme după o anumită lege de mișcare, specifică principiului de funcționare al sistemului de avans.

Analiza modului de funcționare a dispozitivelor de avans prin impulsuri și în special a legii de mișcare a acestor mecanisme arată că antrenarea sârmei electrod se face după o lege de mișcare armonică cosinusoidală, cap. IV. Conform acestei legi în timpul unui impuls viteza de avans a sârmei are o variație sinusoidală, iar accelerația mișcării o variație cosinusoidală.

Mișcarea accelerată a sârmei electrod generează o forță suplimentară, pe care datorită naturii ei o vom denumi sugestiv **forță inerțială F_i** (Burcă), [22]. Mărimea acestei forțe este dată de relația:

$$F_i = m \cdot a \quad (1.14)$$

unde:

- m - masa picăturii;
- a - accelerația mișcării sârmei electrod; pentru mecanismul considerat $a = e\omega^2 \cos\omega t$, scap. 4.2.

Din analiza relației de calcul (1.14) și a legii de variație a accelerației rezultă că forța inerțială F_i este variabilă în timp, atât ca mărime cât și ca sens. Valorile extreme ale forței F_i se obțin la începutul și sfârșitul cursei active de avans a sârmei electrod pentru $a = a_{\max} = |a_{\min}| = e\omega^2$. În prima semiperioadă a cursei (de accelerare a sârmei) forța inerțială acționează în sensul menținerii picăturii de metal topit, care se formează sub acțiunea arcului electric, la vârful electrodului, iar în cea de-a doua semiperioadă a cursei active (de frânare a sârmei) forța inerțială acționează în sensul desprinderii picăturii din vârful sârmei electrod, figura 1.9.

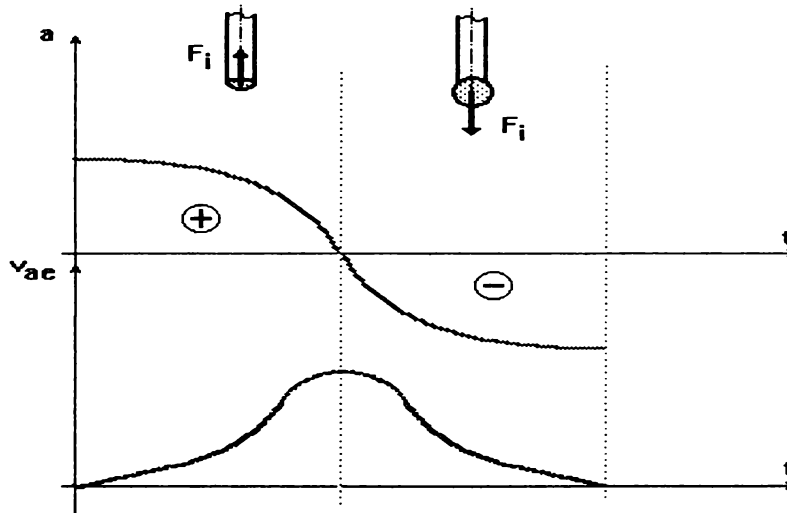


Figura 1.9. Acțiunea forței inerțiale asupra picăturii de metal

Se observă că valoarea maximă a forței F_i se obține la sfârșitul cursei active a sârmei electrod, când atât dimensiunea picăturii (masa ei) cât și accelerația mișcării au valori maxime; această forță este favorabilă desprinderii picăturii din vârful sârmei electrod.

Pentru evaluarea mărimii forței inerțiale F_i se prezintă un exemplu de calcul pentru următoarele condiții concrete, determinate pe cale experimentală și prezentate în subcapitolul 5.3:

$n = 2500$ rot/min	$d_s = 1,2$ mm
$f = 41$ Hz	Gaz: 92%Ar + 8%CO ₂
$\omega \approx 261,5$ rad/s	$v_{ac} \approx 7,5$ m/min
$e = 1,5$ mm	$I_{sm} = 180$ A
$p = 2e = 3$ mm	$U_a = 28$ V

Prin urmare:

$$F_i = m \cdot a$$

Observație: având în vedere valoarea redusă a forței inerțiale, calculul acesteia se va face în sistemul C.G.S., unde unitatea de măsură pentru forță este dyna.

$$1 \text{ dyna} = 10^{-5} \text{ N}$$

Pentru estimarea masei picăturii se consideră că volumul acesteia este dat de volumul de sârmă topit în timpul unui impuls aplicat pe sârmă ($l = p$):

$$m = V \cdot \rho = \frac{\pi d^2}{4} \cdot l \cdot \rho = \frac{\pi \cdot 1,2^2}{4} \cdot 3 \cdot 7,8 \cdot 10^{-3} = 26,5 \cdot 10^{-3} \text{ g}$$

$$a = \omega^2 e = 261,5^2 \cdot 1,5 \cdot 10^{-1} \cong 10257 \frac{\text{cm}}{\text{s}^2}$$

Rezultă:

$$F_i = 26,5 \cdot 10^{-3} \cdot 10257 \cong 272 \text{ dyn}$$

$$F_i = 272 \text{ dyn} = 2,72 \cdot 10^{-3} \text{ N}$$

Pentru estimarea forței inerțiale F_i aceasta se compară cu celelalte forțe care acționează asupra picăturii în condițiile de sudare date mai sus. În figura 1.10 se prezintă graficul de variație a forțelor care acționează asupra picăturii formate în vârful sârmei electrod, în funcție de curentul de sudare (după Waszink & Graat, 1979), [107].

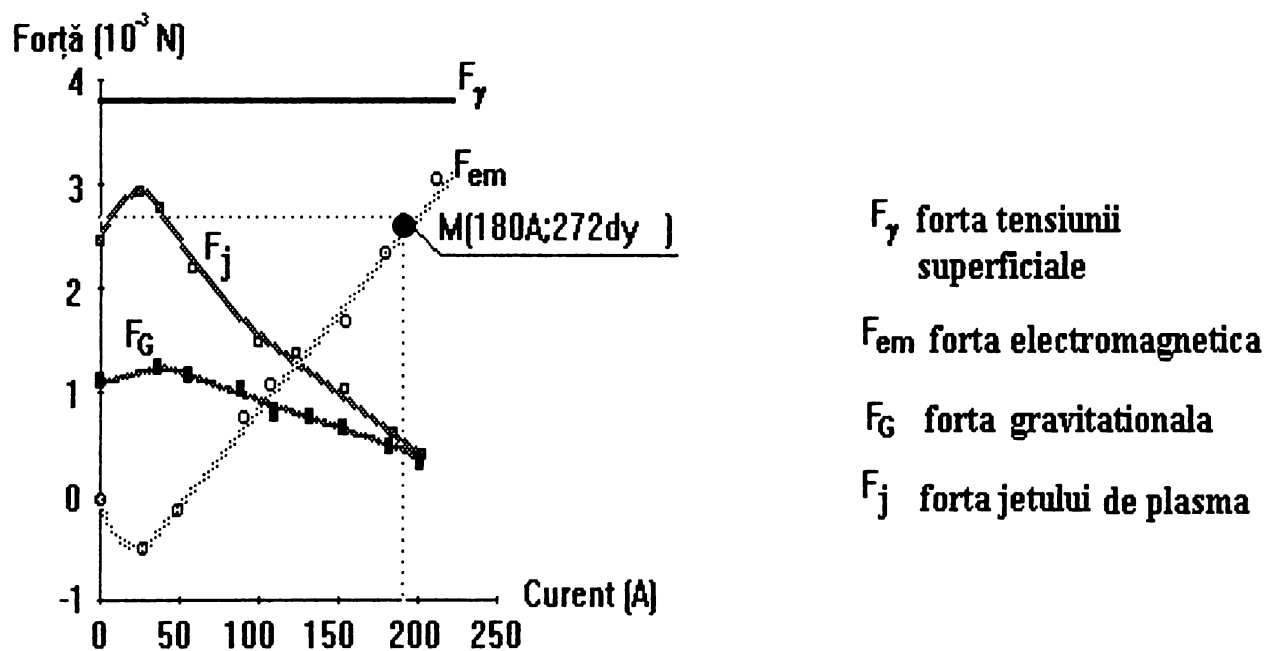


Figura 1.10. Ponderea acțiunii forțelor asupra picăturii de metal

Se observă că forța inerțială F_i ocupă o poziție importantă în categoria forțelor care acționează favorabil asupra transferului picăturii, respectiv a desprinderii acesteia din vârful sârmei electrod. Mărimea forței inerțiale F_i se ridică la nivelul corespunzător forței electromagnetice F_{em} , punctul M (180A, 270dyn).

Ponderea acestei forțe este atât de mare și de importantă încât determină în anumite condiții date (tensiune mai mare a arcului electric) modificarea modului de transfer a picăturii de metal topit prin apariția transferului fără scurtcircuit la valori reduse ale curentului de sudare (sub valoarea curentului critic de transfer spray arc), în domeniul transferului prin scurtcircuit specific sudării MIG/MAG standard cu avans continuu a sârmei electrod. Prin urmare acțiunea forței inerțiale (suplimentare) asupra picăturii cu o pondere importantă și totodată favorabilă desprinderii acesteia, este deteminată de mișcarea (antrenarea) accelerată, periodic, a sârmei electrod.

Acțiunea forței inițiale F_i asupra fenomenului de transfer trebuie să se manifeste și în cazul transferului normal prin scurtcircuit. Aceasta ar trebui să se concretizeze prin reducerea perioadei de scurtcircuit a arcului electric, respectiv prin acțiunea asupra fenomenelor de transfer, față de cazul sudării clasice cu viteză de avans constantă. Confirmarea acestei ipoteze se poate observa prin compararea a două oscilograme executate în condiții identice, dar cu viteză de avans a sârmei electrod continuă, respectiv în impulsuri (prin vibrație).

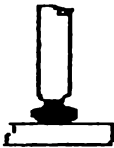

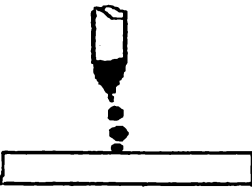

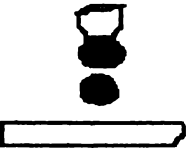
1.3. Moduri (tipuri) de transfer a picăturii de metal topit la sudarea MIG/MAG

Diversitatea modurilor de transfer a materialului de adaos constituie o caracteristică specifică sudării în mediu de gaze protectoare cu electrod fuzibil MIG/MAG, [6], [7], [11], [13], [31], [49], [58], [64].

Modul de transfer al picăturii de metal topit din vârful sârmei electrod este influențat în principal de doi factori de bază și anume *gazul de protecție, respectiv valoarea curentului de sudare*. Transferul picăturii prin coloana arcului este guvernat de echilibrul forțelor care acționează, în condițiile date de sudare, asupra acesteia. Prin urmare modul de transfer al picăturii va fi determinat de forța care acționează asupra picăturii cu ponderea cea mai mare. Așa cum s-a văzut în scap. 1.2 există o strânsă legătură între forțele care acționează în arc electric și cei doi factori de influență de mai sus.

Principalele moduri de transfer a picăturii, respectiv tipurile de arce întâlnite la sudarea MIG/MAG sunt prezentate sintetic în tabelul 1.10, [64].

Tabelul 1.10. Tipuri de transfer a picăturii de metal la sudarea MIG/MAG

Tipul arcului electric	Mărimea picăturii	Aspectul transferului	Modul de transfer
Arc scurt MAG - M MAG - CO ₂	fină		prin scurtcircuit
Arc intermediar (de tranziție) MAG - M MAG - CO ₂	fină până la grobă		globular cu scurtcircuitări aleatoare
Arc spray MAG - M	foarte fina		prin pulverizare fara scurtcircuitari
Arc lung MAG - CO ₂	grobă		globular cu scurtcircuitări
Arc pulsat (sinergic) MAG - M	fină		fără scurtcircuitări (o picatură/puls)

Gama modurilor de transfer ale picăturii la sudarea MIG/MAG este mult mai largă, aspectul acestora obținut prin filmări rapide fiind prezentat pe coperta 2 a lucrării.

În figura 1.11, se prezintă zonele specifice tipurilor de transfer în funcție de parametri tehnologici principali de sudare *curent de sudare (viteza de avans a sârmei)– tensiunea arcului*, pentru toate modurile de transfer întâlnite la sudarea MIG/MAG [97].

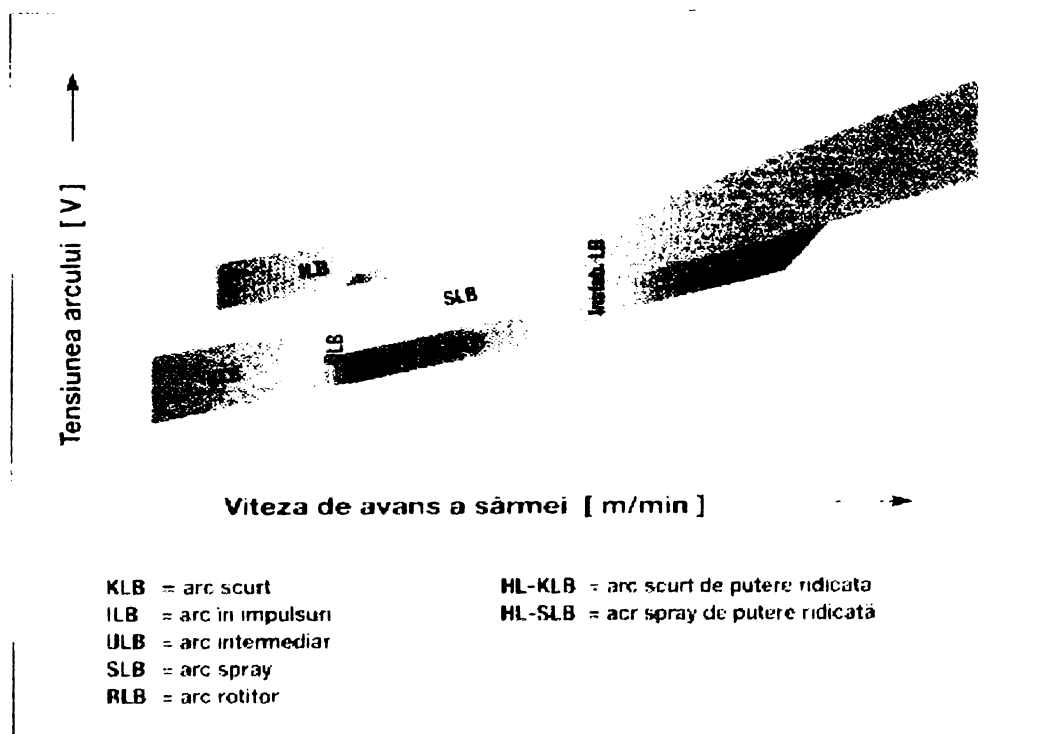


Figura 1.11. Domeniile tipurilor de transfer la sudarea MIG/MAG

În figura 1.12, [64], se prezintă repartiția principalelor tipuri de transfer în funcție de curentul de sudare, influența curentului de sudare și a gazelor de protecție asupra modificării granițelor zonelor de transfer, respectiv influența asupra frecvenței scurtcircuitelor sau a picăturilor de metal transferate prin arc.

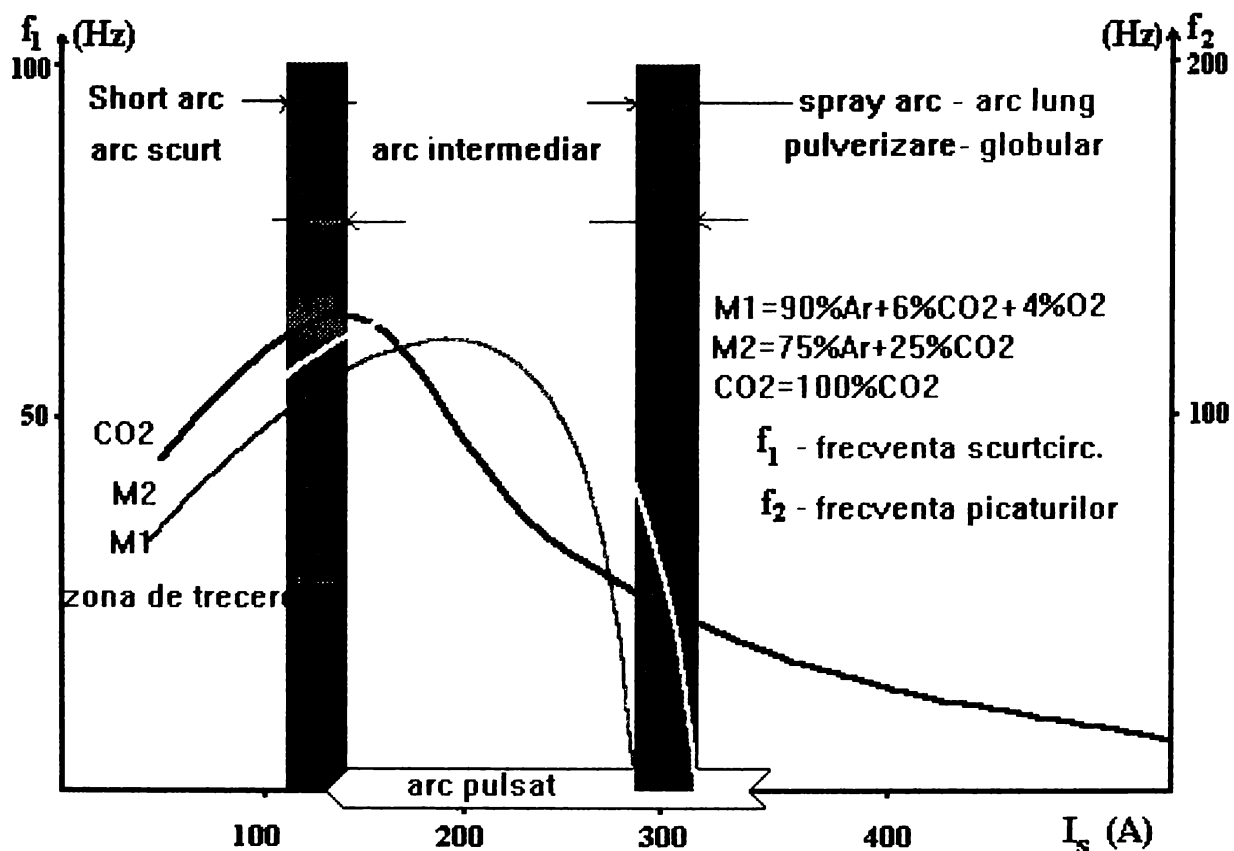


Figura 1.12. Influența curentului și a gazelor de protecție asupra zonelor de transfer

1.3.1. Transferul prin scurtcircuit

Transferul prin scurtcircuit, [13], cu arc scurt sau “short arc, *sha*” se caracterizează prin scurtcircuitarea arcului electric de către picătura de metal topit formată în vârful sârmei electrod cu o anumită frecvență. Modul de desfășurare a procesului de transfer, [6], [78], [32], în strânsă corelație cu modul de variație a parametrilor tehnologici principali de sudare – curentul de sudare I_s , respectiv tensiunea arcului U_a – este prezentat în figura 1.13.

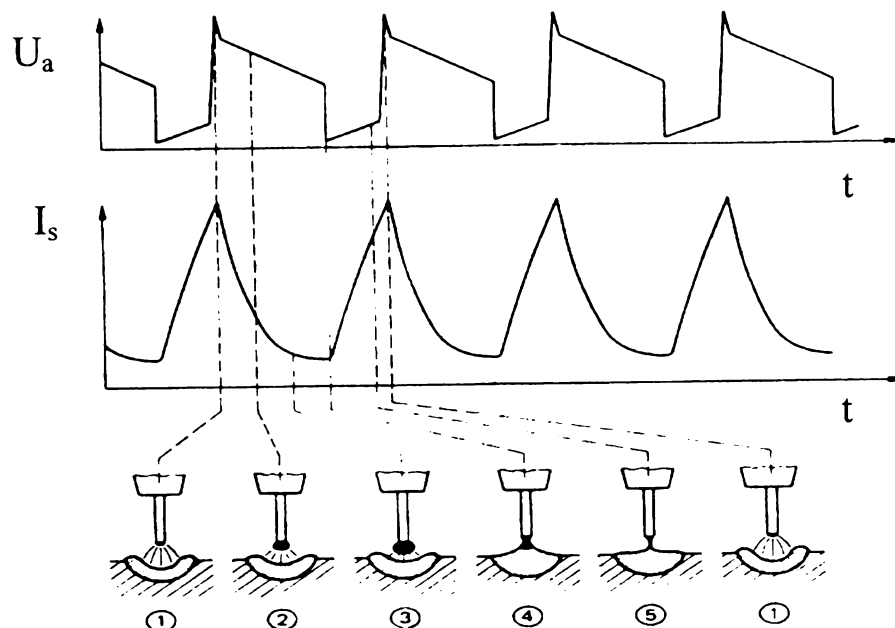


Figura 1.13. Etapele transferului prin scurtcircuit

Sub acțiunea căldurii arcului electric amorsat între sârma electrod și piesă are loc topirea vârfului sârmei, respectiv topirea locală a piesei, (faza 1). Sub acțiunea tensiunilor superficiale metalul topit se acumulează în vârful sârmei, (faza 2). Acumularea metalului topit determină creșterea dimensiunii picăturii la valori $d_p > d_e$ (faza 3). Datorită lungimii reduse a arcului electric la un moment dat picătura atinge piesa formând o punte de metal topit care scurtcircuitază arc (faza 4). Are loc creșterea curentului la valoarea curentului de scurtcircuit ceea ce determină creșterea puternică a forțelor “pinch” sub acțiunea cărora se produce gâtuirea (strangularea) punții metalice la valori de ordinul zecimilor de milimetru (faza 5). Strangularea punții determină creșterea densității de curent producând o încălzire puternică a metalului prin efect Joule-Lentz, până la temperatura de vaporizare a metalului. Are loc ruperea punții metalice și sub acțiunea presiunii vaporilor de metal picătura rezultată este împinsă (plonjează) în baia de metal. La atingerea băii sub acțiunea tensiunilor superficiale de la suprafața acestei picături este atrasă în baia metalică, [29]. Are loc reaprinderea arcului electric care creează premisele formării unei noi picături și procesul de transfer se reia, (faza 6).

Frecvența scurtcircuitelor depinde de gazul de protecție, [81], tensiunea arcului electric (lungimea arcului), valoarea curentului de sudare, materialul sârmei, diametrul sârmei electrod, etc., variind într-un domeniu foarte larg de valori de la 70 la 200 Hz (scurtcircuitări pe secundă).

În figura 1.14, [6] se prezintă corelația dintre parametrii tehnologici principali de sudare, curent – tensiune și frecvența de scurtcircuit a arcului electric, respectiv frecvența picăturilor la sudarea în CO_2 , folosind o sârmă SG2 cu diametrul de 0,8 mm, [6].

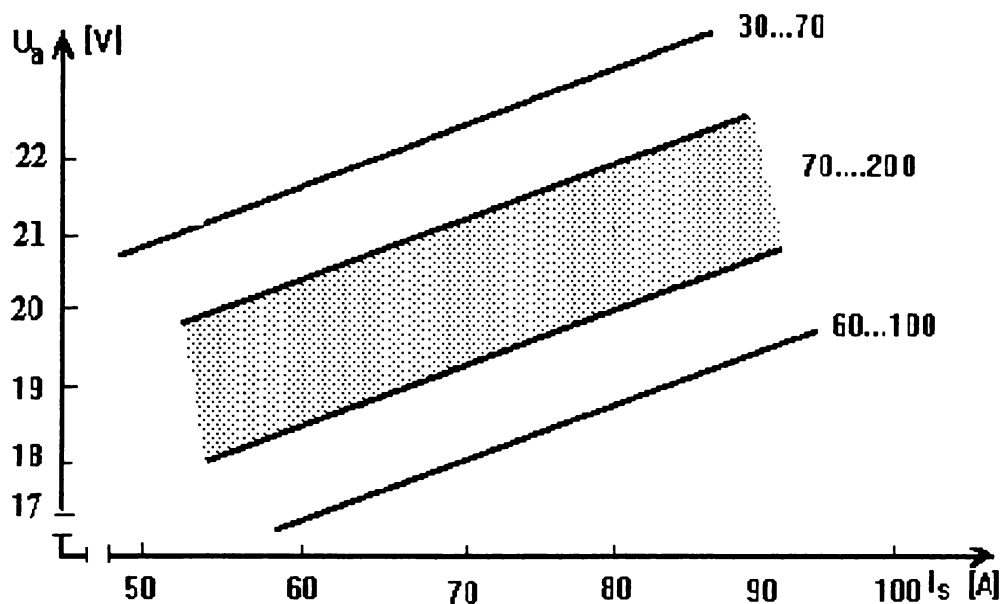


Figura 1.14. Influența parametrilor de sudare asupra frecvenței de scurtcircuit

Caracterizarea transferului prin scurtcircuit:

- specific puterilor reduse ale arcului electric (curenți de sudare mici, tensiuni de arc coborâte (lungimi mici de arc) – arc scurt;
 - $I_s < I_{s \text{ cr sha}}$
- productivitate scăzută: puterea mică a arcului determină puterea de topire redusă; rezultă: rată de depunere mică; viteză de sudare redusă, pătrundere mică;
- energie liniară relativ mică: introduce tensiuni și deformații mici la sudare ;
- forțele dominante din arc: forța de tensiune superficială, forța “pinch” și forța electrodinamică;
- transferul picăturii nu este condiționat de gazul de protecție utilizat;
- transferul picăturii nu este condiționat de polaritatea curentului;
- pierderi (mari) de material prin stropi, inerente acestui tip de transfer care pot ajunge la un procent de 4 – 6 %;
- căi de reducere a stropirilor: utilizarea amestecurilor de gaze bogate în argon, reducerea tensiunii arcului, introducerea unei inductanțe reglabile în circuitul de sudare;
- *utilizare:*
 - ✓ sudarea tablelor subțiri ($s < 5$ mm);
 - ✓ sudarea stratului de rădăcină;
 - ✓ sudarea în poziții dificile (verticală , peste cap);

Stabilitatea maximă a procesului de transfer prin scurtcircuit, caracterizată prin reducerea stropirilor, se realizează când frecvența de scurtcircuit este maximă, ceea ce echivalează cu mărimea (masa) minimă a picăturilor [37]. Aceasta presupune o corelație precisă între curentul de sudare (viteza de avans a sârmei), tensiunea arcului și viteza de sudare, [57], pentru anumite condiții date de sudare (gazul de protecție, sârma electrod, lungime capătului liber a sârmei, etc.). Asigurarea stabilității maxime trebuie discutată în strânsă corelație cu o noțiune relativ nouă întâlnită în literatura de specialitate și anume frecvența de oscilație proprie a băii metalice, [38]. S-a demonstrat experimental (prin filmări rapide) că stabilitatea maximă a procesului de transfer prin scurtcircuit este asigurată la stabilirea egalității dintre frecvența de scurtcircuit f_{sc} și frecvența de oscilație a băii de metal f_o . Frecvența de oscilație f_o depinde de proprietățile fizice ale metalului lichid, în speță de tensiunea superficială σ și de densitatea ρ . Pentru calculul lui f_o se folosește relația empirică, [37]:

$$f_o = 5,84 \left(\frac{\sigma}{\rho}\right)^{1/2} D^{-3/2} \quad (1.15)$$

unde: D – lățimea băii de metal ;

În figura 1.15, [37], [38] se prezintă corelația dintre frecvența măsurării scurtcircuitelor picăturilor de metal (prin filmări rapide) și frecvența calculată a oscilațiilor băii (conform relației de mai sus), pentru condiția de stabilitate maximă a procesului: $f_s = f_o$.

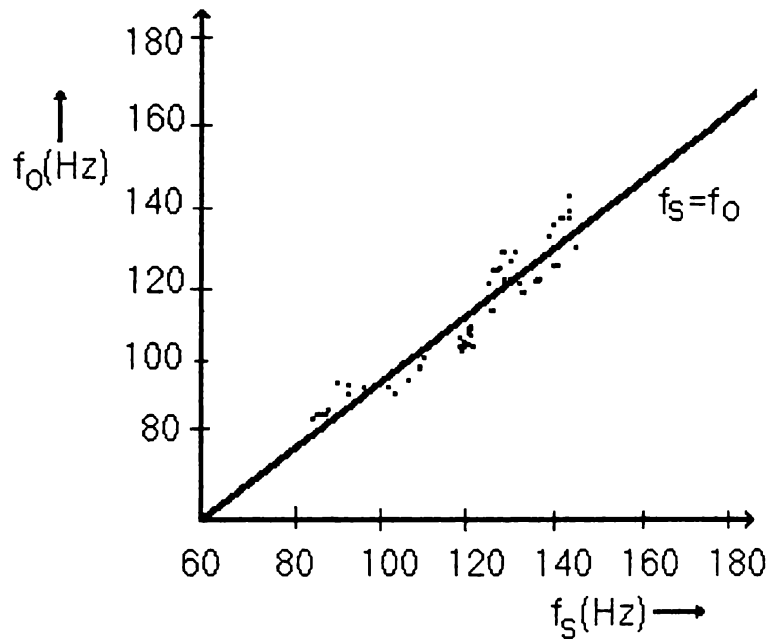


Figura 1.15. Corelația dintre frecvența măsurată și frecvența calculată a scurtcircuitelor

Aceasta permite purtarea unei discuții foarte interesante privind stabilitatea fenomenului de transfer prin scurtcircuit.

Dacă frecvența de scurtcircuit optimă f_s este mai mică decât frecvența de oscilație a băii f_o , baia va atinge picătura ce se formează la capătul sârmei electrod de mai multe ori scurtcircuitând aleator arcul până la stabilirea contactului de scurtcircuit real care produce desprinderea picăturii sub acțiunea tensiunilor superficiale de la nivelul băii metalice. Aceste scurtcircuite incipiente determină la rândul lor variații instantanee ale curentului de sudare și tensiunii arcului cu consecințe asupra stabilității arcului electric, respectiv asupra stropirilor. Aceste scurtcircuite aleatoare, de durată foarte redusă, determină în punctul de contact dintre picătură și baia metalică apariția unei densități mari de curent care produce vaporizarea locală a metalului topit însoțită de apariția unor împrôșcări fine spre grobe din baie, care la o privire atentă pot fi observate și cu ochiul liber de către operator. Totodată dimensiunea picăturilor poate crește foarte mult până la realizarea contactului adevărat, măbind nivelul stropirilor la sudare.

Dacă frecvența optimă de scurtcircuit f_s este mai mare decât frecvența de oscilație a băii f_o , scurtcircuitarea aleatoare a arcului electric face dificilă acumularea metalului topit sub formă de picătură în vârful sârmei. Și în acest caz contactul punctiform instantaneu realizat va determina creșterea densității de curent, încălzirea și vaporizarea locală a materialului însoțită, de această dată, de stropiri foarte fine din vârful sârmei. Aceste stropiri împiedică acumularea metalului topit la vârful sârmei sau oricum o face foarte dificilă. Si acest mod de stropire poate fi observat de către operatorul sudor, dar ele deranjează mai puțin și de multe ori sunt neglijate datorită stropilor foarte fini.

La limită, dacă tensiunea arcului este prea mică, ceea ce este echivalent cu o lungime a arcului foarte redusă, se poate ajunge în situația ca picătura să nu se poată forma la vârful sârmei ceea ce face ca sârma să intre în baia de metal și chiar să atingă fundul băii (piesa) ceea ce determină scurtcircuitarea puternică a arcului, rezistivitatea electrică a metalului topit, fiind de peste cinci ori mai mare decât a materialului solid rezultând un curent de scurtcircuit foarte mare. Are loc încălzirea rapidă a capătului liber a sârmei prin efect Joule – Lentz conducând la topirea explozivă a sârmei însoțită de împrôșcări masive de metal topit din baia metalică. Instabilitatea arcului este atât de mare încât devine imposibilă desfășurarea procesului de sudare.

Scurtcircuitele aleatoare din cele două cazuri prezentate mai sus, pot fi puse în evidență prin filmări rapide ale arcului electric (peste 5000 de clișee pe secundă), sau mult mai ușor și mai ieftin prin oscilografierea arcului, [52], [81], care permite evidențierea în timp real a acestor scurtcircuit, și chiar optimizarea tehnologiei de sudare prin modificarea parametrilor tehnologici de sudare, de obicei a vitezei de sudare, [57] până la obținerea transferului optim prin scurtcircuit cu stropirile cele mai mici. Dificil de realizat la sudarea manuală, această alternativă este foarte accesibilă la sudarea mecanizată MIG/MAG.

Prin urmare domeniul de stabilitate optimă a transferului prin scurtcircuit este limitat pe de o parte de transferul în picături mari care are loc la combinații de tensiuni de arc mari și curenți de sudare (viteze de avans a sârmei electrod) mici, iar pe de altă parte de transferul în picături foarte fine obținut la combinații de tensiuni de arc mici și curenți de sudare (viteze de avans a sârmei) mari care fac dificilă formarea picăturii în vârful sârmei, cu pericolul pătrunderii sârmei în baia metalică fără topirea vârfului acesteia și producând instabilități foarte mari ale arcului, respectiv stropiri foarte intense, la limită cu imposibilitatea desfășurării procesului de sudare, prin lovirea fundului băii.

Prin urmare desfășurarea unui proces de transfer optim presupune stabilirea unei relații optime între cei doi parametri principali de sudare *curent – tensiune*. Aceasta trebuie făcută în strânsă corelație cu optimizarea condiției de stabilitate optimă a transferului prin scurtcircuit definită de condiția $f_s = f_0$, prin optimizarea vitezei de sudare.

Un rol important în asigurarea stabilității arcului electric, respectiv pentru reducerea stropirilor, în cazul transferului prin scurtcircuit, îl are inductivitatea circuitului de sudare, [93], care determină viteza optimă de creștere a curentului de scurtcircuit, respectiv valoarea maximă a acestui curent, astfel încât picătura de metal să se transfere repede pentru reamorsarea rapidă a arcului electric.

Se definește constanta de timp a circuitului de sudare, [3], ca raportul între inductanța L (henry) și rezistența R (ohmi) a circuitului: $T=L/R$.

Dacă constanta de timp, respectiv inductivitatea circuitului au valoare ridicată are loc o creștere prea lentă și la o valoare prea mică a curentului de scurtcircuit ceea ce determină prelungirea exagerată a timpului de scurtcircuit și scurtarea timpului de ardere a arcului conducând la pericolul netopirii sârmei electrod și a intrării acesteia în baia metalică, avind ca rezultat o instabilitate nepermisa a arcului cu stropiri foarte mari din baie. O inductivitate de valoare prea mare îngreunează și mărește de asemenea durata procesului de amorsare a arcului electric, aspect deosebit de important în cazul sudării mecanizate MIG/MAG caracterizată prin viteze de sudare mari, ceea ce poate produce defecte în la începutul îmbinării sudate.

O inductivitate prea mică determină o creștere rapidă și la un curent de scurtcircuit foarte mare ceea ce conduce la vaporizarea puternică a punții de metal însoțită de plonjarea cu viteză foarte mare a picăturii în baia de sudură, producând improșcări de metal topit din baie, respectiv stropiri mari.

În figura 1.16, [3], [33], [56], se prezintă influența inductivității asupra dinamicii curentului de scurtcircuit, respectiv asupra transferului picăturii.

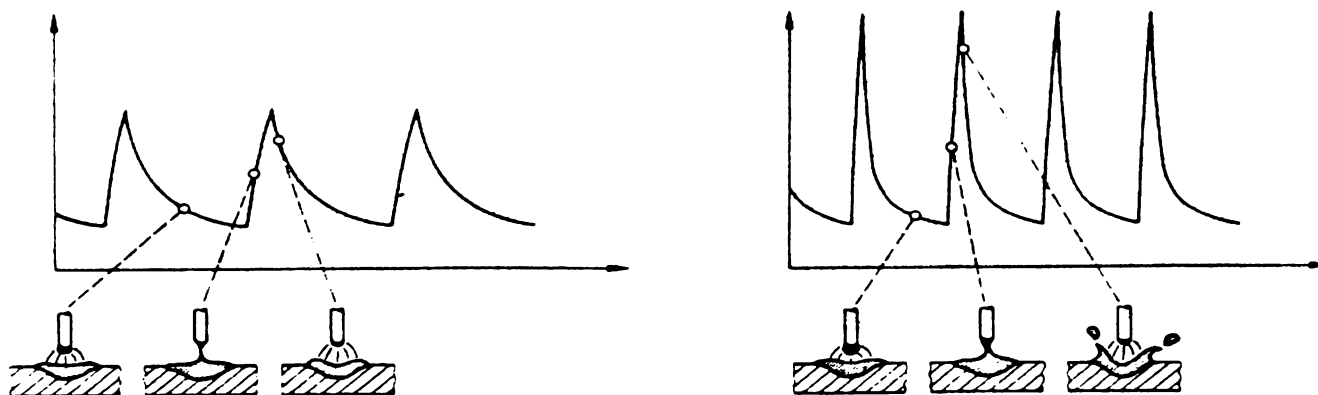


Figura 1.16. Influența inductivității asupra transferului picăturii

În tabelul 1.11 se prezintă comparativ efectul celor două inductivități la sudarea cu transfer prin scurtcircuit, [6].

Tabelul 1.11. Efectul inductivității asupra procesului de transfer a picăturii

mijlocie (potrivită)	Mărimea inductivității	mare (nepotrivită)
mare	Mărimea picăturii	mică
mai lentă	Reaprirea arcului	mai rapidă
mai lentă (prea lentă)	Desprinderea picăturii	mai rapidă
mai puține	Stropirile	mai multe
mai fini	Mărimea solzilor cusăturii	mai grosolani
mai mică	Frecvența scurtcircuitelor	mai mare
mai mică	Presiunea exercitată asupra băii	mai mare

Rezultă din cele prezentate ca este necesară posibilitatea reglării inductivității, în funcție de condițiile concrete de sudare (material de bază, gazul de protecție, diametrul sârmei, lungimea capătului liber, etc.. De exemplu la sudarea în dioxid de carbon este necesară o inductivitate mai mică decât la sudarea în argon sau amestecuri de gaze bogate în argon, la sudarea cu sârme subțiri (0,8 - 1,0 mm) trebuie o inductivitate mai mică decât la sudarea cu sârme groase (1,2 - 1,6 mm), capătul liber mare impune o inductivitate mare ș.a.m.d..

În acest sens sursele de sudare clasice sunt prevăzute cu o inductanță înseriată în circuitul de sudare care permite reglarea în trepte (în două sau trei trepte), prin scoaterea pe panoul frontal a două sau trei borne pentru cuplarea cablului de masă, și/sau reglarea continuă a inductivității în funcție de condițiile concrete de sudare, pentru obținerea unui transfer optim, respectiv pentru reducerea stropirilor.

În cazul surselor moderne de sudare MIG/MAG cu invertor în instalația de sudare (circuitul de sudare) nu mai există o inductanță fizică (reală), [53]. În acest caz viteza de creștere a curentului de scurtcircuit și nivelul acestuia se obține prin modelarea cu ajutorul unui microprocesor care pe baza datelor de intrare specifice procesului de sudare (material sârmă, diametrul sârmei, gazul de protecție), introduse de la o consolă comandă sursa de sudare pentru o reglare optimă a celor doi parametri. În acest caz se poate vorbi de o *inductanță fictivă* a sursei de sudare care permite reglarea continuă, precisă și în timp real (în procente cuprinse între 0 și 100%) a inductivității. Se definesc astfel funcții noi la sudarea MIG/MAG folosind surse cu invertor și anume DINAMICA ARCULUI (ARC FORCE) pentru reglarea inductivității (a vitezei de creștere a curentului de scurtcircuit), respectiv REG. TYPE pentru modificarea pantei caracteristicii externe a sursei de sudare (modificarea nivelului curentului de scurtcircuit), [52], [98]. Pentru ușurarea muncii operatorului și obținerea unor condiții de transfer bune programul microprocesorului definește implicit o valoare optimă a inductivității în funcție de datele de intrare introduse de la consolă, dar permite și modificarea manuală a acesteia prin ieșirea din program dacă condițiile de sudare concrete o cer (impun). Astfel inductivitatea devine un parametru tehnologic nou, important la sudarea MIG/MAG (dar nu numai) de care trebuie ținut seamă la elaborarea tehnologiei de sudare în cazul sudării cu transfer prin scurtcircuit.

Sursele cu invertor permit de asemenea modelarea și a vitezei de scădere a curentului de scurtcircuit ceea ce la sursele clasice nu este posibilă, aceasta fiind o constantă a sursei dată de inerția electromagnetică a acesteia. O viteză mai mare de scădere a curentului de scurtcircuit determină o îmbunătățire a transferului prin scurtcircuit și a stabilității arcului, ca efect a reducerii oscilațiilor băii metalice ca rezultat a diminuării presiunii dinamice exercitate de arcul electric. Sunt create astfel premisele unei bune formări a picăturii în vârful sârmei, diminuându-se scurtcircuiturile incipiente și implicit stropirile. În plus se diminuează și zgomotul arcului electric. Alura curbilor de variație a curentului de scurtcircuit pe panta coborâtoare pentru cele două tipuri de surse este prezentată în figura 1.17, [6], [53], cu linie continuă pentru o sursă clasică, respectiv cu linie întreruptă pentru o sursă cu invertor.

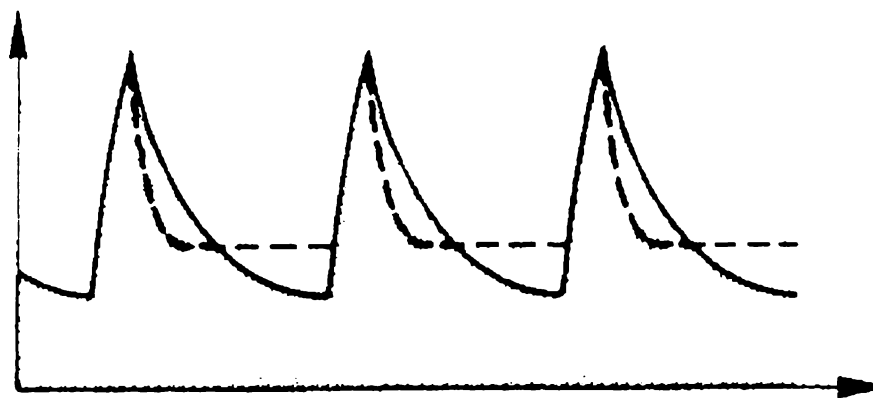


Figura 1.17. Alura curbelor de variație a curentului de scurtcircuit

Realizarea acestei performanțe de modificare infinită a inductivității în funcție de cerințele tehnologice a fost posibilă în primul rând datorită vitezei foarte mari de răspuns a invertoarelor (de ordinul microsecundelor), a dezvoltării electronicii de putere și a folosirii microprocesoarelor în construcția surselor moderne de sudare. În cazul surselor de sudare clasice acest lucru era imposibil în primul rând datorită inerției electromagnetice a sursei.

Aspectul transferului picăturii la sudarea cu transfer prin scurtcircuit, obținut prin filmarea rapidă a procesului de sudare, este prezentat în figura 1.18.



Figura 1.18. Aspectul transferului picăturii prin scurtcircuit

1.3.2. Transferul prin pulverizare

Transferul prin pulverizare sau "spray arc" se caracterizează prin trecerea metalului topit din vârful sârmei electrod spre baia metalică sub forma unui jet de picături foarte fine, "spray", fără scurtcircuitarea arcului electric. Transferul picăturilor poate fi asemuit cu un "șirag de mărgel" [48], care leagă vârful sârmei de baia de sudură, fără atingerea picăturilor. Dimensiunea picăturilor depinde de gazul de protecție, de valoarea curentului de sudare, materialul sârmei (compoziția chimică), diametrul sârmei, etc..

Pentru obținerea transferului prin pulverizare este necesar să fie satisfăcute simultan două condiții importante care se referă la valoarea (mărimea) curentului de sudare respectiv la tipul gazului de protecție utilizat, [28],

Curentul de sudare I_s trebuie să fie de valori ridicate și anume acesta trebuie să fie mai mare decât o valoare critică I_{cr} spa sub care transferul prin pulverizare nu poate avea loc. Această valoare a curentului de sudare denumit în literatura de specialitate și curent tranzitoriu sau curent de tranziție depinde în principal de doi factori, materialul sârmei electrod (compoziția chimică) și de gazul de protecție utilizat, dar și de diametrul sârmei, lungimea capătului liber a sârmei, tipul sârmei (sârmă plină sau tubulară), natura miezului sârmei (rutilic, bazic, pulbere metalică), tensiunea arcului, etc.. Cu cât valoarea curentului de sudare este mai mare raportată la valoarea curentului tranzitoriu cu atât transferul metalului topit se realizează în picături mai fine.

Valoarea mare a curentului de sudare este importantă pentru obținerea unor forțe "pinch" cât mai mari care să forțeze desprinderea picăturii înainte ca dimensiunea acesteia să crească la valori mai mari decât diametrul sârmei electrod, știut fiind faptul că forța "pinch" este direct proporțională cu pătratul curentului. În figura 1.19, este prezentată influența curentului asupra mărimi picăturii prin acțiunea forței "pinch", [32], [64].

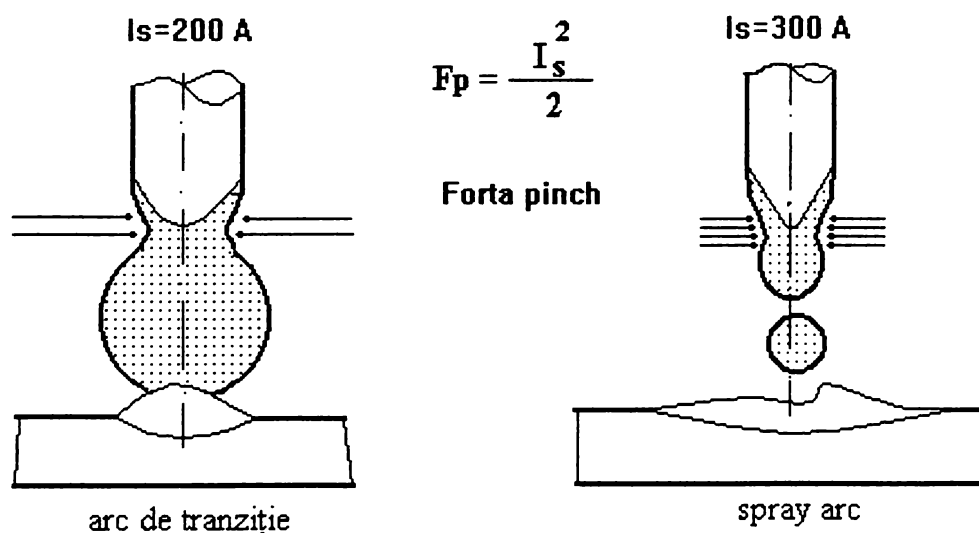


Figura 1.19. Influența curentului de sudare asupra mărimei picăturii

Se observă că pentru un curent de sudare de 200 A valoarea redusă a forțelor "pinch" nu permite strangularea rapidă a picăturii de metal, care sub acțiunea forțelor de tensiune superficială crește la dimensiuni mari depășind diametrul sârmei. Creșterea exagerată a picăturii conduce la un transfer globular însoțită chiar de scurtcircuitarea arcului electric. Dimpotrivă creșterea curentului la 300 A (o creștere cu 50%) determină dublarea forței "pinch" sub acțiunea căreia picătura se detașează la dimensiuni foarte mici ($d_p < d_s$), iar transferul metalului are loc în picături fine fără scurtcircuitări ale arcului electric.

În tabelul 1.12 sunt prezentate câteva valori nominale ale curentului de tranziție, [72], [110].

Privitor la gazul de protecție, pentru obținerea transferului prin pulverizare este necesară utilizarea unor amestecuri de gaze bogate în argon cu mai mult de 80% Ar sau chiar argon pur,

alegerea fiind dictată de materialul de bază care se sudează. Conductibilitatea termică scăzută a argonului determină formarea unui arc electric simetric care înconjoară (îmbrățișează) vârful sârmei electrod concentrând căldura arcului la vârful sârmei. Această distribuție a căldurii arcului produce încălzirea și topirea progresivă a sârmei pornind din vârful acesteia (pata anodică). Sub acțiunea forțelor “pinch” de valori mari (I_s mare) și care acționează pe tot traseul parcurs de curentul de sudare, deci și asupra suprafeței sârmei, are loc comprimarea (stoarcerea) metalului parțial topit la

Tabelul 1.12. Valori ale curentului de tranziție “spray arc”

Materialul sârmei	Diametrul electrodului (mm)	Gazul de protecție	Curentul de tranziție (A)
Oțel carbon	0,8	98% Ar + 2% CO ₂	150
	0,9		165
	1,1		220
	1,6		275
Oțel aliat (INOX)	0,9	98% Ar + 2% CO ₂	170
	1,1		225
	1,6		285
Aluminiu	0,9	Ar	95
	1,1		135
	1,6		180
Cupru dezoxidat	0,9	Ar	180
	1,1		210
Bronz cu siliciu	0,9	Ar	165
	1,1		165
	1,6		270

suprafața sârmei pe măsura topirii acestuia, producând acumularea lui sub forma unor picături de dimensiuni foarte mici care prin fenomenul de strangulare determinat de forțele “pinch” conjugat cu fenomenul de vaporizare a punții de metal create, realizează sub acțiunea presiunii vaporilor desprinderea și plonjarea axială cu viteză mare a picăturii în baia metalică. Totodată acțiunea de “mulgere” a metalului topit, în porțiunea aflată sub incidența arcului electric (pe distanța îmbrățișată de arc) sub efectul forțelor “pinch”, produce așa numitul fenomen de “autoacuire” specific sudării MIG/MAG în amestecuri de gaze bogate în argon. Acest fenomen de ascuțire a sârmei electrod favorizează și mai mult acumularea materialului topit în picături foarte fine amplificând fenomenul de transfer prin pulverizare, ceea ce echivalează cu o mărire a stabilității arcului electric.

Cu toate că viteza de plonjare este mare datorită dimensiunilor foarte fine ale picăturilor nu se produc stropiri de material din baia de sudură.

Introducerea gazelor active ca oxigenul și/sau dioxidul de carbon în argon are efecte favorabile asupra dimensiunilor picăturii conducând la finisarea acestora ca urmare a reducerii tensiunilor superficiale de la suprafața picăturii datorită oxidării acesteia. Reducerea forței dată de tensiunile superficiale F_σ va facilita desprinderea mai ușoară a picăturii din vârful sârmei și prin urmare finisarea transferului de material. Este cazul sudării oțelurilor inoxidabile unde pentru îmbunătățirea transferului de metal, reducerea stropirilor și îmbunătățirea stabilității arcului electric se folosesc amestecuri de gaze Ar + 1 – 3% O₂, sau Ar + 2 – 4% CO₂.

Modul de transfer a picăturii în funcție de gazul de protecție utilizat este prezentat în figura 1.20, [6].

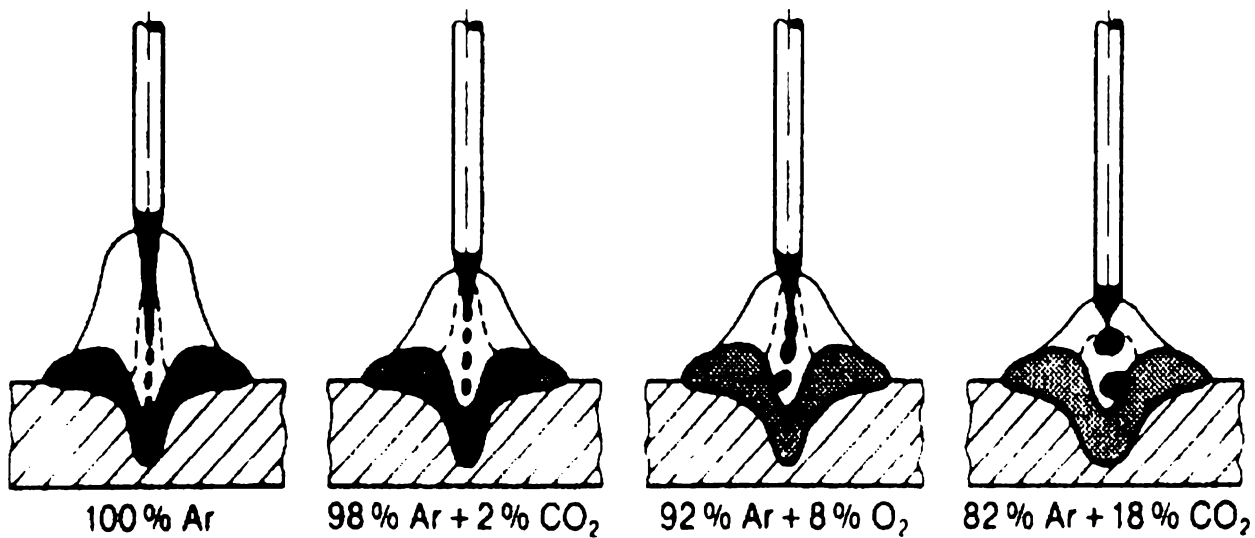


Figura 1.20. Transferul picăturilor de metal funcție de gazul de protecție

Caracterizarea transferului prin pulverizare:

- specific puterilor mari ale arcului electric: curenți de sudare mari, tensiuni de arc ridicate (lungime mare de arc):

$$I_s > I_{s \text{ cr spa}}$$

- productivitate ridicată determinată de puterea de topire mare a arcului electric; rezultă: rată de depunere mare, pătrundere mare, viteze de sudare mari;
- energie liniară mare introdusă în componente, (pericol de tensiuni și deformații la sudare);
- forțe dominante în arc: forța electromagnetică “pinch”, “pinch”, forța electrodinamică (ambele favorabile desprinderii picăturii);
- transferul picăturii este condiționat de gazul de protecție: argon sau amestecuri bogate în argon cu > 80% ar;
- transferul este condiționat de polaritatea curentului: numai în curent continuu, polaritate inversă cc⁺ (plus pe sârmă);
- stropiri foarte reduse (când se produc acestea sunt accidentale) sau chiar fără stropiri; avantaje: eliminarea pierderilor de material de adaos prin stropi, eliminarea operației auxiliare de curățire a stropilor, evitarea pericolului de coroziune (la oțel inox);
- stabilitate mare a arcului electric;
- nu necesită prezența unei inductanțe în circuitul de sudare (inductanța este inoperantă), deoarece lipsesc scurtcircuitele;
- *utilizare:*
 - ✓ sudarea tablelor groase;
 - ✓ sudarea în poziție orizontală sau în jgheab;

Dacă conținutul de argon scade sub 80% conductibilitatea termică a amestecului de gaze crește reducând fenomenul de “autoascuțire” a sârmei cel care favorizează transferul fin și astfel dimensiunile picăturilor cresc. Creșterea ponderii gazelor active, ca de exemplu dioxidul de carbon la valori peste 20%, va genera apariția forței de reacție anodică F_{an} cea care se opune desprinderii picăturii din vârful sârmei. În cazul gazelor de protecție bogate în argon valoarea forței de reacție anodică este foarte mică, iar manifestarea ei nu este perceptibilă. Cu cât cantitatea de CO₂ în amestec este mai mare cu atât ponderea forței de reacție anodică este mai mare, ajungând maximă la sudarea în CO₂ 100%, respectiv efectul ei nefavorabil crește. Cele două fenomene determină creșterea dimensiunilor picăturii și prin urmare modificarea modului de transfer. Din acest motiv transferul prin pulverizare nu este posibil în CO₂ 100%, sau amestecuri bogate în CO₂.

Aspectul transferului prin pulverizare este prezentat în figura 1.21. Se observă fenomenul de

autoascuțire a vârfului sârmei, vâna de metal topit (“șiragul de mărgel”), forma inconfundabilă de “clopot” cu concentrarea foarte puternică a arcului electric.

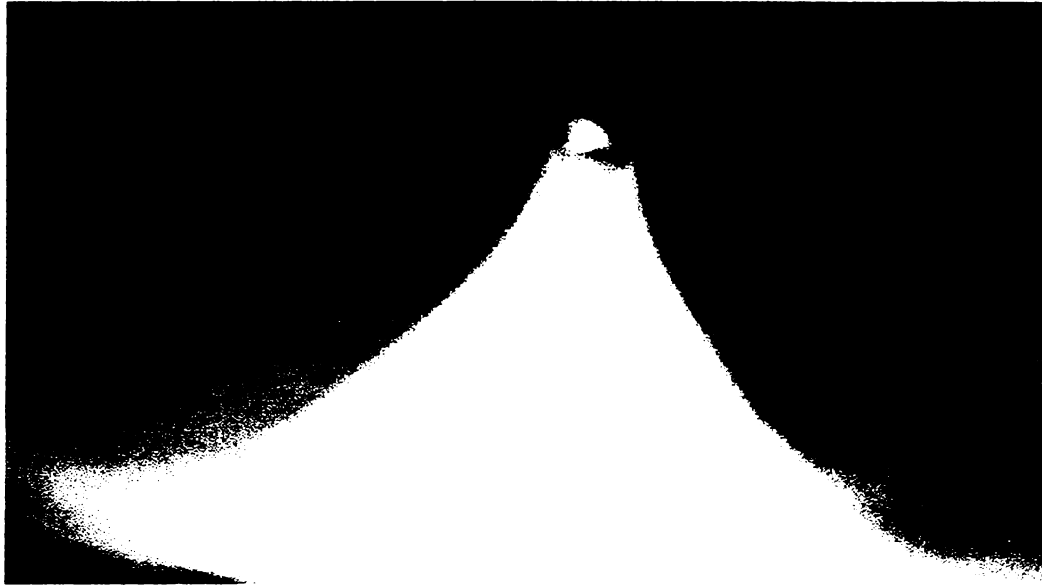


Figura 1.21. Aspectul transferului picăturii prin pulverizare (filmare rapidă)

Transferul prin pulverizare este însoțit de căldură și lumină puternice, nivel ridicat de radiații (în special ultraviolete), ceea ce impune luarea unor măsuri speciale de protecție a operatorului sudor și a personalului auxiluar, eventual mecanizarea sau automatizarea procesului de sudare. În schimb nivelul de zgomot este mai scăzut (variațiile de presiune din coloana arcului reduse).

1.3.3. Transferul globular

Transferul globular, cu arc lung sau "long arc" se caracterizează prin trecerea metalului topit din vârful sârmei electrod spre baia metalică sub forma unor picături mari de metal numite "globule" fără scurtcircuitarea arcului electric. De aici și denumirea de transfer globular. Când picătura de metal crește foarte mult pot avea loc scurtcircuite accidentale însoțite de stropiri intense. Deoarece transferul picăturii se realizează exclusiv sub acțiunea forței gravitaționale, care are ponderea cea mai mare, mai este întâlnit și sub denumirea de "*transfer gravitațional*".

Acest mod de transfer este specific sudării în dioxid de carbon 100% sau în amestecuri de gaze bogate în dioxid de carbon, cu mai mult de 20% CO₂, [30]. Cu cât ponderea dioxidului de carbon este mai mare cu atât transferul picăturii se face în globule mai mari.

Din punct de vedere a parametrilor tehnologici primari de sudare *curent-tensiune*, respectiv a domeniului de lucru, transferul globular se situează în aceeași zonă cu transferul prin pulverizare, (vezi figura 1.12). Din acest punct de vedere cele două moduri de transfer pot fi considerate echivalente, diferența făcându-o gazul de protecție utilizat și anume dioxidul de carbon sau amestecuri bogate în dioxid de carbon la transferul globular, respectiv argon sau amestecuri bogate în argon cu mai mult de 80% Ar la transferul prin pulverizare.

Modul de desfășurare a procesului de transfer a picăturii este prezentat în figura 1.22, [13].

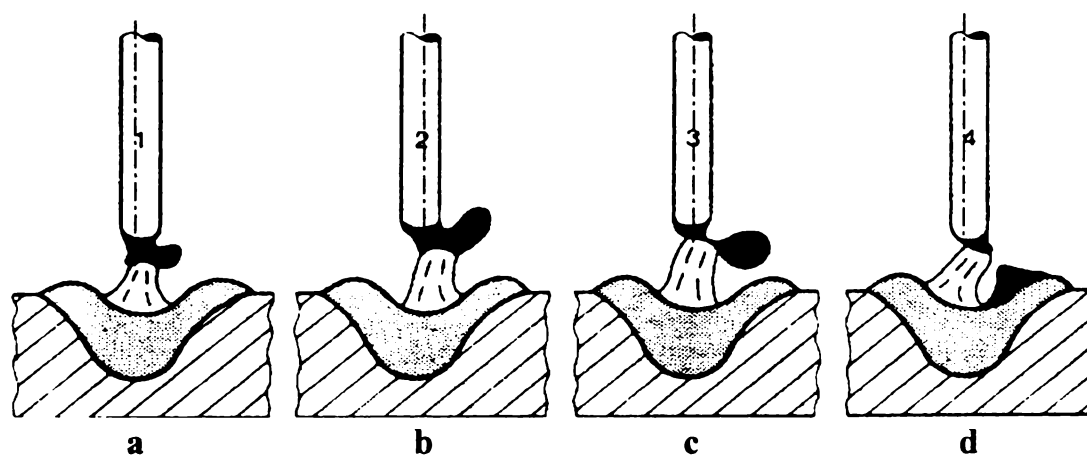


Figura 1.22. Etapele transferului globular a picăturii de metal

Puterea mare de topire a arcului electric determină acumularea rapidă sub acțiunea tensiunilor superficiale a unui volum mare de metal topit în vârful sârmei, faza a. Creșterea dimensiunilor picăturii fără scurtcircuitarea arcului electric se datorează lungimii relativ mari a acestuia (tensiune de arc mare), respectiv forței de reacție anodică F_{an} de valori ridicate care împinge picătura în sus și lateral, dezaxându-o din axa sârmei electrod, [28], favorizând prin aceasta și mai mult acumularea de metal topit, faza b. Sub acțiunea forțelor "pinch" de valori ridicate (curent de sudare mare) se produce strangularea picăturii de metal topit însoțită de formarea unei punți de metal, faza c. Forța gravitațională de valoare ridicată (picătură mare) învinge forțele de tensiune superficiale care țin picătura la vârful sârmei (prin intermediul punții) și forța de reacție anodică, producând desprinderea picăturii, care sub acțiunea greutății proprii ajunge în baia metalică, faza d, fără scurtcircuitarea arcului. Ruperea punții de metal de această dată se face sub acțiunea forței gravitaționale înainte ca dimensiunile acesteia să scadă la valori atât de mici încât să expulzeze puntea prin vaporizare ca efect a creșterii densității de curent așa cum se întâmplă în cazul transferului prin pulverizare. Cu alte cuvinte gradul de vaporizare a punții de metal este mai scăzut și prin urmare acțiunea forței electrodinamice nu este hotărâtoare pentru desprinderea picăturii. Dacă dezaxarea picăturilor este foarte mare este posibilă aruncarea ei în afara băii pe suprafața tablei sub forma unor stopi foarte mari și deosebit de aderenți. De asemenea dacă volumul picăturilor crește exagerat de mult se produc scurtcircuități puternice însoțite de stropiri mari de material din baie, figura 1.23. Cele două fenomene conduc la pierderi însemnate de material de adaos, respectiv la operații costisitoare de îndepărtare a stropilor de pe componentele de sudat.

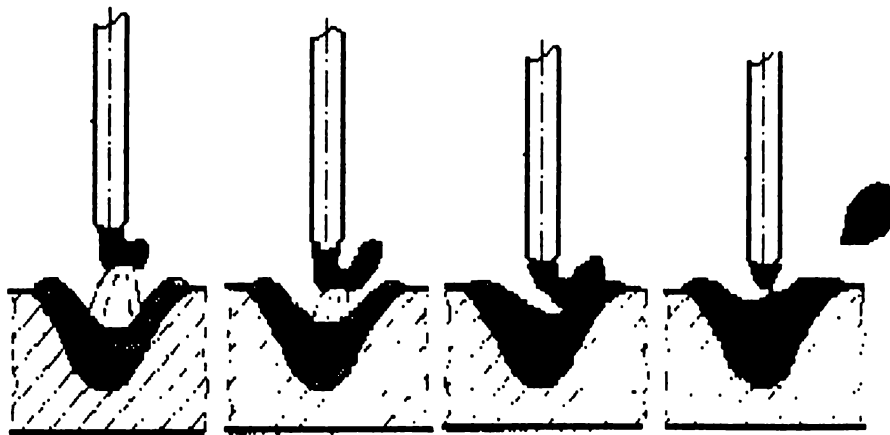


Figura 1.23. Producerea scurtcircuitelor însoțite de stropiri la sudarea în CO₂

Caracterizarea transferului globular:

- specific puterilor mari ale arcului electric: curenți de sudare mari, tensiuni de arc ridicate (lungime mare de arc):

$$I_s > I_{s\ cr\ g}$$

- productivitate ridicată la sudare determinată de puterea de topire mare a arcului electric; rezultă: rată de depunere mare, pătrundere mare, viteze de sudare mari;
- energie liniară mare introdusă în componente, (pericol de tensiuni și deformații la sudare);
- forțe dominante în arc: forța gravitațională și forța de reacție anodică;
- transferul picăturii este condiționat de gazul de protecție, dioxidul de carbon sau amestecuri bogate în dioxid de carbon;

Obs. Se poate obține transfer globular și la sudarea în amestecuri de gaze bogate în argon dacă curentul de sudare (viteza de avans a sârmei), la un diametru de sârmă dat, este crescut exagerat și nejustificat de mult, în special la sârmele subțiri, sub 1,2 mm. Trecerea la transferul globular se poate aprecia prin formarea laterală a picăturii (dezaxarea) la vârful sârmei și observarea mărimii acesteia și a transferului prin coloana arcului, însoțită de asemenea și de o intensificare a stropirilor. În plus are loc și modificarea formei arcului. Acest aspect este nedorit și trebuie evitat printr-o bună alegere a parametrilor tehnologici de sudare. Din păcate sunt mulți care confundă transferul globular cu transferul prin pulverizare deși diferențele sunt multe și evidente.

- pierderi de material prin stropi; stropii sunt de dimensiuni mari (pierderile sunt mai mici însă comparativ cu arc intermediar);
- stabilitatea arcului mai mică comparativ cu transferul spray arc;
- transferul picăturii nu este condiționat de polaritatea curentului; totuși la polaritate directă stropii sunt mult mai mari, stropirile mai intense, iar reglarea parametrilor tehnologici de sudare pentru obținerea unui regim stabil este foarte dificilă și presupune multă dexteritate;
- prezența inductanței în circuitul de sudare nu este necesară; totuși dacă scurtcircuitul sunt frecvente ea este benefică prin limitarea curentului de scurtcircuit;
- *utilizare:*
 - ✓ la sudarea tablelor groase;
 - ✓ la sudarea în poziție orizontală sau în jgheab;
 - ✓ la sudarea oțelurilor nealiate cu puțin carbon și a unor oțeluri slab aliate;

S-a apreciat mai sus că în cazul transferului globular (cu arc lung) nivelul stropirilor este mai scăzut decât la sudarea cu arc intermediar. Presiunea dinamică mare a arcului electric (jetul de plasmă) determină formarea unui crater adânc în care arde arcul respectiv se formează picătura, figura 1.24. Picăturile desprinse din vârful sârmei, în drumul lor spre baia metalică vor întâlni pereții craterului și prin urmare un număr redus de picături vor ajunge în exterior sub formă de stropi.

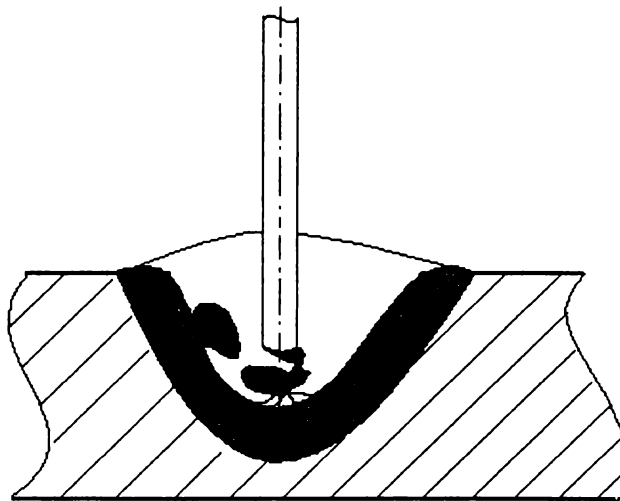


Figura 1.24. Formarea craterului sub acțiunea presiunii dinamice a arcului electric

Datorită modului de transfer în picături mari și a pierderilor de material prin stropiri, care necesită de cele mai multe ori o operație ulterioară de curățire a stropilor, sudarea cu arc lung în CO_2 este tot mai rar folosită în prezent, fiind înlocuită de sudarea în amestecuri de gaze bogate în argon, care datorită transferului prin pulverizare pe care îl produce elimină dezavantajele transferului globular. Cel mai utilizat amestec la ora actuală utilizat pentru sudarea oțelurilor carbon este amestecul cu $80\% \text{Ar} + 20\% \text{CO}_2$ ($82\% \text{Ar} + 18\% \text{CO}_2$), denumit industrial CORGON 18, produs de firma Linde – Gas România.

Substituirea sudării în bioxid de carbon cu sudarea în amestecuri de gaze este condiționată de prețul de cost al sudării. În occident diferența de cost a gazului de protecție este compensată de eliminarea operației de curățire a componentelor și de pierderile de material de adaos prin stropi.

Diferența mare (de 2,5 ori) dintre prețul argonului și cel al dioxidului de carbon determină anumite rețineri în utilizarea amestecurilor de gaze la sudare, sudarea cu arc lung în mediu de bioxid de carbon mai putând fi întâlnită în multe locuri. Totuși pătrunderea fimelor străine producătoare de gaz pe piața românească, LINDE GAZ România, respectiv AGA au impulsionat, prin gama mare de amestecuri de gaze pe care le oferă, introducerea agresivă a amestecurilor de gaze la sudarea MIG/MAG. La aceasta se adaugă creșterea numărului de echipamente moderne de sudare care au fost importante în ultimii 10 ani și care oferă o gamă foarte largă de programe utilizând amestecurile de gaze.

Avantajele utilizării amestecurilor de gaze la sudare:

- ✓ modificarea modului de transfer a picăturii de metal;
- ✓ lărgirea domeniilor de transfer prin scurtcircuit, respectiv prin pulverizare în detrimentul transferului intermediar;
- ✓ creșterea stabilității arcului electric;
- ✓ reducerea stropirilor și a pierderilor de material prin stropi;
- ✓ îmbunătățirea esteticii cusăturii sudate prin reducerea supraînălțării și aspectului suprafeței acestuia (solzi fini și regulați, oxidare redusă a suprafeței);
- ✓ reducerea cantității de zgură (insulele de oxizi de Mn, Si, etc) de pe suprafața cusăturii, și simplificarea operației de curățire;
- ✓ diminuarea sau eliminarea operației de curățire a stropilor de pe suprafața componentelor (desprinderea mult mai ușoară a stropilor datorită aderenței reduse, stropi fini);
- ✓ condiții de stress mai reduse pentru operatorul sudor datorate stropilor și pericolului de ardere;

Rămân însă avantajele incontestabile ale dioxidului de carbon la sudare și anume:

- ✓ cea mai bună geometrie a cusăturii sudate, caracterizată prin pătrundere mare și sigură;
- ✓ pericol mai scăzut de pori în cusătura sudată decât la sudarea în amestecuri de gaze prin creșterea presiunii în coloana arcului ca efect a disocierii dioxidului de carbon la temperaturile ridicate din arc;
- ✓ reducerea pericolului de defecte din îmbinarea sudată (lipsă de topire, lipsă de pătrunere, etc.);

- ✓ solicitare termică mai redusă a capului de sudare, respectiv a operatorului sudor;
- ✓ nivel de radiații mai scăzut;
- ✓ prețul de cost cel mai scăzut;

Aceste particularități recomandă utilizarea dioxidului de carbon și pe viitor în cazul pătrunderilor sigure cerute la sudare ca de exemplu sudarea stratului de rădăcină, sudarea îmbinărilor de colț nepătrunse, când pericolul porilor din cusătură nu poate fi evitat, etc.. În ceea ce privește modul de transfer se recomandă preferențial la sudarea cu transfer prin scurtcircuit și se va evita la sudarea cu puteri mari de arc.

Folosirea dioxidului de carbon pe viitor depinde foarte mult de evoluția și performanțele echipamentelor de sudare MIG/MAG și de posibilitatea acestora de a reduce nivelul stropirilor la sudare prin controlul riguros a parametrilor tehnologici de sudare. și prin implementarea unor funcții noi. Exemple în acest sens există deja pe plan mondial în Japonia și SUA. (de exemplu controlul vitezei de scădere a curentului de scurtcircuit permite reducerea nivelului de stropiri la sudarea în CO₂ 100% chiar pentru valori ale curentului de până la 350A)

1.3.4. Transferul intermediar

Transferul intermediar, cu arc intermediar sau "arc tranzitoriu - transition arc" ocupă zona dintre domeniul transferului prin scurtcircuit (cu arc scurt) și domeniul transferului prin pulverizare (respectiv cu arc lung). Se caracterizează prin transferarea picăturilor de metal topit din vârful sârmei electrod prin două moduri și anume atât prin scurtcircuit cât și gravitațional sau globular. Modul de desfășurare a procesului de transfer este prezentat în figura 1.25, [6].

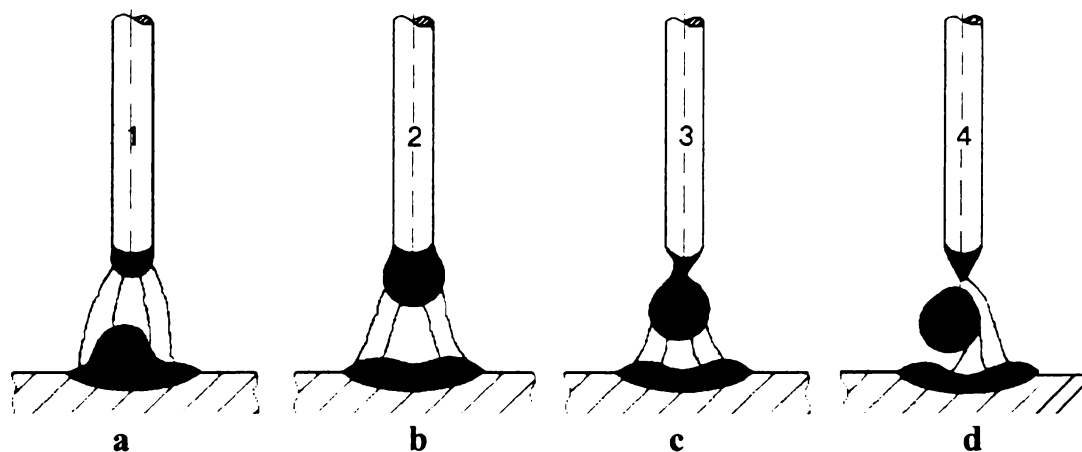


Figura 1.25. Fazele transferului intermediar al picăturii de metal

Creșterea puterii arcului electric prin modificarea valorii parametrilor tehnologici de sudare, curent – tensiune, determină creșterea puterii de topire a arcului. Creșterea tensiunii arcului determină fizic creșterea corespunzătoare a lungimii arcului. Sub acțiunea puterii arcului are loc topirea rapidă a vârfului sârmei electrod, faza a. Metalul topit se acumulează sub acțiunea tensiunilor superficiale la vârful sârmei sub forma unei picături. Datorită lungimii relativ mari a arcului electric volumul picăturii de metal topit din vârful sârmei va crește la dimensiuni mari, depășind diametrul sârmei ($d_p > d_s$) fără să se producă scurtcircuitarea arcului electric, faza b. Sub acțiunea forțelor "pinch" are loc gâtuirea (strangularea) picăturii. Valoarea scăzută însă a acestor forțe (curentul de sudare sub valoarea critică a curentului de pulverizare $I_{s\ cr\ spa}$) face ca gâtuirea picăturii să se producă relativ încet ceea ce favorizează creșterea picăturii de metal, faza c. Reducerea dimensiunii punții de metal sub efectul tot mai intens a forțelor "pinch" determină la un moment dat vaporizarea instantanee a acesteia ca urmare a creșterii densității de curent și desprinderea picăturii din vârful sârmei, faza d. Sub acțiunea vaporilor de metal (forța electrodinamică), dar și a greutății proprii, picătura mare de metal topit plonjează în baia metalică cu viteză foarte mare. Inerția mare a picăturii "globulei" determină la atingerea suprafeței băii împrăștiări intense de metal topit din baie. Fenomenul poate fi comparat cu efectul aruncării unei pietre într-o baltă cu apă. Cu cât piatra este mai mare cu atât stropii sunt mai mari, iar stropirile mai intense.

Datorită dimensiunilor mari ale picăturilor au loc scurtcircuitări neregulate ale arcului electric, dar cu frecvență mult mai scăzută decât în cazul transferului prin scurtcircuit (frecvența picăturilor în acest mod de transfer este sub 25 Hz). Aceste scurtcircuitări puternice determină la rândul lor, cu era de așteptat, de asemenea stropiri intense din baia de sudură, dar și din vârful sârmei. Această intensificare a stropirilor este rezultatul unui curent de scurtcircuit foarte mare care produce o vaporizare mult mai intensă a punții metalice (crește mult valoarea forței electrodinamice).

Nivelul stropirilor depinde de gazul de protecție utilizat. În cazul argonului și amestecurilor de gaze bogate în argon ($> 80\% \text{ Ar}$) nivelul stropirilor este mai redus, pe de o parte datorită picăturilor mai mici de metal, iar pe de altă parte numărului mai redus de scurtcircuite. Forța de reacție anodică are intensitate mică, iar transferul picăturii se face aproape axial. În cazul dioxidului de carbon sau amestecurilor de gaze bogate în dioxid de carbon ($> 20\% \text{ CO}_2$) manifestarea puternică a forței de reacție anodică determină formarea asimetrică a picăturii la vârful sârmei măbind volumul acesteia și totodată probabilitatea mai mare ca picătura să sară în exteriorul băii metalice sub formă de stropi. Lungimea mai mică a arcului electric în CO_2 decât în argon determină la rândul ei creșterea numărului de scurtcircuite. Aceste fenomene fac ca stropii și pierderile de material prin stropiri să fie cele mai mari la sudarea în CO_2 , sau amestecuri bogate în CO_2 .

Caracterizarea transferului intermediar:

- specific puterilor medii de arc: curent de sudare, respectiv tensiuni medii:
- $I_{s \text{ cr sha}} < I_s < I_{s \text{ cr spa}}$
- productivitate medie la sudare, diminuată însă mult de rată mare a pierderilor de material prin stropi;
- energie liniară medie introdusă în componente;
- forțe dominante în arc: forța “pinch”, forța electrodinamică, forța gravitațională;
- nu este conditionat de gazul de protecție utilizat;
- transferul picăturii: globular și prin scurtcircuit;
- arc instabil;
- pierderi mari de material prin stropi mari și stropiri intense, cuprinse între
- 5 – 10%; se produc cele mai mari pierderi de metal la sudarea MIG/MAG);
- *utilizare:*
 - ✓ sudarea tablelor de grosime medie;
 - ✓ sudarea în poziție orizontală sau în jgheab;
 - ✓ sudarea oțelurilor carbon nealiate și a unor oțeluri slab aliate;

Aspectul transferului intermediar este prezentat în figura 1.26. Se observă dimensiunea mare a picăturii de metal și formarea laterală a ei la marginea sârmei electrod.



Figura 1.26. Aspectul transferului globular a picăturii de metal topit

Datorită instabilității mari a arcului electric, respectiv pierderilor foarte mari de metal prin stropi transferul intermediar se va evita să se utilizeze la sudarea MIG/MAG.

Problema este pe deplin rezolvată prin utilizarea arcului pulsant care permite modificarea transferului nefavorabil, caracteristic arcului intermediar într-un transfer fără scurtcircuite (asemănător transferului prin pulverizare) cu formarea unei picături pe puls lipsit de stropi sau cu stropiri neglijabile. Ori de câte ori dacă puterea arcului necesară la sudare, respectiv calculul parametrilor tehnologici de sudare conduce la valori cuprinse în domeniul arcului intermediar este recomandată folosirea sudării în curent pulsant. Dacă însă acest lucru nu este posibil fiindcă nu se dispune de surse de sudare care să permită sudarea în curent pulsant, se recomandă utilizarea amestecurilor de gaze bogate în argon. Se va evita sudarea în CO₂ 100 care determină stropirile cele mai mari.

Tot în acest sens este recomandată utilizarea surselor de sudare cu transfer prin tensiune superficială STT produse de firma LINCOLN, [82], [83], concepute special pentru acoperirea zonelor de transfer prin scurtcircuit sau intermediar (curentul nominal de sudare mai mic de 220A), pentru reducerea drastică a pierderilor de material prin stropi (de pâna la cinci ori). Din păcate aceste echipamente de sudare sunt extrem de rare în practica industrială.

1.3.5. Transferul sinergic în curent pulsant

Transferul sinergic în curent pulsant sau în impulsuri se caracterizează prin transferul dirijat a picăturii de metal prin arcul electric prin modificarea periodică a curentului de sudare.

1.3.5.1. Principiul procedurii

Deosebirea esențială dintre sudarea MIG/MAG în impulsuri și sudarea MIG/MAG clasică constă în faptul că la acest procedeu, curentul de sudare nu mai este constant în timp, ci variază periodic între o valoare maximă – *curent de puls* – și o valoare minimă – *curent de bază* – cu o anumită frecvență, [33], figura 1.27.

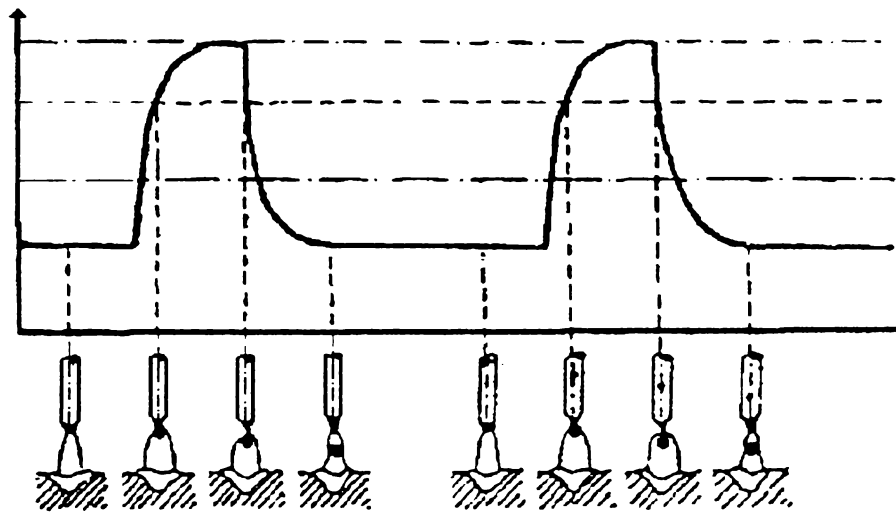


Figura 1.27. Principiul procedurii de sudare în curent pulsant

În timpul de puls t_p , denumit și “timp cald”, valoarea ridicată a curentului de puls I_p determină topirea rapidă și desprinderea sub efectul forțelor electromagnetice a picăturii de metal de dimensiuni mici fără scurtcircuitarea arcului electric, asemănător transferului prin pulverizare, figura 2. În timpul de bază t_b , denumit și “timp rece”, curentul de bază I_b de valori relativ mici asigură întreținerea arderii stabile a arcului electric fără însă să producă topirea sârmei, respectiv transferul picăturii. Valoarea medie a curentului obținut se situează, în funcție de valorile parametrilor curentului pulsant, în domeniul transferului prin scurtcircuit sau intermediar corespunzătoare sudării clasice folosind curent constant.

1.3.5.2. Parametrii tehnologici ai curentului pulsant

Principalii parametri ai curentului pulsant [55], [25], [18], sunt, figura 1.28:

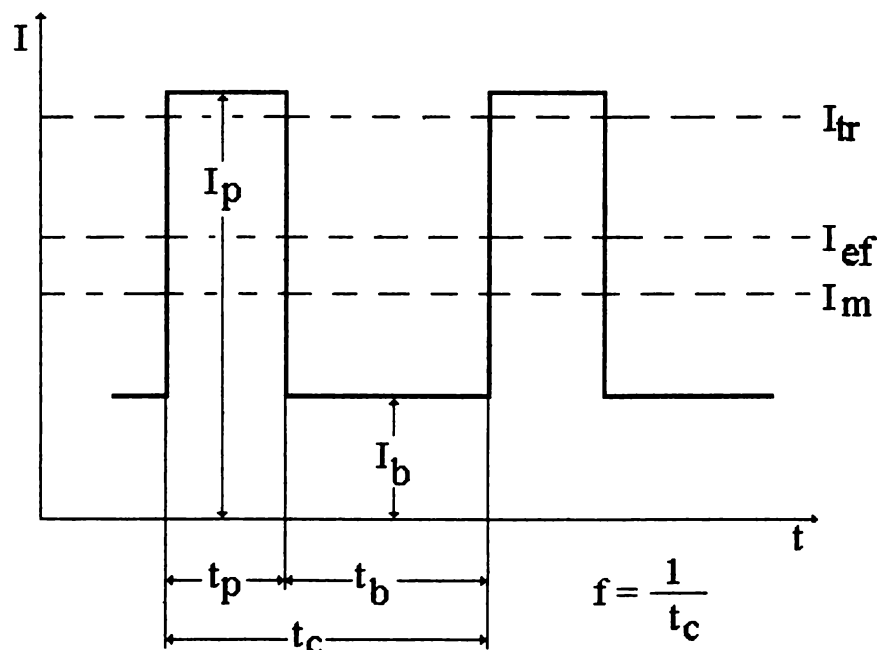


Figura 1.28. Parametrii curentului pulsant

- curentul de puls I_p ;
- curentul de bază I_b ;
- timpul de puls t_p ;
- timpul de bază t_b ;
- frecvența pulsurilor f ;
- durata ciclului de puls t_c ;
- curentul mediu de sudare I_m ;
- curentul critic (de tranziție) I_{tr} ;
- curentul efectiv I_{ef} ;

1.3.5.2.1. *Curentul de puls I_p .* Trebuie să aibă o valoare mai mare decât valoarea curentului critic sau de tranziție I_{tr} , pentru a asigura transferul prin pulverizare a picăturii de metal topit. Sub influența curentului de puls I_p de valori ridicate are loc topirea vârfului sârmei electrod și sub acțiunea forțelor electromagnetice “pinch” de valori mari $F_p = I^2/2$ are loc detașarea picăturii de metal la dimensiuni mici, asemănător transferului prin pulverizare. Totodată valoarea ridicată a curentului de puls I_p mărește stabilitatea arcului electric. Deci, din aceste puncte de vedere, este de dorit ca valoarea curentului de puls să fie cât mai mare. Pe de altă parte însă, o valoare prea ridicată a curentului de puls mărește presiunea dinamică a plasmei arcului, ceea ce poate conduce la perforarea tablei sau la apariția unor defecte de tipul creștăturilor marginale. În plus, trecerea (plonjarea) picăturii cu viteze mari în baie poate conduce la împrôșcări de metal topit. Curenții de puls mari conduc la distrugerea prematură a duzei de contact precum și la creșterea nivelului de zgomot. Prin urmare curentul de puls nu poate fi oricât de mare.

1.3.5.2.2. *Curentul de bază I_b .* Asigură stabilitatea arcului electric în perioada timpului de bază, evitând stingerea acestuia. Curentul de bază are o valoare prea mică pentru a determina o topire semnificativă a sârmei electrod, respectiv un transfer al picăturii. În acest timp se produce totuși o încălzire prin efect Joule – Lenz a capătului liber a sârmei electrod favorabilă topirii mai ușoare a sârmei în timpul de puls. Se recomandă să se mențină la o valoare cât mai redusă pentru a obține un curent mediu la valori scăzute, esența sudării în curent pulsant. Totuși curentul de bază nu rămâne la o valoare constantă ci se modifică, însă în limite mici, între 20 ... 120 A după o variație liniară proporțională cu viteza de avans a sârmei electrod. Prin aceasta se favorizează îmbunătățirea condițiilor de topire și de transfer a picăturii de metal.

1.3.5.2.3. *Timpul de puls t_p .* Depinde de valoarea curentului de puls I_p , fiind o funcție de acesta. Cuplul de valori (I_p , t_p) definește condițiile de transfer. Reglarea optimă a celor două valori determină detașarea unei singure picături pe puls. Acest caz particular al sudării MIG/MAG în curent pulsant caracterizat prin transferul unei singure picături pe puls poartă denumirea de “sudare sinergică” [89] și constituie optimul reglării parametrilor tehnologici de sudare, din punct de vedere a stabilității arcului electric, a eliminării totale a stropilor, a controlului dimensiunilor picăturilor, respectiv a energiei introduse în componente.

În literatura de specialitate sunt prezentate corelații între curentul de puls I_p și timpul de puls t_p pentru asigurarea unui transfer optim. Aceste corelații sunt de forma, [89]:

$$I_p^n * T_p = D \quad (1.16)$$

unde, n și D sunt constante ce depind în mod esențial de natura metalului de bază, de diametrul sârmei și de gazul de protecție; de exemplu, pentru o sârmă de oțel nealiată cu diametrul de 1,2 mm și utilizând un amestec de gaze Ar + 1,5% O₂, valorile celor două constante sunt : $n = 2$ și $D = 400 \text{ A}^2 \text{ s}$.

Dacă durata timpului de puls este prea scurtă, picătura de metal nu se poate forma și detașa în cursul unui puls. Astfel ea se mărește cu fiecare puls și se detașează după mai multe pulsuri, sub forma unor picături mari (globule) asemănător transferului globular a picăturii prin efect gravitațional. Acest

mod de transfer este nefavorabil din punct de vedere a stabilității arcului și a modului de transfer conducând la stropiri.

Dacă durata timpului de puls este prea lungă la fiecare puls are loc detașarea mai multor picături sub forma unui “șirag de mărgel” care prin atingere pot scurtcircuita arcul electric conducând și pe această cale la instabilități și stropiri, [19].

În figura 1.29 se prezintă corelația dintre curentul de puls I_p și timpul de puls t_p , pentru asigurarea unui transfer optim al picăturii (o picătură pe puls).

Figura 1.29. Domeniul optim de transfer în curent pulsant

Se observă că domeniul de reglare a celor doi parametri este destul de extins. De regulă alegerea unei valori reduse pentru curentul I_p trebuie compensată prin mărirea timpului t_p și invers, figura 1.30.

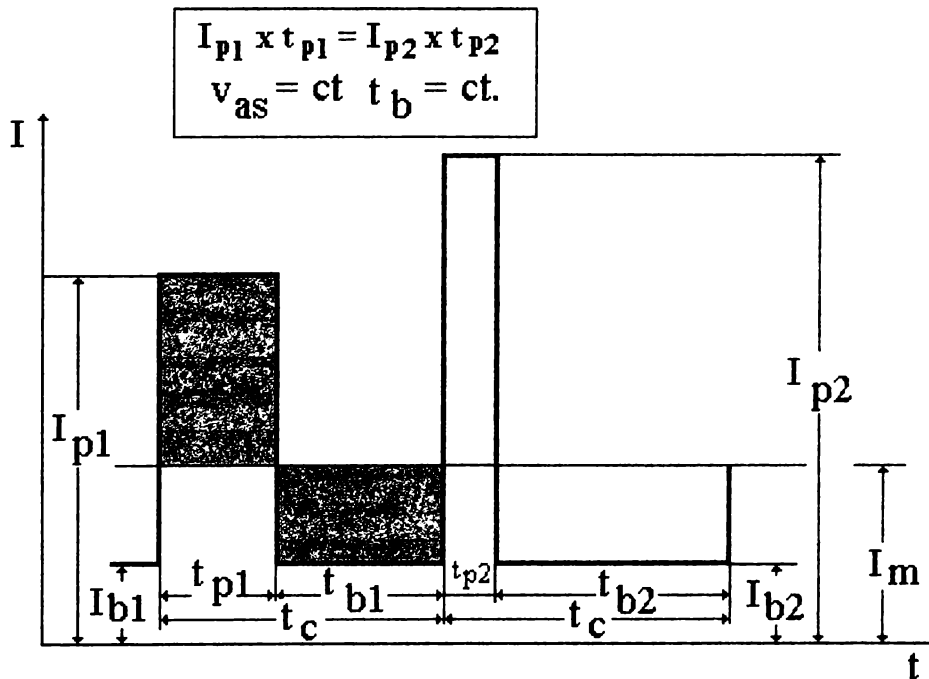


Figura 1.30. Comparație între 2 impulsuri de curent

Între cele două forme de impulsuri există însă următoarele diferențe (chiar dacă valoarea curentului mediu de sudare este constantă):

- detașarea picăturii se face mai lent pentru impulsul cu amplitudine mai mică;
- presiunea dinamică a arcului în cazul curentului I_{i1} este mai mică decât pentru valoarea I_{i2} ceea ce conduce la o pătrundere mai mică și la o diluție mai redusă, lucru deosebit de

important la sudarea tablelor subțiri sau la placarea sau încărcarea MIG/MAG cu un sârmă electrod din bronz de aluminiu;

- c) nivelul de zgomot al arcului mai redus în cazul I_{II} ;
- d) uzura mai redusă a duzei de contact în cazul I_{II} .

Din aceste considerente timpul de impuls este legat direct de curentul de impuls, care la rândul lui depinde de materialul de adaos, diametrul sârmei și gazul de protecție.

În figura 1.28 nu s-au reprezentat și pantele de creștere/descrere, determinate de timpul de creștere t_{cr} și timpul de descere t_{dc} a impulsului, din motive simplificatoare. La unele instalații timpii t_{cr} și t_{dc} se pot regla între anumite limite, iar la alte instalații sunt fixi, prreglați de către producător. În literatura de specialitate acești parametri poartă denumirea de UP SLOPE pentru t_{cr} , respectiv DOWN SLOPE pentru t_{dc} [52], [53] și ei acționează asupra transferului picăturii de metal și a nivelului de zgomot al arcului. O valoare redusă a timpilor t_{cr} , respectiv t_{dc} dă o pantă abruptă, rezultând un arc “dur”, cu un nivel sonor puternic care poate deveni supărător pentru operatorul sudor și pentru personalul muncitor. Forma pantelor de creștere și descere este diferită de la o instalație la alta: liniară, în trepte, logaritmică, exponențială, etc., influențând forma pulsului. Cea mai simplă formă de puls este forma trapezoidală.

1.3.5.2.4. Timpul de bază t_b . Se reglează astfel încât să se obțină curentul mediu de sudare, a cărui valoare determină topirea optimă și lungimea adecvată a arcului electric. Este o rezultată a frecvenței pulsului în condițiile în care timpul de puls este constant.

În tabelul 1.13 se prezintă domeniul de variație a principalilor parametri ai curentului pulsat. [55], folosiți frecvent pe instalațiile de sudare utilizate în practică.

Tabelul 1.13. Domeniul de variație a parametrilor curentului pulsat

Nr. crt.	Denumirea parametrului	Simbolul	Domeniul de variație
1	Curent de puls	I_p	(300 – 500) A
2	Timpul de puls	t_p	(2 – 5) ms
3	Curentul de bază	I_b	(30 – 100) A
4	Timpul de bază	t_b	(2 – 20) ms
5	Frecvența pulsurilor	f	(50 – 300) Hz

Observație: cel mai dificil de selectat dintre parametrii de mai sus este durata optimă a curentului de puls t_p .

1.3.5.2.5. Frecvența pulsurilor f . Frecvența pulsurilor depinde în principal de viteza de avans a sârmei fiind o funcție direct proporțională cu aceasta. Practic în cazul instalațiilor sinergice de sudare în curent pulsant reglarea frecvenței pulsurilor se face automat o dată cu modificarea vitezei de avans a sârmei de către microprocesor prin funcția care leagă cele două mărimi. Frecvența pulsurilor mai depinde de diametrul sârmei electrod, gazul de protecție, lungimea capătului liber, lungimea arcului. Influențează direct durata timpului de bază, deoarece timpul de puls este constant pentru anumite condițiile date de sudare, timpul de bază fiind prin urmare o rezultată a frecvenței (nu este un parametru care se reglează).

În figura 1.31 este prezentată variația frecvenței pulsurilor în funcție de viteza de avans a sârmei, [6]. Această variație este practic liniară și depinde de diametrul electrodului. Se recomandă să se evite frecvențe mai mici de 40 Hz deoarece efectul de pâlpare este obositor pentru operatorul sudor. Frecvența pulsurilor scade cu creșterea lungimii capătului liber. La variațiile aleatoare a lungimii capătului liber din timpul sudării modificarea frecvenței se percepe prin modificarea nivelului de zgomot, respectiv timbrul sunetului. Pentru operatorul sudor poate fi un mijloc practic de reglare și menținere a capătului liber prin păstrarea aceluiași timbru al sunetului produs de arc electri.

1.3.5.2.6. Curentul mediu de sudare I_s – Viteza de avans a sârmei electrod v_{as} . Determină puterea (energia) arcului electric, respectiv cantitatea de căldură introdusă în componente. Corespunde curentului de sudare impus din punct de vedere tehnologic pentru realizarea îmbinării sudate în

condițiile de execuție și calitate cerute. Este echivalent din punct de vedere energetic cu valoarea curentului de sudare constant corespunzător sudării MIG/MAG clasice.

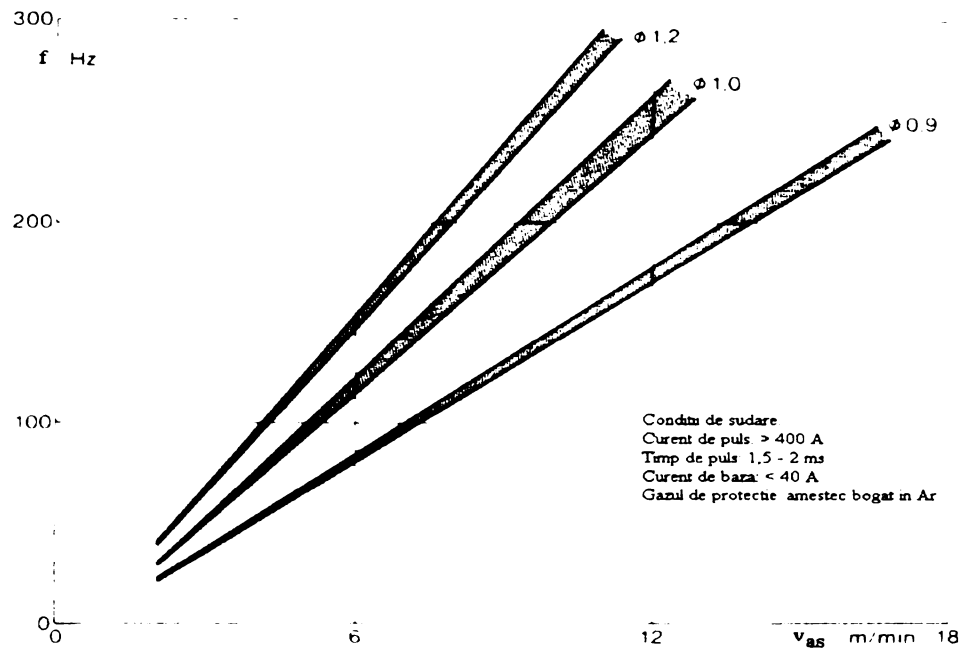


Figura 1.31. Corelația dintre viteza de avans a sârmei electrod și frecvența impulsurilor
Pentru calculul curentului mediu I_m se folosește relația:

$$I_m = \frac{I_p t_p + I_b t_b}{t_c} = f(I_p t_p + I_b t_b) \quad 1.17$$

unde :

$$f = \frac{1}{t_c} = \frac{1}{t_p + t_b}$$

Prin urmare și la sudarea în curent pulsant modificarea curentului mediu se face prin modificarea vitezei de avans a sârmei electrod v_{as} , pe baza relației aproape liniare care există între cei doi parametri:

$$I_m = m \times v_{as} \quad 1.18$$

unde: m – factor de topire [A s/m];

Din analiza relațiilor de mai sus rezultă că, pentru păstrarea condițiilor de transfer (mărimea picăturii constantă), o dată cu creșterea vitezei de avans a sârmei, trebuie să se modifice și parametrii curentului pulsant. Teoretic, pentru modificarea curentului mediu se poate modifica unul sau toți parametrii curentului de puls. În practică însă pentru simplificarea reglării, respectiv simplificarea programului microprocesorului la modificarea vitezei de avans a sârmei se modifică proporțional frecvența pulsurilor. Curentul de puls I_p și timpul de puls t_p , cei care asigură transferul efectiv a picăturii și mărimea acesteia, rămân constanți pentru anumite condiții date: metalul de bază, diametrul sârmei, gazul de protecție. În figura 1.32, [6], se prezintă modificarea puterii arcului la modificarea vitezei de avans a sârmei electrod.

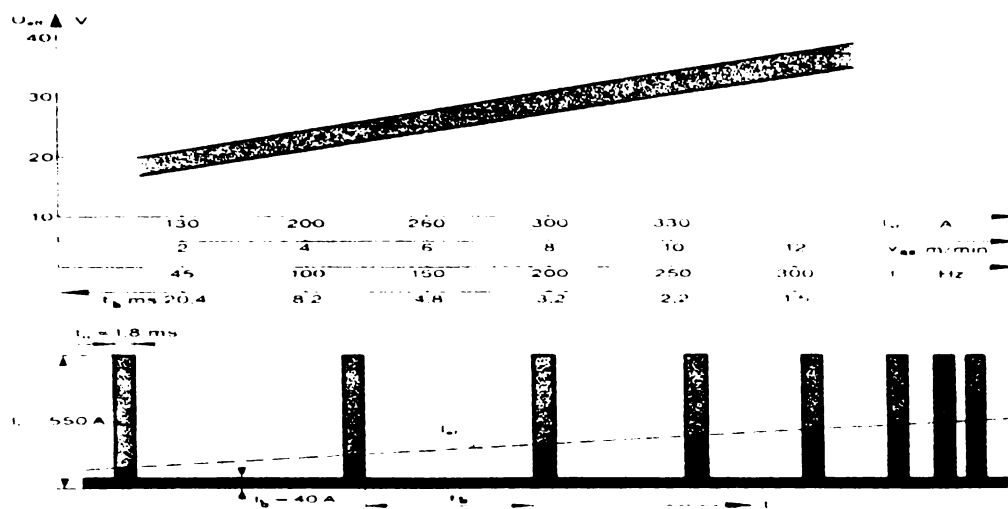


Figura 1.32. Corelația dintre viteza de avans a sârmei și puterea arcului

Creșterea vitezei de avans a sârmei determină creșterea frecvenței pulsurilor, și implicit reducerea proporțională a timpului de bază, [64], [52], [53], [32]. Prin aceasta mărimea picăturilor rămâne practic constantă chiar la dublarea vitezei de avans a sârmei deoarece atât curentul de puls, respectiv forța electromagnetică cea care determină desprinderea picăturii, cât și timpul de puls în care are loc topirea sârmei rămân nemodificați. În schimb frecvența se dublează, figura 1.33.

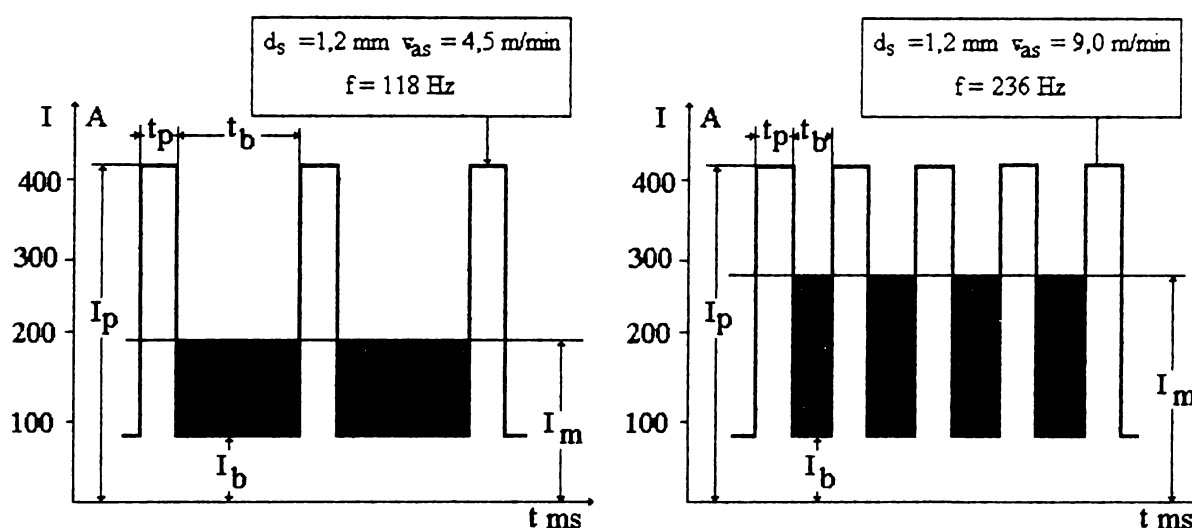


Figura 1.33. Modificarea frecvenței pulsurilor la creșterea vitezei de avans a sârmei

1.3.5.2.7. *Curentul critic sau de tranziție I_{tr}* . Corespunde unei valori minime a curentului de puls pentru care se poate realiza transferul prin pulverizare a metalului topit, valoare care asigură o forță electromagnetică pinch de valori ridicate. Valoarea curentului critic I_{tr} depinde în principal de materialul sârmei electrod, de gazul de protecție, respectiv de diametrul sârmei (vezi tabelul 1, scap. 1.4.2.2). De asemenea mai este influențat de lungimea capătului liber a sârmei electrod și de lungimea arcului electric (tensiunea medie a arcului).

1.3.5.2.8. *Curentul efectiv de sudare I_{ef}* . Reprezintă un curent continuu echivalent curentului pulsant care produce același efect Joule – Lenz la trecerea printr-o rezistență, [67], [52]. Pentru calculul lui se folosește relația:

$$I_{ef} = \frac{1}{t} \int_0^t \sqrt{I^2} dt \quad (1.19)$$

Valoarea curentului efectiv este mai mare decât valoarea curentului mediu cu care adesea se confundă. Măsurarea lui este greu de realizat necesitând un aparat integrativ care este foarte scump. În practică aparatele de măsură de pe sursele de sudare măsoară valoarea curentului mediu. În cartea tehnică a echipamentului precizarea măsurării efective a curentului (dacă aceasta este operațională) se

face prin termenul "TRUE VALUE". Sunt însă foarte puține echipamentele de sudare industriale care au această opțiune, care dă adevărata valoare a cantității de energie introdusă în componente la sudarea în curent pulsant.

1.3.5.3. Avantajele sudării MIG/MAG în curent pulsant

Se pot sintetiza astfel:

- ✓ asigură transferul fără scurtcircuit (prin pulverizare) a metalului topit în tot domeniul de lucru, deci și în cazul domeniilor corespunzătoare transferului prin scurtcircuit, respectiv transferului intermediar, caracterizate prin insabilitatea procesului de sudare și stropiri intense.
- ✓ controlul energiei introduse în componente, de valori mai mici comparativ cu sudarea prin pulverizare cu care se compară adesea, cu efect asupra reducerii tensiunilor și deformațiilor la sudare;
- ✓ posibilitatea sudării tablelor de grosime mică sub 5 mm, utilizând un transfer fără scurtcircuit (prin pulverizare), și fără stropiri;
- ✓ posibilitatea sudării în poziții dificile, verticală, peste cap, ca efect al controlului băii metalice, prin reducerea volumului acesteia;
- ✓ posibilitatea utilizării sârmelor groase, $d_s = 1,6...2,0$ mm la sudare, cu asigurarea unui transfer fără scurtcircuit (prin pulverizare) la valori reduse ale curentului mediu, pentru care în cazul sudării clasice transferul este prin scurtcircuit sau intermediar. Transferul prin pulverizare, în cazul sârmelor groase, la sudarea clasică, poate fi atins numai la valori foarte mari ale curentului de sudare, ceea ce limitează utilizarea acestor sârme numai la componente groase. Prin utilizarea curentului pulsant sârmele groase pot fi utilizate și la sudarea componentelor cu grosimi mici, prin aceasta diminuându-se costul materialului de adaos. Avantajul folosirii sârmelor groase este cu atât mai important în cazul sudării aluminiului și aliajelor sale, unde apar dificultăți mari la antrenare, în special în cazul sârmelor subțiri acestea fiind sârme moi greu de antrenat prin tubul flexibil de ghidare. În plus tot în acest caz se reduce pericolul porilor din cusătură datorită suprafeței mult mai reduse raportate la cantitatea de metal depus cunoscută fiind aviditatea mare a oxidului de aluminiu față de umiditatea din aer (suprafața exterioară a sârmei este acoperită cu un strat de Al_2O_3 a cărei grosime depinde de modul de păstrare a sârmei).
- ✓ eliminarea stropirilor sau diminuarea drastică a acestora. În figura 1.34, [36], se prezintă nivelul stropirilor în cazul sudării MIG/MAG în curent pulsant, comparativ cu sudarea clasică în CO_2 100% sau în amestecuri de gaze bogate în Ar.

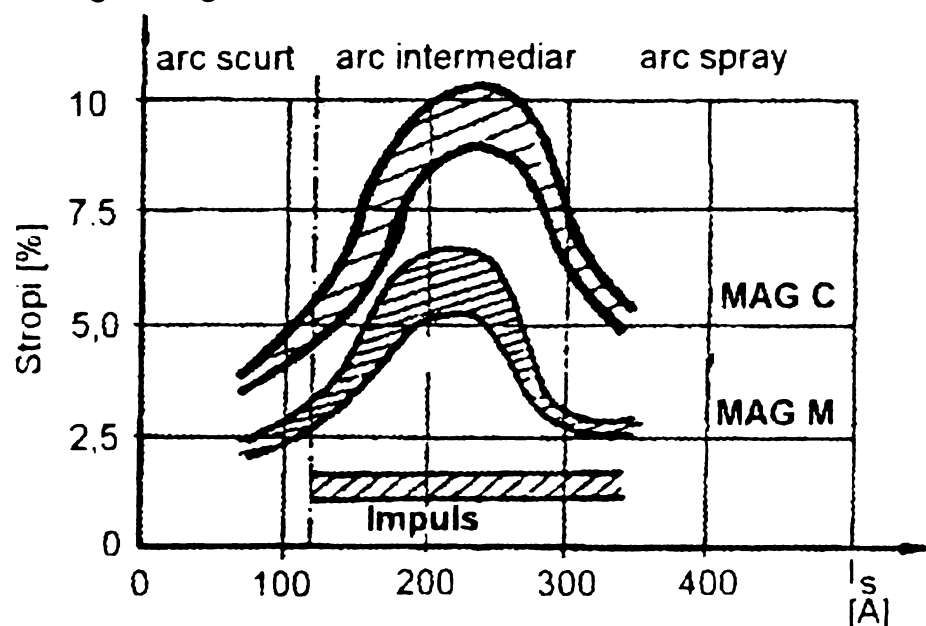


Figura 1.34. Nivelul stropirilor la sudarea MIG/MAG funcție de tipul de transfer

- ✓ minimizarea influenței factorului uman asupra calității îmbinării sudate;
- ✓ îmbunătățirea calității îmbinărilor sudate;

- ✓ posibilitatea sudării stratului de rădăcină fără pericolul străpungcrii acestuia;
- ✓ stabilitate mai bună a arcului electric la fluctuații mai mari ale poziției pistolului de sudare;
- ✓ estetica mai bună a cusăturii sudate;
- ✓ reducerea riscului de lipire al sârmei electrod în baia de sudură;
- ✓ ușurința amorsării arcului electric prin ascuțirea vârfului sârmei electrod.

1.3.5.4. Caracterizarea transferului prin curent pulsat

Particularitățile principale ale acestui mod de transfer sunt:

- specific puterilor mici și medii ale arcului electric: domeniul transferului prin scurtcircuit, respectiv domeniul transferului intermediar;
- productivitate mică și medie în funcție de puterea arcului, dar mai mare decât a tipurilor de transfer pe care le substituie: rată de depunere mai mare, pătrundere mai ridicată, viteze de sudare mai mari, fără pierderi de material,;
- energie liniară controlată introdusă în componente: mai mare decât la sudarea prin scurtcircuit, respectiv mai mică decât la sudarea prin pulverizare, la aceeași valoare a curentului mediu de sudare //;
- forța dominantă în arc: forța electromagnetică “pinch” dată de valoarea ridicată a curentului de puls;
- transferul materialului: sinergic, fără scurtcircuit în tot domeniul de lucru; asemănător transferului prin pulverizare dar cu transferul dirijat a picăturii “o picătură pe puls”;
- transferul picăturii (o picătură pe puls) este condiționat de gazul de protecție: argon sau amestecuri bogate în argon cu mai mult de 80% Ar; *nu se poate suda în curent pulsat folosind CO₂ 100%*;
- transferul este condiționat de polaritatea curentului: numai curent continuu CC⁺;
- stropiri foarte reduse sau fără stropiri (transfer sinergic); eliminarea operației de curățire a stropilor;
- stabilitate înaltă a arcului electric;
- prezența inductanței în circuit deranjează derularea rapidă a fenomenelor de transfer;
- necesită echipamente de sudare mai scumpe și mai complicate;
- necesită o mai bună cunoaștere a fenomenelor specifice sudării în mediu de gaze protectoare în cazul reglajului manual);
- ușor de operat la sudarea cu surse de sudare sinergice cu invertor;
- utilizare:
 - la sudarea oțelului carbon:
 - pentru tehnologii de sudare din domeniul **transferului intermediar**;
 - la sudarea stratului de rădăcină;
 - la sudarea în poziție;
- transferul (procedeul) ideal la sudare aluminiului și aliajelor sale în special în domeniul transferului prin scurtcircuit și intermediar; nu este recomandat în domeniul transferului prin pulverizare; pătrundere sigură la sudare; estetică foarte bună a cusăturii; se pot suda MIG pulsat table subțiri de până la 1 mm (comparabil cu sudarea WIG);
- la sudarea oțelurilor înalt aliate: în toate domeniile de transfer;
- la sudarea cuprului și aliajelor de cupru: în domeniul specific transferului prin scurtcircuit și intermediar;
- este transferul (procedeul) optim pentru toate materiale metalice;

Aspectul transferului picăturii la sudarea în curent pulsat obținut prin filmare rapidă este prezentat în figura 1.35.

În concluzie, folosirea curentului pulsat este specifică domeniului corespunzător transferului (arcului) intermediar caracterizat prin stabilitate scăzută a arcului electric și pierderi mari de material de adaos prin stropi. Utilizarea curentului pulsat în domeniile specifice transferului prin scurtcircuit

respectiv transferului prin pulverizare nu este rațională nici din punct de vedere tehnologic și nici din punct de vedere economic [25].

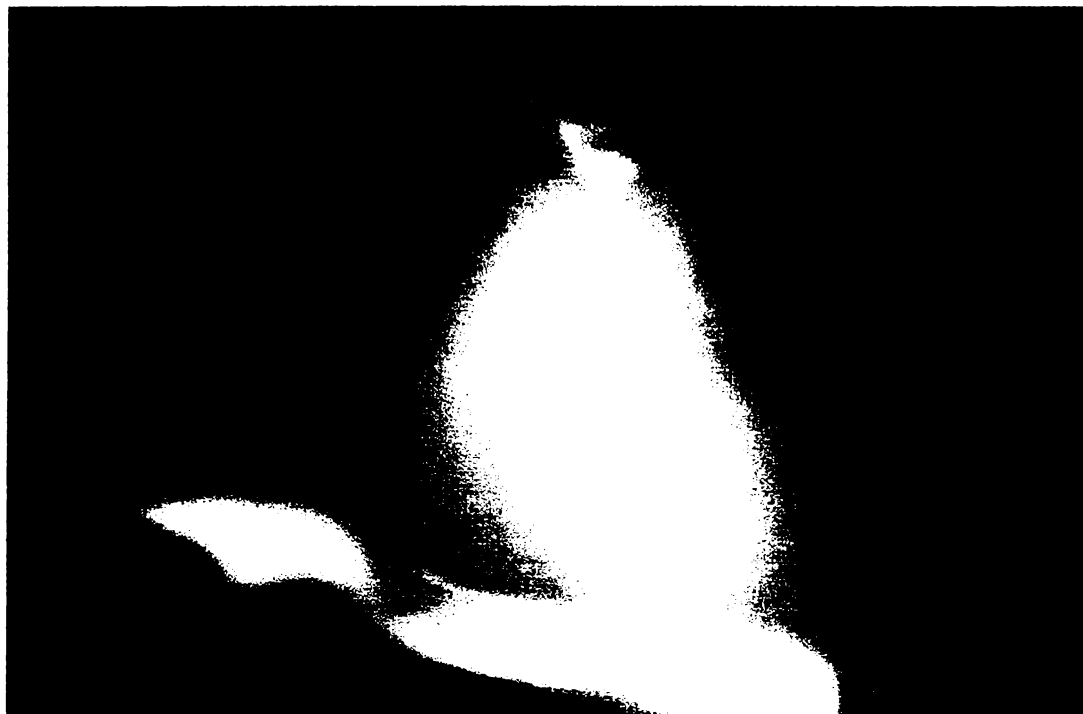


Figura 1.35. Aspectul transferului picăturii prin pulverizare

1.3.6. Transferul prin tensiune superficială

Transferul prin tensiune superficială, sau transferul STT (Surface Tension Transfer), reprezintă cel mai nou tip de transfer a picăturii de metal la sudarea MIG/MAG. În continuare îl vom numi simplu transferul STT așa cum s-a impus deja în literatura de specialitate.

Apariția transferului STT este indisolubil legată de folosirea invertoarelor în construcția echipamentelor de sudare MIG/MAG, și mai exact de dezvoltarea invertoarelor cu viteză foarte mare de răspuns, respectiv timpi de reacție foarte mici de ordinul microsecundelor. Aceasta presupune ca frecvența invertorului să fie ≥ 100 kHz, performanță pe care doar ultima generație de invertoare o are.

Pe de altă parte conceptul de transfer prin tensiune superficială STT presupune cunoașterea în profunzime a fenomenelor și factorilor care guvernează procesul de transfer al metalului topit la sudarea MIG/MAG în general, și în cazul transferului prin scurtcircuit, în special.

Transferul STT vine să diminueze sau chiar să elimine dezavantajul principal al sudării cu transfer prin scurtcircuit și anume stropirile inerente și în cantitate relativ mare.

În acest sens, la realizarea sistemului de transfer STT se pornește de la analiza cauzelor care determină apariția stropirilor în cazul transferului prin scurtcircuit, prezentate și dezvoltate pe larg în cadrul subcapitolului 1.3.1.

În principiu este vorba de două tipuri de stropiri la sudarea cu transfer prin scurtcircuit și anume stropiri din vârful sârmei electrod și stropiri din baia metalică, [82], [84], [85], [86], [90]. Cauza acestor stropiri în ambele cazuri este determinată de scurtcircuiturile care apar între picătura de metal și baia topită.

Stropirile care apar din vârful sârmei electrod se datoresc scurtcircuiturilor “solide” dintre picătură și baia metalică, care produc sub acțiunea curentului de scurtcircuit de valori foarte mari (peste 300 A), respectiv a forțelor “pinch” de valori ridicate, gâtuirea puternică a picăturii până la vaporizarea și expulzarea explozivă “punții” de metal formate în vârful sârmei electrod. Datorită presiunii mari generate de vaporizarea instantanee a punții are loc desprinderea de picături foarte fine din vârful sârmei sub forma unui jet de scântei care se împrăștie în spațiul arcului electric și în mediul înconjurător. Mecanismul acestui tip de stropiri este prezentat în figura 1.37.

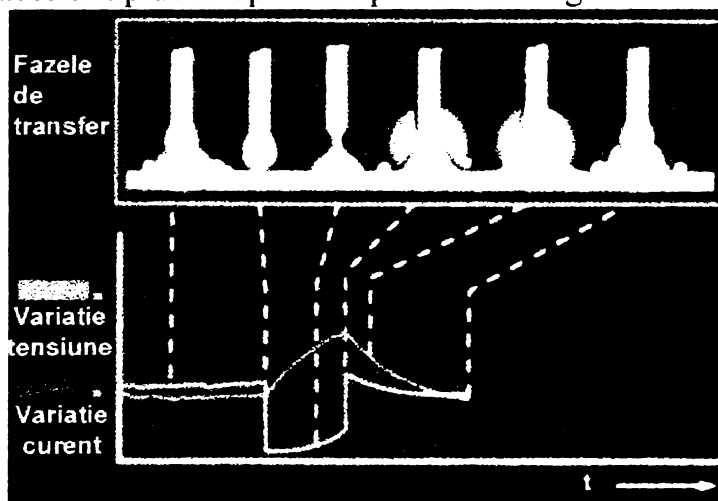


Figura 1.37. Mecanismul stropirii din vârful sârmei la sudarea MIG/MAG cu transfer prin scurtcircuit

Stropirile care se produc din baia metalică au drept cauză scurtcircuiturile incipiente care apar între picătura de metal în formare la vârful sârmei și baia metalică. În contactele punctiforme care se produc la nivelul băii are loc vaporizarea, sub acțiunea densității mari de curent care apare, a metalului topit din această zonă care generează o forță de “reacție” puternică, capabilă să împingă picătura din axa sârmei și chiar s-o desprindă din vârful acesteia, învingând forțele de tensiune superficială. Picătura este aruncată în afara spațiului arcului electric sub forma unor stropi de metal de dimensiuni mari ca și cum ar sări din baia metalică. Pierderile de material de adaos sunt foarte mari, iar stropii foarte periculoși (produc arsuri) și foarte aderenți. Mecanismul de producere a stropirilor de acest tip sunt prezentate în figura 1.38.

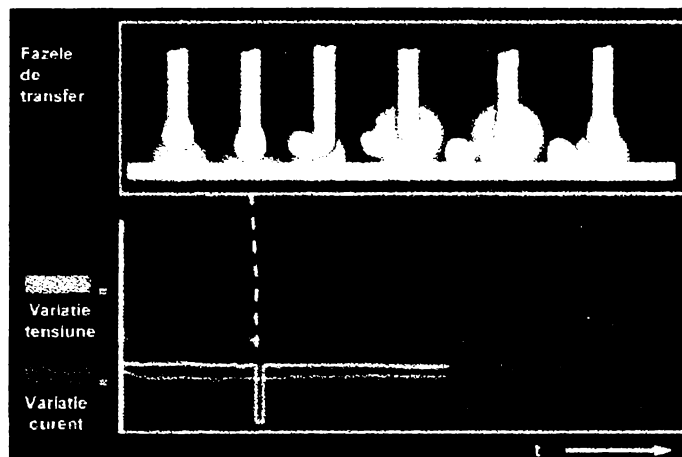


Figura 1.38. Mecanismul stropirii din baia metalică la sudarea MIG/MAG cu transfer prin scurtcircuit

Pe baza acestor observații firma americană Lincoln a realizat un echipament de sudare special în acest scop, denumit sugestiv *Invertec STT*, care prin performanțele înalte ale inverterului, permite comanda, controlată riguros, a parametrilor principali ai procesului de sudare *curent, respectiv tensiune*, pentru diminuarea efectelor negative produse de scurtcircuitele care au loc în cazul sudării clasice. Acest lucru este posibil deoarece timpul de răspuns al inverterului este foarte mic, de ordinul a $10 \mu s$ (în cazul inverterului de 100 kHz), mult mai mic decât timpul cu care se derulează fenomenele specifice transferului prin scurtcircuit de ordinul a 3 – 5 ms. Caracteristic acestui echipament de sudare este că sursa nu mai are o caracteristică externă constantă, cum este la sudarea MIG/MAG clasică pentru producerea fenomenului de autoreglare, ci are o alură variabilă (chiar surprinzătoare la prima vedere) trecând prin toate formele de caracteristici cunoscute, rigidă, coborâtore, brusc coborâtore, în funcție de cerințele de proces.

1.3.6.1. Principiul transferului STT.

Modul de formare și de detașare al picăturii de metal topit din vârful sârmei electrod și modul de variație al parametrilor tehnologici principali de sudare – *curentul prin arc, respectiv tensiunea de lucru* – sunt prezentate în figura 1.39, [82], [84]. Definirea celor doi parametri prin denumirile de mai sus, diferite oarecum de denumirile încetățenite în practica sudării, nuanțează de fapt particularitățile care caracterizează acest mod de transfer comparativ cu sudarea clasică.

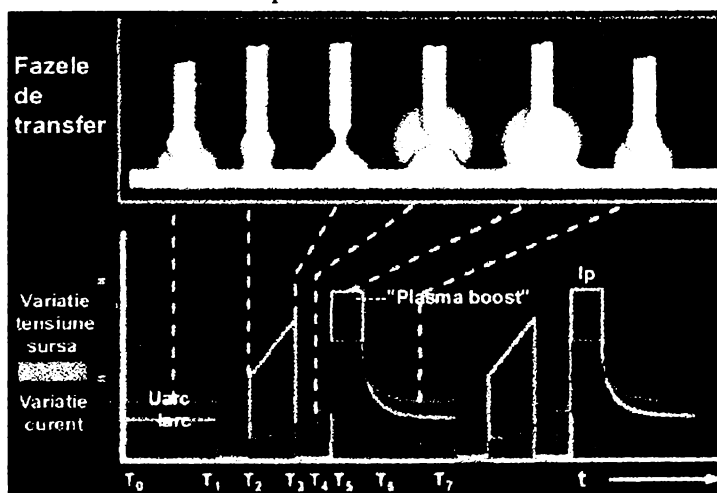


Figura 1.39. Principiul transferului prin scurtcircuit

Etapele transferului STT:

În perioada $T_0 - T_1$ sursa furnizează curentul de sudare I_s , respectiv tensiunea arcului U_a , în funcție de necesitățile tehnologice impuse de aplicația dată. Este perioada (singura) în care se poate

vorbi de un arc electric normal, obișnuit, în care cei doi parametri au o configurație similară cu cea de la sudarea clasică. Sub acțiunea căldurii arcului are loc topirea vârfului sârmei electrod cu formarea picăturii de metal, respectiv topirea piesei cu formarea băii metalice.

În momentul T_1 picătura (sfera) de metal atinge, prin creșterea dimensiunilor ei și a lungimii relativ reduse a arcului, baia topită într-un punct. Un senzor de tensiune furnizează un semnal care comandă sursa, într-un timp extrem de scurt de ordinul microsecundelor, să scadă curentul la cca 10 A, pe care îl menține aproximativ 0,75 ms, timp suficient însă ca sub acțiunea tensiunii superficiale picătura (sfera de metal) să se transforme într-un cilindru de metal topit, ca o punte, care unește vârful sârmei cu baia metalică. Astfel, sub acțiunea tensiunii superficiale care acționează la interfața picătură baie metalică, contactul punctiform inițial (sferă pe suprafață), se transformă într-un contact ferm de suprafață, de secțiune circulară (cilindru pe suprafață).

În momentul T_2 curentul sursei crește brusc la o valoare bine precizată, după care are o creștere liniară cu o pantă de înclinație dată. Tensiunea dintre sârma electrod și piesă, la început, are de asemenea o creștere bruscă, urmată de o creștere liniară cu o anumită pantă și apoi de o creștere exponențială. Creșterea exponențială a tensiunii pe această porțiune nu este comandată de sursă pentru un anumit scop, ci este rezultatul creșterii rezistivității punții de metal topit, datorită creșterii temperaturii acesteia prin efect Joule – Lenz, cât și a subțierii acesteia sub acțiunea forțelor “pinch”. Cele două fenomene determină creșterea rezistenței circuitului pe porțiunea cilindrului de metal topit ceea ce conduce la creșterea exponențială a căderii de tensiune pe această porțiune de circuit (rezistivitatea este direct proporțională cu temperatura $\rho = \rho_0(1+\alpha t)$). Microprocesorul face derivata semnalului dU/dt în faza finală a perioadei $T_2 - T_3$ și în momentul în care aceasta a atins o valoare de “prag” bine definită, care corespunde fizic cu subțierea cilindrului de metal și formarea unei punți foarte înguste (de ordinul zecimilor de mm) aproape de momentul vaporizării și ruperii (expulzării), comandă din nou sursa să scadă curentul la valoarea de ≈ 10 A, timpul T_3 .

În momentul T_4 are loc ruperea punții la o valoare a curentului foarte mică (densitate de curent foarte mică în secțiunea punții) evitând vaporizarea instantanee a acesteia și împingerea (plonjarea) picăturii, sub efectul forței electrodinamice, cu accelerație mare în baia metalică, răspunzătoare de producerea împrăștiilor de material din baie (așa cum se întâmplă la sudarea MAG clasică cu transfer prin scurtcircuit, vezi scap. 1.3.1). Prin urmare, ruperea punții are loc sub acțiunea forței de tensiune superficială F_σ de la nivelul băii metalice care învinge cealaltă forță de tensiune superficială ce ține picătura la vârful sârmei și care este mult mai mică în această fază (vezi diametrul de contact a punții cu vârful sârmei și diametrul de contact al cilindrului de metal cu baia). Astfel, picătura desprinsă din vârful sârmei formează pe suprafața băii o mică proeminență ca o “movilă”.

În momentul T_5 sursa comandă din nou creșterea bruscă a curentului la valoarea unui curent de puls I_p (peste 400 A) prin creșterea tensiunii sursei. Sub acțiunea forței de refulare a arcului (forța jetului de plasmă) picătura este apăsată (deformată) înspre baie măbind brusc distanța dintre vârful sârmei și baia metalică și evitând astfel scurtcircuitele incipiente datorită oscilației băii. Sub acțiunea tensiunii superficiale picătura este absorbită de baia metalică, fără stropiri. Această fază a transferului de metal poartă denumirea sugestivă de “plasma boost”, noțiune dificil de tradus în românește, cu semnificația de “plasmă intensificată”.

În timpul $T_6 - T_7$ curentul, comandat de sursă, scade logaritmic la valoarea I_s . Acest mod de scădere a curentului are un efect de “liniștire”, de micșorare a oscilațiilor băii metalice, care ar putea produce scurtcircuite incipiente înainte de formarea picăturii producând stropiri necontrolate.

1.3.6.2. Stabilitatea transferului picăturii la sudarea STT.

Stabilitatea transferului picăturii la sudarea STT, [53], [82] presupune asigurarea unui transfer de metal în picături cu volum constant, respectiv la un diametru cuprins în domeniul (1,0 ... 1,2)d_s, specific transferului prin scurtcircuit, la apariția unor factori perturbatori care schimbă echilibrul sistemului. Aceasta presupune ca nivelul căldurii introduse în sistem, la apariția factorilor perturbatori, să rămână practic constant. În cazul sudării STT această căldură se compune din: căldura arcului

normal pe perioada $T_0 - T_1$, căldura obținută prin efect Joule – Lenz pe capătul liber a sârmei, respectiv căldura arcului de “plasma boost” pe perioada $T_5 - T_6$. Prin urmare, stabilitatea sistemului este dată de relația:

$$\Sigma(Q_{arc} + Q_{J-L} + Q_{pl. boost}) = \text{const.} \quad (1.20)$$

Asigurarea stabilității sistemului în cazul apariției unor factori perturbatori la sudarea STT se face printr-o buclă de reglare automată cu ajutorul unui SRA, cu care este prevăzut echipamentul de sudare STT. Datorită condițiilor în care are loc sudarea STT cel mai important factor perturbator, este modificarea lungimii capătului liber l_{cl} , care modifică la rândul lui aportul de căldură prin efect Joule – Lenz. Pentru păstrarea echilibrului, bucla de reglare automată modifică corespunzător durata timpului Δt_p a curentului de “plasma boost” și aportul de căldură dat de acesta, căldura arcului Q_{arc} rămânând practic constantă.

În figura 1.40 se prezintă modul de lucru a buclei de reglare automată.

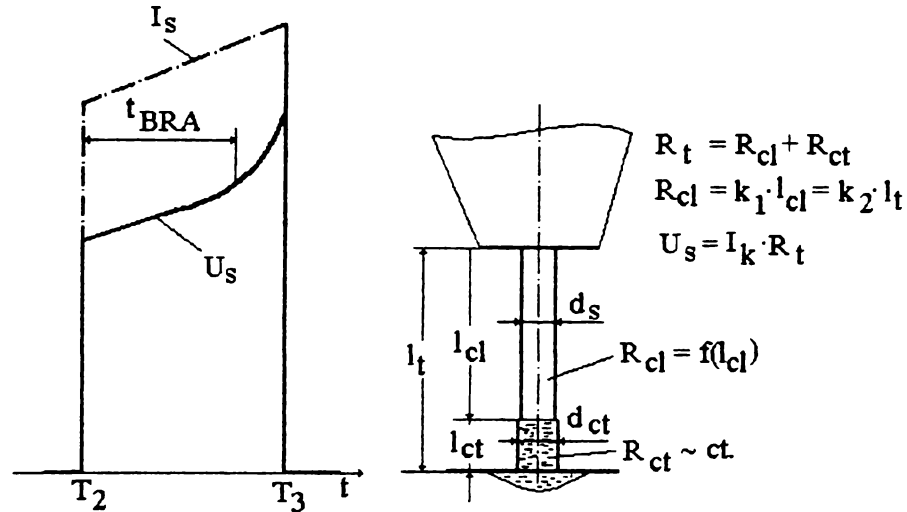


Figura 1.40. Funcționarea buclei de reglare automată

Informația pentru bucla de reglare automată se preia, pentru fiecare transfer, în perioada $T_2 - T_3$, înainte de momentul de “plasma boost” prin t_{BRA} . Se măsoară variația tensiunii din momentul T_2 pe porțiunea t_{BRA} (unde este o variație liniară). În această porțiune picătura de metal formează, sub acțiunea tensiunilor superficiale, un cilindru de metal topit cu secțiune comparabilă cu a sârmei care unește vârful sârmei electrod cu baia metalică. Rezistența electrică a porțiunii de circuit dintre vârful sârmei și baia metalică este formată din rezistența capătului liber plus rezistența cilindrului de metal topit. Aceasta din urmă rămâne aproximativ constantă în timpul sudării (lungime, secțiune, variație Δp constante). Panta de creștere a tensiunii sursei în perioada $T_2 - T_3$, $U_s = I_k \times R_{tot}$, depinde strict de distanța dintre duza de contact și piesă $l_t = l_{cl} + l_{ctop}$. Întrucât dimensiunile cilindrului topit rămân practic constante rezultă că panta de creștere a tensiunii este o funcție de lungimea capătului liber l_{cl} , care poate furniza astfel o informație (un semnal) utilă pentru bucla de reglare automată.

Panta de creștere a tensiunii este integrată și memorată de microprocesorul sursei STT, iar semnalul rezultat va defini durata timpului de “plasma boost” Δt_p . Acest semnal variabil intră în bucla de reglare automată și se compară cu un semnal de referință într-un etaj de comparație. În momentul în care s-a stabilit egalitatea celor două semnale se comandă scăderea curentului de “plasma boost” I_p , așa cum s-a arătat, după o curbă logaritmică, bine justificată tehnologic.

În concluzie SRA va modifica permanent durata timpului de “plasma boost” Δt_p ca funcție de l_t sau lungimea capătului liber l_{cl} (parametrul perturbator) asigurând astfel ca suma căldurilor dezvoltate pentru încălzirea și topirea vârfului sârmei să rămână constantă. Dacă lungimea capătului liber a sârmei l_{cl} crește, rezultă că rezistența capătului liber crește și deci căldura prin efect Joule – Lenz crește. Căldura arcului Q_{arc} rămânând constantă, pentru păstrarea echilibrului rezultă că aportul de căldură dat de arcul “plasma boost” trebuie să scadă, ceea ce se realizează prin SRA care comandă

scăderea proporțională a timpului de “plasma boost” Δt_p . Fenomenele se petrec similar la scăderea lungimii capătului liber, când SRA comadă creșterea timpului Δt_p .

1.3.6.3. Avantajele transferului STT:

- ✓ reducerea substanțială a stropirilor; eliminarea manoperei de îndepărtare a stropilor de pe piesă, duză de gaz, etc.;
- ✓ utilizarea dioxidului de carbon 100% ca și gaz de protecție: geometrie foarte bună a cusăturii, pătrundere sigură, reducerea pericolului de formare a porilor în cusătură, preț de cost redus;
- ✓ îmbunătățirea condițiilor de lucru pentru operatorul sudor prin reducerea stropirilor și a cantității de fum degajat (vaporizări reduse de metal topit);
- ✓ calitate foarte bună la sudarea stratului de rădăcină comparabilă cu sudarea WIG, dar cu productivitate net superioară; ideal pentru sudarea stratului de rădăcină la țevi, sau în locuri unde accesul pentru resudarea rădăcinii este nu este posibil;
- ✓ sensibilitate redusă la apariția factorilor perturbatori (variația lungimii capătului liber), cu transfer optim a picăturii de metal echivalent sudării sinergice, dar în acest caz în domeniul sensibil al transferului prin scurtcircuit (abordare inedită, inovativă, greu de închipuit până nu demult la acest mod de transfer);

1.3.6.4. Caracterizarea transferului STT:

- specific puterilor mici și medii ale arcului electric, cu curent de sudare de max. 220 A;
- transferul picăturii se face exploziv sub acțiunea forțelor de tensiune superficială F_σ ;
- gazul de protecție utilizat: CO₂ 100%;
- pierderi foarte mici de material prin stropi; nivel foarte redus de stropiri;
- stabilitate mare a procesului de transfer asigurată cu ajutorul unui SRA prin transfer sinergic;
- necesită un echipament de sudare cu invertor special, ultraperformant, relativ scump, sursa STT (firma Lincoln);
- sensul de sudare recomandat spre stânga (prin “împingerea cusăturii”) cu înclinarea capului de sudare la un unghi $\alpha = 0 - 5^\circ$, pentru asigurarea stabilității maxime a fenomenelor de transfer (arcul trebuie să “bată” pe baia metalică);
- utilizare:
 - exclusiv în domeniul transferului prin scurtcircuit și intermediar specific sudării MIG/MAG standard, la sudarea oțelurilor carbon și a oțelurilor înalt aliate (în acest caz gazul de protecție este un amestec ternar specific 90% He + 7,5% Ar + 2,5% CO₂); de fapt acest tip de transfer a fost realizat special în acest scop;
 - ideal pentru sudarea stratului de rădăcină a țevilor (dar nu numai);
 - sudarea tablelor subțiri;
 - sudarea în poziție;

1.3.7. Transferul inerțial al picăturii de metal

Analiza oscilogramelor de variație ale parametrilor tehnologici principali ai arcului electric, *curentul de sudare, respectiv tensiunea arcului*, scap. 5.3, și observarea atentă a desfășurării fenomenelor din arcul electric au evidențiat un aspect inedit privind transferul de metal topit în cazul antrenării sârmei electrod cu ajutorul sistemelor de avans prin impulsuri, [22], [72], [73].

S-a constatat că, în cazul vitezelor de avans medii ale sârmei electrod, de valori reduse, respectiv ale puterilor mici ale arcului electric, la modificarea ușoară a tensiunii arcului, prin creșterea acesteia, are loc modificarea modului de transfer a picăturii de metal topit prin coloana arcului, din transfer prin scurtcircuit caracterizat prin stropiri inerente, într-un transfer fără scurtcircuit caracterizat prin reducerea semnificativă a stropirilor, iar în unele cazuri chiar absența acestora în timpul sudării. Acest aspect poate fi evidențiat prin oscilografierea parametrilor tehnologici principali de sudare, figura 1.40. Se observă absența scurtcircuitelor din arcul electric, și pulsarea ușoară a curentului de sudare.

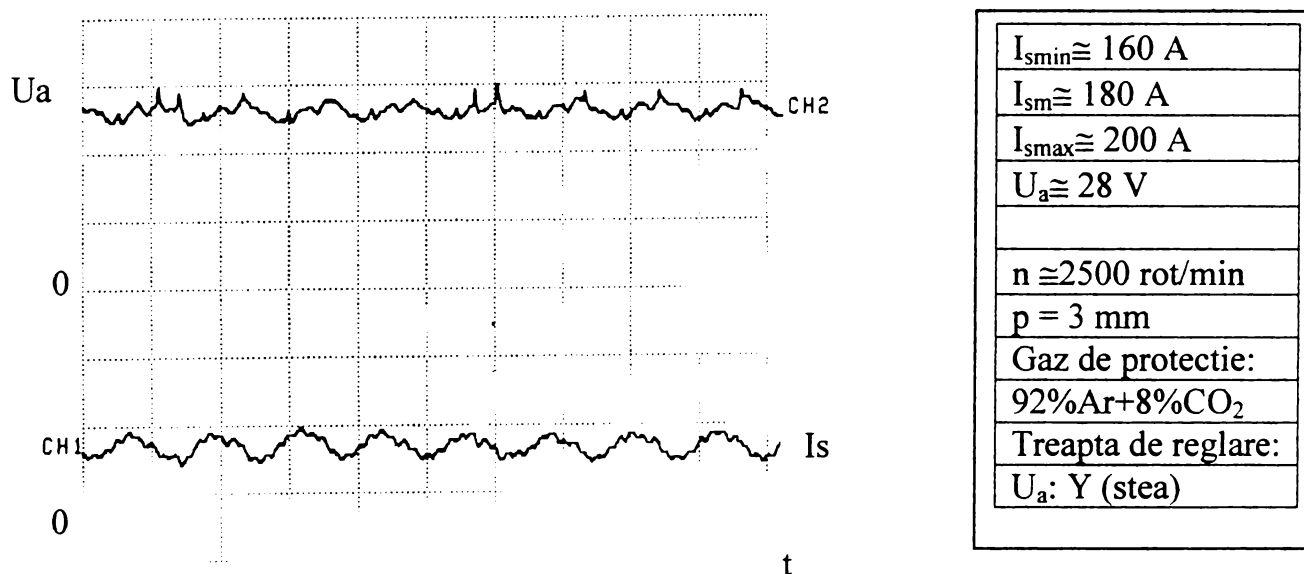


Figura 1.40. Evidențierea transferului inerțial prin oscilografierea parametrilor tehnologici de sudare

Fenomenul poate fi comparat ca efect cu sudarea MIG/MAG standard în curent pulsant. Întrucât curentul variabil generat în circuitul de sudare, ca efect a antrenării sârmei electrod cu viteză variabilă sub formă de impulsuri mecanice de o anumită amplitudine și frecvență, are o amplitudine foarte mică, vezi scap. 5.3, se poate deduce că desprinderea picăturii de metal topit din vârful sârmei în acest caz nu se datorează unei forțe electromagnetice “pinch” de valori ridicate așa cum se întâmplă în cazul sudării în curent pulsant sub acțiunea curentului de puls de valori mari, procedeu cu care a fost comparat modul de transfer în acest caz.

Modificarea modului de transfer în cazul sistemelor de avans prin impulsuri dintr-un transfer prin scurtcircuit într-un transfer lipsit de stropiri (fără scurtcircuit) are loc sub **acțiunea forței inerțiale F_i** proprie antrenării accelerate a sârmei electrod cu aceste sisteme. Natura acestei forțe și modul de manifestare și acțiune a fost prezentat pe larg în cadrul scap. 1.2.7. Mărimea forței inerțiale se ridică ca valoare la nivelul de mărime a forței electromagnetice “pinch”. Acțiunea ei asupra modului de transfer a picăturii în acest caz este similară cu acțiunea forței electromagnetice “pinch” care este răspunzătoare de transferul de metal în cazul sudării în curent pulsant. Prin urmare comparația modului de transfer în cazul sistemelor de avans prin impulsuri al sârmei electrod cu transferul în curent pulsant nu este întâmplătoare și nici gratuită, diferită fiind doar natura forțelor care determină desprinderea picăturii, forță de natură mecanică în cazul sudării cu avans prin impulsuri al sârmei electrod, respectiv forță de natură electromagnetică în cazul sudării în curent pulsant.

Acțiunea forței inițiale F_i asupra fenomenului de transfer se manifestă și în cazul transferului prin scurtcircuit. Aceasta se concretizează prin desprinderea mai ușoară a picăturii de metal din vârful sârmei la contactul acesteia cu baia metalică, respectiv prin reducerea perioadei de scurtcircuit a arcului electric, față de cazul sudării clasice cu viteză de avans constantă. Transferul

picăturii în baia metalică, în acest caz, are loc atât sub acțiunea tensiunii superficiale care acționează la nivelul băii cât și sub acțiunea mișcării inerțiale accelerate a picăturii la blocarea sârmei electrod (a cărei pondere nu este deloc de neglijat). Confirmarea acestei ipoteze se poate observa prin compararea a două oscilograme executate în condiții identice, dar cu viteză de avans a sârmei electrod continuă, figura 1.41, respectiv impulsuri (vibrare), figura 1.42.

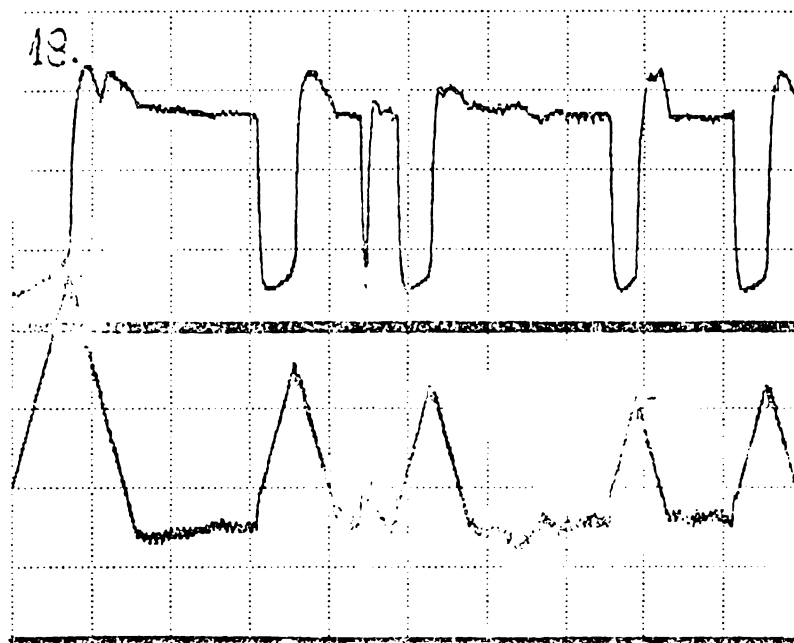


Figura 1.41. Oscilografierea transferului prin scurtcircuit standard, $v_{as} = ct.$

În cazul avansului continuu, standard, al sârmei electrod se observă apariția unui transfer instabil cu scurtcircuite aleatoare și incipiente caracterizat prin stropiri intense. Cauza principală a acestor scurtcircuite aleatoare este nesincronizarea dintre frecvența de scurtcircuit a picăturilor și frecvența de oscilație a băii metalice, fenomen foarte greu de obținut d.p.d.v. practic.

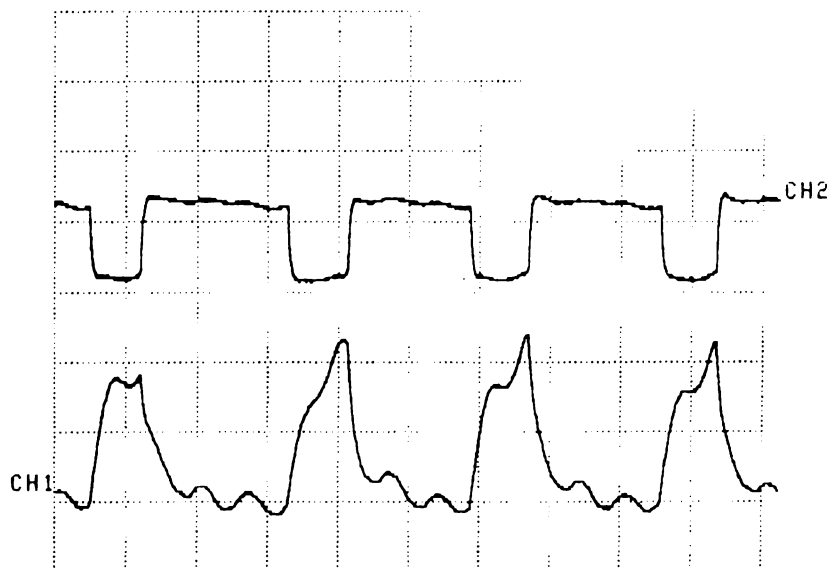


Figura 1.42. Oscilografierea transferului prin scurtcircuit folosind avansul prin impulsuri al sârmei electrod

În cazul avansului prin impulsuri a sârmei electrod se observă un regim deosebit de stabil la care scurtcircuitele întâmplătoare dispar. Explicația fenomenului este dată de acțiunea de liniștire a băii metalice prin sincronizarea frecvenței de transfer a picăturilor, egală cu frecvența de pulsare a sârmei electrod, cu frecvența de oscilație a băii metalice. Efectul este obținerea unui transfer de metal mai stabil respectiv reducerea stropirilor comparativ cu sudarea cu transfer prin scurtcircuit standard.

Aspectele tehnologice privind utilizarea sistemelor de avans prin impulsuri și a transferului inerțial sunt deosebit de interesante și pot fi sintetizate astfel, [22]:

- ✓ are loc modificarea tipului de transfer a picăturii dintr-un transfer prin scurtcircuit sau intermediar, caracterizat prin arc instabil și stropiri mari, într-un transfer fără scurtcircuitări ale arcului electric, caracterizat prin stabilitate, reducerea stropirilor și chiar eliminarea acestora;
- ✓ transferul picăturii poate fi asimilat cu transferul specific sudării în curent pulsant; mecanismul care determină modificarea tipului de transfer însă, este de natură diferită: în cazul sudării în curent pulsant modificarea transferului este determinată de valoarea ridicată a curentului de impuls, iar în cazul avansului prin impulsuri de forță inerțială rezultată din mișcarea accelerată a sârmei electrod;
- ✓ același tip de transfer se poate obține cu o sursă de sudare sinergică cu invertor la sudarea în curent pulsant sau cu o sursă de sudare clasică la sudarea cu avans prin impulsuri a sârmei; prin urmare, este posibilă reconsiderarea surselor de sudare clasice, respectiv exploatarea acestor surse la performanțe superioare prin înlocuirea dispozitivului de avans a sârmei; în paranteză trebuie amintit că sursele de sudare MIG/MAG în curent pulsant cu invertor sunt relativ scumpe;
- ✓ frecvența de transfer a picăturilor este riguros egală cu frecvența impulsurilor (vibrațiilor) sârmei electrod, la fiecare impuls se transferă o singură picătură; cazul este similar cu cel a sudării sinergice în curent pulsant;
- ✓ obținerea, relativ simplu, a unui transfer sinergic al picăturii de metal topit chiar în cazul transferului prin scurtcircuit, fenomen care îi preocupă tot mai mult pe specialiști și deopotrivă pe producătorii de echipamente de sudare;
- ✓ este posibilă obținerea și a altor efecte benefice asupra calității îmbinării sudate (vezi sudarea MIG/MAG Interpuls, de exemplu).

CAPITOLUL II

ECHIPAMENTE PENTRU SUDAREA MIG/MAG

(9 subcapitole, 11 pagini, 7 figuri, 2 tabele, 4 relații de calcul)

2.1. Alcătuirea echipamentului de sudare MIG/MAG

Din punctul de vedere al tehnologului, respectiv al utilizatorului echipamentului de sudare, nu este atât de importantă cunoașterea detaliilor de proiectare a acestor instalații, (sursă de sudare, pupitru de comandă, scheme electrice și electronice, etc.), cât mai ales cunoașterea părților componente ale echipamentului și a rolului acestora, a particularităților specifice, a performanțelor de sudare, a modului de reglare și control a parametrilor tehnologici de sudare în vederea obținerii rezultatelor dorite sau impuse de tehnologia de sudare, cu performanțe maxime.

Echipamentele de sudare MIG/MAG constituie sisteme mult mai complexe, atât în ceea ce privește părțile componente cât și pregătirea pentru sudare, respectiv modul de comandă și reglare a parametrilor tehnologici de sudare, în comparație cu echipamentele clasice utilizate la sudarea manuală cu electrozi înveliți (transformatoare, convertizoare, redresoare). Din punct de vedere a reglării parametrilor tehnologici, în practică lucrurile nu sunt de loc complicate, în general aceasta implicând reglarea a doi parametri și anume selectarea treptei de tensiune (tensiunea de mers în gol și implicit tensiunea arcului), respectiv ajustarea vitezei de avans a sârmei electrod pentru asigurarea curentului de sudare necesar (impus) sau invers.

În cazul surselor moderne de sudare sinergice cu invertor problema este și mai mult simplificată, oferind utilizatorului (operatorului sudor) prin programele încorporate în microprocesor o tehnologie apropiată de optim, prin reglarea unui singur parametru tehnologic, viteza de avans a sârmei electrod, respectiv tensiunea arcului. În funcție de principiul de reglare a puterii (energii) arcului, specific sursei de sudare utilizate, se setează sau se reglează după necesități un singur parametru tehnologic considerat parametru de bază și anume viteza de avans a sârmei în cazul surselor cu invertor cu tranzistoare de putere cu reglare continuă a tensiunii arcului, respectiv tensiunea în cazul surselor de sudare cu tiristoare cu reglare în trepte a tensiunii arcului. Restul parametrilor tehnologici de sudare sunt reglați automat prin intermediul programelor microprocesorului în funcție de datele de intrare specifice aplicației date introduse în prealabil de la consola sursei: tipul de transfer (clasic sau pulsant), materialul de adaos (compoziția chimică), diametrul sârmei, gazul de protecție, etc.. Echipamentul permite și efectuarea corecțiilor necesare dacă este cazul.

Acest mod de reglare a puterii arcului necesar procesului de sudare dat este cunoscut sub denumirea de "ONE KNOB", [64], [52], adică reglarea instalației pentru sudare de la un singur buton, ceea ce simplifică foarte mult sarcinile operatorului sudor, conducând la regimuri de sudare optime fără să fie nevoie de multe cunoștințe tehnologice temeinice, în afara celor de bază necesare sudării propriu zise.

Un echipament de sudare MIG/MAG se compune în principiu din următoarele părți componente, figura 2.1, [3], [50], [52], [54], [64]:

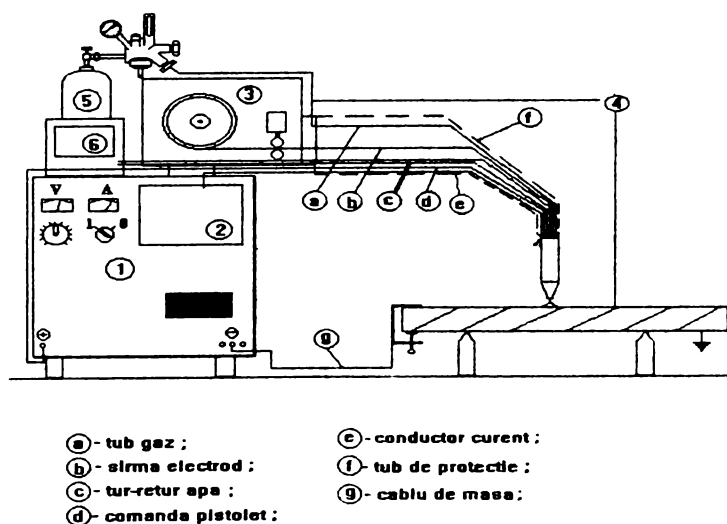


Figura 2.1. Părțile componente ale unei instalații de sudare MIG/MAG

- 1. Sursa de sudare;
- 2. Dispozitivul de avans a sârmei electrod, DAS;
- 3. Pupitrul de comandă;
- 4. Pistoletul de sudare;
- 5. Alimentarea cu gaz de protecție;
- 6. Instalația de răcire cu apă ;

2.2. Sursa de sudare

Sursele de sudare utilizate la sudarea MIG/MAG sunt surse de curent continuu, convertizoare, redresoare, invertoare. Datorită performanțelor modeste (timp de răspuns mare, dinamică ridicată) în prezent convertizoarele de sudare se utilizează din ce în ce mai rar la sudarea MIG/MAG (aproape deloc), ele fiind înlocuite de redresoarele de sudare și în ultimul timp pe scară tot mai largă de sursele cu inverter pentru sudare (pe scurt invertoare pentru sudare). Redresoarele la rândul lor pot fi clasice cu diode sau comandate electronic cu tiristoare sau tranzistoare de putere.

Particularitatea principală a surselor de sudare MIG/MAG este forma caracteristicii externe $U_a=f(I_s)$. Din motive de asigurare a stabilității arcului electric prin fenomenul de autoreglare, specific sudării MIG/MAG, forma caracteristicii externe a sursei este rigidă (1) sau ușor coborâtoare (2) (sub 7V/100A), figura 2.2.

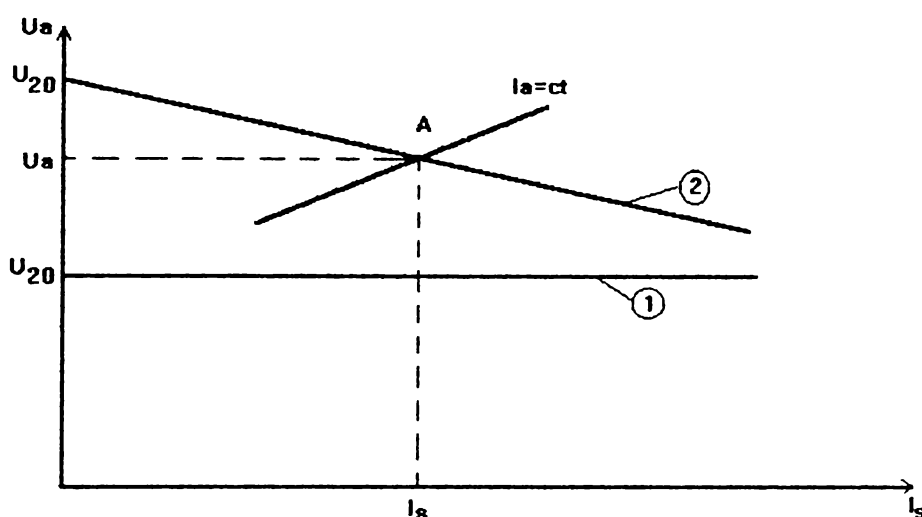


Figura 2.2. Forma caracteristicii externe a sursei de sudare MIG/MAG

Din motive de stabilitate maximă a procesului se preferă caracteristicile externe ușor coborâtoare, a căror pantă ($\Delta U_a/\Delta I_s$) depinde de gazul de protecție, respectiv de diametrul sârmei electrod prin funcția REG.TIPE (valabilă numai la sursele cu inverter). Panta caracteristicii externe este mai mare la sudarea în dioxid de carbon decât în argon sau amestecuri bogate în argon. La sudarea în CO_2 caracteristica externă are panta maximă la sârma electrod cu diametrul cel mai mic, 0,8 mm și scade cu creșterea diametrului sârmei. La sudarea în amestecuri bogate în argon panta caracteristicii externe este aceeași pentru toate diametrele de sârmă și mai mică decât cele corespunzătoare sudării în CO_2 .

Datorită acestei forme a caracteristicii externe se observă că tensiunea arcului este apropiată de tensiunea de mers în gol a sursei. În consecință reglarea tensiunii arcului la sudarea MIG/MAG se face prin reglarea tensiunii de mers în gol a sursei de sudare. Aceasta se poate face prin reglaj în trepte la sursele cu tiristoare sau prin reglaj continuu la invertoare. Reglajul continuu este cel mai bun permițând o infinitate de curbe, acoperind toate cerințele tehnologice, dar este mai costisitor. Reglajul în trepte se face de obicei în două etape, un reglaj brut, respectiv un reglaj fin, și este mai ușor de realizat constructiv (mai ieftin). Numărul curbelor caracteristicii externe este limitat între o valoare minimă U_{20min} și o valoare maximă U_{20max} specifice fiecărei surse. În acest caz obținerea regimului optim pentru o valoare dată a tensiunii se face prin corecția vitezei de avans a sârmei electrod.

De aici decurge cea de-a doua particularitate a surselor de sudare MIG/MAG și anume tensiunea de mers în gol este mai mică decât la sursele de sudare cu electrod învelit, respectiv sursele WIG, fiind cuprinsă în intervalul de valori 20-50V. Forma caracteristicii externe și valoarea

redușă a tensiunii de mers în gol fac ca sursele de sudare MIG/MAG să nu poată fi folosite la sudarea SE și WIG. În ultimul timp au apărut sursele de sudare universale (cu tiristoare sau cu invertor) care permite sudarea cu toate cele trei procedee de sudare printr-o simplă comutare pe procedeul utilizat (prin modificarea formei caracteristicii externe).

Cea de-a treia particularitate a surselor de sudare MIG/MAG o constituie prezența unei inductanțe în circuitul de sudare necesară în cazul sudării cu arc scurt cu transfer prin scurtcircuit (sau la sudarea cu arc lung în bioxid de carbon în cazul scurtcircuitelor aleatoare), pentru limitarea vârfului curentului de scurtcircuit și prin urmare pentru reducerea stropirilor. Inductanțele fizice (reale) pot fi fixe, variabile în trepte (cu ploturi) sau variabile continuu (cu miez magnetizat).

Valoarea inductivității depinde în principal de diametrul sârmei electrod. O inductanță prea mare limitează vârful curentului de scurtcircuit îngreunând desprinderea picăturii din vârful sârmei, măbind durata de scurtcircuit ceea ce conduce la împrôșcări de material din baia de metal. Inductivitatea mare este defavorabilă și din punct de vedere a amorsării arcului electric măbind timpul de stabilizare a acestuia, [64], [32], figura 2.3, ($t_2 = 0,7$ s pentru valoarea maximă a inductivității, respectiv 0,1 s pentru valoarea minimă a inductivității), aspect foarte important în special în cazul sudării mecanizate sau robotizate caracterizate prin viteze mari de sudare ceea ce poate conduce la apariția defectelor în cusatură în zonele de amorsare a arcului electric. Din acest punct de vedere ar fi ideal ca inductanța să fie reglabilă și într-un interval de timp foarte scurt ceea ce în cazul surselor cu inductanță fizică în circuit nu este posibil.

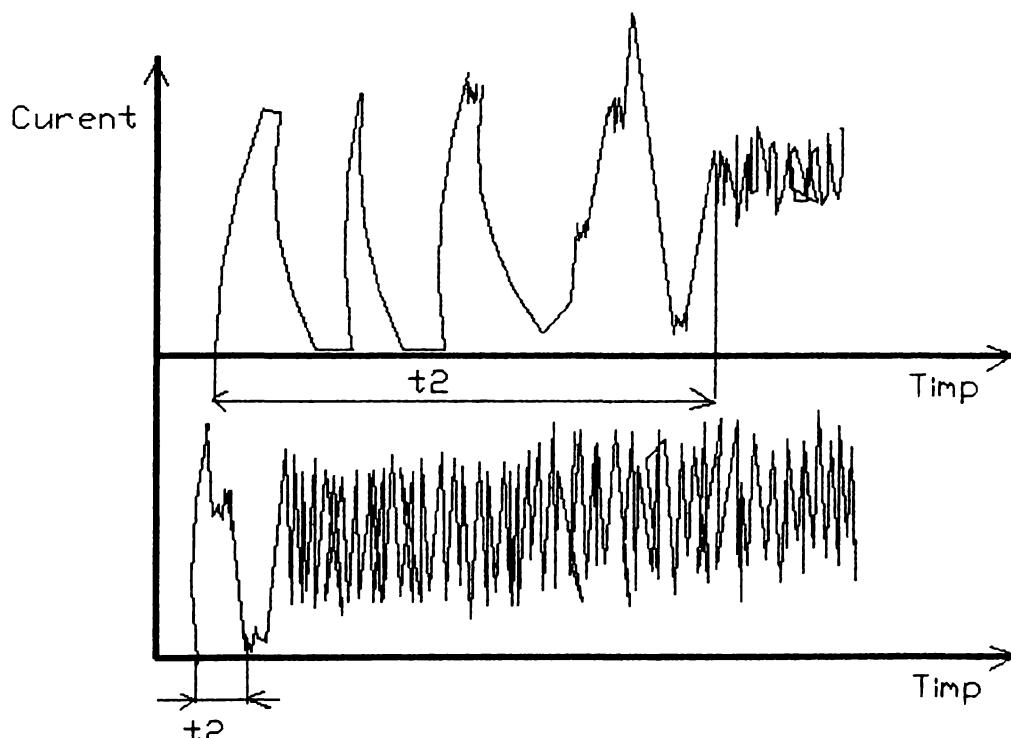


Figura 2.3. Influența inductivității asupra timpului de stabilizare a arcului electric la amorsare

Inductanța de valoare mare are influență negativă și asupra curbei de variație a curentului de scurtcircuit după rupere scurtcircuitului (viteza de scădere a curentului de scurtcircuit), prin scăderea lentă a curentului. Aceasta influențează oscilația băii, măbind instabilitatea arcului electric și stropirile.

O inductivitate prea mică pe de altă parte determină apariția unui vârf de curent de scurtcircuit foarte mare care conduce la desprinderea explozivă a picăturii din vârful sârmei însoțită de stropiri intense, de această dată din vârful sârmei.

În cazul surselor de sudare moderne cu invertor inductanța fizică lipsește, vorbindu-se de așa numita “inductanță fictivă”, [52], [53]. Reglarea curentului de scurtcircuit și a formei de creștere a acestuia se realizează electronic prin modelare prin comanda invertorului cu ajutorul microprocesorului, ceea ce permite modificarea cu ușurință, după dorință, și în limite infinite mai largi a inductivității. Reglată inițial de către microprocesor în funcție de datele de intrare, printr-o valoare de referință exprimată în procente, inductanța definită în acest caz prin noțiunea de “dinamica arcului” poate fi modificată manual dacă este cazul prin ieșirea din programul sinergic prin schimbarea valorii implicite între 0% și 100%. Acest reglaj presupune o foarte bună cunoaștere

la fenomenelor din arcul electric și este mai puțin recomandat operatorilor sudori. Totodată este posibilă comanda și reglarea vitezei de scădere rapidă a curentului de scurtcircuit cu efecte benefice asupra stabilității procesului.

Sursele de sudare clasice cu inductanță fixă (RSC 400, SR 630), respectiv sursele de sudare cu invertor cu modelarea "dinamicii" sunt prevăzute cu două borne de ieșire. La borna (+) se conectează de regulă pistolul de sudare prin intermediul dispozitivului de avans a sârmei, iar la borna (—) se conectează piesa prin cablul de legătură la masă. Sursele de sudare cu inductanță variabilă în trepte au în general două borne (uneori trei) de ieșire pentru legarea cablului de masă (legate la minusul sursei) și simbolizate printr-o inductanță (bobină) cu număr diferit de spire. Pentru sârme subțiri de 0,8; 1,0 mm se alege inductanța mai mică, pentru sârmele mai groase 1,2; 1,6 mm se alege inductanța mai mare.

Unele surse de sudare (FRONIUS) dispun și de posibilitatea modificării inductivității în funcție de gazul de protecție utilizat (inductivitate mai mică la CO₂ și mai mare la amestecuri de gaze bogate în argon) prin legarea la bornele corespunzătoare a cablului de masă marcate cu simbolul unei bobine și simbolul gazului de protecție CO₂ sau Ar.

Pe suprafața frontală a sursei se mai găsesc de regulă două aparate de măsură, un ampermetru și un voltmetru, respectiv în funcție de producătorul echipamentului se mai pot găsi și alte funcții de comandă și reglare a procesului tehnologic (acestea pot fi amplasate pe sursă sau pe DAS).

2.3. Surse de sudare sinergică – Invertoare

Dezvoltarea electronicii în general și a electronicii de putere în special în ultimul timp (a doua parte a secolului al XX-lea) a impulsionat așa cum era de așteptat dezvoltarea și modernizarea echipamentelor de sudare în general și a echipamentelor de sudare prin topire în special, producând se poate spune o adevărată revoluție în acest domeniu, nebănuț cu puțin timp în urmă, atât dpdv al greutății proprii și a dimensiunilor de gabarit cât mai ales a performanțelor atinse. Motorul acestei "revoluții" a fost folosirea invertoarelor de frecvență ridicată pe miez de ferită în construcția surselor de putere și comanda lor cu ajutorul microprocesoarelor, [62], [68], . A fost posibilă astfel atingerea unor performanțe tehnologice inimaginabile și a unui control perfect a procesului de sudare în ansamblul lui. Atingerea acestor nivele înalte se datorează vitezei foarte mari de răspuns a invertoarelor, de ordinul microsecundelor funcție de frecvența inverterului, care a permis modelarea după dorință a parametrilor tehnologici de sudare și controlul riguros a acestora. Comparativ viteza de răspuns a redresoarelor clasice cu diode sau tiristoare nu putea fi scăzută sub 5 ms.

În anul 1970 redresoarele cu tiristoare au început să fie utilizate la sudarea manuală cu electrozi înveliți SE și sudarea MIG/MAG standard. Tot cam în aceeași perioadă au apărut și sursele standard MIG/MAG în curent pulsant formate prin combinarea a două surse obișnuite, una pentru curentul de baza, alta pentru curentul de puls, dar care funcționează pe frecvențe fixe, 25, 33, 50, 75, 100Hz [3]. Datorită vitezelor mari cu care se desfășoară fenomenele în zona arcului (de exemplu timpul de scurtcircuit $t_{sc} = 1,5-3$ ms), și având în vedere că timpul de reacție al tiristoarelor este de min 5-6 ms (deci mult mai mare), la redresoarele pentru sudarea MIG/MAG nu era posibilă modelarea acestor fenomene, iar controlul variației curentului de scurtcircuit s-a putut face numai folosind o inductanță fizică reală.

În jurul anului 1980 au apărut tiristoarele rapide cu timp de blocare redus. Astfel s-au realizat primele surse de tip invertor cu tiristoare care funcționează pe o frecvență de 1...5 KHz. Datorită cerințelor complexe ale regimului de sudare și a vitezelor mari de derulare a fenomenelor din arcul electric, au fost realizate surse cu tranzistoare de putere în circuitul de sudare care au permis creșterea frecvenței invertoarelor la valori mult mai mari decât viteza cu care se desfășoară fenomenele în arc.

2.4. Surse pentru sudarea MIG/MAG în curent pulsant

Dezvoltarea construcției surselor de sudare în impulsuri este legată direct de dezvoltarea cronologică a electronicii de putere în general și a tranzistoarelor de putere în special, [8], [62], [68]. În continuare se vor prezenta la nivel de scheme bloc, [89], [52], [53], câteva variante de surse pentru sudare în impulsuri, în ordinea cronologică de apariție a lor.

2.4.1. Sursa de sudare în impulsuri cu tiristoare, figura 2.4.

Reprezintă primul tip de sursă utilizată la sudarea în curent pulsant. Un singur transformator alimentează două redresoare comandate, cu tiristoare. Frecvențele impulsurilor sunt fixe: 25; 33,33; 50; 100 Hz. Ca posibilități de reglare permite modificarea curentului de impuls și a curentului de bază.

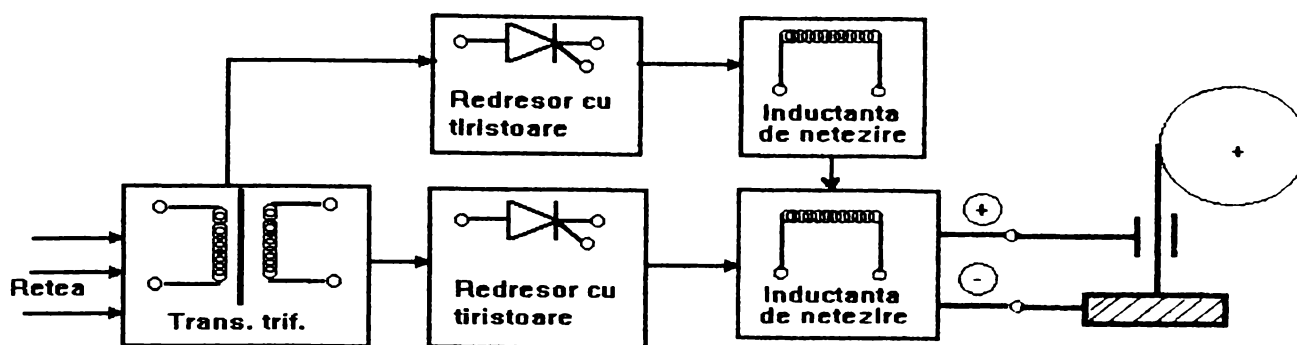


Figura 2.4. Schema bloc a redresorului cu impulsuri cu tiristoare

2.4.2. Sursa de sudare în impulsuri analogică cu tranzistoare în conducție variabilă, figura 2.5.

Ca și sursele clasice, sursa analogică cu tranzistoare cuprinde un transformator trifazat, în general numai cu o priză în primar. Tensiunea secundară se redresează folosind o punte cu diode de siliciu și se aplică unui bloc cu tranzistoare format dintr-un număr mare de tranzistoare legate în paralel. Diferența dintre tensiunea de ieșire din redresor și tensiunea necesară pentru arcul electric cade pe blocul cu tranzistoare și produce în acesta o putere disipată relativ ridicată care necesită o răcire forțată cu apă. Randamentul se situează între 50 și 75%, dezavantaj care se acceptă de regulă pentru că astfel de surse prezintă timpi de reacție foarte reduși, de ordinul a 30..50 μ s. Astfel de surse permit reglarea curentului de puls și a curentului de bază, a duratei și a frecvenței impulsurilor, respectiv a pantei de creștere și descreștere a impulsurilor.

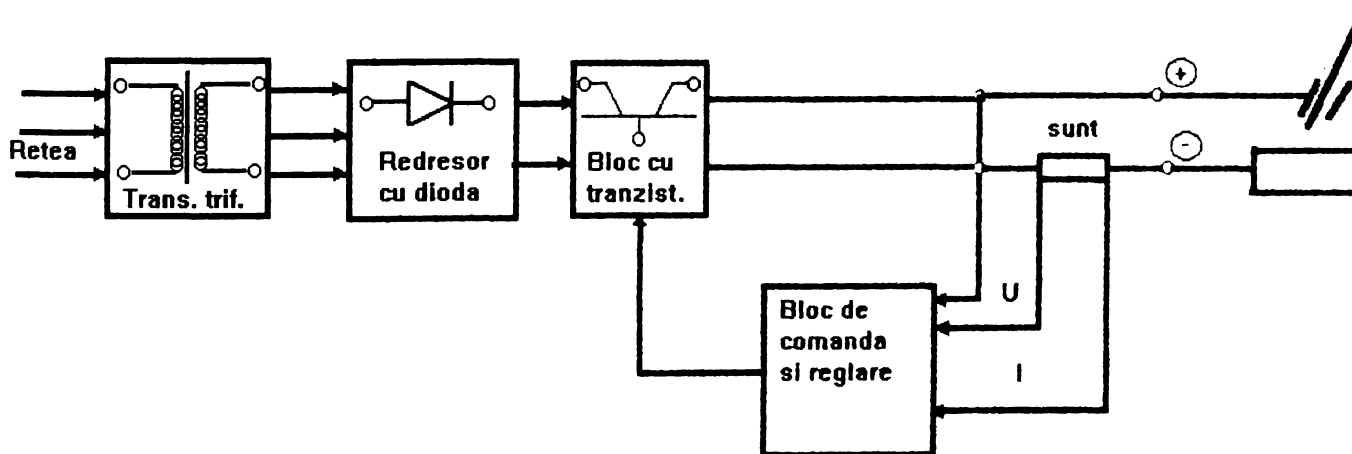


Figura 2.5. Schema bloc a sursei cu impulsuri analogică cu tranzistoare în conducție variabilă

2.4.3. Sursa de sudare în impulsuri cu tranzistoare în secundar în regim de comutație, figura 2.6.

Sursa este formată dintr-un transformator trifazat al cărui secundar alimentează o punte redresoare trifazată cu diode. Tensiunea continuă este aplicată blocului cu tranzistoare care o transformă într-o tensiune de impulsuri, cu frecvență fixă (cuprinsă între 20 și 60 kHz) și cu un coeficient de umplere variabil. Inductanța de netezire asigură un curent de sudare, puternic netezit de inductanța plasată în circuitul de sudare. Reglarea curentului sau a tensiunii de ieșire se realizează prin modificarea coeficientului de umplere. Tensiunea arcului este însoțită de niște armonici superioare reduse ca amplitudine și cu frecvență egală cu cea de comutație. Deoarece blocul cu tranzistoare lucrează numai în regim de comutație, puterea disipată în tranzistoare este mult mai redusă decât la sursa analogică cu tranzistoare, iar randamentul se situează între 75 și 95%. Tot din acest motiv numărul tranzistoarelor montate în paralel poate fi redus foarte mult. Timpii de reacție sunt cuprinși între 10 – 200 de microsecunde, sensibil mai mari decât la sursele

analogice. Parametrii reglabili sunt: curentul de puls și curentul de bază, durata și frecvența impulsurilor, respectiv panta de creștere și descreștere a impulsurilor.

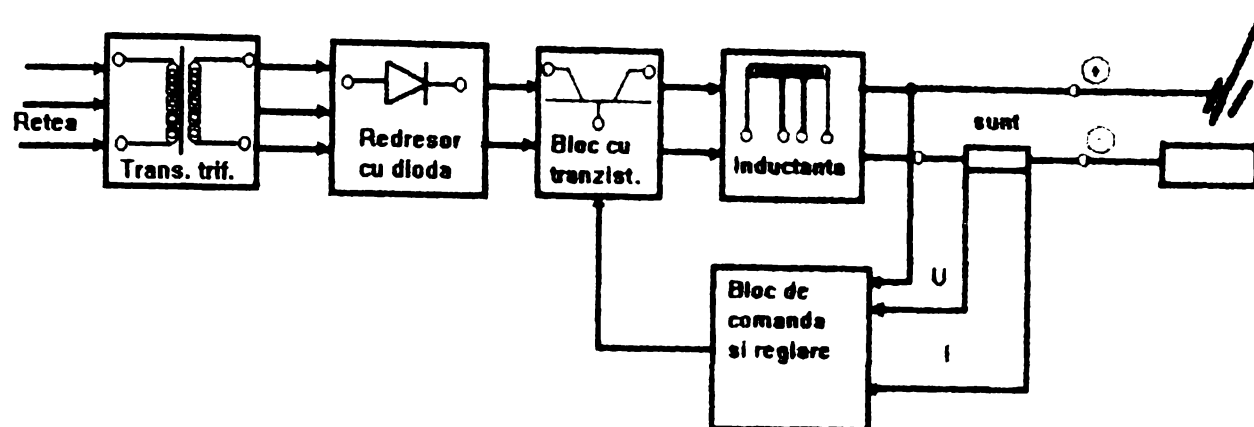


Figura 2.6. Schema bloc a sursei cu impulsuri cu tranzistoare în regim de comutație

2.4.4. Sursa de sudare în impulsuri cu inverter, figura 2.7.

Tensiunea rețelei este redresată direct cu o punte trifazată cu diode. Tensiunea continuă este transformată de blocul inverter într-o tensiune alternativă de frecvență constantă cuprinsă între 20 și 100 kHz. Tensiunea alternativă astfel obținută, este aplicată transformatorului de putere monofazat pe miez de ferită, și apoi redresată cu o punte monofazată. Modificarea tensiunii de ieșire se realizează prin reglarea coeficientului de umplere al tranzistoarelor care formează inverterul. Timpii de reacție sunt cuprinși între 10 – 200 de microsecunde.

Parametrii reglabili sunt: curentul de impuls și de bază, durata și frecvența impulsurilor, panta de creștere și descreștere a impulsului.

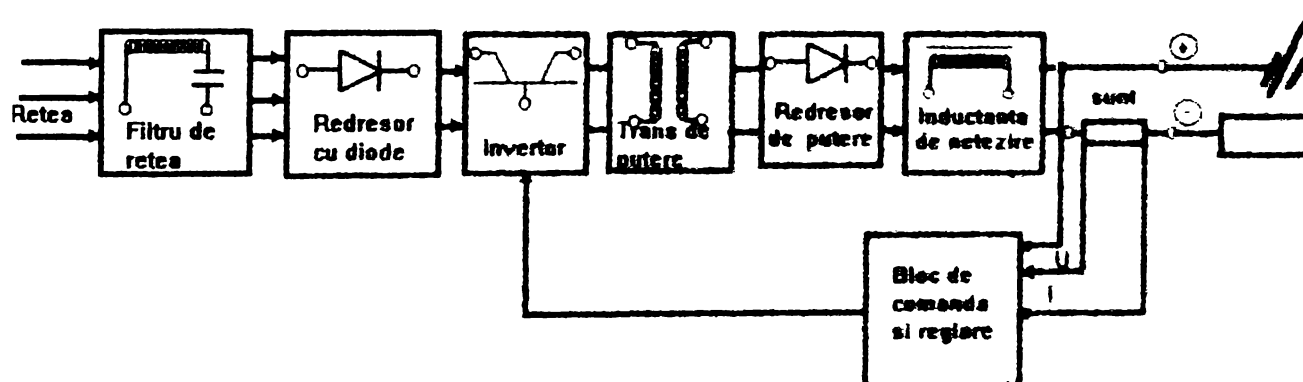


Figura 2.7. Schema bloc a sursei de sudare în curent pulsant cu inverter

Avantajele surselor cu inverter sunt:

- ✓ greutatea sursei este micșorată de circa 10 ori față de sursele standard;
- ✓ reducerea puternică a greutății transformatorului și a inductanței de netezire;
- ✓ posibilitatea obținerii oricărei forme de impuls pentru curentul de sudare.

Dezavantaje:

- ✓ necesitatea utilizării unor tranzistoare de putere la tensiuni ridicate (600 - 800 V);
- ✓ sensibilitatea tranzistoarelor față de supratensiunile ce apar pe rețeaua de alimentare datorită altor mașini electrice de forță, racordate la aceeași rețea de alimentare;
- ✓ necesitatea montării unui filtru de rețea de construcție mai deosebită care să protejeze rețeaua față de tensiunile transmise prin diferite cuplaje, cu frecvența de 300 Hz care este frecvența maximă a impulsurilor de curent la sudare.

2.5. Dispozitivul de avans a sârmei electrod (DAS)

Dispozitivul de avans a sârmei electrod (DAS) constituie subansamblul care asigură antrenarea mecanizată a sârmei electrod, cu viteza de avans necesară pentru obținerea curentului de sudare impus tehnologic, de la bobina de sârmă prin pistolul de sudare și duza de contact în zona arcului electric. Se precizează că în cazul sudării MIG/MAG reglarea, respectiv modificarea curentului de sudare se realizează prin modificarea vitezei de avans a sârmei electrod. Prin urmare orice fluctuații în viteza de avans a sârmei implică automat variații ale curentului de sudare. În consecință asigurarea stabilității procesului de sudare MIG/MAG și obținerea unei îmbinări sudate de calitate, presupune asigurarea de către DAS a unei viteze de avans a sârmei electrod constante, continue și uniforme. Această premisă dovedește importanța DAS – lui în structura și funcționarea instalației de sudare MIG/MAG, o sursă de sudare performantă presupunând un DAS la fel de performant. Importanța DAS – ului se observă și din ponderea lui în costul echipamentului de sudare MIG/MAG. DAS – ul poate fi încorporat în echipamentul de sudare ceea ce limitează raza de acțiune la lungimea pistolului de 3,5 – 4,5 m sau separat de acesta, tot mai frecvent în ultimul timp, fiind legată de echipament printr-un furtun de cauciuc care conține un pachet de cabluri și furtune, cu lungimea de 3...5 m, mărind astfel raza de acțiune față de sursa de sudare.

Elementele principale ale dispozitivului de avans a sârmei sunt:

- ✓ grupul motor electric – reductor de turație;
- ✓ mecanismul de antrenare (avans);
- ✓ suportul cu sistemul de frânare pentru așezarea bobinei de sârmă;
- ✓ electroventilul pentru gazul de protecție;
- ✓ racordul pentru montarea și fixarea pistolului de sudare;
- ✓ după caz, butoane, potențiometre etc., într-un cuvânt funcții pentru reglarea parametrilor secundari ai procesului de sudare MIG/MAG (în cazul când acestea nu sunt amplasate pe panoul frontal a sursei);

În cazul distanțelor mai mari dintre DAS și locul sudării (> 4.5 m) pentru avansul sârmei se folosesc dispozitive de avans push – pull. Acestea se fac în două variante constructive:

1. Un sistem cu DAS de bază conținând tamburul de sârmă și una sau mai multe unități intermediare sincronizate electronic care trag, respectiv împing sârma pe tubul flexibil. La ultima unitate se leagă pistolul de sudare. SE poate ajunge astfel la lungimi de 16 – 20 m folosind 3 sau 4 unități intermediare.
2. Un DAS obișnuit și un pistol de sudare cu motoreductor în mâner. DAS – ul împinge, iar motoreductorul trage sârma menținând-o tot timpul întinsă (tensionată). Cele două motare sunt înseriate pentru sincronizarea turațiilor. Sistemul este indispensabil la sudarea aluminiului în curent pulsant (Fronius).

2.6. Pupitrul de comandă

Asigură realizarea funcțiilor necesare desfășurării procesului de sudare specific sudării MIG/MAG. Pupitrul de comandă conține echipamentul de reglare și comandă a procesului de sudare.

În general pupitrul de comandă se găsește integrat în sursa de sudare cu posibilitățile de setare și reglare a parametrilor tehnologici de pe panoul frontal a sursei. Poate fi întâlnit și ca unitate separată sub forma unei telecomenzi, sau comandă de la distanță (sudarea robotizată). În cazul sudării mecanizate cutia de comandă se găsește de regulă fixată în consolă pe tractorul de sudare. O altă variantă este un pupitru de comandă divizat, pe panoul frontal a sursei și pe dispozitivul de avans a sârmei DAS.

În funcție de tipul instalației de sudare MIG/MAG prin intermediul pupitrului de comandă pot fi efectuate, de obicei înaintea pornirii procesului de sudare, o serie de operații sau funcții, denumite reglări la “mers în gol” precum introducerea sârmei electrod în pistolul de sudare, reglarea debitului de gaz, reglarea timpului de pregaz respectiv a timpului de postgaz, reglarea vitezei de avans inițiale a sârmei electrod, reglarea tensiunii de mers în gol a sursei, reglarea timpului de sudare la sudarea prin electronitare, reglarea timpului de ardere întârziată a arcului “burnback”, alegerea ciclului de sudare, în 2 tacte sau în 4 tacte, introducerea datelor de intrare pentru reglarea și comanda echipamentului (în cazul surselor de sudare sinergice):

- viteza de avans a sârmei electrod sau tensiunea de mers în gol a sursei (tensiunea arcului) în funcție de modul de lucru;
- tipul de transfer a picăturii; prin scurtcircuit, prin pulverizare sau în curent pulsant;
- materiilul de adaos (compoziția chimică a sârmei) și tipul acesteia (sârmă plină sau tubulară, cu miez rutilic, bazic sau cu pulbere metalică);
- gazul de protecție: CO₂, Ar, amestecuri de gaze;
- diametrul sârmei electrod: 0.8; 1.0; 1.2; 1.6 mm;
- alegerea inductivității (dinamicii) prin cuplare cablului de masă la borna adecvată;

2.7. Pistoletul de sudare

Este subansamblul prin intermediul căruia se dirijează curentul de sudare, sârma electrod și gazul de protecție de la DAS la componentele de sudat.

În funcție de modul de răcire pistoletele de sudare sunt de trei feluri:

- pistolete cu răcire naturală;
- pistolete cu răcire forțată cu gaz;
- pistolete cu răcire forțată cu apă.

Alegerea variantei de pistol depinde de valoarea curentului de sudare I_s (A) și de durata activă de lucru sau durata ciclului de sudare DA (%). Ca o recomandare folosirea pistolului răcit cu apă este indicată întotdeauna când valoarea curentului de sudare depășește 250 A, respectiv când durata activă DA este mai mare de 60%. Durata unui ciclu de sudare MIG/MAG este de 5 minute la sursele mai vechi, respectiv de 10 minute la sursele din ultima generație.

Pistoletul de sudare se compune din trei părți principale:

- racordul de cuplare la DAS;
- pachetul de furtunuri și cabluri;
- capul de sudare;

Pachetul cabluri și furtune asigură legătura între racordul de cuplare la DAS și corpul pistolului (capul de sudare). Uzual lungimea acestui subansamblu este de 3-4 m, pentru reducerea frecărilor care au loc în tubul de ghidare și care influențează viteza de avans a sârmei electrod și prin urmare stabilitatea procesului de sudare.

Pachetul de furtune și cabluri conține următoarele elemente:

- cablul de curent;
- tubul de ghidare a sârmei electrod;
- furtunul de gaz;
- furtunele de apă, tur apă și retur apă (dacă se folosește răcirea cu apă);
- cablul de comandă a procesului de sudare.

Întregul ansamblu este introdus într-o manta flexibilă din cauciuc special care asigură totodată protecția mecanică, termică și chimică a elementelor componente.

Cablul de curent este din cupru sub formă de liță sau tresă pentru mărirea flexibilității pistolului. În cazul răcirii cu apă se introduce de regulă pe furtunul de retur apă.

Tubul de ghidare are rolul de dirijare a sârmei electrod de la DAS la corpul pistolului. Are un rol foarte important în asigurarea unei viteze de avans constante și uniforme a sârmei electrod, viteză care poate fi afectată de forțele de frecare care au loc între sârmă și tub și care se manifestă de obicei prin intrarea sacadată (în salturi) a sârmei în arc sau chiar prin modificarea vitezei de avans prescrise. Din acest motiv tubul de ghidare trebuie să asigure o frecare cât mai redusă cu sârma electrod.

În principal există 2 variante de tuburi de ghidare:

- tub spiralat din oțel arc;
- tub din teflon;
- (poliamidă de înaltă densitate la puteri mici de arc și încălziri ale capului de sudare sub 150°C);

Tubul spiralat din oțel se folosește în general la antrenarea sârmelor din oțel nealiat și slab aliat, a sârmelor tubulare groase antrenate cu role cu profil zimțat, dar uneori pot fi folosite și la sârme înalt aliate (Inox). Diametrul interior al tubului de ghidare d_i trebuie să fie corelat cu

diametrul sârmei electrod pentru a preveni fenomenul de ondulare a sârmei dacă $d_i \gg d_s$, respectiv blocarea sârmei în tub dacă $d_i \approx d_s$. În general se recomandă ca între cele două diametre să existe relația:

$$d_i = d_s + (0,5 \dots 0,1) \text{ mm} \quad (2.1)$$

În tabelul 2.1 sunt prezentate dimensiunile tubului flexibil spiralat în funcție de diametrul sârmei electrod [52].

Tabelul 2.1. Dimensiunile tubului de ghidare din oțel

Nr. crt.	d_s (mm)	d_{int} (mm)	d_{ext} (mm)
1.	0,6 – 0,9	1,5	4,0
2.	1,0 – 1,2	2,0	4,5
3.	1,4 – 1,6	2,5	4,5
4.	2,0 – 2,4	3,5	4,9

Tubul din teflon se folosește pentru antrenarea sârmelor moi din Al, Cu și aliajele lor, a sârmelor tubulare moi (diametru mare, secțiune deschisă, nesudate pe generatoare), respectiv a sârmelor aliate și înalt aliate Inox (pentru reducerea forței de frecare și evitarea pericolului de contaminare a suprafeței sârmei). Datorită coeficientului de frecare scăzut al teflonului se reduc mult frecările cu sârma electrod diminuându-se undulațiile sârmei. Se elimină de asemenea fenomenul deformării axiale a tubului, tubul de teflon fiind un element rigid. Diametrul interior al tubului este calibrat pe diametrul sârmei electrod, conform relației:

$$d_i = d_s + (0,3 \dots 0,4) \text{ mm} \quad (2.2)$$

În tabelul 2.2 sunt prezentate dimensiunile tubului flexibil din teflon în funcție de diametrul sârmei.

Tubul din teflon nu poate fi utilizat în cazul antrenării sârmelor tubulare cu contur deschis, de diametru mare (2,0; 2,4 mm), antrenate cu role cu profil zimțat (pentru reducerea forței de apăsare datorită rigidității reduse) deoarece prin răzuirea tubului, relativ moale, de către amprente lăsate pe sârmă are loc îmbâcsirea găurii tubului și creșterea forței de frecare, respectiv blocarea sârmei în tub.

Tabelul 2.2. Dimensiunile tubului de ghidare din teflon

Nr.crt.	d_s (mm)	d_{int} (mm)	d_{ext} (mm)
1.	0,6 – 1,0	1,5	4,0
2.	1,0 – 1,4	2,0	4,0
3.	1,6	2,7	4,7
4.	2,0 – 2,4	3,9	4,7

Corpul pistolului sau capul de sudare este elementul cel mai solicitat din punct de vedere termic ca efect a acțiunii căldurii arcului electric și a stropilor de metal. Se realizează într-o varietate mare de tipodimensiuni în funcție de destinație (sudarea manuală sau mecanizată), respectiv în funcție de nivelul de încărcare cu curent. Pe mânerul pistolului se găsește butonul de comandă care poate fi simplu sau combinat (un buton cu mai multe poziții sau două butoane distincte).

Capul de sudare se compune din:

- corp;
- duza de contact;
- duza de gaz;
- difuzorul de gaz;
- izolator;

Duza de contact asigură transmiterea curentului de sudare la sârma electrod (contact alunecător), motiv pentru care se execută din cupru electrolic sau aliaj din Cu-Cr (1% Cr), respectiv Cu-CrZr. Duzele din cupru aliat sunt mai dure, au rezistență la uzură mai mare deci durabilitate mai ridicată. În schimb sunt mai scumpe (cost dublu). La sudarea aluminiului se

recomandă utilizarea duzelor din aliaj de cupru. Diametrul interior al duzei de contact este calibrat pe diametrul sârmei și depinde de materialul sârmei electrod:

$$\begin{aligned}d_i &= d_s + (0,1 \dots 0,2) \text{ mm} - \text{pentru OL} \\d_i &= d_s + (0,3 \dots 0,4) \text{ mm} - \text{pentru Al}\end{aligned}\tag{2.3}$$

Influența calității sârmei electrod asupra duzei de contact:

- în cazul sârmelor cuprate desprinderea stratului de pe suprafață îmbăcsește cu praf de cupru duza de contact măbind frecările;
- în cazul sârmelor necuprate prezența lubrifianului pe sârmă produce arderea lui în duza de contact înrăutățind contactul electri și măbind forțele de frecare;
- prezența unor microașchii sau asperități pe suprafața sârmei duce la uzarea duzei de contact; evidențierea lubrifianului sau asperităților se face cu ajutorul unei batiste de hârtie care se ține pe sârmă la antrenarea acesteia;
- de aici prețul de cost diferit a sârmelor electrod la diferiți furnizori cu efecte negative la sudare ceea ce presupune o mai mare atenție la procurarea sârmei.

2.8. Alimentarea cu gaz de protecție

Gazul de protecție se livrează în butelii de oțel specifice fiecărui gaz de protecție utilizat la sudare : argon, heliu, bioxid de carbon, oxigen, sau amestecuri de gaze.

În cazul consumurilor mari de gaze livrarea se face în baterii de butelii de gaz cu până la 20 de butelii într-o baterie. În întreprinderile mari consumatoare de gaz gazul se livrează la locul de muncă prin conducte de oțel de la o unitate centrală.

Amestecurile de gaze se livrează în butelii sau pot fi obținute din buteli separate prin utilizarea amestecătoarelor de gaz. Se preferă prima variantă deoarece proporția gazelor în amestec este mai sigură în special la amestecuri cu proporții foarte mici ale unor gaze în amestec (1-3% O₂, 2-4% CO₂ etc.), datorită amestecării gravimetrice a gazelor în proporția dorită în instalații specializate.

Pentru măsurarea presiunii gazului din butelie, respectiv pentru reglarea debitului de gaz la valorile prescrise tehnologic se folosește reductorul (regulatorul) cu manometru de presiune și manometru de debit, sau regulatorul de presiune cu debitmetru (rotametrul). Acesta din urmă are avantajul unui control și citiri mai precise a debitului de gaz, dar este mai scump. Manometru sau debitmetru de debit este etalonat de regulă în l/min și este specific pentru fiecare gaz de protecție utilizat. În cazul în care pentru măsurarea debitului de gaz se folosește un debitmetru destinat măsurării debitului altui gaz de protecție se impune corecția necesară determinată de diferența de densitate a gazelor. Dacă nu se ține cont de acest lucru apar erori în măsurarea corectă a debitului de gaz, respectiv în asigurarea protecției la sudare.

În aplicațiile practice pentru calculul debitului de gaz măsurat cu un debitmetru diferit se poate folosi relația:

$$Q_{\text{gazmas}} \cong Q_{\text{gazetalonare}} \times \sqrt{\frac{\rho_{\text{gazetalonare}}}{\rho_{\text{gazmas}}}}\tag{2.4}$$

2.9. Instalația de răcire cu apă

Este destinată răcirii cablurilor de curent și a capului de sudare în cazul utilizării curenților mari de sudare. În acest caz instalația de sudare este prevăzută cu un presostat care decuplează sursa de sudare dacă instalația de răcire nu funcționează. Instalațiile de răcire pot fi unități separate sau pot fi integrate în sursa de sudare. Ca și lichid de răcire se utilizează o soluție de apă distilată cu alcool sau antigel în concentrație variabilă funcție de temperatura negativă preconizată.

CAPITOLUL III
SISTEME DE AVANS PRIN IMPULSURI ALE SÂRMEI ELECTROD

[2 subcapitole, 35 pagini. 50 figuri (6 poze), 15 relații de calcul]

3.1. Orientări în direcția perfecționării sistemelor de acționare ale sârmei electrod la sudarea MIG/MAG

Dispozitivul de avans a sârmei electrod DAS, ca subansamblu de bază a echipamentelor de sudare în mediu de gaze protectoare MIG/MAG, asigură prin intermediul sistemului de acționare aducerea mecanizată a sârmei electrod, de pe bobina de sârmă prin tubul de ghidare, în zona sudării ceea ce permite realizarea premiselor de amorsare și întreținere a arderii stabile a arcului electric.

Pentru anumite condiții date la sudare, stabilitatea arcului electric depinde în mod direct de stabilitatea vitezei de avans a sârmei electrod, deci implicit de calitatea sistemului de antrenare. Prin urmare, cerințele principale impuse sistemelor de antrenare a sârmei electrod sunt:

- ✓ asigurarea unei viteze de avans constante, uniforme și continue a sârmei;
- ✓ deformarea minimă a sârmei electrod și evitarea degradării suprafeței acesteia (prin desprinderea stratului de cupru, respectiv zgârierea sau zimțarea suprafeței);
- ✓ posibilitatea reglării continue și precise a vitezei de avans;
- ✓ asigurarea unei game largi de valori a vitezei de avans care să acopere necesitățile tehnologice;
- ✓ siguranță în exploatare;
- ✓ fiabilitate și mentenabilitate;

O problemă importantă în direcția asigurării unei viteze de avans constante și uniforme a sârmei electrod o reprezintă forța de frecare a sârmei pe traseul străbătut, în special forța de frecare din tubul flexibil de ghidare (bowden). Reducerea forței de frecare (a rezistenței la înaintare) prin tubul de ghidare permite pe de o parte asigurarea unei viteze de avans constante, iar pe de altă parte posibilitatea măririi razei de acțiune a pistolului de sudare.

Sistemele standard de avans a sârmei electrod sunt cele cu motoreductor și role de antrenare prezentate pe larg în capitolul 2. Specific acestor sisteme este avansul continuu a sârmei electrod, caracterizat prin forțe de frecare relativ mari în tubul flexibil de ghidare și prin pericolul ondulării (deformării) sârmei. Acest aspect limitează raza de acțiune a pistolului de sudare la o distanță de 3-5 m. În plus aceste sisteme se caracterizează prin soluție constructivă complicată, gabarit mare, preț de cost ridicat, etc..

Pornind de la acest aspect în literatura de specialitate au apărut trei orientări în direcția reducerii forței de frecare (de rezistență la înaintare) la avansul sârmei electrod prin tubul flexibil de ghidare, [27], [44], [45], [50], care stau la baza realizării unor sisteme de avans mai mult sau mai puțin diferite de sistemele de avans clasice, după cum urmează:

- suprapunerea peste mișcarea principală de avans a unei mișcări suplimentare de rotație sau oscilație a sârmei electrod;
- perfecționarea tuburilor flexibile de ghidare a sârmei electrod;
- avansul sub forma unor impulsuri (vibrații) axiale aplicate pe sârmă cu o anumită amplitudine și frecvență.

3.1.1. Sisteme de avans cu mișcări suplimentare ale sârmei electrod

Sistemele de avans cu reductor, după unele modificări și perfecționări, pot fi construite astfel încât să realizeze simultan mișcarea principală de avans (continuă) peste care să se suprapună o mișcare suplimentară de rotație, oscilație axială sau neaxială a sârmei electrod. În cele ce urmează se prezintă câteva din soluțiile constructive propuse în acest sens în literatura de specialitate.

În cazul sistemelor (mecanismelor) de acționare cu mișcare suplimentară de rotație, rotirea sârmei electrod poate fi realizată cu ajutorul unui sistem cu angrenaj planetar, figura 3.1, prin utilizarea unor role profilate (hiperboloide), figura 3.2, prin derularea sârmei de pe o bobina fixă, figura 3.3, etc..

Dintre sistemele de acționare cu mișcare suplimentară de vibrație se menționează sistemele cu vibrarea neaxială a sârmei electrod, figura 3.4, cu vibrarea neaxială a tubului flexibil de ghidare, figura 3.5, respectiv cu rotirea sau vibrarea axială a tubului flexibil de ghidare, figura 3.6.

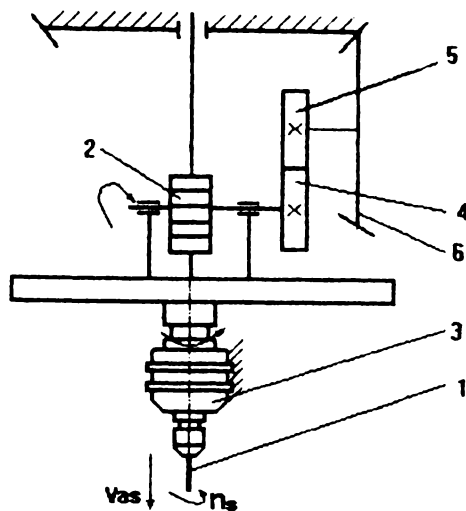


Figura 3.1. Mecanism de acționare cu angrenaj planetar:
 1. sârma electrod; 2. role de antrenare; 3. motor de acționare; 4., 5. angrenaj cilindric; 6. angrenaj planetar

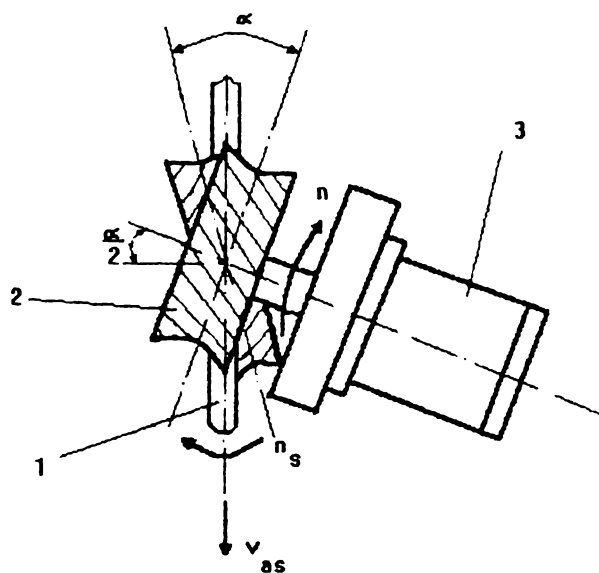


Figura 3.2. Mecanism de acționare cu role profilate hiperboloidale:
 1. sârma electrod; 2. role hiperboloidale; 3. motor de acționare

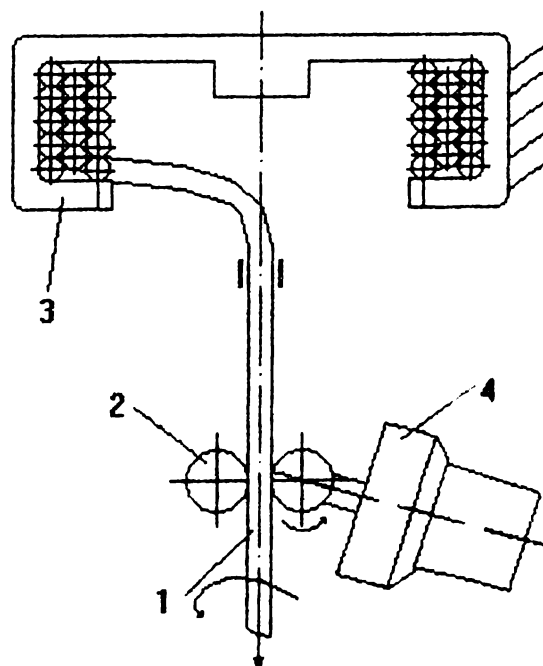


Figura 3.3. Mecanism de acționare prin derularea sârmei de pe bobină fixă:
 1. sârma electrod; 2. role de antrenare; 3. bobina de sârmă; 4. motor de acționare

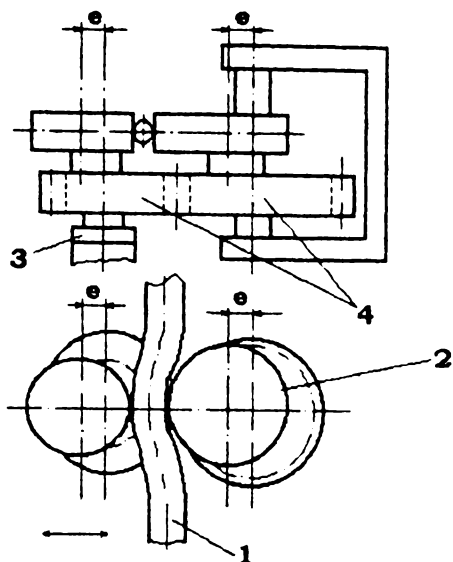


Figura 3.4. Mecanism cu vibrarea neaxială a sârmei:
1. sârma electrod; 2. role de antrenare; 3. motor de acționare; 4. sistem de vibrare

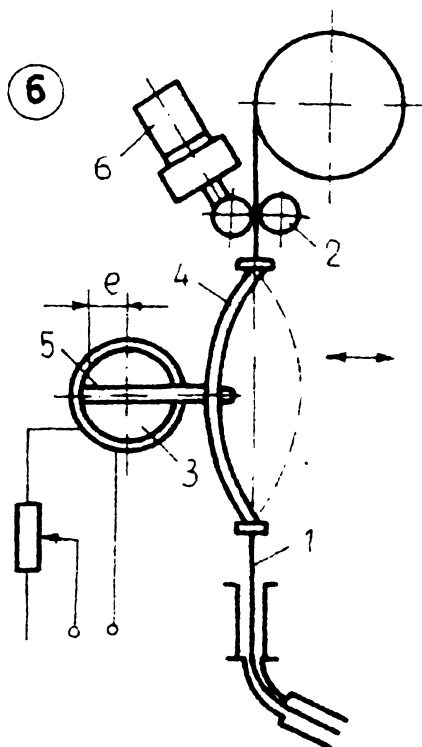


Figura 3.5. Mecanism cu vibrarea neaxială a tubului flexibil:
1. sârma electrod; 2. role de antrenare; 3, 5 sistem de oscilare; 4. tub flexibil; 6. motor de acționare

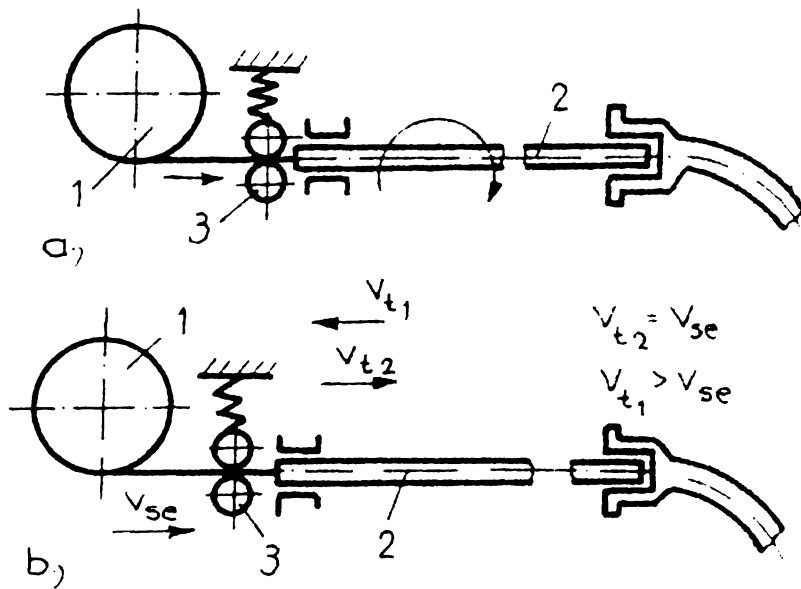


Figura 3.6. Mecanism cu rotirea sau vibrarea axială a tubului flexibil
1. bobina de sârmă; 2. tub flexibil de ghidare; 3. role de antrenare; a. cu rotire; b. cu vibrare axială

3.1.2. Perfecționarea tuburilor flexibile de ghidare

Direcțiile de perfecționare a tuburilor flexibile de ghidare au fost orientate spre modificarea rigidității tubului pe anumite porțiuni sau pe întreaga lungime, evitându-se îndoirile nedorite ale acestuia, figura 3.7, confecționarea unor tuburi de ghidare cu secțiune diferită de cea circulară în speță cu secțiune poligonală, figura 3.8, înglobarea în învelișul elastic al tubului a unor corpuri de rotație (bile) care transformă frecarea de alunecare într-o frecare de rostogolire, figura 3.9, presarea în învelișul elastic al tubului a unor ace de sârmă înclinată în sensul de avans a sârmei, figura 3.10.

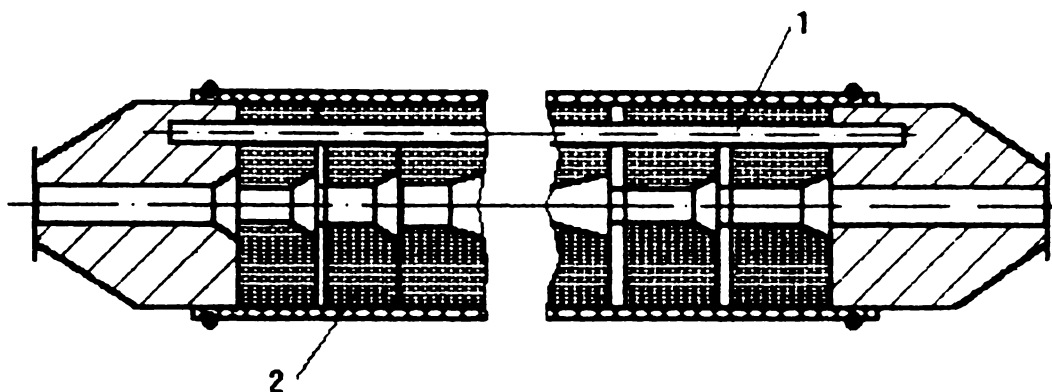


Figura 3.7. Sistem de rigidizare a tubului de ghidare: 1. element de rigidizare; 2. tub de ghidare

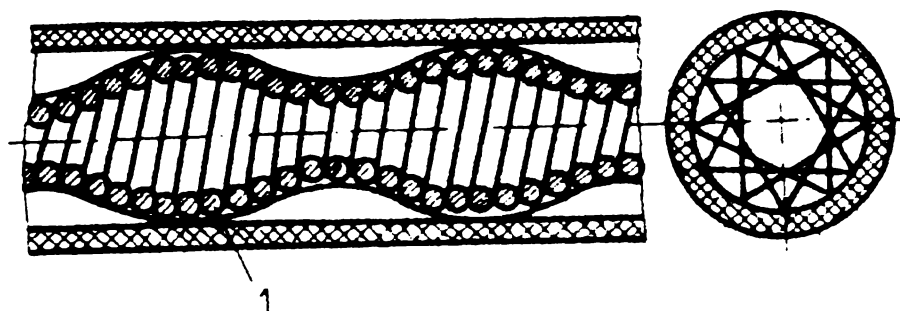


Figura 3.8. Tub de ghidare cu secțiune poligonală: 1. spiră triunghiulară

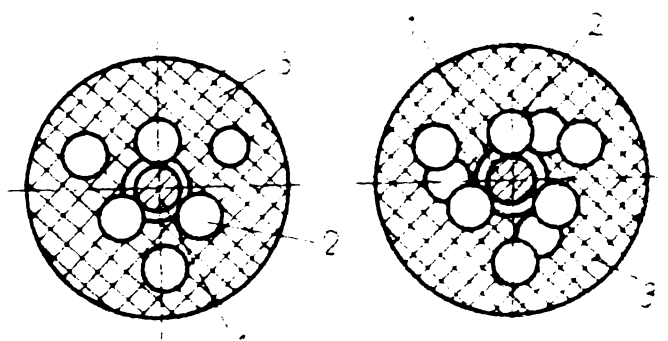


Figura 3.9. Tub flexibil de ghidare cu bile: 1. sârmă electrod; 2. bile; 3. înveliș elastic

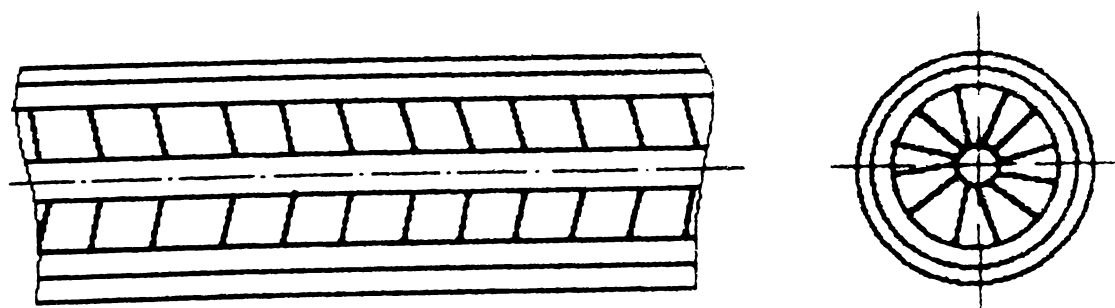


Figura 3.10. Tub flexibil de ghidare cu ace de sârmă înglobate în învelișul elastic

3.1.3. Sisteme de avans prin impulsuri axiale a sârmei electrod

Avansul prin impulsuri axiale a sârmei electrod, ca posibilitate de reducere a forței de frecare din tubul flexibil de ghidare, se bucură datorită particularităților și avantajelor pe care le are de cel mai mare interes în literatura de specialitate. Ceea ce deosebește în mod esențial sistemele de avans prin impulsuri de sistemele de avans standard constă în faptul că antrenarea sârmei electrod se face sub forma unor impulsuri axiale, cu o anumită amplitudine și frecvență, și nu continuu așa cum se întâmplă în cazul sistemelor clasice cu motoreductor și role de antrenare. Deci în timpul unui impuls viteza de avans a sârmei electrod variază între două valori extreme.

Avantajele principalele sunt:

- ✓ reducerea forței de frecare din tubul flexibil de antrenare;
- ✓ obținerea unui curent variabil periodic, pulsant, ca efect al variației vitezei de avans a sârmei în timpul unui impuls aplicat pe sârmă;

În plus aceste sisteme se caracterizează prin: simplitate și o mare varietate constructivă, eliminarea reductorului, gabarit redus, greutate mică, flexibilitate mare putând fi adaptate cu ușurință la orice instalație de sudare, posibilitatea folosirii unor motoare de antrenare de putere mai mică și la un preț de cost scăzut.

În funcție de metoda de generare a impulsurilor aceste sisteme se pot clasifica în:

- sisteme de avans cu impulsuri mecanice;
- sisteme de avans cu impulsuri electromecanice cu electromagneți;

Indiferent de tipul sistemului de avans acesta conține obligatoriu o acționare – *generatorul de impulsuri* – și minim două dispozitive de prindere (apucare), unul pentru avansul sârmei la cursa activă, iar celălalt pentru blocarea acesteia la cursa de mers în gol (cursa de revenire). În funcție de elementul de prindere a sârmei aceste dispozitive pot fi: cu bile, cu role, cu excentric, cu came, cu șaibe, cu pene, etc. La alegerea dispozitivului de prindere a sârmei se urmărește:

- simplitate constructivă și de execuție;
- fiabilitate în exploatare;
- greutate și gabarit redus;
- abateri minime de la pasul (amplitudinea) dat;
- folosirea unor piese de serie (bile, role, etc).

3.1.3.1. Soluții constructive de prindere (apucare) a sârmei electrod

Literatura de specialitate prezintă o varietate mare de soluții constructive de prindere (apucare) a sârmei electrod, [44]. Cerințele principale care se impun acestor dispozitive de prindere sunt:

- asigurarea unei prinderi sigure și evitarea patinării sârmei electrod cu consecințe asupra modificării pasului de avans, respectiv a vitezei de avans;
- deformații minime ale sârmei electrod și evitarea degradării suprafeței acesteia;
- asigurarea reversibilității mișcării de avans;

Principalelor tipuri de dispozitive de prindere a sârmei electrod în funcție de elementul de prindere sunt:

- dispozitiv de prindere cu bile, figura 3.11;
- dispozitiv de prindere cu role cilindrice, figura 3.12;
- dispozitiv de prindere cu role hiperboloidale, figura 3.13;
- dispozitiv de prindere cu excentric, figura 3.14;
- dispozitiv de prindere cu element de împănare, figura 3.15;
- dispozitiv de prindere cu arc, figura 3.16;
- dispozitiv de prindere cu pene, figura 3.17;
- dispozitiv de prindere cu șaibă, figura 3.18.

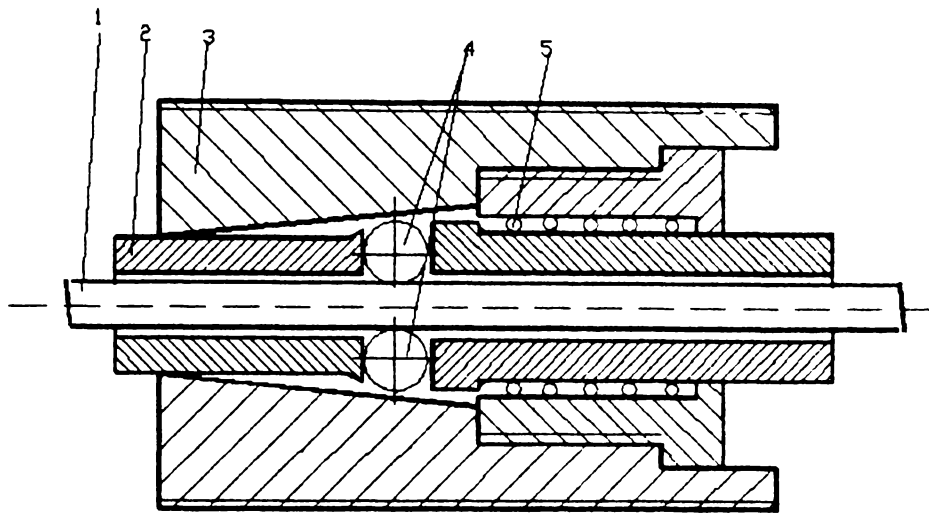


Figura 3.11. Dispozitiv de prindere cu bile: 1.sârma electrod; 2. bușă; 3. corp; 4. bile; 5. resort.

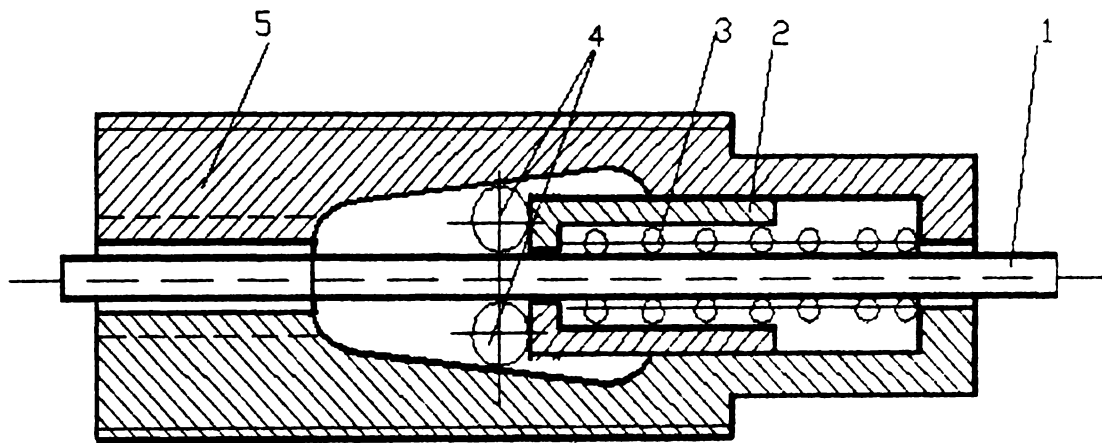


Figura 3.12. Dispozitiv de prindere cu role cilindrice: 1.sârma electrod; 2. resort; 3. bușă; 4. role; 5. corp

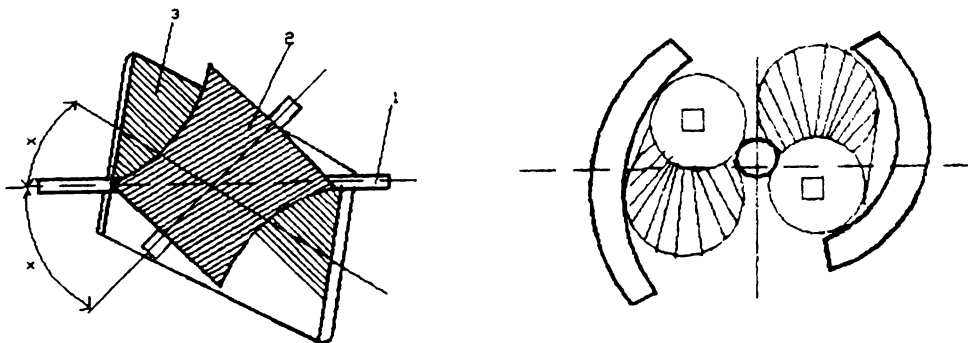


Figura 3.13. Dispozitiv de prindere cu role hipoidale: 1.Sârma; 2.Role hipoidale; 3.Role de ghidare și apăsare

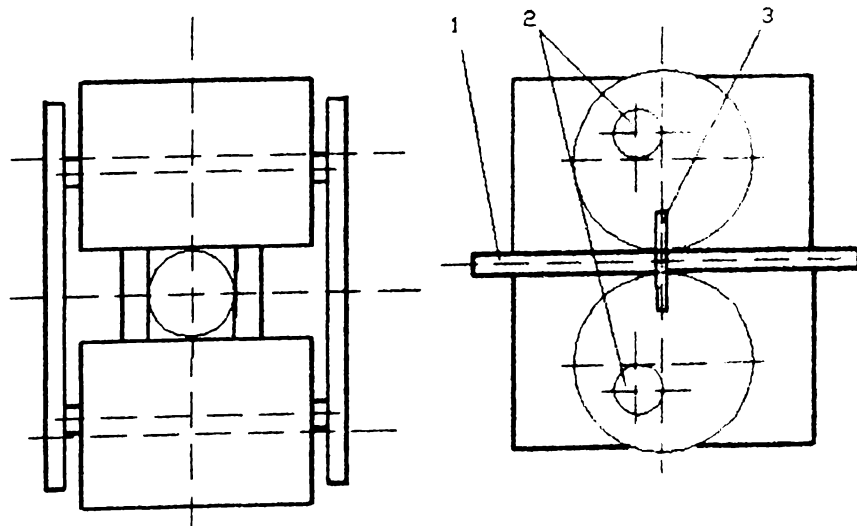


Figura 3.14. Dispozitiv de prindere cu excentric: 1. Sârma electrod; 2. Role excentrice; 3. Arc lamelar

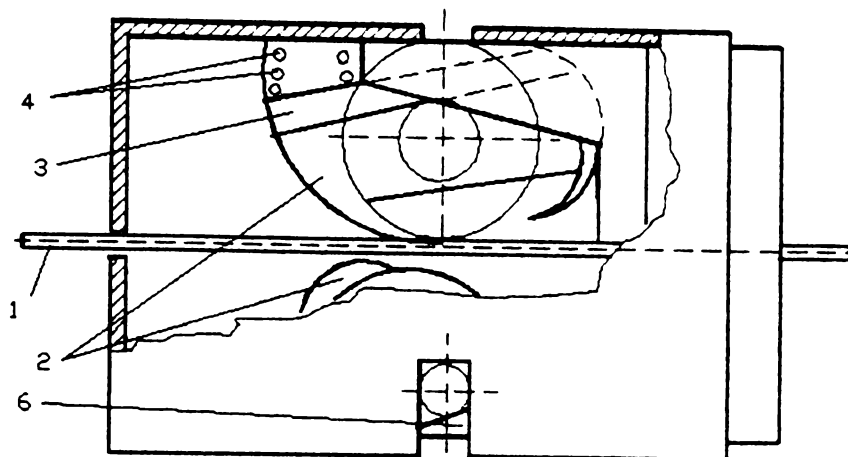


Figura 3.15. Dispozitiv de prindere cu element de împănare:
1. sârma electrod; 2. element de împănare; 3. balansor; 4. resort; 5. rolă; 6. pană

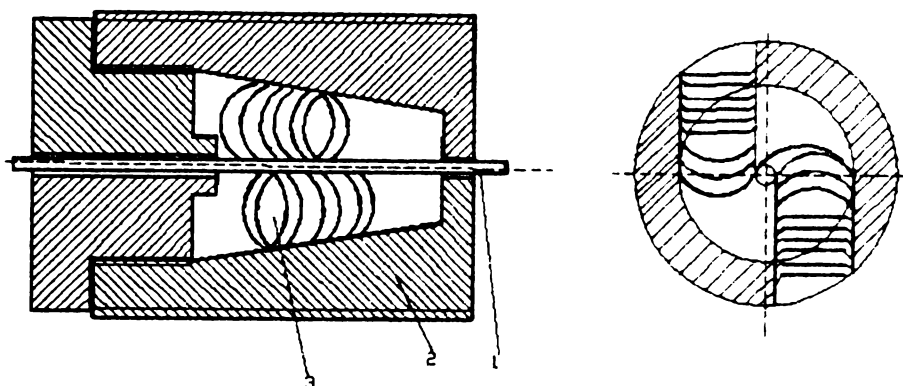


Figura 3.16. Dispozitiv de prindere cu arc: 1. sârma electrod; 2. corp; 3. arc

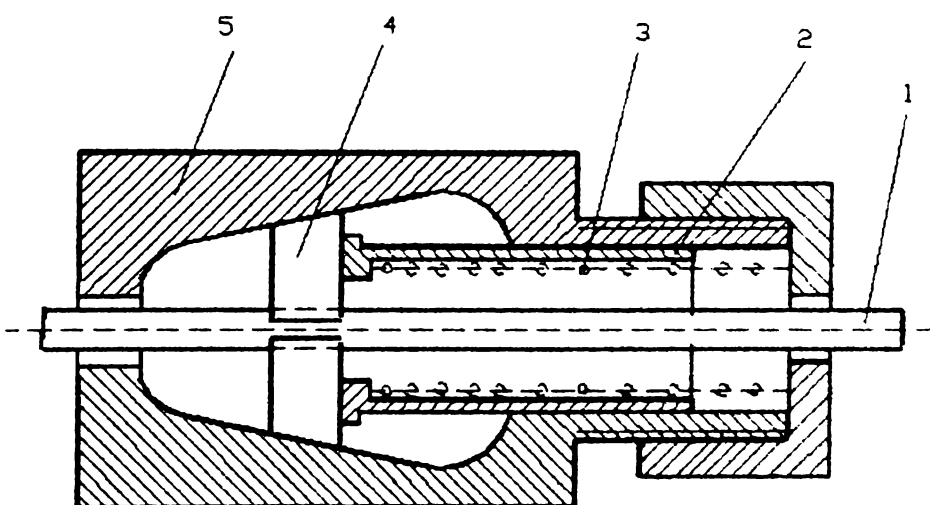


Figura 3.17. Dispozitiv de prindere cu pene: 1. sârma electrod; bușă; 3. resort; 4. pene; 5. corp

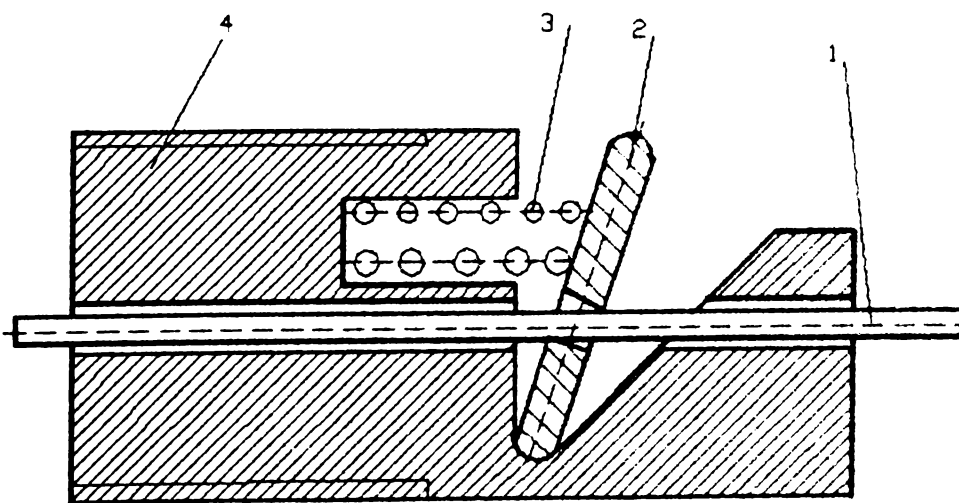


Figura 3.18. Dispozitiv de prindere cu șaibă: 1. sârma electrod; 2. șaibă; 3. resort; 4. corp

3.1.3.2. Calculul dispozitivelor de prindere ale sârmei electrod

Calculul dispozitivelor de prindere ale sârmei electrod constă în determinarea forței de apăsare (P) a elementului de împănare pe sârma electrod în funcție de forța de rezistență la înaintare (F) a acesteia în tubul flexibil de ghidare și în determinarea condiției de împănare, respectiv de evitare a patinării (alunecării) sârmei în dispozitivul de prindere. Calculul depinde de tipul dispozitivului de prindere. În continuare se prezintă schemele de principiu și relațiile de calcul pentru trei tipuri de dispozitive de prindere, cele mai reprezentative, [44].

3.1.3.2.1. Calculul dispozitivului de prindere cu bile (sau role).

a. Schema de calcul, figura 3.19:

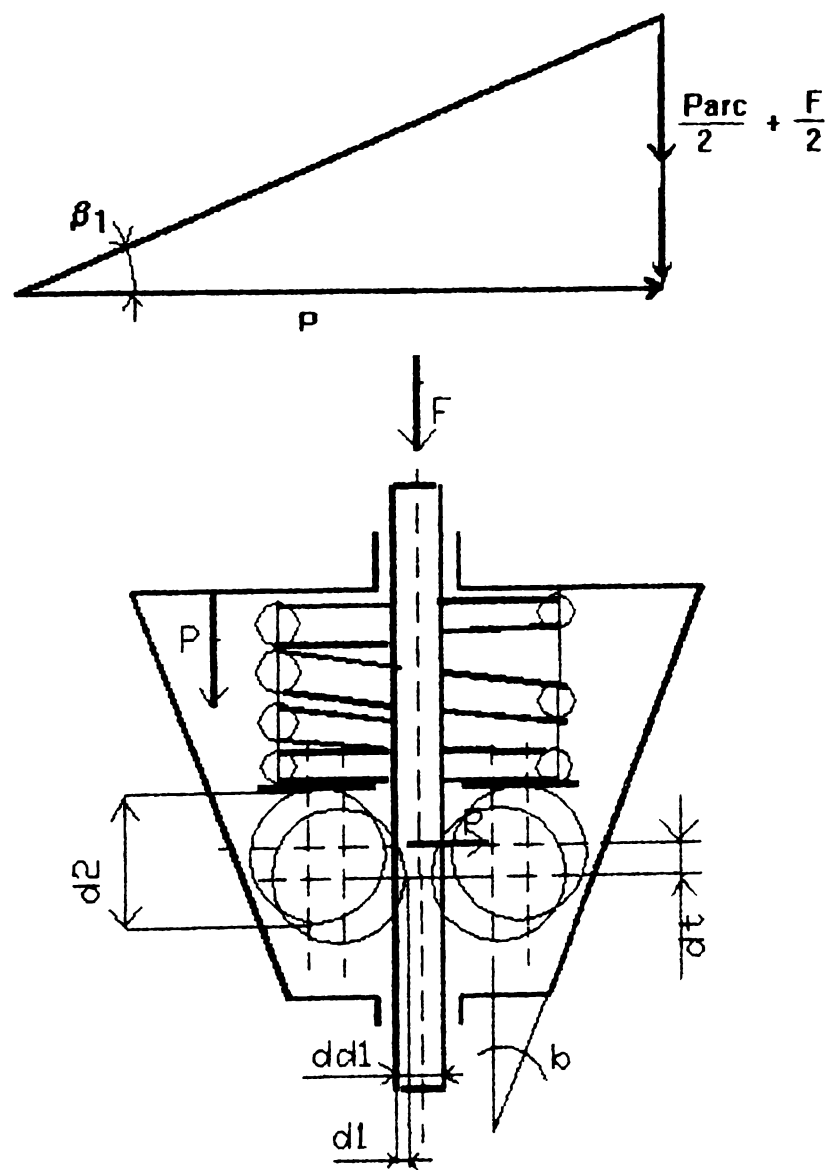


Figura 3.19. Schema de calcul a dispozitivului de prindere cu bile

b. Relații de calcul:

Forța de prindere P :

$$P = \frac{F + Parc}{n \operatorname{tg} \beta_1} ;$$

Abateră de la pasul avansului :

$$\Delta t = \Delta d_1 \operatorname{tg} \beta_1 ;$$

Marimea deformației locale a sîrmei :

$$\Delta d_1 = \lambda \left(\frac{(F + Parc)^2}{k^2 n^2 \operatorname{tg} \beta_1 c_1} \right)^{\frac{1}{3}} ;$$

unde :

$$k = \frac{8}{3} \frac{E_1 E_2}{E_1 (1 - \mu_1^2) + E_2 (1 - \mu_2^2)} ;$$

pentru prindere cu bile :

$$c_1 = \frac{2d_1 d_2}{2d_1 + d_2} ;$$

pentru prindere cu role :

$$c_1 = \frac{2d_1 d_2}{d_1 + d_2} ;$$

Condiția pentru avansul sigur al sîrmei

și precizia prevăzută pentru pasul de înaintare :

$$f \left(1 + \frac{Parc}{F} \right) > \operatorname{tg} \beta_1 \geq \left(\frac{\Delta t}{\lambda} \right)^{\frac{3}{5}} \left(\frac{F + Parc}{n^2 k^2 c_1} \right)^{-\frac{1}{5}}$$

3.1.3.2.2. Calculul dispozitivului de prindere cu excentric

a. Schema de calcul, figura 3.20:

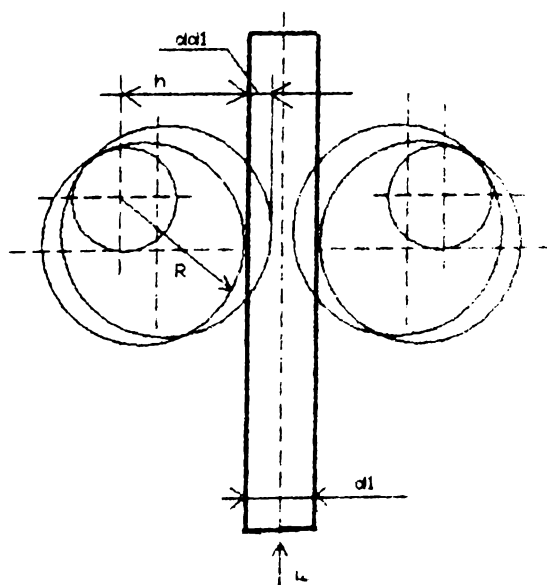


Figura 2.20. Schema de calcul a dispozitivului de prindere cu excentric

b. Relații de calcul:

Forța de stringere P :

$$P = \frac{F + Parc}{n \operatorname{tg} \beta_2};$$

Marimea deformăției locale a sîrmei :

$$\Delta d_1 = \lambda \left(\frac{(F + Parc)^2}{k^2 n^2 \operatorname{tg}^2 \beta_2 c_1} \right);$$

Abaterea de la pasul avansului :

$$\Delta t = e \sin \alpha_1 - \sqrt{e^2 \sin^2 \alpha_1 - 2e \Delta d_1 \cos \alpha_1 - \Delta d_1^2};$$

unde :

$$k = \frac{8}{3} \frac{E_1 E_2}{E_1 (1 - \mu_1^2) + E_2 (1 - \mu_2^2)};$$

$$c_1 = \frac{2d_1 d_2}{d_1 + d_2};$$

$$\frac{\Delta t}{\Delta d_1} = \frac{\sin \alpha_1 - \sin \alpha_2}{\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1};$$

$$\sin \alpha_1 = \frac{\operatorname{tg} \beta_2 (e^2 \operatorname{tg}^2 \beta_2 - R^2 \operatorname{tg}^2 \beta_2 + e^2)^{\frac{1}{2}} + R \operatorname{tg} \beta_2}{e(1 + \operatorname{tg}^2 \beta_2)};$$

$$\cos \alpha_1 = \frac{(e^2 \operatorname{tg}^2 \beta_2 - R^2 \operatorname{tg}^2 \beta_2 + e^2)^{\frac{1}{2}} - R \operatorname{tg}^2 \beta_2}{e(1 + \operatorname{tg}^2 \beta_2)};$$

$$\cos \alpha_2 = \frac{\Delta d_1}{e} + \cos \alpha_1;$$

Condiția pentru avansul

sigur al sîrmei și precizia prevăzută

pentru pasul de înaintare :

$$f \left(\frac{F + Parc}{n \operatorname{tg} \beta_2} \right) > F \geq k c_1^{\frac{1}{2}} \left(\frac{2e \Delta t - \Delta t^2}{2\lambda e \cos \alpha_1} \right)^{\frac{3}{2}};$$

3.1.3.2 3. Calculul dispozitivului de prindere cu șaibă

a. Schema de calcul, figura 3.21:

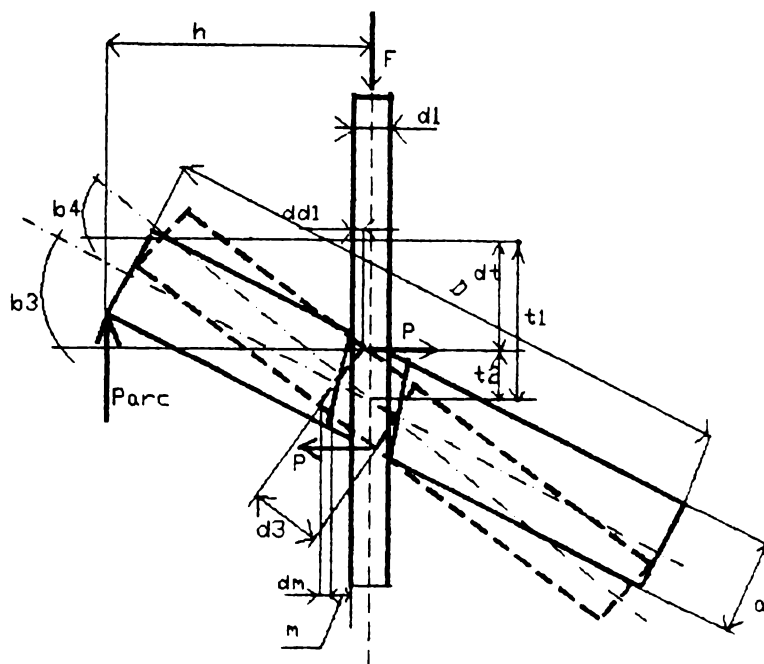


Figura 3.21. Schema de calcul a dispozitivului de prindere cu șaibă

b. Relații de calcul

Forța de stringere P :

$$P = \frac{F(h + d_3) \cos \beta_4}{d_2 \sin \beta_4 + \delta} ;$$

Abaterea de la pasul avansului :

$$\Delta t = \frac{D \Delta m}{\delta} = \frac{D \Delta d_1}{\delta} ;$$

Marimea deformației locale a șirmei :

$$\Delta d_1 = \lambda \left(\frac{[F(h + d_3) \cos \beta_4]^2}{d_3 \sin \beta_4 + \delta} \right) ;$$

unde :

$$k = \frac{8}{3} \frac{E_1 E_2}{E_1 (1 - \mu_1^2) + E_2 (1 - \mu_2^2)} ;$$

$$\sin \beta_3 = \frac{m}{\delta} = \frac{2t_1}{D} ;$$

$$\sin \beta_4 = \frac{m + 2\Delta m}{\delta} = \frac{m + 2\Delta d_1}{\delta} = \frac{2t_2}{D} ;$$

$$D = \frac{2h - \delta \sin \beta_3 + d_1}{\cos \beta_3} ;$$

$$d_3 = \frac{d_1 + \delta \sin \beta_3}{\cos \beta_3} ;$$

Condiția pentru avansul sigur al șirmei și precizia prevăzută pentru pasul de înaintare :

$$f \left(\frac{F(h + d_3) \cos \beta_4}{d_3 \sin \beta_4 + \delta} \right) > F \geq kc^{\frac{1}{2}} \left(\frac{\Delta t \delta}{D \lambda} \right)^{\frac{3}{2}}$$

Semnificațiile termenilor care intervin în formulele de calcul de mai sus sunt:

➤ la dispozitivul de prindere cu bile (role):

- ✓ P - forța de prindere (de strângere sau apucare) [N];
- ✓ F - forța de rezistență la înaintare [N];
- ✓ P_{arc} - forța arcului sau a elementului elastic [N];
- ✓ n - numărul elementelor de prindere;
- ✓ β_1 - unghiul de împănare al bilei (rolei) fără deformarea sârmei [°];
- ✓ t - pasul avansului [cm];
- ✓ Δt - micșorarea pasului [cm];
- ✓ d_1 - diametrul sârmei [cm];
- ✓ Δd_1 - mărimea deformației sârmei [cm];
- ✓ - coeficient ce depinde de poziția relativă a elementelor de prindere și de strângere;
- ✓ k - coeficient ce depinde de materialul elementelor de prindere și de materialul sârmei;
- ✓ c_1 - coeficient ce ține seama de forma elementelor de prindere și de stringere;
- ✓ E_1, E_2 - modulul de elasticitate corespunzător materialului sârmei, respectiv elementului de prindere [MPa];
- ✓ μ_1, μ_2 - coeficientul lui Poisson corespunzător materialului sârmei, respectiv elementului de prindere;
- ✓ d_2 - diametrul bilei (rolei) [cm];
- ✓ f - coeficientul de frecare de alunecare dintre sârmă și bilă (rolă);

➤ la dispozitivul de prindere cu excentric:

- ✓ β_2 - unghiul de împănare a excentricului [°];
- ✓ e - mărimea excentricității [cm];
- ✓ α_1, α_2 - unghiul de rotire a excentricului, corespunzător cu forța de rezistență, respectiv fără forță de rezistență la înaintare [°];
- ✓ R - raza de curbură corespunzătoare excentricității e [cm];

➤ la dispozitivul de prindere cu șaibă:

- ✓ h - distanța de la sârma electrod până la punctul de aplicare a forței de prindere [cm];
- ✓ d_3 - diametrul orificiului din șaibă;
- ✓ β_3, β_4 - unghiul de împănare a șaibei, cu deformarea, respectiv fără deformarea sârmei electrod [°];
- ✓ - grosimea șaibei [cm];
- ✓ D - diametrul exterior al șaibei [cm];
- ✓ m - spațiul (jocul) dintre suprafața sârmei și muchia neîncastrată a șaibei [cm];
- ✓ $\Delta m = \Delta d_1$ - creșterea intervalului [cm];
- ✓ t_1, t_2 - pasul avansului cu deformarea, respectiv fără deformarea sârmei [cm];
- ✓ v_1 - viteza de avans calculată [m/h];
- ✓ L - lungimea sârmei [cm] antrenată în timpul t [s];
- ✓ f_p - frecvența impulsurilor de avans a sârmei [Hz];

Obs.

1. Deformația Δd_1 a sârmei determină micșorarea pasului de avans dat (teoretic) cu valoarea Δt .

2. Pentru dispozitivul de prindere cu excentric unghiul de rotire α depinde de unghiul de împănare β_2 al excentricului care se stabilește din condiția de împănare sigură a sârmei, dată de relația:

$$\operatorname{tg} \beta_2 < f.$$

3. La dispozitivul de prindere cu șaibă forța maximă acționează în punctul opus punctului de aplicație a forței. Pentru avansul sigur al sârmei electrod trebuie îndeplinită relația:

$$P \cdot f > F.$$

3.1.3.3. Soluții constructive de sisteme de avans prin impulsuri ale sârmei electrod

Literatura de specialitate prezintă o varietate mare de sisteme de avans prin impulsuri a sârmei electrod, [6], [27], [45]. În cele ce urmează se prezintă schema de principiu a unor sisteme de avans prin impulsuri mecanice și electromagnetice.

Schema generală de generare a impulsurilor indiferent de schema de principiu a mecanismului este prezentată în figura 3.22. Avansul sârmei electrod se realizează cu ajutorul rotelor profilate (2), acționate cu motoreductorul (3). Pauza dintre impulsuri depinde de forma profilului rolei de antrenare (cota h).

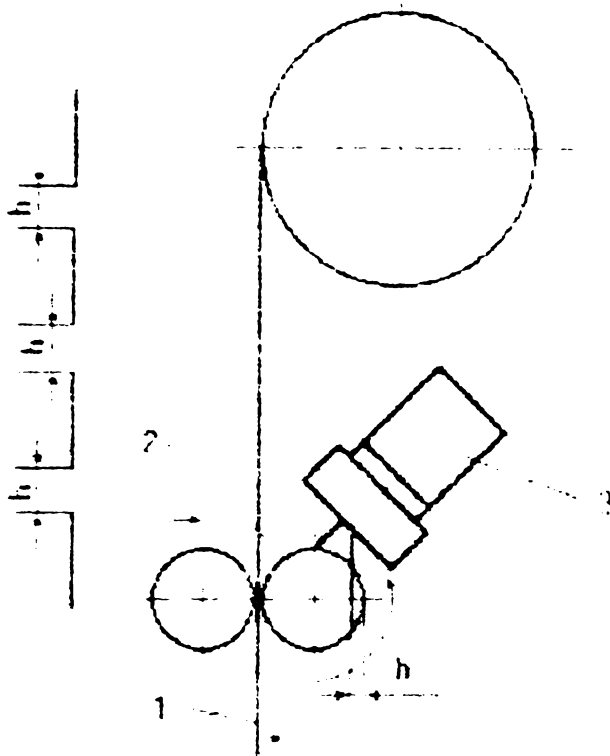


Figura 3.22. Schema generală a sistemelor de avans prin impulsuri
În figura 3.23 este prezentat sistemul de avans prin impulsuri cu două excentrice.

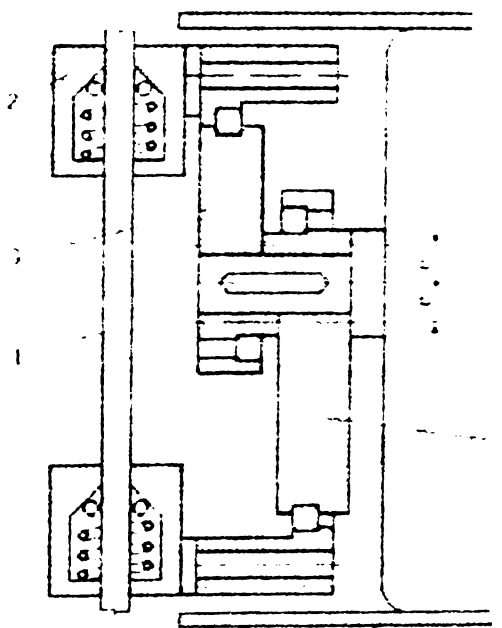


Figura 3.23. Schema de principiu a sistemului de avans prin impulsuri cu două excentrice.

La rotirea arborelui motorului (4), dispozitivele de prindere (2) se deplasează unul spre celălalt. În prima semirotăție un dispozitiv de prindere apucă sârma, ca efect al împănării bilelor prin intermediul suprafeței conice și a arcului de compresiune și o deplasează cu un pas (impuls) a cărui amplitudine depinde de mărimea excentricității "e", timp în care cel de-al doilea dispozitiv

alunecă pe sârmă. În cea de-a doua semirotăție cele două dispozitive se îndepărtează unul de altul, funcțiile lor inversându-se.

Sistemul de avans din figura 3.24 are ca element generator de impulsuri furca de oscilație (2) antrenată într-o mișcare oscilatorie de către excentricul (4). La deplasarea furcii în direcția dispozitivului de prindere (3) sârma electrod (1), fixată în canalul de ghidare al furcii, este împinsă în sensul direcției de avans prin dispozitivul de prindere-blocare (5). Dispozitivul de prindere (3) în această fază blochează deplasarea sârmei înapoi. În faza următoare prin deplasarea furcii spre dispozitivul (5), care acum preia funcția de blocare, sârma electrod este fixată în canalul furcii și antrenată odată cu acesta prin dispozitivul (3) care alunecă pe sârmă. Viteza de avans depinde de valoarea excentricității și de distanța dintre dispozitivele de prindere (3) și (5).

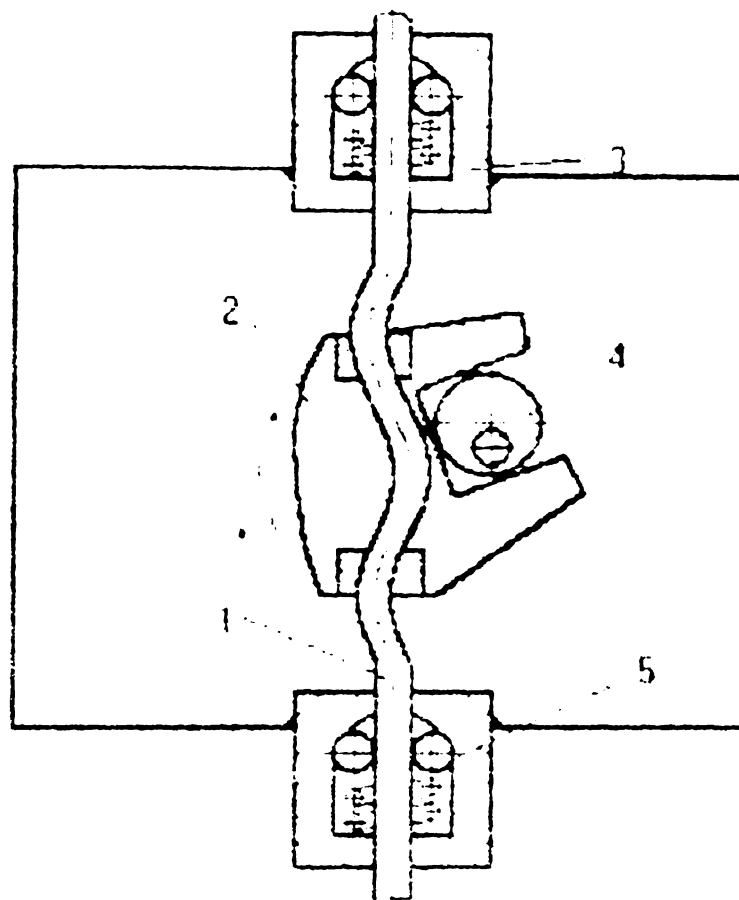


Figura 3.24. Schema de principiu a sistemului de avans prin impulsuri cu furcă oscilantă

Sistemul de avans cu pârghii din figura 3.25 este asemănător cu cel prezentat anterior. Prin rotirea excentricului (2), pârghiile (3) primesc o mișcare oscilantă antrenând odată cu ele dispozitivul de prindere a sârmei (4) care imprimă acesteia o mișcare de avans cu amplitudinea și frecvența date de mărimea pârghiilor și turația motorului. Blocarea sârmei la cursa de revenire se face cu ajutorul dispozitivului cu bile (5).

Sistemul de avans din figura 3.26 folosește pentru generarea impulsurilor motorul electric (10) și manivela (9) care prin excentricitatea creată transmite dispozitivului de apucare mobil (2) o mișcare alternativă de dute-vino. Viteza de avans, respectiv pasul (sau amplitudinea), impulsului se reglează prin modificarea turației motorului și/sau a excentricității manivelei. Blocarea sârmei la cursa de mers în gol se face prin intermediul dispozitivului (7).

În continuare se prezintă schema de principiu a unor sisteme de avans prin impulsuri cu electromagneți, [27], [50], .

În figura 3.27 vibratorul electromagnetic (5) alimentat în curent alternativ la frecvența de 50 Hz atrage periodic armătura elastică (4) legată la dispozitivul de antrenare (2) a sârmei. La deplasarea spre dreapta, datorită împănării bilelor pe sârmă, are loc antrenarea acesteia prin dispozitivul de blocare fix (8). La deplasarea dispozitivului (2) spre stânga, bilele eliberează sârma și aceasta are tendința de a reveni în poziția inițială, lucru ce este împiedicat de către dispozitivul de blocare fix (8). Viteza de avans depinde de mărimea cursei de oscilație a lamelei (4), reglată prin intermediul dispozitivului (3).

Viteza de avans poate fi realizată și cu ajutorul unui excitator electrodinamic, figura 3.28 Dispozitivul cu autoblocare oscilant (2) este montat pe bucșa (10), fixată prin membrana elastică (9)

de pereții carcusei (12). Solidar cu bușa este dispusă bobina (11), iar concentric se dispune un magnet permanent (13). La un impuls de curent prin bobină, datorită interacțiunii câmpului magnetic produs de aceasta și magnetul permanent, se obține o deplasare axială a elementelor mobile.

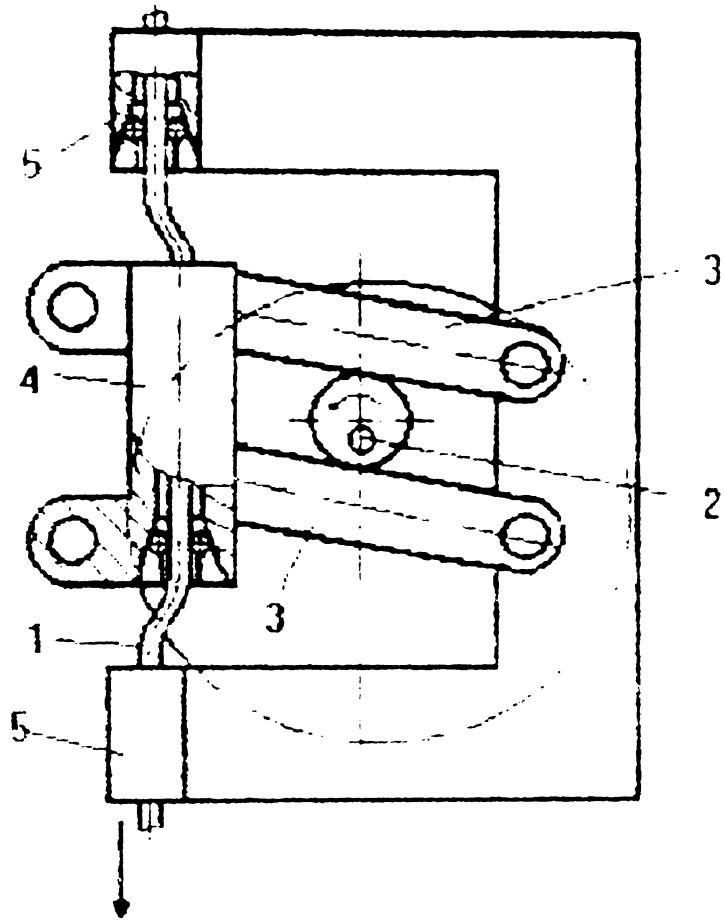


Figura 3.25. Schema de principiu a sistemului de avans prin impulsuri cu pârghii oscilante

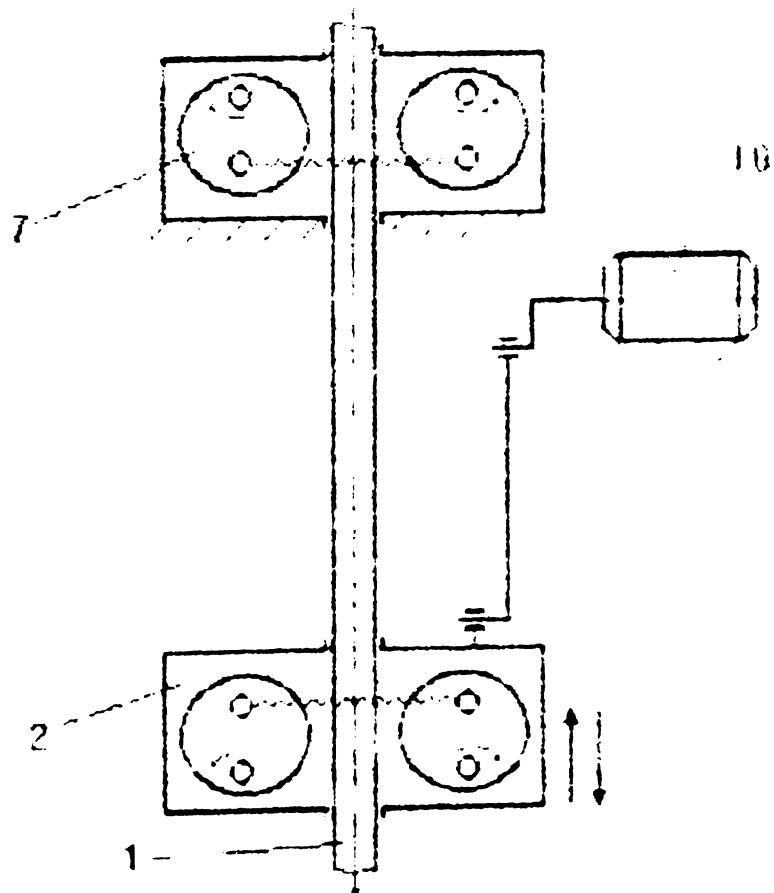


Figura 3.26. Schema de principiu a sistemului de avans prin impulsuri bielă - manivelă

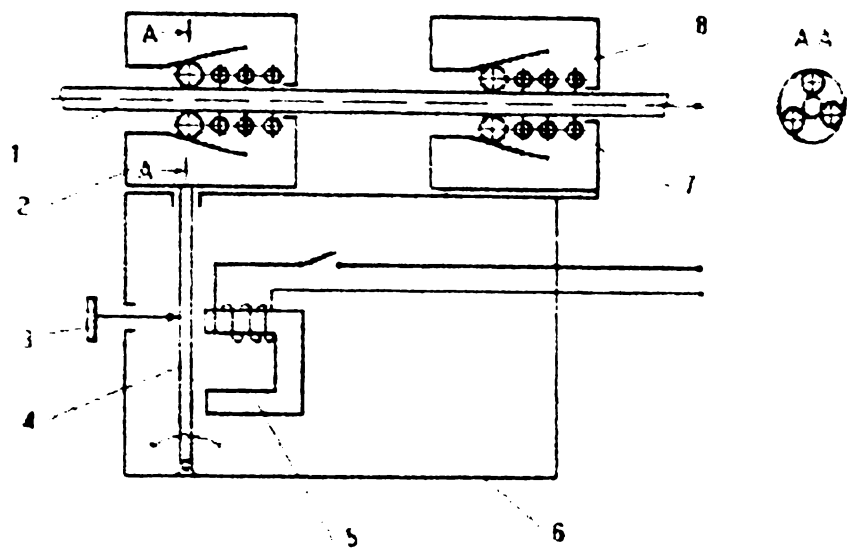


Figura 3.27. Schema de principiu a sistemului de avans prin impulsuri cu vibrator electromagnetic

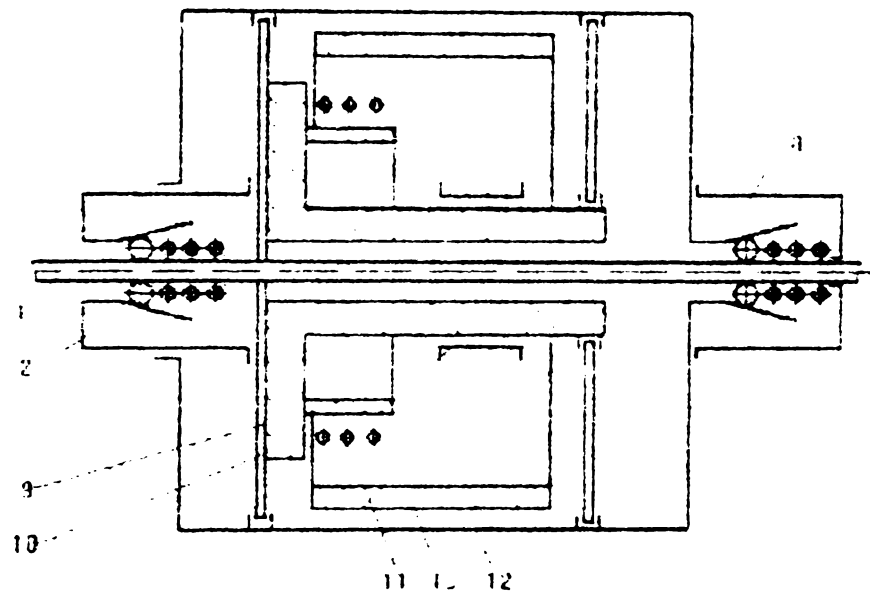


Figura 3.28. Schema de principiu a sistemului de avans prin impulsuri cu excitator electrodinamic

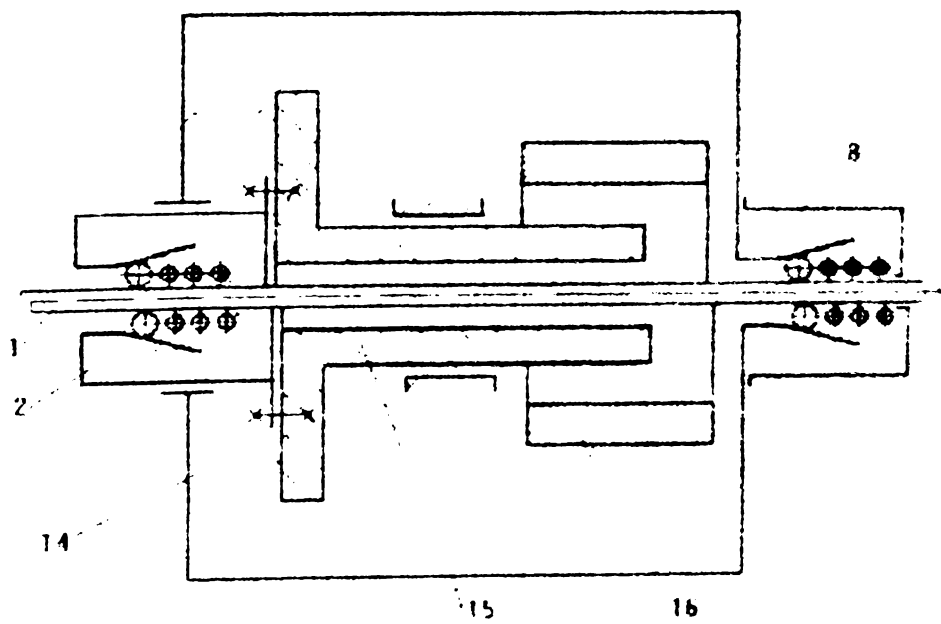


Figura 3.29. Schema de principiu a sistemului de avans prin impulsuri cu electromagnet

În altă variantă constructivă se folosește un electromagnet (16), figura 3.29. Armătura acestuia este un miez central oscilant sub formă de bucșă, pe care se fixează dispozitivul de prindere (2) al sârmei. Resortul (14) asigură revenirea elementelor mobile în poziția inițială. Bobina electromagnetului este alimentată în curent alternativ sau de la o sursă de impulsuri cu frecvență variabilă.

În figura 3.30 se prezintă sistemul de avans prin impulsuri cu electromagnet, care folosește pentru prinderea sârmei electrode dispozitivele cu came (2), respectiv (8).

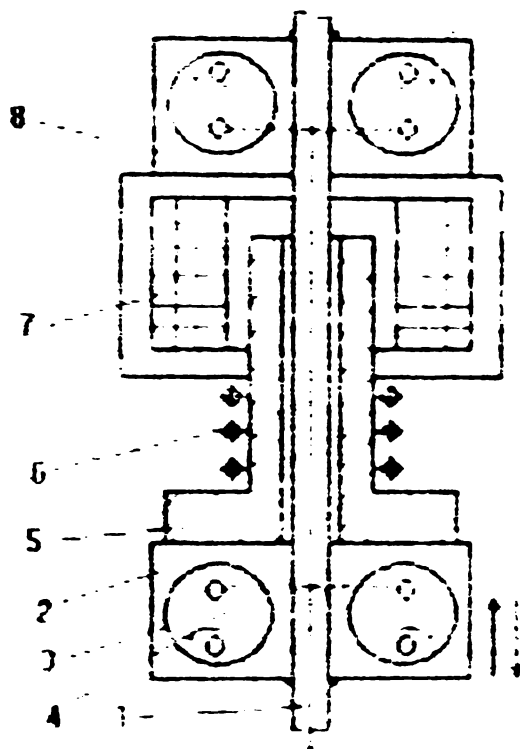


Figura 3.30. Schema de principiu a sistemului de avans prin impulsuri cu came și electromagnet

Când armătura (5) a electromagnetului (7) este atrasă, camele (3) din dispozitivul de prindere mobil (2) eliberează sârma. Datorită aderenței camelor cu sârma, acestea se rotesc puțin încât raza de curbură corespunzătoare punctelor de contact se micșorează. Când bobina electromagnetului (7) nu mai este alimentată, arcu (6) readuce armătura în poziția inițială. Rotirea camelor se face acum în sens invers, razele de curbură se măresc, sârma este blocată și obligată să se deplaseze axial împreună cu dispozitivul (2). Dispozitivul de autoblocare fix (8), identic cu (2), permite trecerea liberă a sârmei în direcția vitezei de avans a acesteia, dar o blochează la tendința de alunecare înapoi spre sistemul de avans. Suprafața de lucru a camelor are un canal sau o creștătură pentru ghidarea sârmei electrod. Variația vitezei de avans poate fi realizată prin modificarea frecvenței impulsurilor, a tensiunii de alimentare a electromagnetului sau prin reglarea întrefierului electromagnetului.

3.2. Proiectarea unor sisteme de avans prin impulsuri ale sârmei electrod

Pornind de la analiza sistemelor de avans prin impulsuri prezentate în literatura de specialitate, pentru studiul acestor sisteme au fost proiectate și realizate la Catedra de sudură din Universitatea "Politehnica" din Timișoara trei sisteme originale de avans prin impulsuri, două din categoria sistemelor de avans prin impulsuri mecanice, respectiv unul electromagnetic.

3.2.1. Sistem de avans prin impulsuri al sârmei electrod cu dispozitiv de prindere cu șaibă.

[20], [43], [72], [75].

Schema de principiu a sistemului de avans este prezentată în figura 3.31.

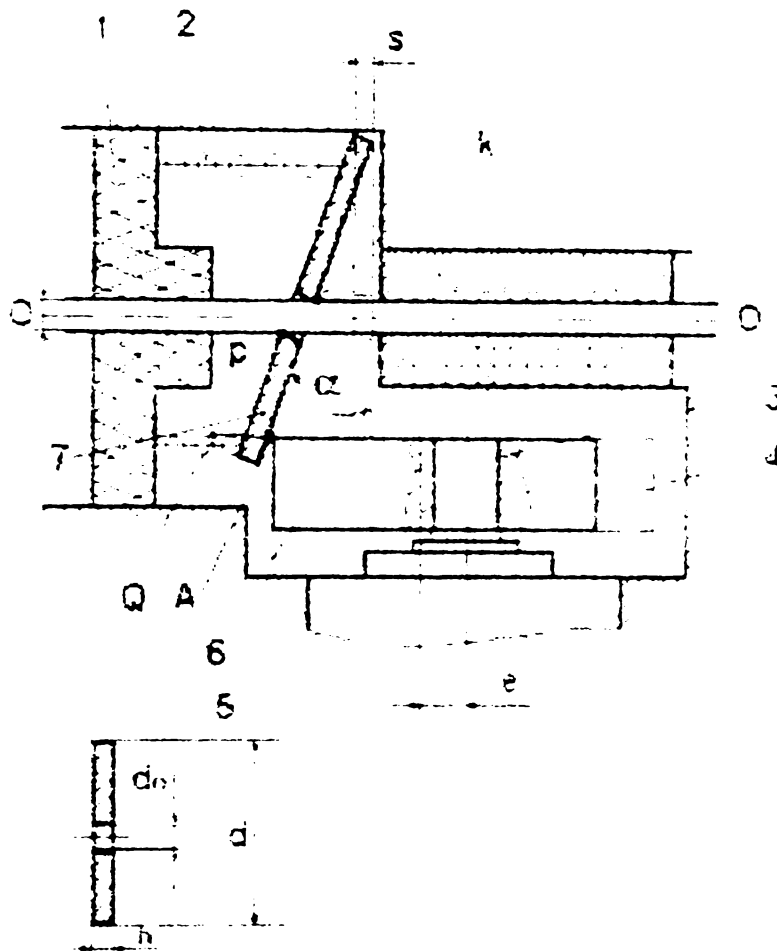


Figura 3.31. Schema de principiu a sistemului de avans prin impulsuri cu dispozitiv de prindere cu șaibă

Sistemul de avans are ca element generator de impulsuri excentricul (4) fixat pe axul (3) al motorului electric (5). Pe excentricul (4) este fixat un rulment (6) care acționează asupra elementului de prindere a sârmei, șaiba (7), imprimându-i o mișcare rectilinie alternativă, învingând rezistența arcului de compresiune (2) amplasat între limitatorul (1) și șaiba (7).

Prin apăsarea muchiei rulmentului pe șaibă (contact în punctul A), aceasta este obligată să efectueze deplasări liniare alternative cu amplitudinea egală cu $2e$ (e - excentricitatea) și se rotește în raport cu axa 0 - 0 cu un unghi oarecare α . Prin rotirea cu unghiul α , șaiba prinde sârma (se încastrează) în punctele K și P și o obligă să se deplaseze cu un pas egal cu $2e$. Încadrarea muchiilor șaibei în sârmă se realizează prin intermediul arcului de compresiune (2).

Reglarea vitezei de avans a sârmei se poate realiza prin modificarea turației motorului de antrenare a șaibei, respectiv prin modificarea pasului de avans (prin modificarea excentricității). Pentru calculul vitezei de avans a sârmei electrod se folosește relația:

$$V_{as} = \frac{2 \cdot n \cdot e \cdot 60 \cdot k}{1000} \quad [\text{m/h}] \quad (3.1)$$

unde:

- n - turația motorului, (rot/min);
- e - excentricitatea rulmentului (mm);
- K - coeficient de încadrare a șaibei în sârmă.

Elementul sensibil al sistemului este șaiba de prindere (apucare) a sârmei electrod care, în timp, se uzează în punctele de încastrare a muchiilor în sârmă, ceea ce conduce la pericolul patinării sârmei electrod însoțită de modificarea pasului de avans (amplitudinea impulsului) și implicit de modificarea vitezei de avans a sârmei. Totuși, datorită faptului că sub acțiunea forțelor de frecare care au loc în punctul de contact dintre șaibă și elementul de rotație, șaiba este antrenată și într-o mișcare de rotație care face ca contactul dintre muchiile acesteia și sârma electrod să se modifice continuu în timpul funcționării. Are loc astfel, o uzură uniformă a conturului muchiilor găurii șaibei și totodată creșterea durabilității șaibei. Dimensiunile șaibei depind de diametrul sârmei și orientativ pot lua următoarele valori:

- ✓ $d = 6 \div 20 \text{ mm}$;
- ✓ $d_o = (1,1 \div 1,2) d_s$;
- ✓ $h = (0,6 \div 1,1) d_s$.

Astfel conceput, sistemul de avans prin impulsuri nu realizează practic avansul sârmei deoarece la cursa de mers în gol (cursa de revenire), sub efectul inerției sistemului și a frecărilor din tubul de ghidare, sârma electrod revine în poziția inițială realizând o mișcare de dute-vino. Pentru preîntâmpinarea revenirii sârmei în poziția inițială la cursa de mers în gol, s-a realizat un dispozitiv de blocare a sârmei identic cu cel de antrenare. Sistemul de avans funcțional este prezentat în figura 2.32.

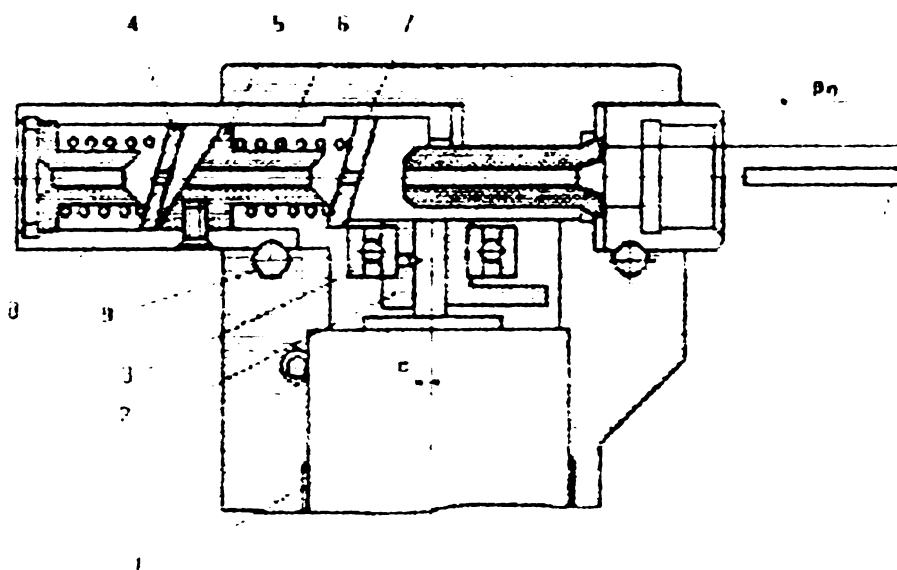


Figura 3.32. Sistemul de avans prin impulsuri a sârmei electrod cu șaibe

Sub acțiunea arcului de compresiune (10), șaiba (4) se înclină cu un anumit unghi, așezându-se pe suprafața frontală a limitatorului (5), și prin intermediul muchiilor ascuțite ale găurii prin care trece sârma realizează blocarea acesteia. Forța realizată de arcul de compresiune (10) este relativ scăzută. În timpul cursei active când sârma electrod avansează cu un pas, ca urmare a antrenării acesteia de către sistemul generator de impulsuri creat de rulmentul cu excentric (3) și șaiba de prindere (7), sub acțiunea forțelor de frecare dintre sârma electrod și șaiba (4), aceasta va pivota învingând forța de reacțiune a arcului (10) ocupând o poziție normală (perpendiculară pe axa sârmei), ceea ce permite sârmei să treacă prin gaura centrală a șaibei și să avanseze cu un pas [șaiba (4) alunecă pe sârmă]. La cursa revenire (cursa de mers în gol) sub acțiunea arcului (8), șaiba (4) revine în poziția inițială înclinată (așezându-se pe suprafața limitatorului) și blochează prin intermediul muchiilor găurii revenirea sârmei în poziția inițială, în această fază a mișcării. Fenomenul se repetă periodic funcție de frecvența rotației motorului, rezultând în final mișcarea de avans prin impulsuri a sârmei electrod.

Având în vedere faptul că șaibele au o durabilitate limitată, după un anumit timp impunându-se înlocuirea lor, sistemul de avans a fost astfel conceput ca înlocuirea să se facă ușor. În acest sens ansamblul dispozitivelor de avans și de blocare a sârmei electrod sunt montate într-un "cartuș" cilindric interschimbabil care se înlocuiește foarte rapid prin intermediul unui sistem de fixare cu excentric.

Pentru lărgirea gamei parametrilor de impuls (amplitudine și frecvență), având în vedere că pentru antrenare se folosește un motor de curent continuu de tip MRF cu turația de 5000 rot/min. s-au realizat elemente de acționare a șabei sub formă de camă cu două și trei profile active, figura 3.33.

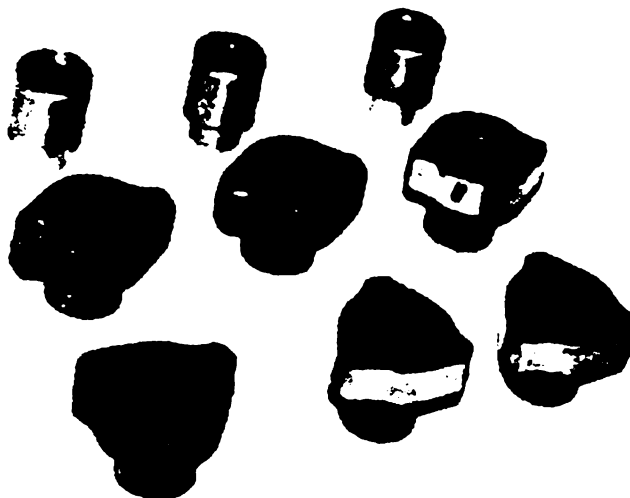


Figura 3.33. Forme constructive de came pentru acționarea șabei
Aspectul sistemului de avans realizat este prezentat în figura 3.34.

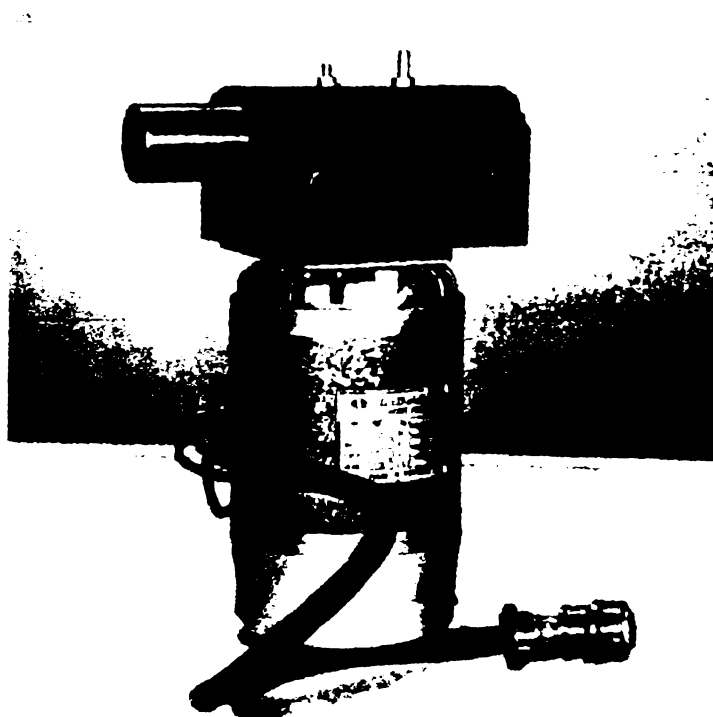


Figura 3.34. Aspectul sistemului de avans prin impulsuri cu dispozitiv de prindere cu șabă

Caracteristicile tehnico-funcționale principale ale sistemului de avans sunt:

- acționare: motor de curent continuu cu excitație separată de tip MRF (Fronius);
- $P=120$ W; $n = 200 - 5000$ rot/min;
- limitele de reglare pentru v_{as} : $1,8 \div 26$ m/min;
- diametrul sârmei electrod: $0,8 - 1,0 - 1,2 - 1,6 - 2,0$ mm;
- pasul (amplitudinea) impulsului: $1 - 1,5 - 2,0 - 2,5 - 3,0$ mm;
- limitele de reglare a frecvenței: $5 \div 240$ Hz;
- dimensiuni de gabarit: $230 \times 120 \times 156$ mm;
- greutate: $2,4$ kg ($4,4$ kg cu motor).

3.2.2. Sistem de avans prin impulsuri al sârmei electrod cu dispozitiv de prindere cu bile, [71], [72].

Schema de principiu a sistemului este prezentată în figura 3.35.

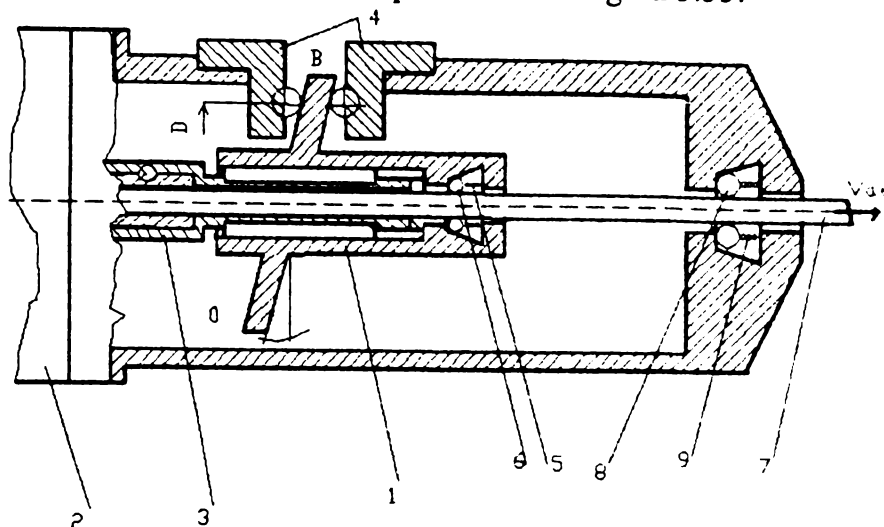


Figura 3.35. Schema de principiu a sistemului de avans prin impulsuri al sârmei electrod cu dispozitiv de prindere cu role

Elementul care generează impulsurile este butucul (1) prevăzut cu o flanșă cu suprafața frontală înclinată cu un unghi α , piesă care execută simultan o mișcare de rotație și una de translație rectilinie alternativă, de dute-vino. Mișcarea de rotație se transmite de la axul motorului electric (2) prin intermediul asamblării cu pană dintre piesa de legătură (3) și generatorul de impulsuri (1). Ca urmare a constrângerii impuse mișcării de rotație a flanșei de către sistemul cu bile (4), elementul (1) este obligat să execute o mișcare de translație (mai exact o oscilație) de-a lungul asamblării cu pene, la fiecare rotație a elementului. Oscilația se transmite dispozitivului de prindere (apucare) cu bile (6) care într-o primă fază, ca urmare a compresiunii arcului (5) și a conicității din piesa (6), produce o împănare a bilelor pe sârma electrod (7) și totodată deplasarea acesteia cu un pas egal cu amplitudinea oscilației. În faza a doua, după rotirea cu 180° a flanșei, urmează cursa de revenire în poziția inițială a elementului (1) (cursa de mers în gol) când forța de compresiune a arcului (5) începe să scadă, revenind la valoarea inițială, slăbind strângerea sârmei. În această fază apare tendința de deplasare înapoi a sârmei electrod. Acest lucru este împiedicat însă de către sistemul de blocare, tot cu bile, (8) care prin intermediul arcului (9) produce împănarea sârmei, blocând revenirea acesteia în poziția inițială. Prin rotirea în continuare a elementului (1) fenomenul se repetă, realizându-se avansul prin impulsuri a sârmei electrod. Frecvența impulsurilor depinde de turația motorului de antrenare (2), iar amplitudinea acestora depinde de unghiul de înclinare al flanșei " α " și de diametrul de contact " D " dintre flanșă și bilele sistemului (4).

În figura 3.36 se prezintă traiectoria desfășurată descrisă de punctul de contact P, dintre flanșă și bilele sistemului de ghidare (4), la o rotație completă a elementului (1).

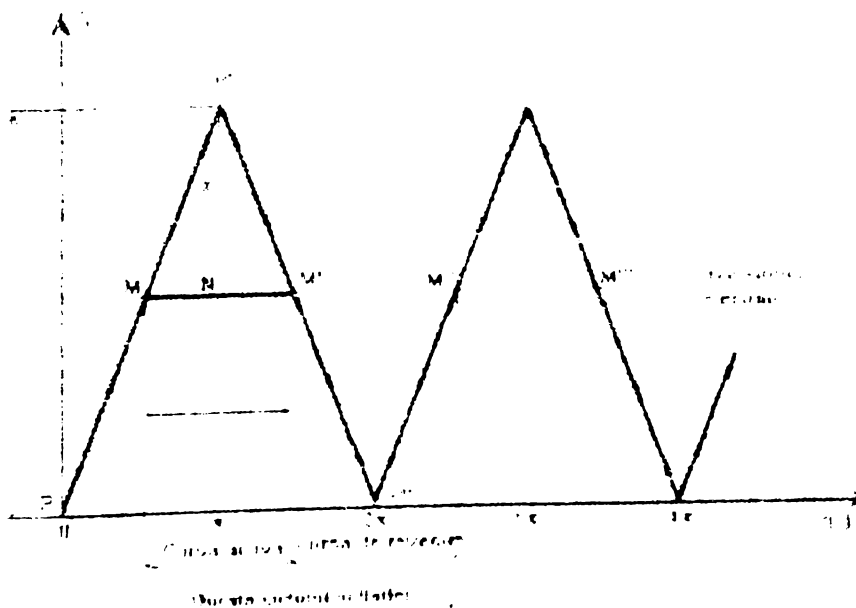


Figura 3.36. Traiectoria desfășurată descrisă de punctul de contact al flanșei cu sistemul de ghidare

Se disting cele două faze ale oscilației, cursa activă (de avans al sârmei cu pasul "p") și cursa de revenire în poziția inițială (de mers în gol). La o rotație cu 180° a flanșei, punctul M aflat pe axa acesteia, care poate fi asimilat cu punctul de contact dintre flanșă și sârma electrod, se deplasează în poziția M'. Spațiul parcurs MM' coincide cu pasul corespunzător avansului sârmei electrod "p".

Pentru un anumit unghi de înclinare al flanșei α și un diametru de contact "D" dat, se poate calcula pasul de avans al sârmei electrod (amplitudinea impulsului) din triunghiul MPN:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\frac{p}{2}}{\frac{D}{2}} = \frac{p}{D} \quad (3.2)$$

de unde rezultă pasul de avans "p":

$$p = D \cdot \operatorname{tg} \alpha \quad (3.3)$$

Având turația motorului "n" și pasul de avans "p" se poate calcula viteza de avans a sârmei v_{as} :

$$v_{as} = n \cdot p = n \cdot D \cdot \operatorname{tg} \alpha \quad (3.4)$$

Viteza de avans dată de relația de mai sus este o viteză teoretică a sârmei electrod. În realitate însă, datorită fenomenelor de alunecare în dispozitivele de prindere și blocare a sârmei precum și a deformațiilor elastice la contactul dintre sârmă și bile, viteza de avans este mai mică. Se poate scrie că:

$$v_{as} = K \cdot n \cdot D \cdot \operatorname{tg} \alpha \quad (3.5)$$

unde:

K - coeficient de alunecare; subunitar, ia valori cuprinse în intervalul $0.8 \div 0.95$.

În figura 3.37 se prezintă în secțiune sistemul de avans în impulsuri proiectat, având la bază schema de principiu prezentată mai sus.



Figura 3.37. Secțiune prin sistemul de avans prin impulsuri cu dispozitiv de prindere cu bile

Părțile principale ale mecanismului sunt: motorul de antrenare (1), corpul dispozitivului (2), generatorul de impulsuri (13), flanșa interschimbabilă (15), dispozitivul de prindere cu bile a sârmei electrod (5), dispozitivul de blocare cu șaibă a sârmei (18), capul de sudare (19).

Principalele caracteristici tehnico-funcționale ale sistemului de avans sunt:

- acționarea: motor de curent continuu cu excitație separată tip MRF cu rotorul găurit;
- $P = 120 \text{ W}$; $n = 5000 \text{ rot/min}$;
- limitele de reglare a vitezei de avans a sârmei electrod: $1,8 \div 15 \text{ m/min}$;
- diametrul sârmei electrod: $0,8 \div 1,0 \div 1,2 \div 1,6 \div 2,0 \text{ mm}$;
- pasul de avans a sârmei: $1,0 \div 3,0 \text{ mm}$, reglabil continuu;
- limitele de reglare a frecvenței impulsurilor: $5 \div 85 \text{ Hz}$;
- posibilități de reglare a vitezei de avans a sârmei electrod:
 - ✓ *în trepte*: prin modificarea unghiului de înclinare a flanșei și deci a pasului (amplitudinii) impulsului ($\alpha = 2^\circ; 4^\circ; 6^\circ$);
 - ✓ *continuu*: prin modificarea turației motorului de acționare;
 - ✓ *continuu*: prin reglarea diametrului de contact a flanșei cu bilele sistemului de ghidare și deci prin modificarea pasului (amplitudinii) impulsului, $D = 30 \div 60 \text{ mm}$;
- dimensiuni de gabarit : $100 \times 400 \text{ mm}$;
- greutatea : $8,5 \text{ kg}$;

Față de sistemul de avans prin impulsuri cu dispozitiv de prindere cu șaibă, sistemul prezentat prezintă o serie de avantaje precum:

- siguranță mai mare în exploatare;
- durabilitate ridicată;
- deformații minime ale sârmei electrod, evitarea degradării suprafeței prin eliminarea striatiunilor de pe sârmă și evitarea răzuirii stratului de cuprare;
- abateri mai mici ale vitezei de avans față de valoarea teoretică;
- posibilități largi și comode de reglare, într-o plajă mare, a frecvenței și amplitudinii impulsurilor pentru realizarea vitezei de avans dorite.

În figura 3.38 se prezintă o vedere de ansamblu a sistemului de avans prin impulsuri realizat.



Figura 3.38. Aspectul sistemului de avans prin impulsuri cu dispozitiv de prindere cu bile

Experimentările efectuate pentru studiul modificării pasului de avans în funcție de mărimea forței de rezistență la avansul sârmei electrod, modelate prin răsucirea sârmei pe un canal de ghidare elicoidal, efectuate pentru sârme din oțel, respectiv din aluminiu, sunt prezentate în figura 3.39.

Abaterea pasului de avans s-a calculat cu relația :

$$\Delta p = \frac{v}{3600 f_p} - \frac{l}{f_p \cdot t} \text{ [m]} \quad (3.6)$$

S-a demonstrat că la frecvențe mici ale impulsurilor pentru avansul sârmei sub 10Hz, pentru pasul de avans de 1,5 mm și lungimea tubului flexibil de ghidare de 3m eroarea măsurată a pasului de avans, a sârmei electrod cu diametrul de 1,2 mm, corespunde practic cu cea calculată.

La creșterea frecvenței viteza de avans reală a sârmei electrod se deosebește de viteza teoretică, dată de relația:

$$v = 3600 \cdot p \cdot f_p \text{ [m/h]} \quad (3.7)$$

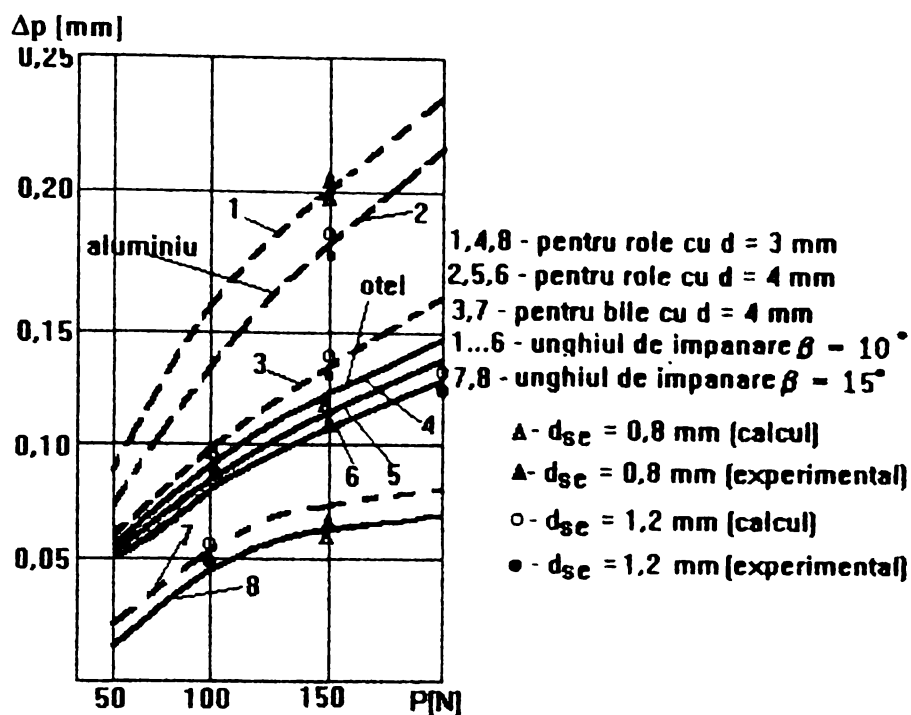


Figura 3.39. Abaterea pasului de avans al sârmei electrod

Prin urmare la frecvențe ridicate eroarea pasului de avans reală se deosebește de cea calculată teoretic. Probabil cauza este determinată de fenomenele dinamice datorate deformațiilor elastice ale sârmei electrod în tubul de ghidare. Acest lucru trebuie luat în considerare la alegerea tipului de sistem de avans prin impulsuri a sârmei electrod și la proiectarea acestuia pentru obținerea unui impuls de avans cât mai apropiat de valoarea prescrisă.

Rezultă că pentru reducerea abaterii (erorii) pasului de avans al sârmei electrod, funcție de forța de rezistență la împingerea prin tubul de ghidare, trebuie să se dispună de un sistem de prindere pentru cursa de avans a sârmei (cursa activă) și un sistem de blocare a acesteia pentru cursa de revenire (cursa pasivă sau de mers în gol) a sistemului.

3.2.3. Sistem de avans prin impulsuri al sârmei electrod electromecanic cu electromagneți. [72]

Schema de principiu a sistemului este prezentată în figura 3.40.

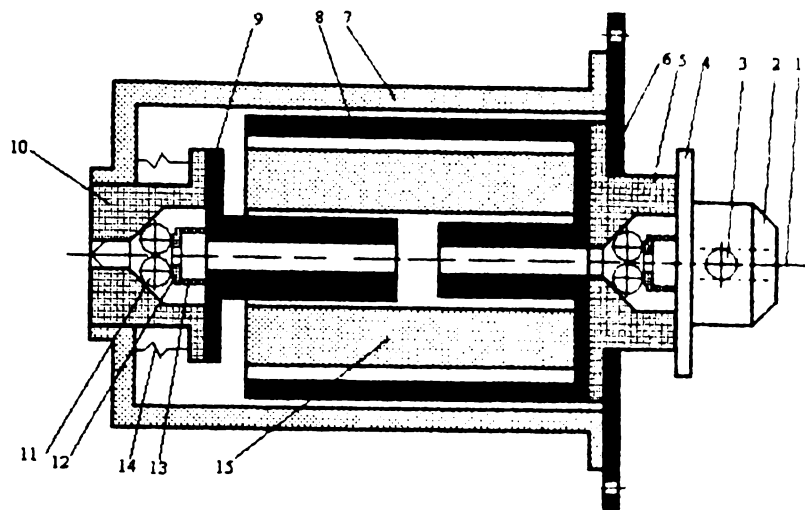


Figura 3.40. Schema de principiu a sistemului de avans prin impulsuri al sârmei electrod electromecanic cu electromagneți

Electromagnetul este de construcție specială, cu dispozitiv de comutație rapidă. La alimentarea bobinei (15) a electromagnetului toroidal (8), armătura mobilă sub formă de bucă este atrasă în interiorul acesteia. De armătură este fixat dispozitivul de prindere (10) al sârmei care se deplasează odată cu acesta, producând avansul sârmei cu un pas. La întreruperea alimentării bobinei, armătura împreună cu dispozitivul de prindere revin în poziția inițială sub acțiunea resorturilor (14). Dispozitivul de blocare (3) identic cu dispozitivul (10) împiedică retragerea sârmei la cursa de mers în gol. Sistemul mai conține capul de sudare (4) și piesa de fixare (6). Viteza de avans a sârmei se calculează cu relația:

$$v_{as} = \frac{K \cdot f \cdot p \cdot 60}{1000} \quad [\text{m/h}] \quad (3.8)$$

unde:

- f - frecvența tensiunii de alimentare a electromagnetului;
- p - pasul (amplitudinea) impulsului;
- K - coeficient de alunecare.

3.4.3.2. Proiectarea electromagnetului

Electromagnetul este un corp feromagnetic, magnetizat sub acțiunea unui curent electric.

Construcția unui electromagnet este determinată de valoarea forței electromagnetice impuse, de dimensiunile circuitului magnetic, a întrefierului, de condițiile de încălzire și răcire ale bobinei și de modul de înfășurare a acesteia, de asigurarea criteriilor de optimizare la construcție și exploatare, etc..

Forma constructivă a electromagnetului este strâns corelată cu destinația acestuia, felul acționării, mărimea forței, locul de amplasare al forței, etc.. Pornind de la rolul lui în ansamblul echipamentului de sudare, respectiv al sistemului de avans prin impulsuri al sârmei electrod la alegerea electromagnetului stau la bază următoarele criterii:

- modul de lucru: de tip reținere;
- forma constructivă: de tip plonjor;
- natura curentului: de curent continuu;
- viteza de acționare: de tip întârziat cu amortizarea vitezei pe ultima porțiune a cursei.
- durata relativă de acționare DA: în funcție de destinație și rol funcțional;

Electromagnetul de tip plonjor ales pentru acționarea sistemului de avans prin impulsuri al sârmei electrod se caracterizează prin:

- ✓ cursă relativ mare;
- ✓ forță redusă dar practic constantă pe toată lungimea cursei;
- ✓ viteză de acționare redusă.

Forma constructivă (schița) electromagnetului de tip plonjor se prezintă în figura 3.41.

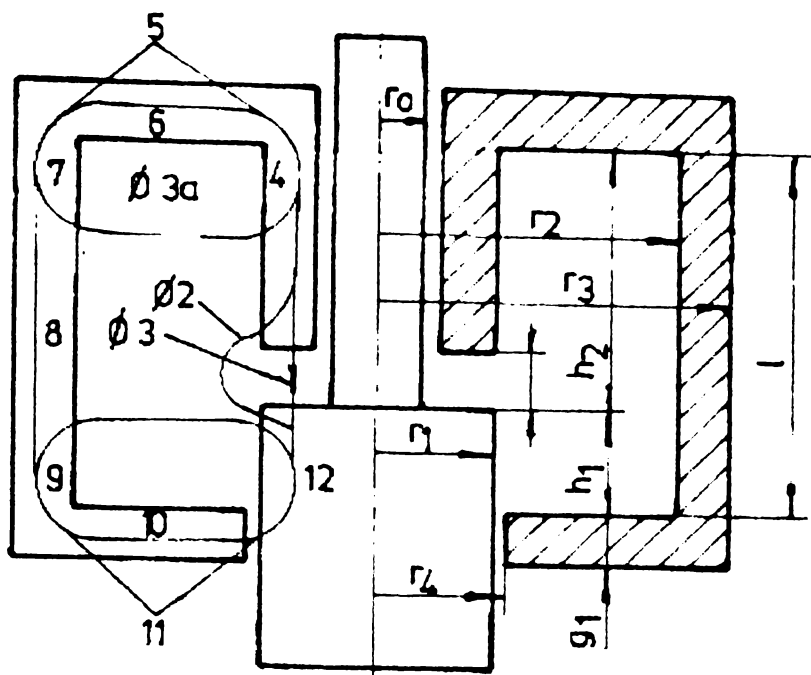


Figura 3.41. Forma constructivă a plonjorului

a). Date de calcul la proiectarea electromagnetului, [2], [60]:

- Tensiunea de alimentare: $U_{2n} = 24 \text{ V}$;
- Curentul prin bobină: $I_2 = 0,5 \text{ A}$;
- Puterea EM: $P_{\max} = 12 \text{ W}$;
- Forța minimă de acționare: F_{\min} (la întrefier maxim) = 10 N;
- Forța maximă de acționare: F_{\max} (la întrefier minim) = 20 N;
- Cursa maximă (pasul): $p = 3 \text{ mm}$;
- Întrefier maxim: $\delta_{\max} = 3,5 \text{ mm}$;
- Întrefier minim: $\delta_{\min} = 0,5 \text{ mm}$;
- Durata relativă de conectare: $D_e = 0,01$;
- Temperatura mediului ambiant: $\theta_0 = 10 - 40^\circ$;
- Supratemperatura medie a bobinei: $\theta = 40^\circ$.

b). Relații uzuale de calcul:

- Forța electromagnetului:

$$F = \frac{B^2 \cdot A}{2\mu_0} = \frac{\phi^2}{2\mu_0 A} \quad (3.9)$$

- Supratemperatura medie a bobinei:

$$\theta = \frac{\delta \cdot D_e}{2\alpha \cdot f} \left(\frac{N \cdot I}{l} \right)^2 \quad (3.10)$$

- Legea circuitului magnetic pentru întrefier maxim:

$$N \cdot I = \frac{B \cdot \delta}{\mu_0} + H_{je} \cdot l_{je} \quad (3.11)$$

- Tensiunea de alimentare a bobinei:

$$U = R \cdot I = \frac{4 \cdot \rho \cdot L_m \cdot N \cdot I}{\pi \cdot d^2} \quad (3.12)$$

- Constanta electromagnetului (caracterizează secțiunea miezului):

$$C_e = \frac{\sqrt{F}}{\delta} \quad (3.13)$$

- Determinarea inducției magnetice (din nomograme):

$$B = f(C_e) \text{ [T]} \quad (3.14)$$

c). Etape de calcul:

1. Constanta electromagnetului:

$$C_e = \frac{\sqrt{F_{\min}}}{\delta_{\max}} = \frac{\sqrt{10}}{3 \cdot 10^{-3}} = 1054$$

2. Inducția magnetică în întrefier:

$$B_0 = 0,483 \text{ (T)}$$

3. Raza plonjorului (din relația de calcul a forței):

$$r_1^2 = \frac{2\mu_0 F}{\pi B^2} + r_0^2 = \frac{2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 20}{\pi \cdot 0,483^2} + 0,004 = 7,4 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$$

$$r_1 = 0,0086 \text{ mm} \cong 8 \text{ mm}$$

4. Solenația necesară:

$$H_\delta \cdot \delta = 0,3 \cdot N \cdot I = 0,3 \cdot 6037,5 = 576 \text{ Asp}$$

$$N \cdot I = \frac{B \cdot \delta_{\max}}{0,7 \cdot \mu_0} = \frac{0,483 \cdot 3,5 \cdot 10^{-3}}{0,7 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}} = 1922 \text{ Asp}$$

5. Lungimea (bobinei) ferestrei:

$$l = \sqrt{\frac{\delta \cdot D_e (NI)^2}{2\alpha \cdot f \cdot \theta}} = \sqrt{\frac{3,5 \cdot 0,01 \cdot 10^{-3} (576)^2}{2 \cdot 6 \cdot 0,6 \cdot 40}} = 0,06 \text{ m}$$

$$l = 60 \text{ mm}$$

$$\text{In calculul } s-a \text{ utilizat } \frac{l}{r_2 - r_1} = 5; \alpha = 6; f = 0,6; \theta = 40^\circ;$$

6. Raza armăturii fixe r_2 :

$$r_2 = \frac{l}{5} + r_1 = \frac{60}{5} + 8 = 20 \text{ mm}$$

7. Raza armăturii fixe r_3 (se deduce din egalitatea aproximativă a secțiunilor):

$$\pi \cdot (r_1^2 - r_0^2) = k_a \cdot \pi \cdot (r_3^2 - r_2^2) \text{ rezulta:}$$

$$r_3 = \sqrt{\frac{r_1^2 - r_0^2}{k_a} + r_2^2} = \sqrt{\frac{64 - 16}{0,2} + 400} = 25 \text{ mm}$$

$$\text{unde: } k_a = 0,2 \text{ - coeficient de transfer a caldurii}$$

8. Diametrul conductorului (spirei):

$$d = \sqrt{\frac{4\rho(r_1 + r_2)NI}{U}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 17,5 \cdot 10^{-9} \cdot 28 \cdot 10^{-3} \cdot 2800 \cdot 0,5}{24}} = 0,34 \text{ mm}$$

$$s-a \text{ luat: } L_m = \frac{2\pi(r_1 + r_2)}{2}$$

9. Alegerea diametrului standardizat al conductorului:

- diametrul conductorului neizolat: $d_{Cu} = 0,4 \text{ mm}$;

- diametrul conductorului izolat: $d_{STAS} = 0,42 \text{ mm}$;

10. Numărul de spire al bobinei:

$$N = \frac{4f(r_2 - r_1)l}{\pi d^2} = \frac{4 \cdot 0,6 \cdot 12 \cdot 10^{-3} \cdot 60 \cdot 10^{-1}}{\pi \cdot (0,42 \cdot 10^{-3})^2} = 3240 \text{ spire}$$

$$\text{unde } f = 0,6$$

11. Rezistența electrică a bobinei:

$$R = \rho \frac{4(r_1 + r_2)N}{d^2} = \frac{4 \cdot 28 \cdot 10^{-3} \cdot 3240 \cdot 17,5 \cdot 10^{-9}}{(0,42 \cdot 10^{-3})^2} = 43,8 \Omega$$

12. Valoarea curentului prin bobină:

$$I_2 = \frac{U}{R} = \frac{24}{43,8} = 0,55 \text{ A}$$

13. Densitatea curentului prin bobină pe durata de conectare:

$$J = \frac{4I}{\pi d^2} = \frac{4 \cdot 0,55}{\pi \cdot (0,42 \cdot 10^{-3})^2} = 3,9 \text{ A/m}^2$$

d). Dimensionarea electromagnetului.

Pe baza rezultatelor de calcul obținute rezultă următoarele dimensiuni și caracteristici ale electromagnetului:

- ✓ diametrul miezului mobil: $d_0 = 2 \cdot r_0 = 2 \cdot 4 = 8 \text{ mm}$;
- ✓ diametrul exterior al carcusei EM: $d_3 = 2 \cdot r_3 = 2 \cdot 25 = 50 \text{ mm}$;
- ✓ diametrul interior de înfășurare a bobinei de excitație: $d_1 = 2 \cdot r_1 = 2 \cdot 8 = 16 \text{ mm}$;
- ✓ diametrul exterior al bobinei: $2 \cdot r_2 = 2 \cdot 20 = 40 \text{ mm}$;
- ✓ diametrul conductorului (standardizat):
- ✓ fără izolație: $d_{Cu} = 0,40 \text{ mm}$;
- ✓ cu izolație: $d = 0,42 \text{ mm}$;
- ✓ numărul total de spire: $n_{sp} = 3240$ spire;
- ✓ diametrul mediu al primei înfășurări: $d_m = d_1 + 2d/2 = 16 + 0,42 = 16,42 \text{ mm}$;
- ✓ numărul de spire pe prima înfășurare: $n_{sp} = l/d = 60/0,42 = 142$ spire;
- ✓ numărul de straturi: $n_{st} = N/n_{sp} = 3240/142 = 22$ straturi;
- ✓ dispunerea spirelor pe straturi:
 - 142 spire pe straturile 1; 3; 5; 7; 9; 11; 13; 15; 17; 19; 21;
 - 141 spire pe straturile: 2; 4; 6; 8; 10; 12; 14; 16; 18; 20; 22.
- ✓ lungimea ferestrei EM: $l = 60 \text{ mm}$;
- ✓ înălțimea ferestrei EM: $h = 12 \text{ mm}$;
- ✓ lungimea opritorului: $l_{opr.} = l/2 - \delta_{min}/2 = 60/2 - 0,5/2 = 29,75 \text{ mm}$;

Obs. Pentru a asigura un randament maxim al EM în construcția acestuia se utilizează un opritor (miez) care are rolul de a asigura închiderea fluxului magnetic; lungimea acestuia se ia astfel încât să fie plasat la mijlocul lungimii bobinei de excitație, unde intensitatea câmpului magnetic este maximă.

- ✓ lungimea de pătrundere a plonjorului în bobina de excitație: $l_{pp} = l - l_{opr.} - \delta_{max.} = 27 \text{ mm}$.
- ✓ lungimea plonjorului: $l_p = l_{pp} + (\delta_{max.} - \delta_{min.}) = 27 + (3,5 - 0,5) = 30 \text{ mm}$.

e). Verificarea forței în întrefier:

$$F_{min} = \frac{1}{2\mu_0} B_0^2 \cdot \delta_{max} = \frac{1}{2 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot (0,478)^2 \cdot 3,5 \cdot 10^{-3} = 9,88 \text{ N}$$

$$F_{max} = \frac{1}{\mu_0} B_0^2 \cdot \delta_{min} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot (0,478)^2 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} = 19,84 \text{ N}$$

Obs. Pentru realizarea corpului electromagnetului și a plonjorului s-a folosit oțelul OL 50, iar pentru reducerea forțelor de frecare la deplasarea plonjorului s-au folosit lagăre (bucse) din teflon.

3.4.3.3. Alimentarea electromagnetului

Pentru alimentarea electromagnetului se folosește o sursă de tensiune fixă, cu frecvența reglabilă, calculată să funcționeze într-un regim dinamic puternic.

Elementul principal de comandă îl reprezintă circuitul integrat temporizator de putere TBA

315.

Caracteristici tehnice:

- tensiunea de alimentare: $U_1 = 230 \text{ V C.A.}$;
- puterea absorbită de la rețea: $P = 12 \text{ W}$;
- tensiunea de ieșire: $U_{ie} = 24 \text{ V C.C.}$;
- curentul de ieșire: $I_{ie} = 0,8 \text{ A}$;
- frecvența de ieșire: $20 - 80 \text{ Hz}$.

Schema bloc a circuitului de alimentare a electromagnetului cuprinde următoarele etaje.

figura 3.42:

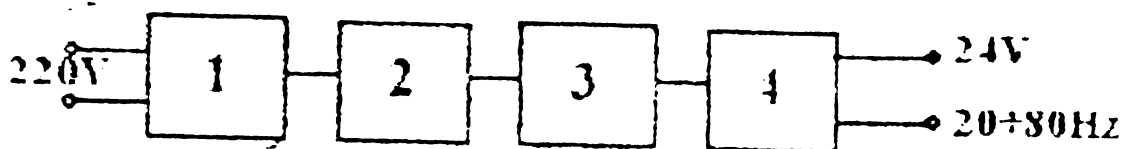


Figura 3.42. Schema bloc a circuitului de alimentare a electromagnetului

1. Etajul coborâtor de tensiune: asigură coborârea tensiunii de alimentare de 220V c.a., într-o tensiune de 17 V c.a. necesară alimentării etajelor ulterioare;
2. Etajul redresor: redresează tensiunea dată de etajul coborâtor;
3. Etajul de filtrare: filtrează tensiunea pulsatorie dată de etajul redresor, obținându-se o tensiune continuă pentru alimentarea etajului 4;
4. Etajul de comandă: realizează o comandă în impulsuri dreptunghiulare a electromagnetului, asigurând totodată și posibilitatea reglării frecvenței tensiunii de ieșire.

Schema electrică a circuitului de alimentare este prezentată în figura 3.43.

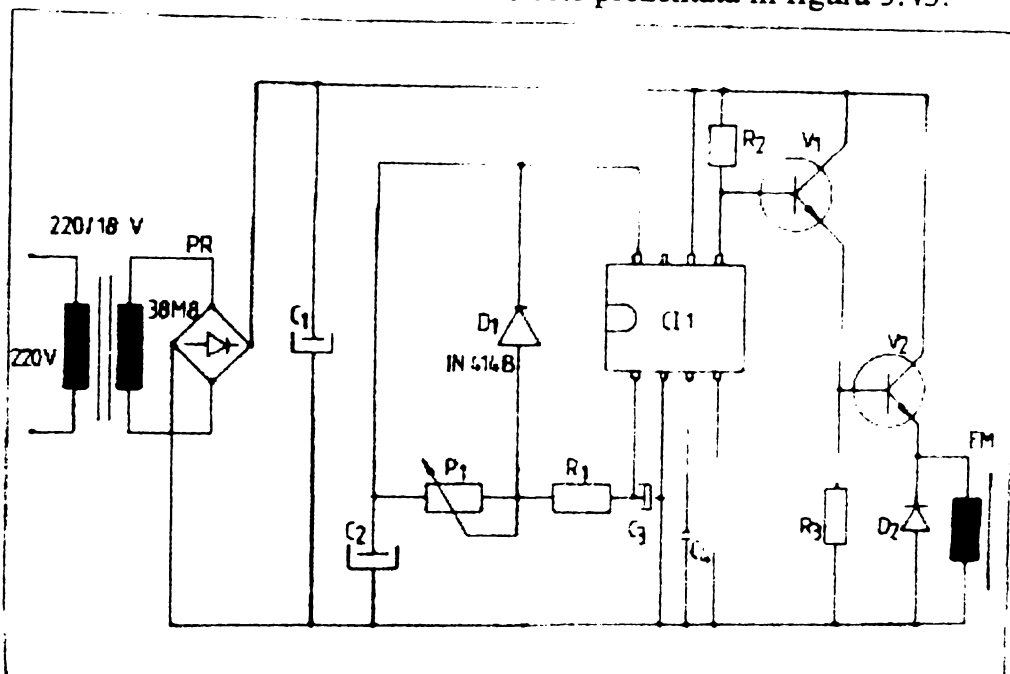


Figura 3.43. Schema electrică a circuitului de alimentare a electromagnetului

Elementul de comandă principal îl reprezintă circuitul integrat temporizator de putere TBA 315 care face parte din familia oscilatoarelor de relaxare, oferind la ieșire impulsuri dreptunghiulare. Frecvența de oscilație este determinată de un grup RC exterior circuitului integrat. Circuitul integrat TBA 315 este proiectat să funcționeze la tensiuni de alimentare tipice de 12 V sau 24 V, în funcție de schema de aplicație. Curentul continuu în sarcină este de maxim 200 mA, etajul de ieșire fiind de tipul cu colector în gol. În circuit este inclusă și o diodă de protecție necesară în aplicațiile în care sarcina este inductivă (de exemplu bobina unui relee). Declanșarea sau blocarea oscilațiilor se realizează printr-o comandă pe terminalul CONTROL. Pentru mărirea capacității de curent, ieșirea circuitului integrat comandă un etaj Darlington format din tranzistoarele V_1 și V_2 . Dioda D_2 are rolul de a proteja circuitul electric de tensiunea electromagnetică inversă introdusă de electromagnet conform legii lui Lenz.

În figura 3.44 este prezentată schema unui generator de impulsuri dreptunghiulare cu timp de conducție variabil. Descărcarea condensatorului C se face prin rezistențele R_1 , R_2 și tranzistorul Q_{18} din interiorul circuitului integrat, dioda D_1 fiind blocată. Timpul de descărcare al condensatorului se poate regla prin intermediul rezistenței variabile R_2 . Încărcarea condensatorului se face prin R_1 și D_1 . Rezultă că timpul de încărcare este determinat practic de valorile lui C și R_1 .

Frecvența de oscilație se calculează cu relația aproximativă:

$$f = \frac{800}{R \cdot C} \quad (3.15)$$



Figura 3.44. Schema generatorului de impulsuri dreptunghiulare

Se calculează frecvența maximă, respectiv minimă corespunzătoare valorilor elementelor din schema electrică:

➤ Frecvența maximă:

$$C = 1 \mu\text{F};$$

$$R_1 = 10 \text{ k}\Omega;$$

$$P(R_2) = 0.$$

$$f_{\max} = \frac{800}{1 \cdot 10} = 80 \text{ Hz}$$

$$R_e = R_1 + P = 10 \text{ k}\Omega;$$

➤ Frecvența minimă:

$$C = 1 \mu\text{F};$$

$$R_1 = 10 \text{ k}\Omega;$$

$$P(R_2) = 33 \text{ k}\Omega;$$

$$f_{\max} = \frac{800}{1 \cdot 43} = 18,6 \text{ Hz}$$

$$R_e = R_1 + P = 10 + 33 = 43 \text{ k}\Omega;$$

În figura 3.45 se prezintă schema bloc a sistemului de avans prin impulsuri cu electromagnet realizat.



Figura 3.45. Schema bloc a sistemului de avans prin impulsuri cu electromagnet

1. sistemul de avans propriu-zis plus capul de sudare; 2. pupitrul de comandă; 3. sârma electrod

În figura 3.46 se prezintă o vedere de ansamblu a sistemului de avans prin impulsuri cu electromagnet, [17].

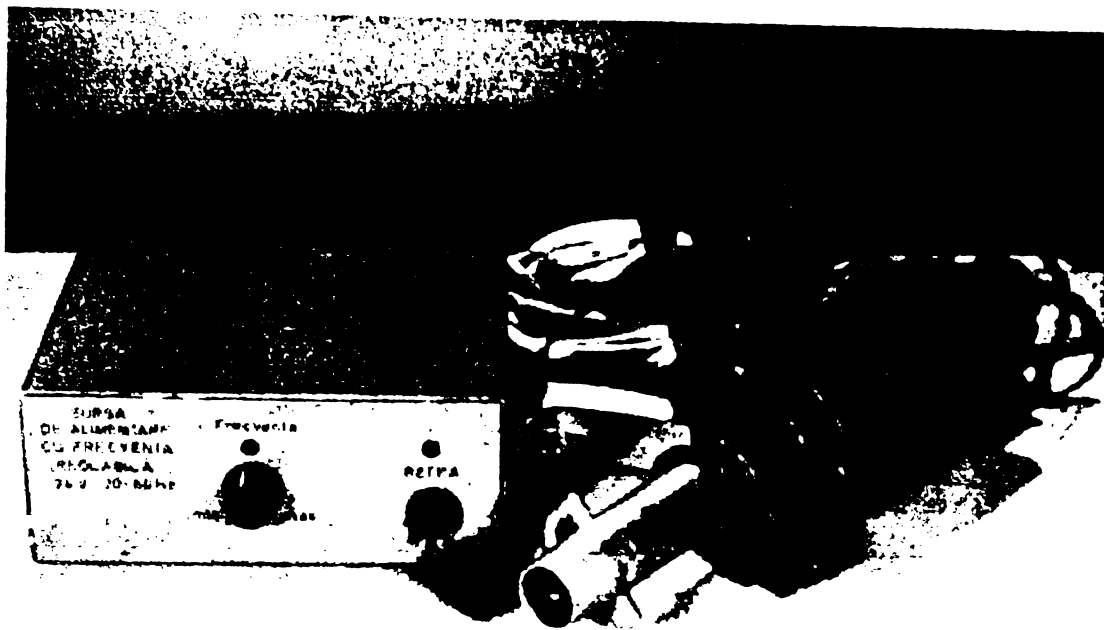


Figura 3.46. Aspectul sistemului de avans prin impulsuri cu electromagnet

Caracteristicile tehnico-funcționale ale sistemului de avans prin impulsuri sunt:

- tensiunea de alimentare: 220 V, c.a.;
- tensiunea de ieșire: 24 V, c.c.;
- curentul de ieșire maxim: 0,8 A;
- frecvența de ieșire: 20÷80 Hz;
- forța de acționare: 10÷20 N;
- diametrul sârmei electrod: 0,6; 0,8; 1,0; 1,2;
- pasul (amplitudinea) impulsului: 0,5 ÷ 3 mm;
- posibilități de reglare a vitezei de avans:
 - ✓ în trepte: prin modificarea întrefierului electromagnetului (amplitudinea impulsului);
 - ✓ continuu: prin modificarea frecvenței tensiunii de alimentare;
- dimensiuni de gabarit: 80 x 150 mm;
- masa: 2 kg.

În concluzie, dintre cele două variante de sisteme de avans prin impulsuri, perspectivele cele mai mari le au sistemele mecanice care utilizează pentru antrenarea generatoarelor de impulsuri motoare electrice de serie obișnuite, a căror comandă se face relativ ușor, pe câtă vreme sistemele electromecanice necesită electromagneți speciali și dispozitive complexe de comutație rapidă a acestora.

3.2.4. Proiectarea cutiei de alimentare și comandă a sistemelor de avans prin impulsuri

Pentru acționarea sistemelor de avans prin impulsuri realizate s-a utilizat un motor de curent continuu cu excitație separată de tip MRF (Fronius) cu puterea nominală de 120 W și turația nominală de 5000 rot/min, de la care s-a eliminat reductorul de turație. Pornind de la acest aspect s-a proiectat și realizat un echipament de comandă flexibil care se poate adapta cu ușurință sistemelor de avans realizate, respectiv pot comanda orice instalație sau echipament de sudare semimecanizată sau mecanizată în mediu de gaze protectoare MIG/MAG, [16], [73].

Schema electrică a cutiei de alimentare și comandă este prezentată în figura 3.47.

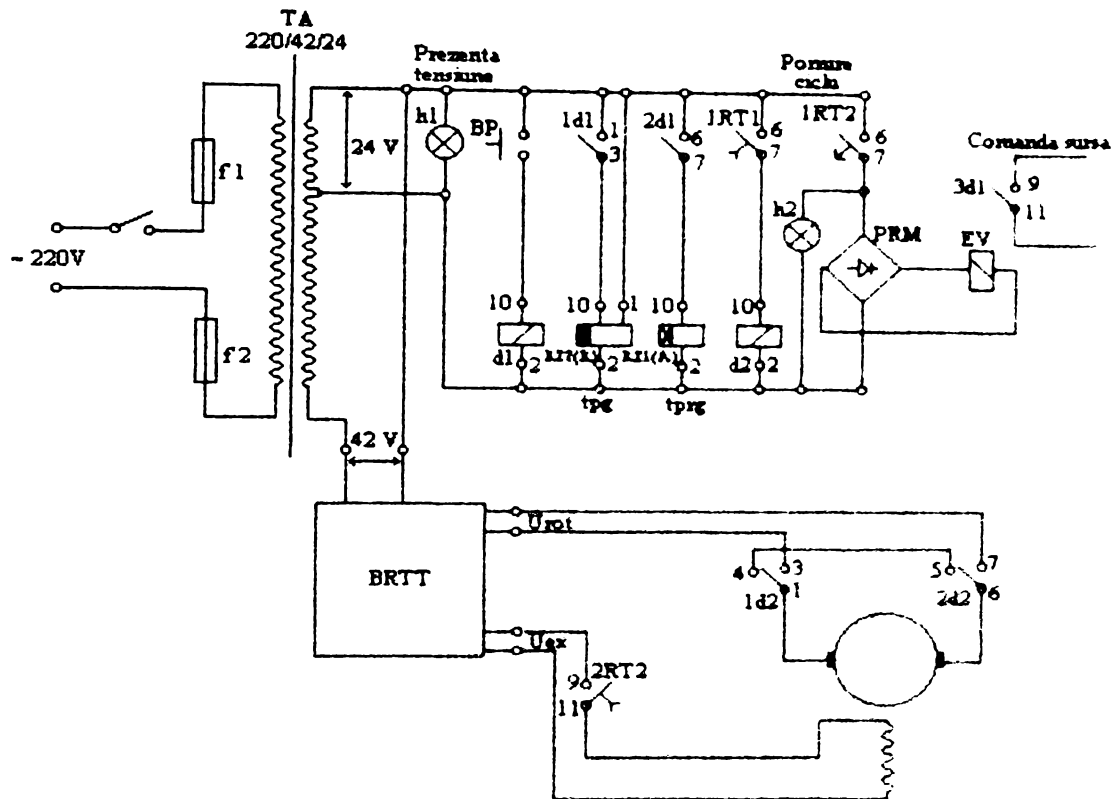


Figura 3.47. Schema electrică a cutiei de alimentare și comandă

Față de schemele clasice utilizate pentru alimentarea motoarelor MRF, curent utilizate în acționarea instalațiilor de sudare de construcție românească, schema realizată conține o placă performantă de reglare a turației motorului cu tiristoare BRTT. Utilizarea blocului BRTT conferă următoarele avantaje:

- asigură constanța turației motorului la fluctuațiile tensiunii rețelei și ale cuplului mecanic rezistent;
- protecția tiristoarelor la supracurenți prin limitarea superioară a curentului rotoric, respectiv la întreruperea accidentală a curentului de excitație;
- fiabilitate net superioară prin utilizarea unor componente electronice de calitate și prin execuția deosebită a cablajului;
- construcția mai compactă și în consecință mai rațională a plăcii electronice.

Principiul de funcționare al schemei:

- Se apasă butonul de pornire BP și se pune sub tensiune releul d_1 . Acesta își acționează contactele:
 - ✓ $1d_1$ care se închide și pune sub tensiune releul de timp cu întârziere la revenire RT_2 (R) care la rândul lui își acționează instantaneu contactele:
 - $1RT_2$ care se închide și conectează electroventilul EV și se aprinde lampa h_2 ;
 - $2RT_2$ care se închide și permite alimentarea excitației motorului de antrenare al sârmei electrod;
 - ✓ $2d_1$ care se închide și pune sub tensiune releul de timp cu întârziere la anclansare RT_1 (A);
 - ✓ $3d_1$ care se închide și comandă contactorul sursei pentru sudare;

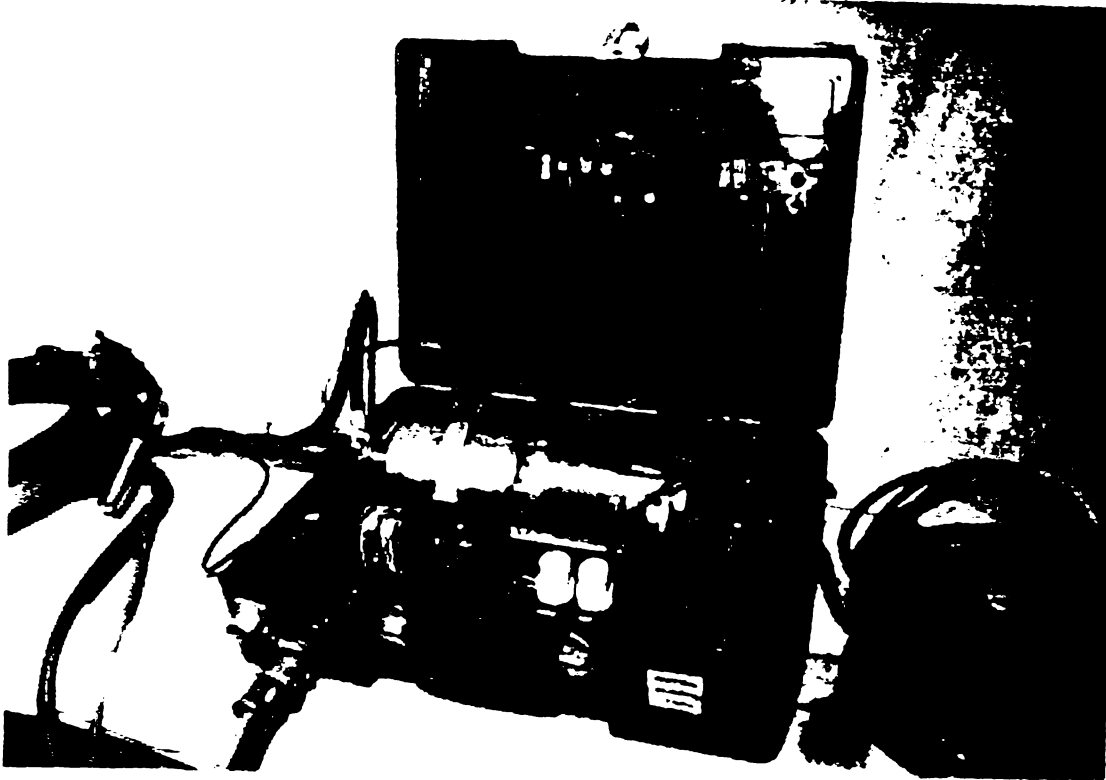


Figura 3.49. Cutia de alimentare și comandă a sistemelor de avans prin impulsuri
(vezi sistemul de avans cu dispozitiv de prindere cu bile)

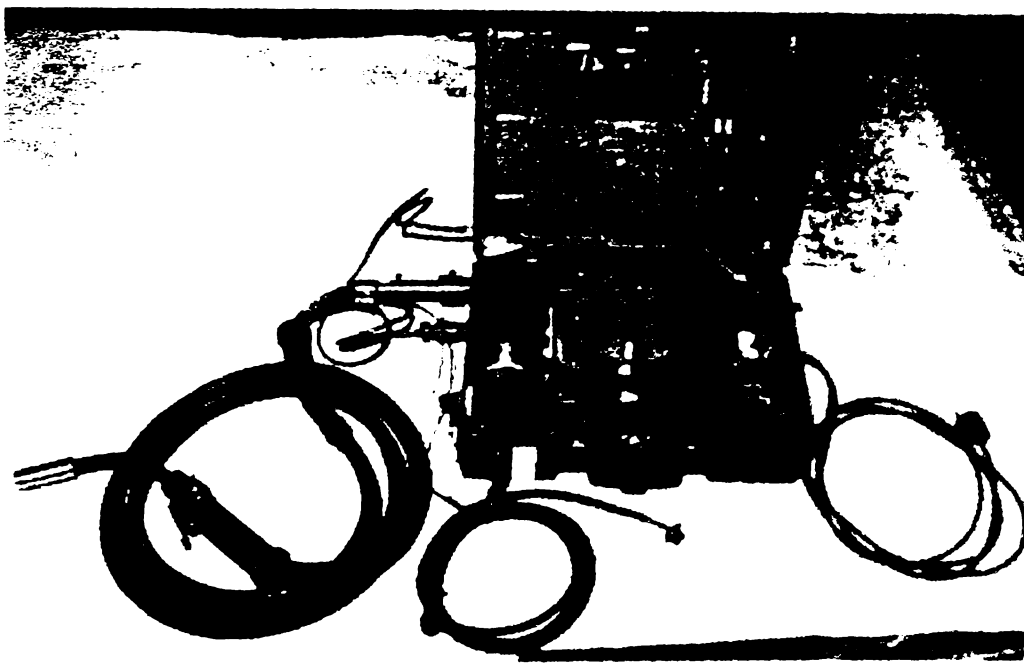


Figura 3.50. Cutia de alimentare și comandă a sistemelor de avans prin impulsuri
(vezi sistemul de avans cu dispozitiv de prindere cu șaibă)

CAPITOLUL IV

GENERAREA IMPULSURILOR DE CURENT CU AJUTORUL SISTEMELOR DE AVANS PRIN IMPULSURI

(2 subcapitole, 13 pagini, 10 figuri, 4 tabele, 32 relații de calcul)

1.1. Principiul generării impulsurilor de curent cu ajutorul sistemelor de avans prin impulsuri ale sârmei electrod

În cazul sistemelor de avans prin impulsuri ale sârmei electrod modul de generare a impulsurilor de curent este principial diferit față de modul de generare convențional, pe cale electronică, (prezentat anterior). În plus, această posibilitate de generare a impulsurilor de curent dacă e confirmă, este mai simplă și mult mai ieftină, datorită simplității sistemelor de avans prin impulsuri față de blocurile electronice generatoare de impulsuri. O instalație de sudare modernă în curent pulsant costă în general de cel puțin 5 ori mai mult decât o instalație standard de sudare MIG/MAG tocmai datorită complexității blocurilor electronice de generare a impulsurilor de curent, ceea ce justifică interesul pentru sistemele de avans prin impulsuri.

La baza teoriei generării impulsurilor de curent cu ajutorul sistemelor de avans prin impulsuri stă proporționalitatea dintre viteza de avans a sârmei electrod și curentul de sudare, care într-o primă aproximare poate fi aproximată ca fiind o variație liniară, figura 4.1. Valoarea curentului de sudare depinde în primul rând de viteza de avans a sârmei electrod, fiind direct proporțională cu aceasta. Creșterea vitezei de avans a sârmei implicând creșterea curentului de sudare și invers.

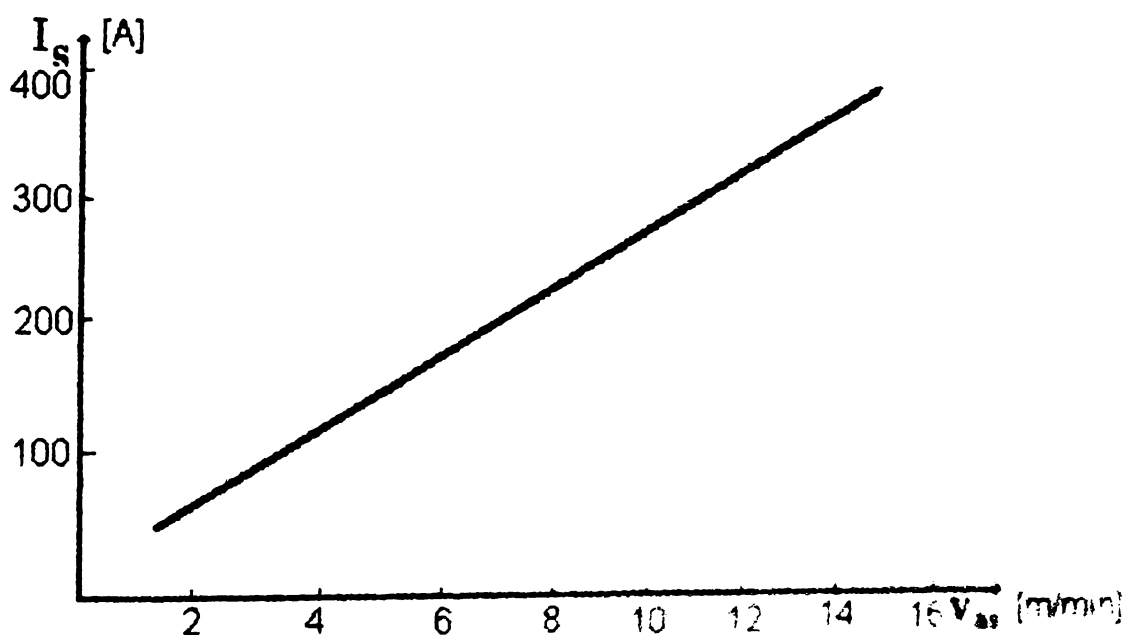


Figura 4.1. Corelația curent de sudare - viteza de avans a sârmei electrod

Prin urmare, dacă într-un anumit interval de timp, relativ scurt, viteza de avans a sârmei electrod variază între o valoare maximă și o valoare minimă, aceasta va determina o variație proporțională a curentului din circuitul de sudare între o valoare maximă și una minimă, cu o alură a formei de creștere a curentului în funcție de viteza de creștere a vitezei de avans a sârmei electrod, respectiv funcție de accelerația acesteia în intervalul de timp dat.

Generarea impulsurilor de curent cu ajutorul sistemelor de avans prin impulsuri se bazează pe proprietatea antrenării periodice cu viteză de avans variabilă a sârmei electrod pe timpul unui impuls, după o lege de variație bine precizată. Dacă se cunoaște alura de variație a vitezei de avans a sârmei, se poate determina forma de variație a impulsului de curent din circuitul de sudare. Cunoașterea modului de variație a vitezei de avans presupune la rândul ei cunoașterea legii de mișcare a mecanismului care generează impulsul.

Prin urmare, studiul generării impulsurilor prin această metodă presupune cunoașterea corectă și amănunțită a dependenței curentului de sudare funcție de viteza de avans a sârmei, în ultima instanță, cunoașterea în detaliu a parametrului tehnologic viteză de avans a sârmei electrod.

Pentru un material de adaos dat, viteza de avans a sârmei electrod depinde în principal de următorii factori, [12], [19], [24]:

- ✓ curentul de sudare I_s ;
- ✓ diametrul sârmei electrod d_s ;

- ✓ polaritatea curentului;
- ✓ gazul de protecție.

Curentul de sudare este proporțional cu viteza de avans a electrodului. Când toate celelalte variabile sunt menținute constante, curentul de sudare variază cu viteza de avans a electrodului printr-o relație neliniară.

La nivele scăzute ale curentului pentru fiecare diametru de electrod curba are o variație aproape liniară, iar pentru valori ridicate ale curentului variația devine exponențială.

Curbele pot fi exprimate aproximativ prin relația, [58]:

$$v_{ae} = a I_s + b |l_c| I_s^2 \quad (4.3)$$

unde:

a – constantă de proporționalitate pentru încălzirea anodului sau catodului, mărimea sa este dependentă de polaritatea curentului, compoziția gazului de protecție, compoziția chimică a materialului de adaos și de alți factori;

b – constantă de proporționalitate pentru încălzirea prin efect Joule a capătului liber al sârmei electrod;

$|l_c|$ – lungimea capătului liber a sârmei electrod;

În figura 4.2 se prezintă calitativ corelația dintre viteza de avans a sârmei electrod și curentul de sudare, [108], [110].

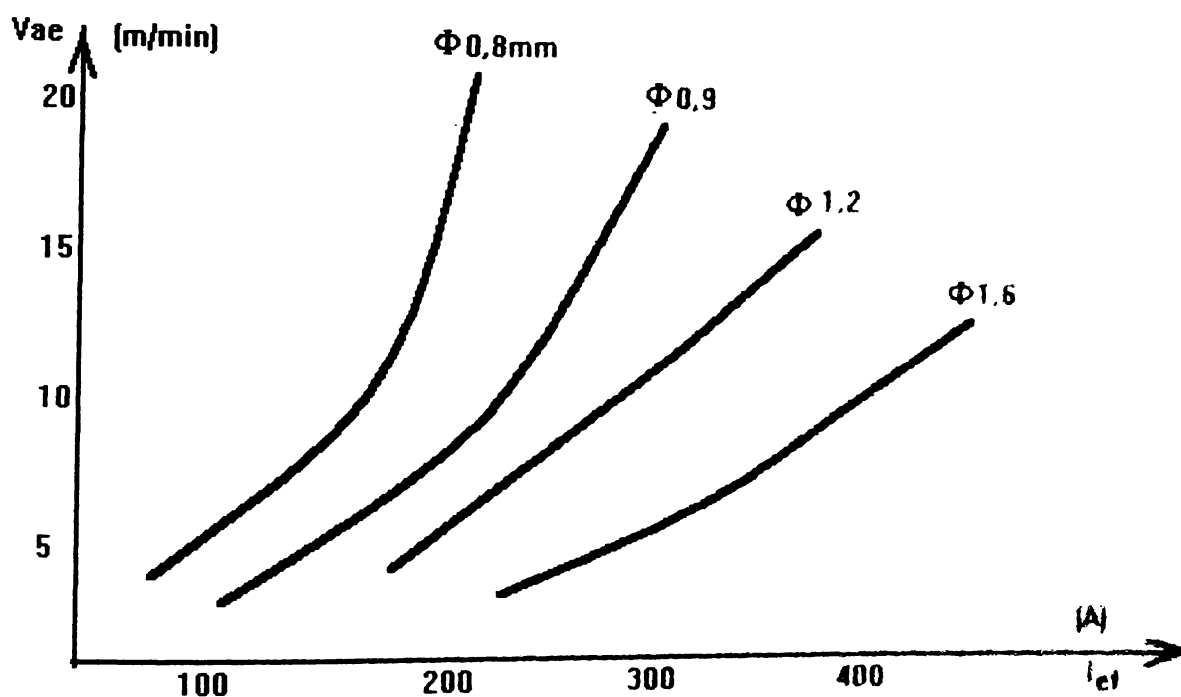


Figura 4.2. Dependența dintre curentul de sudare și viteza de avans a sârmei electrod

Viteza de avans a sârmei electrod variază invers proporțional cu diametrul acesteia, pentru obținerea unei valori date a curentului de sudare sârmele de diametru mic le corespunde o viteză de avans mai mare comparativ cu sârmele de diametru mai mare. S-a stabilit, de exemplu, că pentru obținerea unui curent de sudare de 200 A este nevoie ca viteza de avans a sârmei să fie de 14 m/min pentru sârma de 0,8 mm, 9 m/min pentru sârma de 1,0 mm, 5,3 m/min pentru sârma de 1,2 mm, respectiv 2,7m/min pentru sârma de 1,6 mm. Se constată că diferențele sunt semnificative și creșterea diametrului sârmei implicând o scădere apreciabilă a vitezei de avans a acesteia.

În ceea ce privește influența polarității se constată că viteza de avans a sârmei electrod pentru obținerea unui curent dat este mai mare în cazul folosirii polarității directe decât în cazul polarității inverse.

În concluzie, se apreciază că o cunoaștere a valorilor efective ale vitezei de avans a sârmei electrod pentru obținerea unor anumite valori dorite ale curentului de sudare, respectiv cunoașterea factorilor care influențează viteza de avans a sârmei constituie punctul de plecare în proiectarea sistemelor de avans prin impulsuri a sârmei electrod.

4.2. Determinarea analitică a formei impulsurilor de curent generate cu ajutorul sistemelor de avans prin impulsuri ale sârmei electrod

Generarea impulsurilor de curent cu ajutorul sistemelor de avans prin impulsuri ale sârmei electrod se bazează pe proprietatea antrenării cu viteză de avans variabilă a sârmei după o lege de mișcare bine precizată, pornind de la relația de proporționalitate dintre viteza de avans a sârmei și curentul de sudare, specifică sudării în mediu de gaze protectoare MIG/MAG. Dacă se cunoaște alura de variație a vitezei de avans a sârmei, se poate determina forma de variație a impulsului de curent din circuitul de sudare, [14]. Cunoașterea modului de variație a vitezei de avans presupune la rândul ei cunoașterea legii de mișcare a mecanismului care generează impulsul. Determinarea legii de mișcare se face în funcție de sistemul de avans utilizat, fiecare sistem putând fi echivalat cu un anumit mecanism cu camă.

În continuare se prezintă determinarea legilor de mișcare pentru sistemele de avans mecanice prin impulsuri realizate.

4.2.1. Stabilirea legii de mișcare a sistemului de avans prin impulsuri cu dispozitiv de prindere cu șaibă

Schema de principiu și modul de funcționare a sistemului de avans au fost prezentate pe larg în subcapitolul 3.2.1.

Se constată că sistemul de avans considerat poate fi asimilat cu un caz particular al mecanismului cu camă și anume cu un mecanism cu excentric.

În funcție de forma profilului de lucru există două tipuri constructive de excentrici, [47]. [87]:

- excentrici circulari, la care profilul de lucru este executat după un arc de cerc;
- excentrici curbilinii (came), la care profilul de lucru este executat după o curbă, de obicei o spirală arhimedică sau o evolventă.

Excentricul circular este un disc circular care se rotește în jurul unui ax deplasat față de axa sa geometrică, cu o anumită excentricitate. Excentricul circular este cel mai des întâlnit datorită ușurinței de realizare practice a profilului de lucru.

În figura 4.3 se prezintă parametrii constructivi ai excentricului circular, [47]:

- raza discului excentric R ;
- raza axului de rotație r ;
- excentricitatea e ;

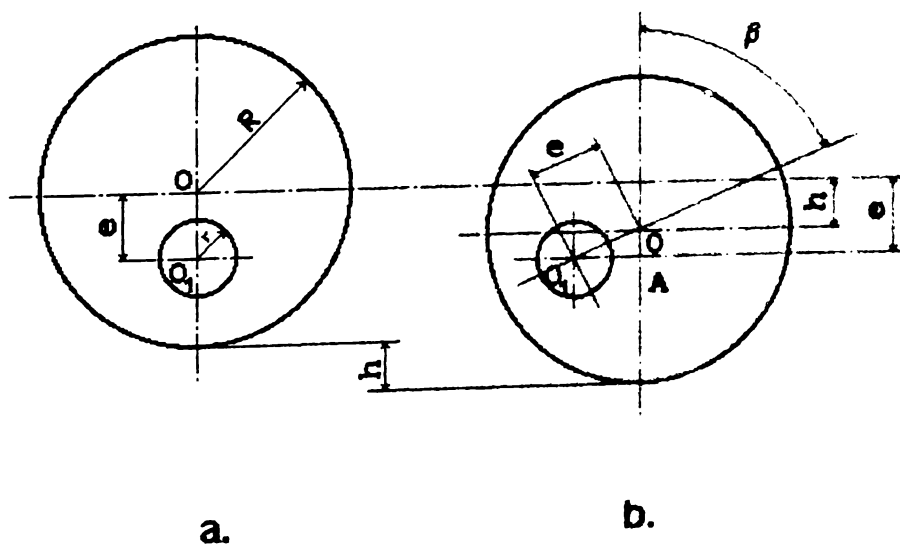


Figura 4.3. Parametrii constructivi ai excentricului circular

Pentru determinarea cursei de lucru "h" a excentricului presupunem că excentricul se rotește față de poziția inițială, figura 4.3.a, cu unghiul β , figura 4.3.b. Cursa de lucru a excentricului este:

$$h = e - OA \quad (4.2)$$

Din triunghiul OO_1A rezultă:

$$\cos \beta = \frac{OA}{OO_1} = \frac{OA}{e} \quad (4.3)$$

$$OA = e \cdot \cos \beta \quad (4.4)$$

Prin urmare, înlocuind în (4.2), rezultă:

$$h = e - e \cdot \cos \beta = e(1 - \cos \beta) \quad (4.5)$$

Presupunând că excentricul se rotește cu viteza unghiulară constantă ω , ceea ce de fapt se și întâmplă în timpul funcționării sistemului de avans, valoarea unghiului β este:

$$\beta = \omega \cdot t \quad (4.6)$$

Înlocuind în ecuația (4.5) se obține:

$$h = e(1 - \cos \omega t) \quad (4.7)$$

Ecuația (4.7) reprezintă legea de variație a spațiului (legea de mișcare) parcurs în timp de un punct al excentricului.

În tabelul 4.1 se prezintă valorile spațiului "h", corespunzătoare pentru diferite valori ale unghiului β , iar în diagrama din figura 4.4 este reprezentată variația curbei "h" în funcție de unghiul de rotire β , stabilită pe baza relației (4.7).

Din diagramă rezultă că avem de-a face cu o variație continuă și periodică, după o funcție trigonometrică, valoarea spațiului parcurs variind în limitele $[0; 2e]$, pentru o variație a unghiului $\beta = 0 \dots 180^\circ$, după care se revine în punctul de funcționare inițial, la rotirea excentricului cu unghiul $\beta = 180 \dots 360^\circ$.

Tabelul 4.1. Corelația $h = f(\beta)$

$\beta [^\circ]$	$h = e(1 - \cos \beta)$
0	0
10	0.02e
20	0.06e
30	0.13e
40	0.23e
50	0.36e
60	0.5e
70	0.66e
80	0.83e
90	e
100	1.17e
110	1.34e
120	1.5e
130	1.64e
140	1.77e
150	1.87e
160	1.94e
170	1.98e
180	2e

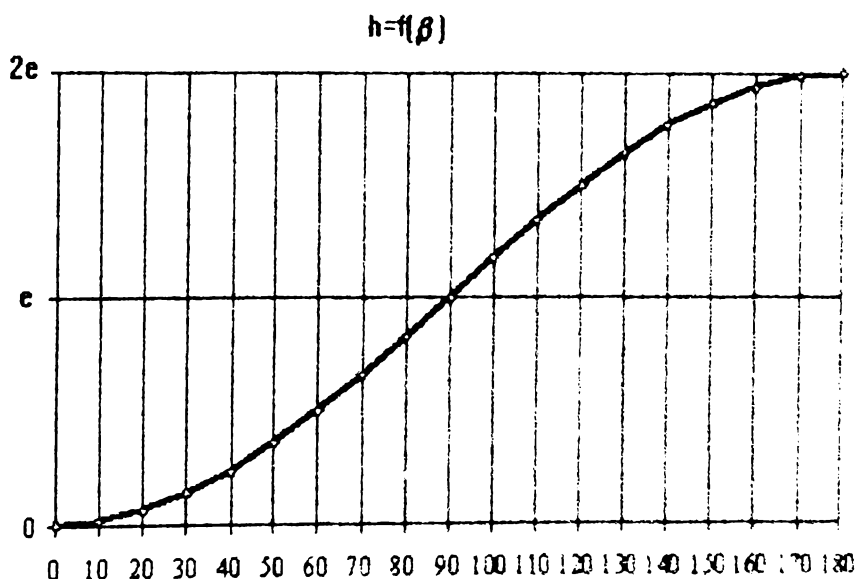


Figura 4.4. Legea de mișcare a unui punct al excentricului

Din categoria excentricilor curbilini cei mai utilizați sunt excentricii executați după o spirală arhimedică, [47]. Tehnologia de prelucrare a acestora este cu mult mai dificilă decât a excentricilor circulari. Excentricii curbilini prezintă însă avantajul unui unghi de pantă constant pe toată lungimea profilului de lucru, precum și a unei curse de lucru (pas) mai mare decât cei circulari, ca urmare a faptului că unghiul de rotire poate fi practic 180° (de obicei $30^\circ - 120^\circ$).

Spirala arhimedică se obține prin deplasarea unui punct cu o viteză constantă pe o rază care se rotește uniform în jurul unui pol, figura 4.5.

Dacă la o rotație cu 360° a razei, punctul se deplasează cu distanța $2h$, atunci pentru o rotație cu un unghi oarecare β se obține:

$$h = \frac{r_0 \cdot \beta^\circ}{2\pi} = \frac{r_0 \cdot \beta^\circ}{360^\circ} \quad (4.8)$$

Pentru cazul rotației excentricului cu viteza unghiulară constantă ω se poate scrie:

$$\beta = \omega t \quad (4.9)$$

și înlocuind, se obține:

$$h = \frac{r_0 \omega t}{360^\circ} \quad (4.10)$$

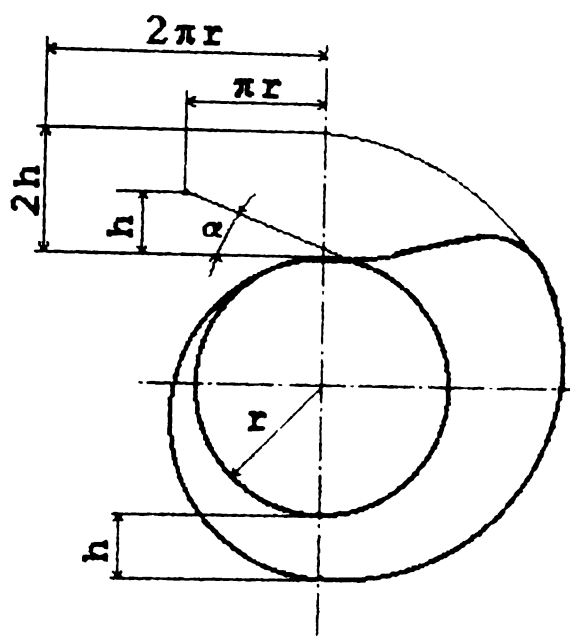


Figura 4.5. Generarea excentricului curbiliniu (spirală arhimedică)

Ecuția (4.10) reprezintă legea de variație a spațiului parcurs de un punct al excentricului curbiliniu în timp, respectiv legea de mișcare a camei.

În continuare vom analiza legile de mișcare în cazul excentricului circular care poate fi asimiliat sistemului de avans prin impulsuri cu dispozitiv de prindere cu șaibă; o abordare asemănătoare se poate face și în cazul excentricului curbiliniu.

Cunoașterea legii de mișcare a unui mecanism presupune cunoașterea legii de variație a parametrilor cinematici – *viteză, accelerație, spațiu* – pentru un punct caracteristic al mecanismului.

Pornind de la ecuația de variație a spațiului (4.7):

$$h = e \cdot (1 - \cos \alpha),$$

prin derivare se obține viteza:

$$v = h' = e \cdot \omega \cdot \sin \alpha \quad (4.11)$$

Prin derivarea vitezei se obține accelerația:

$$a = v' = h'' = e \cdot \omega^2 \cos \alpha \quad (4.12)$$

În tabelul 4.2 sunt prezentate valorile accelerației, vitezei și spațiului în intervalul cursei active a mecanismului ($0 - \pi$), corespunzătoare excentricității “e”, respectiv vitezei unghiulare constante “ ω ”, pentru câteva valori particulare ale unghiului de rotație β .

Tabelul 4.2. Valorile parametrilor cinematici ai mișcării

Parametrul cinematic	$\beta [^\circ]$						
	0	30	60	90	120	150	180
$s=e(1-\cos\beta)$	0	$\frac{2-\sqrt{3}}{2}e$	$\frac{1}{2}e$	e	$\frac{2+\sqrt{3}}{2}e$	$\frac{3}{2}e$	$2e$
$v=e\omega\sin\beta$	0	$\frac{1}{2}e\omega$	$\frac{\sqrt{3}}{2}e\omega$	$e\omega$	$\frac{\sqrt{3}}{2}e\omega$	$\frac{1}{2}e\omega$	0
$a=e\omega^2\cos\beta$	$e\omega^2$	$\frac{\sqrt{3}}{2}e\omega^2$	$\frac{1}{2}e\omega^2$	0	$-\frac{1}{2}e\omega^2$	$-\frac{\sqrt{3}}{2}e\omega^2$	$-e\omega^2$

În figura 4.6 se prezintă diagramele de variație ale parametrilor cinematici ai mecanismului.

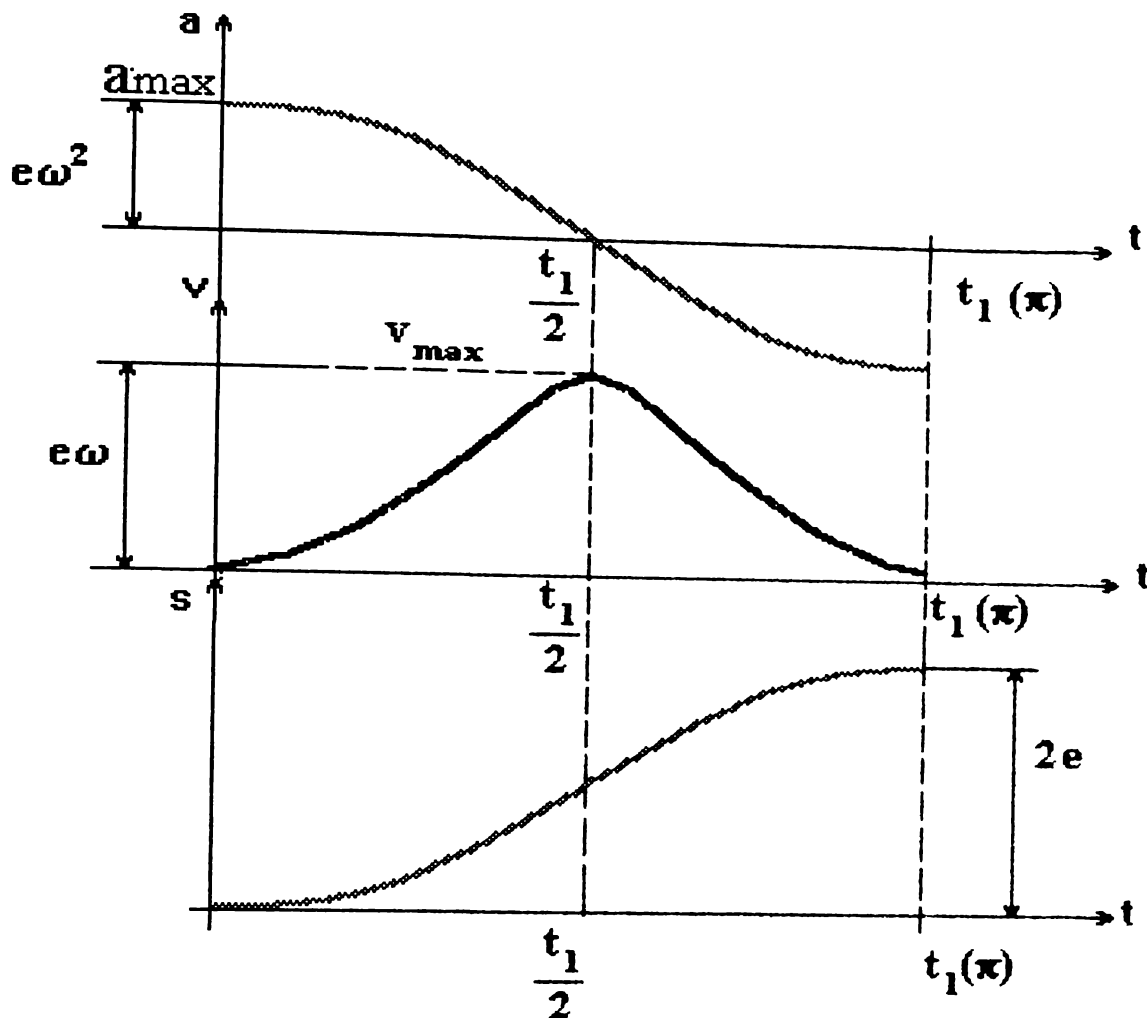


Figura 4.6. Diagramele de variație ale parametrilor cinematici ai mecanismului

Din analiza legilor de variație ale parametrilor cinematici ai mișcării, rezultă că avem de-a face cu o lege de mișcare după o funcție trigonometrică. În literatura de specialitate specifică sintezei mecanismelor [42], [47], legea de mișcare la care accelerația variază în intervalul de timp $0 - t_1$ cosinusoidal, este cunoscută sub numele de legea de mișcare armonică cosinusoidală. Se observă că, în acest caz, viteza are o variație sinusoidală cu timpul, iar spațiul are o variație cosinusoidală cu timpul. Din analiza curbelor de variație a parametrilor cinematici, se poate observa că în cazul în care ciclograma mișcării punctului are un repaus superior și unul inferior, accelerația prezintă o variație cu două discontinuități finite (pentru momentele $t = 0$ și $t = t_1$). În aceste momente mecanismul funcționează cu șocuri moi.

4.2.2. Stabilirea legii de mișcare a sistemului de avans prin impulsuri cu dispozitiv de prindere cu bile

Schema de principiu și modul de funcționare a sistemului de avans au fost prezentate pe larg în subcapitolul 3.2.2.

Cunoașterea legii de mișcare a sârmei electrod presupune cunoașterea legii de mișcare a punctului M, care materializează contactul dintre sârma electrod și elementul de antrenare, corespunzătoare cursei active a mecanismului și anume rotirii flanșei cu unghiul $\beta = 180^\circ$, respectiv în timpul $t = \omega/\beta$.

Determinarea legii de mișcare a punctului M se face prin metoda grafică, figura 4.7, în care unghiul de înclinare al flanșei α și spațiul de deplasare al punctului "h", egal cu pasul de avans "p", sunt cunoscute, considerând timpul t egal cu o semiperioadă și împărțind semiperioada în opt părți egale, [14], [42]. Totodată, se consideră că viteza unghiulară ω este constantă. Pentru simplificarea calculului s-a considerat că traiectoria pe care se deplasează punctul de contact dintre bila de calcul și flanșă este un cerc (în realitate este o elipsă). Această aproximare este posibilă având în vedere că unghiul α are valori mici ($\alpha < 5^\circ$).

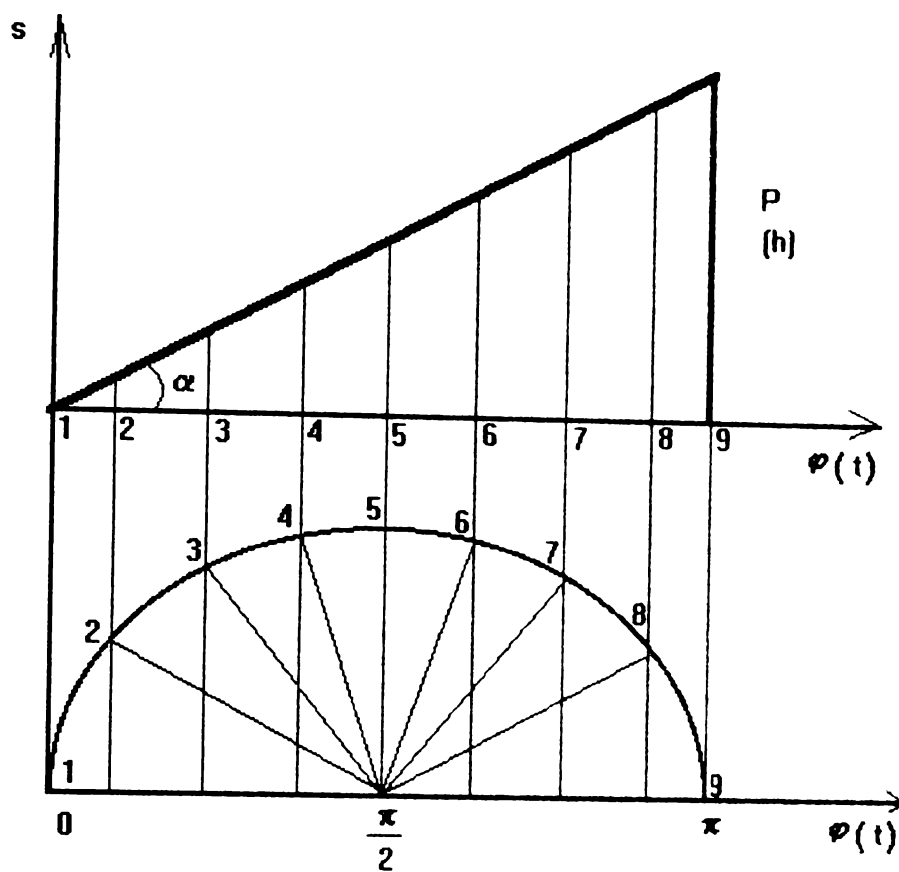


Figura 4.7. Determinarea grafică a legii de mișcare a mecanismului

În figura 4.8 se prezintă alura legii de variație a punctului M determinată pe cale grafică, pe baza figurii 4.7. Se poate observa distanța parcursă de punctul M pentru cele 9 puncte caracteristice (sau valori efective ale unghiului de rotire al flanșei $\varphi = \omega t$). Corespunzător, se prezintă și graficul de variație al vitezei de deplasare a punctului M.

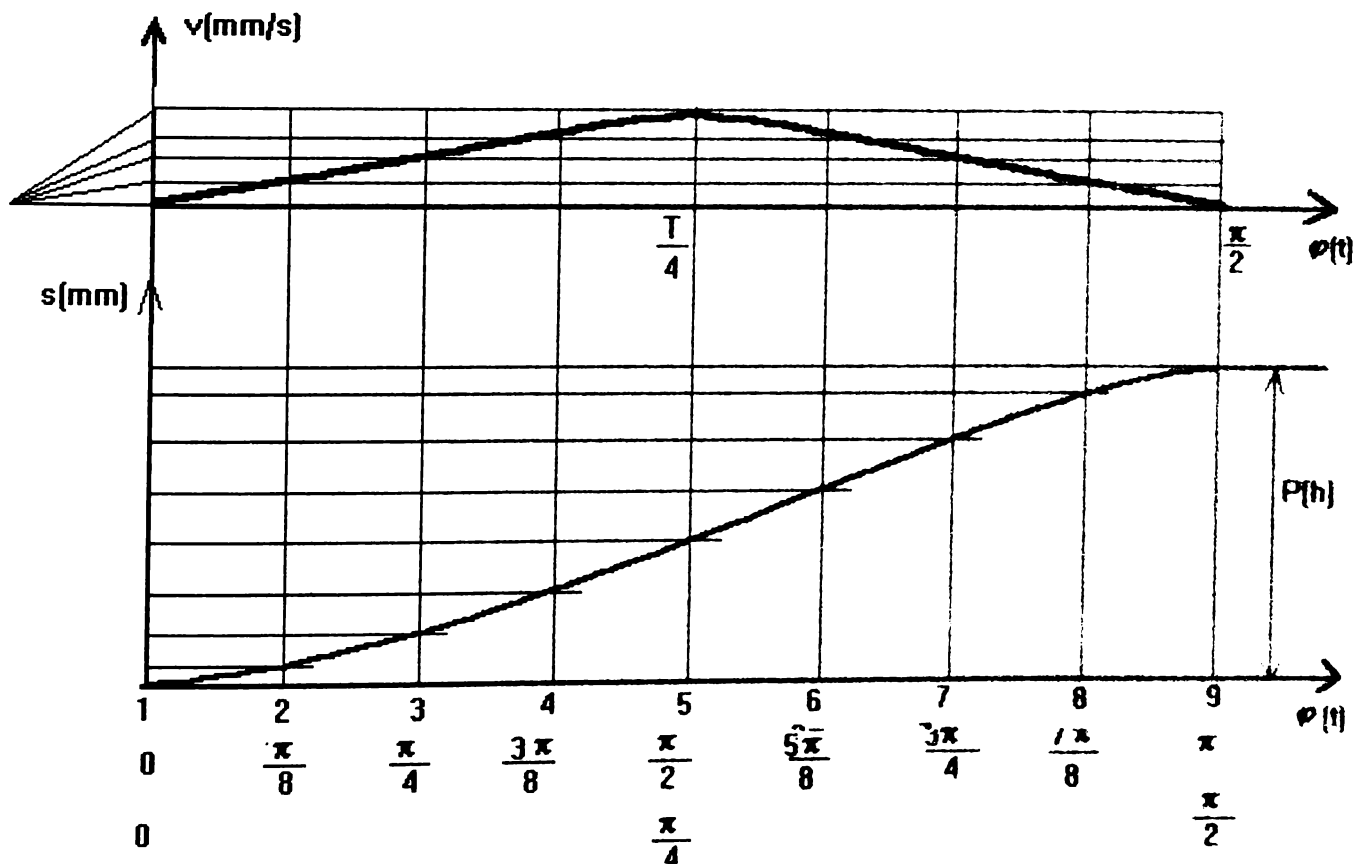


Figura 4.8. Curbele de variație ale parametrilor cinematici ai mișcării

Analizând curbele de variație ale parametrilor cinematici ai mișcării punctului M, se constată că aceștia variază după o funcție trigonometrică. Acest lucru ne sugerează ideea că avem de-a face cu o lege de mișcare armonică, sinusoidală sau cosinusoidală, frecvent utilizate în sinteza mecanismelor cu camă.

Pornind de la ipoteza că legea de mișcare a punctului are o variație cosinusoidală cu timpul. (vezi figura 4.6) vom determina în continuare legile de variație ale parametrilor cinematici ai mișcării – *acelerație, viteză, spațiu* – considerând că flanșa se rotește cu viteza unghiulară ω constantă, [42].

În această ipoteză accelerația punctului are o variație cosinusoidală și dacă considerăm că flanșa se rotește cu viteza unghiulară ω constantă, ecuația accelerației este dată de relația:

$$a = C_1 \cdot \cos C_2 \omega t \quad (4.13)$$

Prin integrări succesive se determină expresia vitezei:

$$v = \int a dt = \int C_1 \cdot \cos C_2 \omega t dt = \frac{C_1}{C_2 \omega} \sin C_2 \omega t + C_3 \quad (4.14)$$

respectiv a spațiului:

$$s = \int v dt = \int \left(\frac{C_1}{C_2 \omega} \sin C_2 \omega t + C_3 \right) dt = -\frac{C_1}{(C_2 \omega)^2} \cos C_2 \omega t + C_3 t + C_4 \quad (4.15)$$

Punând condițiile de perechi de valori, parametri cinematici – timp, rezultați din figura 4.5. și anume pentru:

$$\begin{cases} t=0 & \text{avem } v=0 ; s=0 \\ t = \frac{t_1}{2} & \text{avem } a=0 \\ t = t_1 & \text{avem } v=0 ; s=h(p) \end{cases} \quad (4.16)$$

Rezultă sistemul :

$$\begin{cases} \frac{C_1}{C_2 \omega} \sin 0 + C_3 = 0 \\ -\frac{C_1}{(C_2 \omega)^2} \cos 0 + C_4 = 0 \\ C_1 \cos C_2 \omega \frac{t_1}{2} = 0 \\ \frac{C_1}{C_2 \omega} \sin C_2 \omega t_1 + C_3 = 0 \\ -\frac{C_1}{(C_2 \omega)^2} \cos C_2 \omega t_1 + C_3 t_1 + C_4 = h \end{cases} \quad (4.17)$$

Rezolvând sistemul se obțin valorile constantelor C_1, C_2, C_3, C_4 și anume:

$$\begin{cases} C_1 = \frac{h}{2} \left(\frac{\pi}{t_1} \right)^2 \\ C_2 = \frac{1}{\omega} \cdot \frac{\pi}{t_1} \\ C_3 = 0 \\ C_4 = \frac{h}{2} \end{cases} \quad (4.18)$$

Cu acestea, expresiile parametrilor cinematici ai mișcării punctului devin:

$$\begin{cases} a = \frac{h}{2} \left(\frac{\pi}{t_1} \right)^2 \cos \frac{\pi}{t_1} t \\ v = \frac{h \pi}{2 t_1} \sin \frac{\pi}{t_1} t \\ s = \frac{h}{2} \left(1 - \cos \frac{\pi}{t_1} t \right) \end{cases} \quad (4.19)$$

Pornind de la observația că raportul π/t_1 reprezintă chiar viteza unghiulară ω a mecanismului ($\pi/t_1 = \omega$) și înlocuind în (4.19) obținem:

$$\begin{cases} a = \frac{h}{2} \omega^2 \cos \omega t \\ v = \frac{h}{2} \omega \sin \omega t \\ s = \frac{h}{2} (1 - \cos \omega t) \end{cases} \quad (4.20)$$

Relațiile (4.20) descriu legea de mișcare a sistemului de avans prin mpulsuri cu dispozitiv de prindere cu bile.

Din analiza legilor de variație ale parametrilor cinematici ai celor două mecanisme prezentate se constată că acestea au o lege de mișcare asemănătoare.

În cele ce urmează, vom analiza aspectele legate de stabilirea relației dintre legea de mișcare a sârmei electrod, specifică sistemului de avans cu dispozitiv de prindere cu saibă, și legea de variație prezumtivă a curentului de sudare, ca efect a antrenării sârmei electrod cu viteză de avans și accelerație variabilă după legile prezentate anterior; o analiză similară se poate face și pentru sistemul de avans cu dispozitiv de prindere cu bile.

Pornind de la expresiile parametrilor cinematici ai legii de mișcare cosinusoidale, stabiliți pentru mecanismul de avans cu dispozitiv de prindere cu saibă, și anume:

$$\begin{cases} a = e \omega^2 \cos \omega t \\ v = e \omega \sin \omega t \\ s = e (1 - \cos \omega t) \end{cases} \quad (4.21)$$

se pot determina valorile extreme ale acestor parametri și timpii corespunzători acestor valori după cum urmează:

$$\begin{aligned} a_{\max} &= e \omega^2, \text{ pentru } t = 0, \text{ respectiv} \\ a_{\min} &= -e \omega^2, \quad t = \frac{\pi}{\omega} \\ \text{deci: } a &\in [-e \omega^2; e \omega^2] \\ v_{\max} &= e \omega, \text{ pentru } t = \frac{\pi}{2\omega} \\ v_{\min} &= 0, \text{ pentru } t = 0 \text{ și } t = \frac{\pi}{\omega} \\ \text{deci: } v &\in [0; e \omega] \\ s_{\max} &= 2e, \text{ pentru } t = \frac{\pi}{\omega} \\ s_{\min} &= 0, \text{ pentru } t = 0 \\ \text{deci: } s &\in [0; 2e] \end{aligned} \quad (4.22)$$

Sintetizând, obținem expresiile valorilor extreme ale parametrilor cinematici:

$$\begin{cases} a_{\max} = |a_{\min}| = e \omega^2 \\ v_{\max} = e \omega \\ s_{\max} = 2e = p \text{ (pasul de avans sau amplitudinea pulsului)} \end{cases} \quad (4.23)$$

Expresiile valorilor extreme ale accelerației, respectiv vitezei, pot fi exprimate și în funcție de frecvența "f", respectiv turația "n" a mecanismului. Aceste expresii permit un calcul mult mai facil al mărimilor de mai sus.

Din relația:

$$\omega = 2\pi f$$

$$f = \frac{n}{60}, \text{ rezulta} \quad (4.24)$$

$$\omega = 2\pi \frac{n}{60} = \frac{\pi n}{30}$$

Înlocuind în expresiile (4.23) rezultă:

$$\begin{cases} a_{\max} = |a_{\min}| = 4\pi^2 e f^2 = C_1 f^2 \\ v_{\max} = 2\pi e f = C_2 f \end{cases} \quad (4.25)$$

respectiv:

$$\begin{cases} a_{\max} = |a_{\min}| = \frac{1}{900} \pi^2 e n^2 = C_3 n^2 \\ v_{\max} = \frac{1}{30} \pi e n = C_4 n \end{cases} \quad (4.26)$$

unde: C_1, C_2, C_3, C_4 sunt constante ale mecanismului pentru anumite condiții concrete de funcționare.

În tabelul 4.3 se prezintă valorile efective ale accelerației, respectiv vitezelor maxime pentru trei valori particulare ale excentricității, respectiv pentru câteva valori reprezentative ale turației mecanismului în intervalul de funcționare $n = 0 \dots 5000$ rot/min.

Tabelul 4.3. Mărimea accelerației și vitezei de avans a sârmei electrod în timpul unui impuls

Excentricitatea e (mm)	Parametrul cinematic	n [rot/min] Tipul motorului: Fronius; $P = 120$ W; $n_{\max} = 5000$ rot/min								
		500	1000	1500	2000	3000	3500	4000	4500	5000
1	v_{\max} (m/min)	3,14	6,28	9,42	12,6	18,8	22	25,1	28,3	31,4
	a_{\max} (m/s ²)	0,87	3,48	7,85	13,95	31,4	42,73	55,82	70,65	87,2
2	v_{\max} (m/min)	6,28	12,6	18,8	25,1	37,7	44	50,2	56,5	62,8
	a_{\max} (m/s ²)	1,74	6,96	15,7	27,9	62,8	85,46	111,6	141,3	174,4
3	v_{\max} (m/min)	9,42	18,8	28,3	37,7	56,5	65,9	75,4	84,8	94,2
	a_{\max} (m/s ²)	2,61	10,44	23,55	41,85	94,2	128,2	167,5	211,95	261,6

Relații de calcul: $v_{\max} = \omega \cdot e = \frac{\pi \cdot n \cdot e}{500} [m/min]$; $a_{\max} = \omega^2 \cdot e = \frac{e(\pi \cdot n)^2}{900} \cdot \frac{1}{1000} [m/s^2]$

Cunoscând legea de variație a vitezei de avans a sârmei electrod, se poate determina valoarea instantanee a acesteia, pentru anumite condiții concrete.

Revenind la principiul de funcționare al mecanismului de avans considerat, reamintim că în cadrul unui ciclu de lucru, respectiv pentru o rotație a excentricului cu 360° , se disting două faze principale:

- cursa activă de avans a sârmei electrod, corespunzătoare primei semiperioade a ciclului la rotirea excentricului cu un unghi de 180° , cu o variație cosinusoidală a pasului de avans, respectiv după variație sinusoidală a vitezei de avans;
- cursa pasivă de revenire în poziția inițială (sau cursa de mers în gol), corespunzătoare celei de-a doua semiperioade a ciclului de rotire a excentricului cu unghiul cuprins între $180-360^\circ$, când sârma electrod este oprită de către sistemul de blocare cu șaibă, pentru a împiedica revenirea ei în poziția inițială.

Rezultă că sârma electrod are o mișcare de avans intermitentă, cu o variație sinusoidală a vitezei în prima semiperioadă ($\varphi = 0-180^\circ$), respectiv cu valoarea 0 în semiperioada a doua ($\varphi = 180-360^\circ$).

În figura 4.9 se prezintă modul de variație teoretică în timp, a vitezei de avans a sârmei electrod, în funcție de unghiul de rotație al excentricului, respectiv pentru cele două faze ale ciclului de rotație, [14].

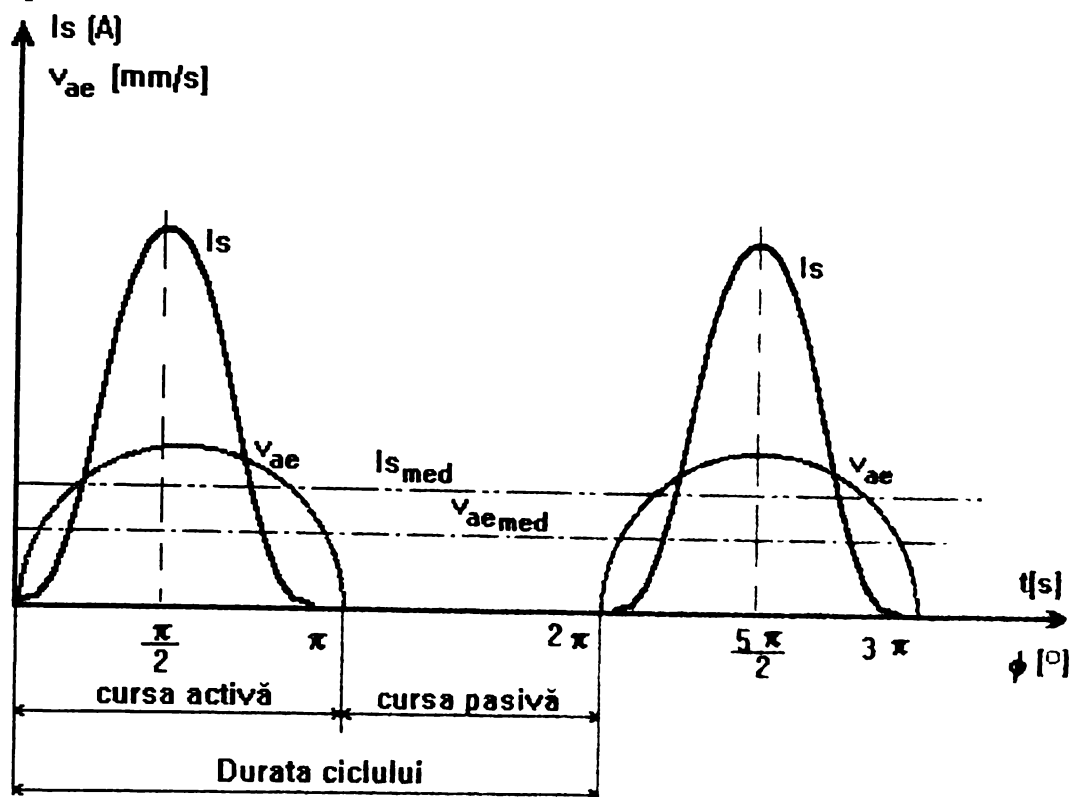


Figura 4.9. Variația teoretică a vitezei de avans a sârmei electrod, respectiv a curentului de sudare

Având în vedere relația de proporționalitate dintre viteza de avans a sârmei electrod și curentul de sudare, prin extrapolare rezultă că variația vitezei de avans determină variația corespunzătoare ale curentului de sudare după o lege asemănătoare, respectiv în circuitul de sudare se generează niște impulsuri de curent cu o anumită amplitudine funcție de viteza de avans maximă a sârmei electrod. Modul de variație teoretică al curentului din circuit este prezentat de asemenea în figura 4.9. Corespunzător unei viteze de avans medii a sârmei electrod rezultă un curent de sudare mediu în circuit.

Analizând graficul de variație teoretică a curentului pulsant generat cu ajutorul sistemului de avans prin impulsuri prezentat, se constată că acesta are o variație intermitentă (cu întreruperi), ceea ce ar conduce la concluzia că în timpul sudării cu un astfel de sistem de avans, arc electric se stinge periodic, rezultând în final un arc instabil, impropriu procesului de sudare. În realitate însă, lucrurile nu se petrec așa și primele cercetări experimentale efectuate, au evidențiat un arc electric cu o stabilitate foarte bună.

Explicația este relativ simplă. Într-adevăr, în cea de-a doua semiperioadă a ciclului, când viteza de avans a sârmei este nulă, datorită opririi sârmei, arc electric tinde să se stingă prin alungire topind în continuare vârful sârmei electrod. Prin urmare, arc electric continuă să ardă deoarece sursa de sudare continuă să alimenteze cu energie circuitului de sudare, furnizând o anumită diferență de potențial între vârful sârmei și piesa de sudat. Lungirea arcului însă, nu ajunge la lungimea de stingere (așa cum se întâmplă în cazul sudării când la întreruperea procesului de sudare datorită opririi avansului sârmei arc se lungește și se stinge), deoarece după un anumit timp, mai scurt decât timpul necesar alungirii de stingere, antrenarea sârmei se reia în ciclul următor determinând din nou avansul cu un pas a sârmei electrod și generând un nou impuls de curent.

Calculare simple pot dovedi acest lucru, [14]. Dacă de exemplu sudăm cu o sârmă electrod nealiată, cu diametrul $d_s = 1,2 \text{ mm}$ folosind ca și gaz de protecție amestecul de $80\% \text{ Ar} + 20\% \text{ CO}_2$, rezultă următoarele valori ale parametrilor de sudare, tabelul 4.4:

Tabelul 4.4. Parametrii tehnologice de sudare la sudare MAG convențională

$v_{as} \text{ [m/min]}$	$I_s \text{ [A]}$	$U_a \text{ [V]}$
4	160	17.3

Din relația de calcul a vitezei medii de avans a sârmei electrod, pentru sistemul de avans prin impulsuri cu șaibă, se poate determina turația, respectiv frecvența de rotire a excentricului, pentru obținerea acestei viteze de avans:

$$v_{as_{med}} = \frac{2 \cdot n \cdot e \cdot k}{1000} \left[\frac{m}{min} \right] \quad (4.27)$$

rezultă pentru $e = 1,5$ mm și $k = 0,9$ valoarea turației motorului n :

$$n = \frac{1000 \cdot v_{as_{med}}}{2 \cdot e \cdot k} = \frac{1000 \cdot 4}{2 \cdot 1,5 \cdot 0,9} \cong 1500 \text{ rot / min} \quad (4.28)$$

respectiv:

$$f = \frac{n}{60} = \frac{1500}{60} = 25 \text{ [Hz]} \quad (4.29)$$

De aici:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{25} = 0,04 \text{ [s]}$$

$$T = T_p + T_b \quad (4.30)$$

$$T_p = T_b = \frac{T}{2} = 0,02 \text{ [s]}$$

Pentru o ardere stabilă a arcului electric, trebuie să se realizeze echilibrul între viteza de avans v_{as} și viteza de topire a sârmei electrod v_{ts} :

$$v_{ts} = v_{ac} = 4 \text{ m/min} \approx 66,5 \text{ mm/s} \quad (4.31)$$

În timpul cursei active de avans a sârmei electrod, pentru cazul considerat mai sus și anume excentricitate $e=1,5$ mm, sârma avansează cu pasul $p = 2e = 3$ mm.

Având în vedere că durata cursei pasive $T_b = 0,02$ s, rezultă că, pentru o viteză de topire $v_{ts}=66,5$ mm, se obține prin regula de trei simplă o modificare a lungimii arcului electric x dată de relația:

$$x = v_{ac} \cdot T_b = 66,5 \cdot 0,02 = 1,33 \text{ mm} \quad (4.32)$$

În concluzie, o modificare a lungimii arcului electric, în perioada cursei pasive de blocare a sârmei electrod, de aproximativ 1,3 mm, este prea mică pentru a determina stingerea arcului în această perioadă. Prin urmare, în realitate arcul arde fără întreruperi.

În figura 4.10 se prezintă graficul de variație teoretică a curentului pulsat în timp, respectiv parametrii curentului pulsat, generat cu ajutorul sistemului de avans prin impulsuri mecanice a sârmei electrod.

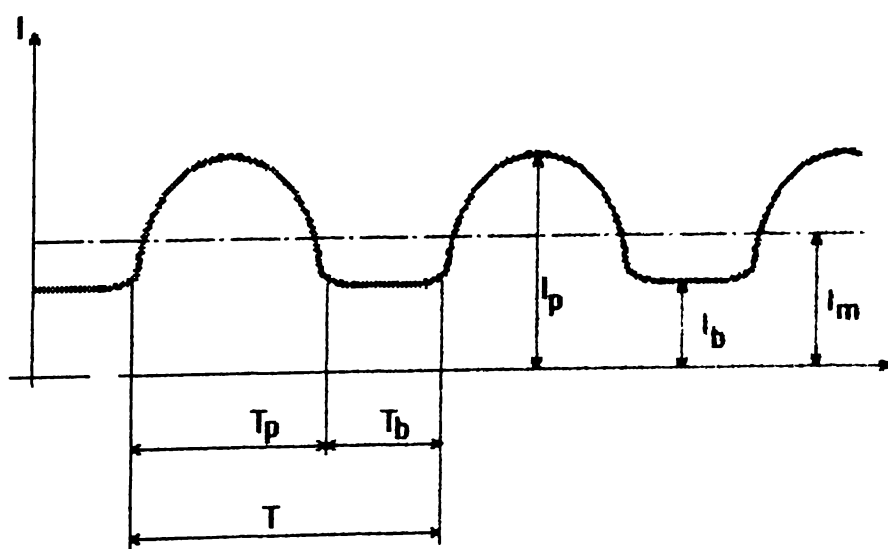


Figura 4.10. Variația teoretică a curentului la folosirea sistemelor de avans prin impulsuri

Determinarea analitică a curbei de variație a curentului pulsat din figura 4.10 este foarte greu de realizat, având în vedere complexitatea sistemului și interacțiunile care intervin: frecări, forțe inerțiale variabile în timp, element elastic (tubul flexibil de ghidare), patinări ale sârmei electrod, etc.

CAPITOLUL V

CERCETĂRI EXPERIMENTALE

[7 subcapitole, 53 pagini, 52 figuri (20 poze, 23 oscilograme). 9 tabele, 14 relații de calcul]

5.1. Cercetări privind funcționarea sistemelor de avans și influența avansului prin impulsuri asupra modului de transfer a picăturii și a îmbinării sudate

Cercetările experimentale au urmărit punerea în funcțiune a sistemelor de avans prin impulsuri realizate, urmărirea modului de lucru a acestora, analiza stabilității arcului electric și a stropirilor, influența parametrilor de impuls, amplitudine-frecvență, asupra geometriei cusăturii sudate și a structurii metalografice, influența avansului pulsat asupra calității îmbinării, influența gazului de protecție asupra fenomenelor de transfer, [70], [76], etc.

Cercetările experimentale au constat în efectuarea unor depuneri de metal pe table de oțel utilizând două gaze de protecție frecvent utilizate la sudare, dioxidul de carbon, respectiv amestecul bogat în argon Corgon 18 (82% Ar + 18% CO₂). Rațiunea utilizării celor două gaze de protecție este justificată de influența, bine cunoscută de altfel a gazului de protecție, alături de mărimea curentului de sudare, asupra modului de transfer a picăturii de metal la sudarea MIG/MAG. Depunerile s-au efectuat în următoarele condiții:

- metalul de bază: OL 37; s = 10 mm;
- marca sârmei electrod: OK Autrod 12.51 (G3Si); d_s = 1.2; 1.6 mm;
- Fluxofil 31 (sârmă tubulară); d_s = 1.6 mm (ESAB);
- debitul de gaz: 15l/min;
- lungimea capătului liber: 12 – 18 mm;

5.1.1. Instalația de sudare

Pentru efectuarea cercetărilor experimentale a fost concepută și realizată o instalație de sudare mecanizată, pe baza dotărilor existente în laboratoarele catedrei, [16]. Aspectul de ansamblu al instalației de sudare cu părțile principale sunt prezentate în figura 5.1.

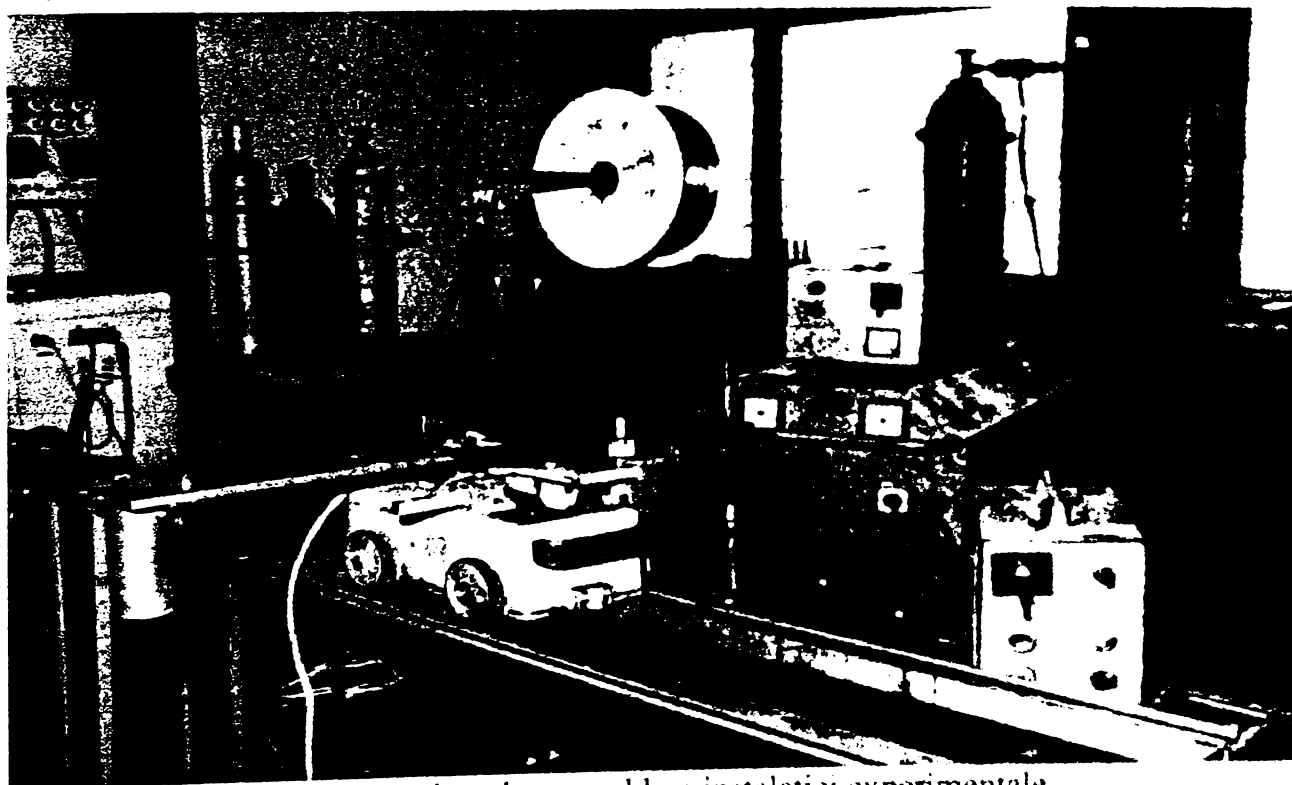


Figura 5.1. Vedere de ansamblu a instalației experimentale

- 1) Sursa de sudare, RSC 400 cu următoarele caracteristici tehnice:
 - tensiunea de alimentare : 3 x 380 V la 50 Hz;
 - curentul de sudare nominal : I_n = 400 A la DA = 60%;
 - tensiunea de mers în gol: U₂₀ = 23 - 30 - 37 - 44 - 51 V (cu reglaj în trepte și reglaj fin cu amplificator magnetic);
 - forma caracteristicii externe U_s = f(I): rigidă, ușor coborâtoare (2V/100 A).
- 2) tractorul universal de tăiere, TUT cu următoarele caracteristici:

- tensiunea de alimentare: 220 V la 50 Hz;
 - domeniul de reglare a vitezei de sudare: $v_s = 0 - 200$ cm/min;
 - antrenare: motoreductor de curent continuu de tip MRF ($U_a = 42$ V, C.C.);
- 3) sistemul de avans prin impulsuri al sârmei electrod: cu dispozitiv de prindere cu șaibă, caracterizat prin:
- viteza de avans a sârmei electrod: $v_{as} = 1,5 - 15$ m/min;
 - frecvența impulsurilor: $f = 5 - 80$ (240) Hz;
 - amplitudinea impulsurilor (pasul de avans): $p = 0,5 - 3$ mm;
 - diametrul sârmei electrod: $d_s = 0,8 - 1,0 - 1,2 - 1,6$ mm;
 - acționare: motor de curent continuu cu excitație separată de tip MRF (fără reductor): $P = 120$ W; $n = 5000$ rot./min.
- 4) capul de sudare;
- 5) cutia de alimentare și comandă a sistemului de avans al sârmei electrod;
- 6) accesorii: masa cu calea de rulare, cutie de alimentare tractor, butelie de gaz, bobină de sârmă, cabluri și furtune de alimentare, etc..

5.1.2. Analiza sudării în dioxid de carbon

Au fost efectuate un număr mare de depuneri, urmărind funcționarea sistemului de avans și influența globală a avansului prin impulsuri, la diferite viteze medii de avans a sârmei electrod prin modificarea succesivă a parametrilor de impuls (amplitudine – frecvență), la schimbarea tipului sârmei (sârmă plină sau tubulară) și a diametrului acesteia. Din probele sudate au fost prelevate transversal șlifuri metalografice pentru evidențierea aspectului depunerilor și a geometriei acestora. Pentru evidențierea geometriei depunerilor șlifurile au fost prelucrate (șlefuite) și atacate cu Nital 10%.

Valorile parametrilor tehnologici de sudare, condițiile în care s-au făcut depunerile și elementele geometrice ale acestora, sunt prezentate în tabelele 5.1, 5.2, 5.3, analizându-se influența frecvenței impulsurilor la amplitudine (pas de avans) constantă, [72], [73].

Influența amplitudinii (pasului) variabile a impulsului la frecvența constantă și determinările aferente sunt prezentate în tabelul 5.4.

Aspectul microscopic al geometriei depunerilor este prezentat selectiv (din motive de spațiu) în figura 5.2.

Cercetările preliminare au permis obținerea unor regimuri de sudare "optime" care au permis aplicarea la realizarea unor îmbinări sudate cap la cap. Condițiile de încercare au fost: metalul de bază OCS 52.5k, $s = 10$ mm, marca sârmei S10 Mn1SiNi1Ti, $d_s = 1,2$ mm, $Q = 15$ l/min, $l_{cl} = 15$ mm. Parametrii tehnologici de sudare sunt prezentați în tabelul 5.5.

Analiza geometriei depunerilor arată proporționalitatea evidentă dintre parametrii impulsurilor, mărimea amplitudinii, respectiv frecvența și elementele geometrice ale acestora în special pătrunderea și supraînălțarea. Deși nu a interesat în mod deosebit estetica depunerilor se remarcă că cele mai bune rezultate s-au obținut pentru regimurile tehnologice (3), (8), (10), (13). Aprecierea s-a făcut luând în considerare coeficientul de formă al depunerii ($\psi = b/p$), respectiv mărimea supraînălțării.

În ceea ce privesc stabilitatea arcului electric, modul de transfer al picăturii, respectiv nivelul stropirilor se pot trage următoarele concluzii:

- ✓ La cele mai multe regimuri se remarcă un nivel mai ridicat al tensiunii arcului electric comparativ cu sudarea standard, cu o valoare de 2–4 V, impus de nevoia asigurării stabilității arcului și reducerea stropirilor.
- ✓ În cazul parametrilor tehnologici de sudare specifici domeniului de transfer prin scurtcircuit folosirea avansului prin impulsuri a sârmei electrod conduce la o instabilitate mare a arcului electric caracterizată în special prin stropiri foarte mari din baia metalică. Practic sudarea în acest domeniu nu se poate desfășura în condiții normale. Lungimea mai redusă a arcului electric în acest caz (lungimea arcului în CO₂ este mai mică decât în amestecuri de gaze bogate în argon) conduce la producerea unor scurtcircuite puternice între sârma electrod și baia de metal

Tabelul 1. Parametrii tehnologici de sudare la $d_s = 1,2$ mm. Influența frecvenței asupra geometriei depunerii

Notarea depunerii	Parametrii tehnologici de sudare				Elementele geometrice ale depunerii			Frecvența impulsurilor f (Hz) (A – amplitudinea impulsului)
	I_s (A)	U_a (V)	v_s (cm/min)	Vas (m/min)	Pătrunderea p (mm)	Supraînălțarea h (mm)	Lățimea b (mm)	
A	200	30	50	4,2	5	2,5	8	35
B	300	28	65	6,5	7	5	7	54
C	320	38	65	6,7	7,5	5,5	13	56
D	300	28	60	6,5	7	5	10	54
E	200	32	60	4,2	5	3	11	35
F	200	32	65	4,2	5	3,5	11	35
G	150	32	60	3,4	3	2	11	28
H	185	32	60	3,8	4	2,5	9,5	32
I	250	30	60	5	6	33,5	8,5	42
J	350	30	60	7,3	8	4,5	8,5	61
K	350	30	65	7,3	8	5	13	61
L	350	38	60	7,3	8	4,5	5,5	61
M	220	24	60	4,4	6	3	6	37
N	200	30	60	4,2	5	33	8	35
O	180	27	60	3,75	4	2,5	9	31
P	200	30	60	4,2	5	3	10	35
R	200	31	65	4,25	5	3,5	10,5	35,4
S	205	31	65	4,25	5	3,5	10,5	35,4
T	190	28	60	3,85	4,5	3	9	32,1
U	220	28	65	4,4	6	4	9	37
V	210	30	60	4,3	5,5	3	8,5	36
X	200	32	60	4,2	5	3	8	34

Tabelul 2. Parametrii tehnologici de sudare la $d_s = 1,6$ mm (sărmă plină). Influența frecvenței impulsurilor asupra geometriei depunerii

Notarea depunerii	Parametrii tehnologici de sudare				Elementele geometrice ale depunerii			Frecvența impulsurilor f (Hz)
	I_s (A)	U_a (V)	v_s (cm/min)	v_{as} (m/min)	Pătrunderea p (mm)	Suprainălțarea h (mm)	Lățimea b (mm)	
1	260	30	65	3	6	5	8.5	25
2	300	31	60	3.7	7	5	9	31
3	300	31	50	3.7	7	4	9	31
4	300	35	60	3.7	7	5	11	31
5	300	35	55	3.7	7	3.5	11	31
6	270	33	55	3.15	6.5	3.5	10	26
7	250	32	50	2.5	6	2.5	9.5	21
8	220	33	50	2.3	5	2	10	19
9	220	33	50	2.3	5	3	10	19
10	280	33	60	3.35	6.5	4	10	28
11	300	34	60	3.7	7	4	10.5	31

Tabelul 3. Parametrii tehnologici de sudare la $d_s = 1,6$ mm (sărmă tubulară). Influența frecvenței impulsurilor asupra geometriei depunerii

Notarea depunerii	Parametrii tehnologici de sudare				Elementele geometrice ale depunerii			Frecvența impulsurilor f (Hz)
	I_s (A)	U_a (V)	v_s (cm/min)	v_{as} (m/min)	Pătrunderea p (mm)	Suprainălțarea h (mm)	Lățimea b (mm)	
I	250	31	50	4.5	6	2.5	9.5	37
II		32	55		6	3	10	
III		30	55		5.5	3	9	
IV		31	50		6	2.5	9.5	
V		33	50		6	2.5	10.5	
VI		31	50		6	2.5	9.5	

Tabelul 4. Parametrii tehnologici de sudare. Influența amplitudinii impulsului (pasului de avans)

Notarea depunerii	Parametrii tehnologici de sudare				Parametrii impulsului			Elementele geometrice ale depunerii				
	I _s (A)	U _a (V)	v _s (cm/min)	v _{as} (m/min)	A (mm)	Nr. impuls./rot	p (mm)	b (mm)	h (mm)	P (mm)	B	
1	250	32	36	5	-	-	3.5	11	3.5	4.5	14	
2	320	32	36	5	-	-	4	11.5	3.5	5	14.5	
3	250	32	36	5	4	3	4.5	11	4	5.5	13	
4	250	32	36	5	5	3	6.5	10.5	5	8	12.5	
6	250	32	36	5	4	2	4	10.5	3.5	5	13.5	
8	250	32	36	5	4	2	4	11	3.5	5	13	
10	250	32	36	5	2	1	3.5	12	3.5	5	14	
11	250	32	36	5	3	3	5	11	4.5	6	13	
13	250	32	36	5	3	2	4	11.5	4	4	13.5	
5	320	32	36	6.9	4	2	5	10	3	5.5	12.5	
7	320	32	36	6.9	4	2	5	10.5	5	6	13	
9	320	32	36	6.9	2	1	4	10.5	5	5	12.5	
14	320	32	36	6.9	3	3	6.5	11.5	3	8	14	

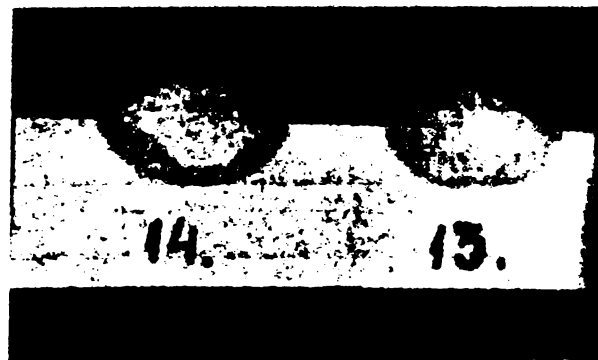
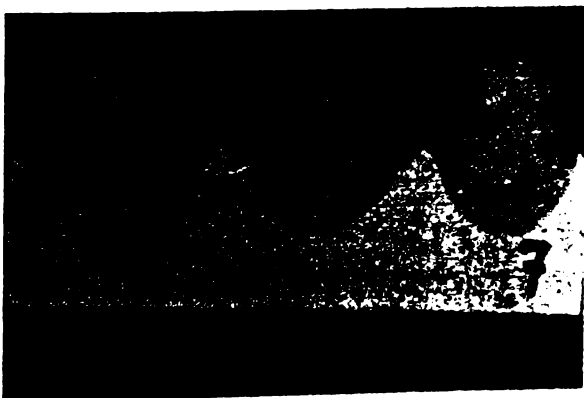
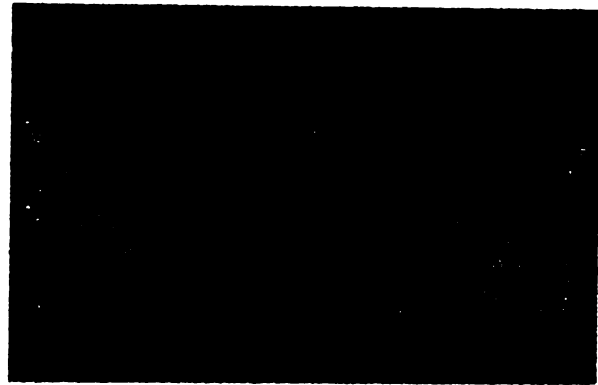
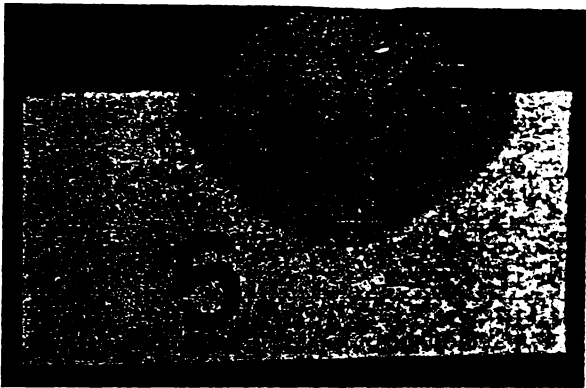
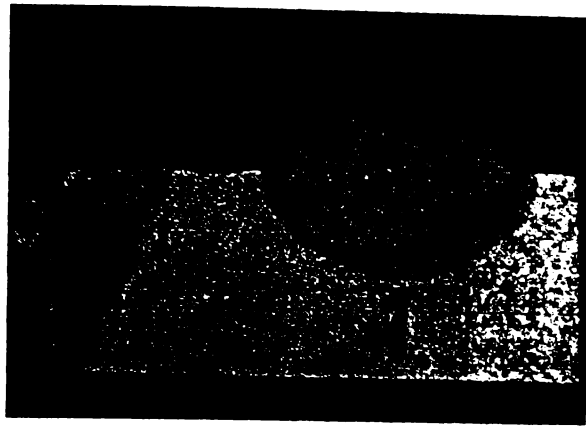


Figura 5.2. Aspectul macroscopic al depunerilor (prezentare selectivă)

Tabelul 5. Tehnologii de sudare

Număr îmbinare	Nr. treceți	I _s (A)	U _a (V)	v _s (cm/min)	v _{as} (m/min)	e (mm)	f (Hz)	d _s (mm)
C1V	1-3	250	31	50	5	0	-	1.2
C1V	4-5	250	31	65	5	0	-	1.2
C2V	1-3	250	31	50	5	0	-	1.2
C2V	4	250	31	65	5	0	-	1.2
1	1-6	200	32	60	4.2	0	35	1.2
2	1-3	200	32	60	4.2	0	35	1.2
2	4	200	32	60	4.2	0	35	1.2
2	5	230	32	60	4.5	0	37.5	1.2
2	5	180	32	60	3.8	0	32	1.2
3	1-5	200	32	60	4.2	0	35	1.2
4	1	300	30	55	6.5	1	54	1.2
4	2-5	200	30	60	4.2	1	35	1.2
4	6	200	30	50	4.2	1	35	1.2
5	1-3	200	30	50	4.2	1.5	35	1.2
5	4	200	30	60	4.2	1.5	35	1.2
5	5-6	180	30	50	3.8	1.5	32	1.2
6	1	200	30	50	4.2	0	35	1.2
6	2-3	220	30	50	4.4	0	37	1.2
7	1-3	250	31	55	5	0	42	1.2
7	4-5	270	35	50	5.6	0	47	1.2
8	1-2	250	31	60	5	0	42	1.2
8	3-4	250	33	60	5	0	42	1.2
9	1	250	31	60	5	1	42	1.2
9	2	270	31	50	5.6	1	47	1.2
9	3-4	270	33	55	4.4	1	37	1.2
10	1	250	31	60	5	2	42	1.2
10	2	250	31	55	5	2	42	1.2
10	3	270	35	50	5.6	2	47	1.2

Tabelul 5. (continuare)

Număr îmbinare	Nr. treceți	I _s (A)	U _a (V)	v _s (cm/min)	v _{as} (m/min)	e (mm)	f (Hz)	d _s (mm)
11	1 - 4	300	35	60	6.5	0	54	1,2
12	1	240	33	50	4,7	0	41	1,2
12	2	270	33	50	5,6	0	44	1,2
12	3	220	33	50	4,4	0	37	1,2
12	4	220	33	68	4,4	0	37	1,2
13	1	250	30	50	2,5	1	21	1,6
13	2	220	30	50	3,3	1	19	1,6
13	3	250	30	50	2,5	1	21	1,6
14	1	250	30	50	2,5	0	21	1,6
14	2-3	220	31	50	2,3	0	19	1,6
15	1-2	250	30	50	2,5	0	21	1,6
15	3	270	30	50	2,7	0	22,5	1,6
15	4	250	30	50	2,5	0	21	1,6
16	1	270	30	50	2,7	0	22,5	1,6
16	2-4	250	30	50	2,5	0	21	1,6
17	1	250	30	60	2,5	1,5	21	1,6
17	2	230	30	61	2,35	1,5	20	1,6
17	3	250	30	61	2,5	1,5	21	1,6
17	4	250	30	69	2,5	1,5	21	1,6
18	1	250	30	61	2,5	2	21	1,69
18	2	270	30	61	2,7	2	22,5	1,6
18	3-4	250	30	61	3,5	2	21	1,6
19	1-5	250	30	61	2,5	1	21	1,6
20	1-5	250	30	61	2,5	0	21	1,6
21	1-2	250	33	50	4,5	0	37,5	1,6 *
21	3	230	33	50	4,2	0	35	1,6 *
21	4	220	33	50	4,1	0	34	1,6 *
22	1-3	250	32	50	4,5	1	37,5	1,6 *
22	4	250	32	65	4,5	1	37,5	1,6 *
23	1	350	32	50	6,1	1,5	51	1,6 *
23	2	250	32	50	4,5	1,5	37,5	1,6 *
23	3	230	32	50	4,2	1,5	35	1,6 *

* Sudare cu sârmă tubulară Fluxofil 31

topit (practic în timpul unui impuls capătul sârmei intră în baie fără să se topească, la limită atingând fundul băii) însoțite de expulzări de metal din baie. Folosirea unor regimuri de sudare specifice domeniului arcului intermediar, respectiv arcului lung (curent de sudare mare, respectiv tensiunea de arc ridicată) face desfășurarea procesului de sudare posibilă. Se obține chiar o stabilitate satisfăcătoare a arcului electric. Utilizarea unor tensiuni mai ridicate a arcului electric, comparativ cu sudarea clasică, pentru obținerea unei stabilități acceptabile conduce la creșterea diametrului picăturii de metal topit însoțită de o creștere a nivelului stropirilor și a pierderilor de material de adaos, considerabil mai mari decât la sudarea clasică. Din punct de vedere al geometriei cusăturii creșterea tensiunii arcului este binevenită conducând la creșterea lățimii cusăturii, respectiv diminuarea supraînălțării acesteia;

- ✓ Sudarea în domeniul arcului lung asigură cele mai bune rezultate. Picăturile au însă dimensiuni mari, specifice transferului globular (gravitațional) cu pierderi însemnate de material. Arcul este stabil, geometria cusăturii acceptabilă. O tensiune de arc prea mică determină creșterea numărului de scurtcircuite, implicit creșterea stropirilor și totodată o geometrie defavorabilă cu lățime mică și supraînălțare mare a cusăturii. Creșterea exagerată a tensiunii arcului crează probleme în asigurarea protecției picăturii de metal și a băii topite, respectiv chiar o creștere a numărului de stropi (aceștia nu mai ajung în baie, ci sar alături pe componente);

În concluzie se apreciază că utilizarea avansului prin impulsuri a sârmei electrod nu produce modificarea modului de transfer a picăturii de metal dacă gazul de protecție utilizat este dioxidul de carbon în proporție de 100%. Mai mult, improșcările de material prin stropi sunt mai mari ca la sudarea clasică cu avans continuu a sârmei electrod, iar arcul electric este mai instabil.

Creșterea stropirilor în acest caz se poate explica prin accelerarea picăturii de metal la trecerea prin coloana arcului electric determinată de acțiunea forței inertiiale care face ca picătura să plonjeze în baia de metal cu viteză mare producând improșcări de metal din baia topită. Datorită dimensiunilor mari ale picăturii și a accelerației de nivel ridicat forța inercială are valori considerabile.

Efectul acestei accelerări puternice a picăturii de metal la sudarea cu valori mari de curent este apariția creștăturilor marginale foarte adânci, defect caracteristic, frecvent întâlnit în timpul cercetărilor experimentale, care probabil va limita aplicarea procedurii de sudare în domeniul puterilor mari ale arcului electric.

5.1.3. Analiza sudării în amestecuri de gaze

Pe baza observațiilor făcute în cadrul experimentărilor din subcapitolul precedent încercările experimentale s-au concentrat pe analiza fenomenelor în domeniul transferului prin scurtcircuit respectiv al transferului intermediar.

Valorile parametrilor tehnologici utilizați la realizarea depunerilor sunt prezentate în tabelul 5.6, [72], [74]. Sudarea s-a desfășurat în următoarele condiții: marca sârmei electrod OK Autrod 12.51 (G3Si), $d_s = 1.2$ mm. gazul de protecție Ar + 10% CO₂, Q = 15 l/min, $v_s = 30$ cm/min.

Tabelul 5.6. Regimuri tehnologice de sudare a depunerilor

Nr. ctr.	A (p) (mm)	f (Hz)	v_{as} (m/min)	I_{sm} (A)	U_{am} (V)	Observatii
1	1	60	3,6	130	17	Transfer prin scurtcircuit Modificarea tipului de transfer specific arcului scurt și intermediar, caracterizat prin scurtcircuitarea arcului electric, într-un transfer fără scurtcircuite (asemănător transferului în curent pulsant)
2	1	80	4,8	200	19	
3	3	25	4,0	150	22	
4	1	55	3,0	110	19	
5	3	25	4,5	160	21	
6	3	50	9,6	260	28	
7	3	33	6,0	170	27	
8	3	40	7,4	180	27	

Analiza fenomenelor în cazul transferului prin scurtcircuit (regimurile 1 și 2) conduce la următoarele concluzii:

- ✓ stabilitatea arcului este bună (comparabilă cu sudareastandard), spre deosebire de sudarea în CO₂ 100% când practic procesul de sudare nu este posibil;
- ✓ modul de transfer a picăturii este prin scurtcircuit nesesizându-se diferențe față de cazul avansului continuu al sârmei electrod;
- ✓ nivelul stropirilor este specific transferului prin scurtcircuit caracterizat prin stropiri fine și intense;
- ✓ tensiunea scăzută a arcului electric determină o cusătură de lățime mică și supraînălțare mare, defavorabilă din punct de vedere estetic;

Creșterea ușoară a tensiunii arcului păstrând însă valorile în domeniul transferului prin scurtcircuit conduce la dispariția scurtcircuitelor obținându-se un transfer asemănător cu cel specific arcului pulsant. Cu alte cuvinte, în cazul utilizării amestecului de gaze bogat în argon, antrenarea cu viteză variabilă a sârmei electrod sub forma unor impulsuri mecanice determină modificarea modului de transfer. Desprinderea picăturii la acest nivel al curentului de sudare este favorizată de generarea forței suplimentare, favorabilă desprinderii, denumită forță inerțială, care are o pondere importantă și a cărei natură este determinată de accelerația rezultată din antrenarea cu viteză variabilă a sârmei electrod. Obținerea unui transfer fără scurtcircuit într-un domeniu al parametrilor tehnologici de sudare specific arcului scurt sau intermediar este echivalentă cu cazul sudării în curent pulsant cu toate avantajele legate de aceasta. Acest lucru justifică interesul pentru sistemele de avans prin impulsuri ale sârmei electrod.

În ceea ce privește geometria depunerilor, figura 5.3, se constată o pătrundere relativ redusă corelată cu o lățime și o supraînălțare acceptabile. Tehnologiile de sudare ale celor 3 depuneri corespund regimurilor 1, 3 și 6 din tabelul 5.6.

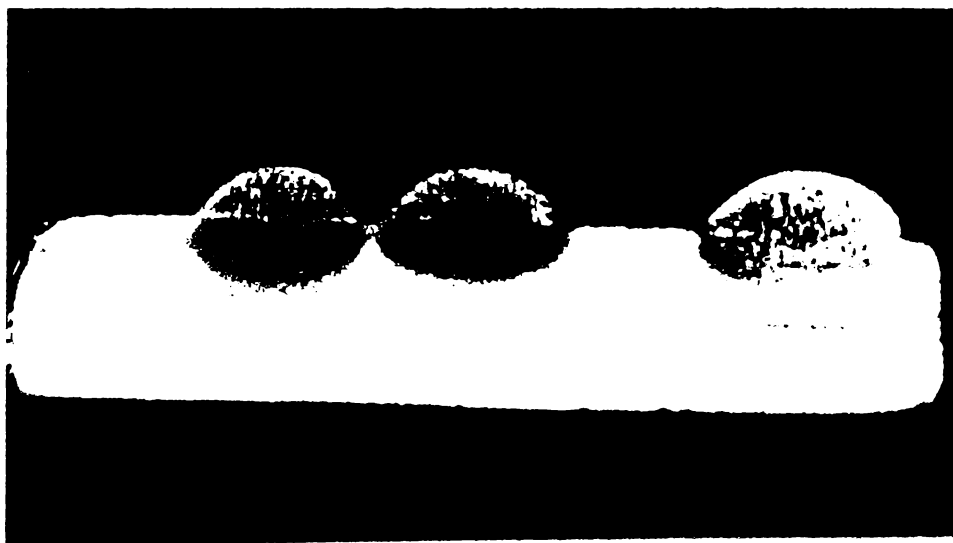


Figura 5.3. Aspectul macroscopic al depunerilor

Din analiza geometriei depunerilor se constată o diluție mică a metalului de bază și dacă corelăm acest aspect cu celelalte elemente geometrice, lățimea și supraînălțarea cusăturii, rezultă la prima vedere că sistemele de avans prin impulsuri ale sârmei electrod s-ar preta perfect la operațiile de încărcare prin sudare în mediu de gaze protectoare. Fenomenul de disipare a energiei în mediu înconjurător ca efect a alungirii arcului electric poate constitui o explicație în acest sens. În sprijinul acestei ipoteze vin și cercetările efectuate în urmă cu mai mulți ani la Catedra de sudură, privind încărcarea prin sudare cu arc vibrator care se aseamănă într-o oarecare măsură cu principiul de funcționare a sistemelor de avans prin impulsuri.

Confirmarea fenomenelor și ipotezelor analizate mai sus este dată de oscilografiera parametrilor tehnologici principali ai arcului electric, *curentul de sudare, respectiv tensiunea arcului*, care permite dezvoltarea teoriei transferului picăturii de metal la sudarea cu avans prin impulsuri a sârmei electrod și înțelegerea mai deplină a fenomenelor și factorilor care guvernează procesele de transfer.

Această analiză se va face din motive lesne de înțeles doar pentru sudarea în amestecuri de gaze bogate în argon și constituie obiectul următoarelor două subcapitole.

5.2. Înregistrarea formei impulsului de curent

Determinările experimentale au urmărit evidențierea următoarelor aspecte:

- 1) determinarea experimentală a formei impulsului de curent generat cu ajutorul sistemelor de avans prin impulsuri;
- 2) studiul comparativ dintre cele două forme de impulsuri determinate analitic și experimental și interpretarea rezultatelor;
- 3) evidențierea unor fenomene și aspecte noi privind transferul picăturii de metal topit comparativ cu sudarea MIG/MAG clasică în curent pulsat.

Încercările experimentale s-au desfășurat în următoarele condiții:

- tipul sistemului de avans prin impulsuri utilizat: cu dispozitiv de prindere cu șaibă;
- sursa de sudare: redresoarele RSC – 400 , respectiv RSC – 400M;
- instrumentul de înregistrare: osciloscopul numeric cu memorie HAMEG;
- instrumentul de măsurare a frecvenței: tahometru digital;
- tractorul de sudare: TUT;
- materiale de sudare:
 - sîrmă electrod: O.K. Autrod 12.51 (G3Si);
 - diametrul sîrmei: 1,2 mm;
 - gazul de protecție: amestecuri bogate în argon Ar + CO₂ (Corgon);
 - debitul de gaz: 15 l/min
 - metalul de bază: OL 37;

5.2.1. Osciloscopul numeric cu memorie HAMEG

Pentru evidențierea semnalelor dintr-un circuit electric, cel mai frecvent, se folosește osciloscopul. În cazul semnalelor variabile (aleatorii) utilizarea osciloscopului clasic nu permite identificarea formei semnalului datorită suprapunerii imaginilor diferite la fiecare baleare a ecranului.

Potrivit studiului analitic privind forma curentului de sudare în cazul utilizării sistemelor de avans prin impulsuri a sârmei electrod, a rezultat clar că acesta este variabil în timp după o lege greu de definit teoretic, respectiv cu o viteză foarte mare, așa cum s-a arătat în capitolul precedent. Pornind de la acest aspect pentru înregistrarea formei de variație a curentului de sudare și a tensiunii arcului electric s-a utilizat un osciloscop numeric cu memorie de tip HAMEG 205/3 cu imprimantă grafică de tip HD 148 HAMEG, [55].

În continuare se prezintă succint (selectiv) principalele aspecte legate de performanțele instrumentului de înregistrare.

5.2.1.1. Caracteristici tehnice:

A. La funcționare în regim analogic (standard):

- ✓ înregistrarea separată a semnalelor pe canalul 1 și/sau canalul 2, respectiv înregistrarea sumei sau diferenței între canalele 1 și 2;
- ✓ funcționarea în regim X – Y între canalul 1 și 2;
- ✓ domeniul de frecvență: max. 20MHz;
- ✓ calibratorul de semnal: cu 10 poziții de la 5mV/cm la 5V/cm;
- ✓ impedanța de intrare: 1MΩ;
- ✓ coeficientul bazei de timp: cu 21 poziții de la 0,2 μs/cm la 1 s/cm;

B. La funcționarea în regim de memorare digitală:

- ✓ cu reîmprospătarea sau cu blocarea imaginii;
- ✓ pentru semnale periodice sau singulare;
- ✓ frecvența maximă de eșantionare: 20 MHz/canal;
- ✓ capacitatea memoriei: 2048 octeți/canal;
- ✓ rezoluția:

- 28 puncte/cm pe verticală;
- 204 puncte/cm pe orizontală;
- ✓ posibilitatea extensiei pe orizontală pentru detalieri la mărimi de 10 ori;
- ✓ funcția DOT-Joiner pentru reprezentarea fidelă a curbei;
- ✓ coeficientul bazei de timp: 18 poziții calibrate de la 10 μ s/cm la 5 s/cm;
- ✓ ieșire analog – digitală pentru imprimantă grafică;
- ✓ timpul de conversie (eșantionare) analog – digital: 50 ns;
- ✓ frecvența maximă a semnalului util: 1MHz;
- ✓ memorare individuală sau comună pentru cele două semnale;

C. Imprimanta grafică

Imprimanta primește semnalul numeric, memorat, de la osciloscop și permite următoarele moduri de tipărire:

- copiere prin comandă manuală;
- copiere automată în concordanță cu declanșarea operației de memorare;
- copiere controlată prin ceas programabil (TIMER);
- memorare într-un buffer a 4 imagini ecran;

Posibilități de programare ale imprimantei:

- ✓ tipărire semnal din memoria osciloscopului;
- ✓ tipărire semnal din memorie plus semnal din buffer;
- ✓ memorare semnal;
- ✓ tipărire semnal cu și fără caroiaj;
- ✓ tipărire data de înregistrare;
- ✓ tipărire pe banda laterală a unor informații legate de reglarea osciloscopului și de tipul undeii utilizate;
- ✓ posibilitatea de reprezentare mărită (zoom) a unora din cele 10 zone a imaginii ecran pe întreaga lățime a hîrtiei;
- ✓ posibilitatea utilizării funcției DOT-JOINER.

5.2.1.2. Setarea osciloscopului

Etapele punerii în funcțiune a osciloscopului la funcționarea cu memorare sunt:

- ✓ punerea sub tensiune (conectare la rețea);
- ✓ reglarea focalizării și a intensității fascicolului;
- ✓ poziționarea pe verticală a axei de simetrie a semnalului pentru cele două canale;
- ✓ poziționarea pe orizontală a începutului baleerii;
- ✓ conectarea sistemului de memorare;
- ✓ poziționarea comutatorului bazei de timp pentru valoarea dorită;
- ✓ poziționarea comutatorului de atenuare pe verticală a semnalelor în pozițiile dorite în funcție de valoarea semnalelor de intrare;
- ✓ conectarea pe declanșare automată sau manuală a baleerii pe orizontală;
- ✓ poziționarea comutatorului de declanșare a impulsului pe poziția DC sau mai avantajos pe poziția LF (low frequency);
- ✓ selectarea modului de memorare (semnal singular sau semnal periodic);
- ✓ selectarea funcționării pe canalul 1, canalul 2 sau simultan 1 și 2;
- ✓ conectarea sondelor corespunzătoare la mufele de intrare;
- ✓ conectarea imprimantei și programarea ei;

5.2.1.3. Schema bloc de măsurare și înregistrare

În figura 5.4 este prezentată schema bloc utilizată pentru măsurarea și înregistrarea formei de variație a parametrilor tehnologici principali de sudare, curentul de sudare, respectiv tensiunea arcului electric.

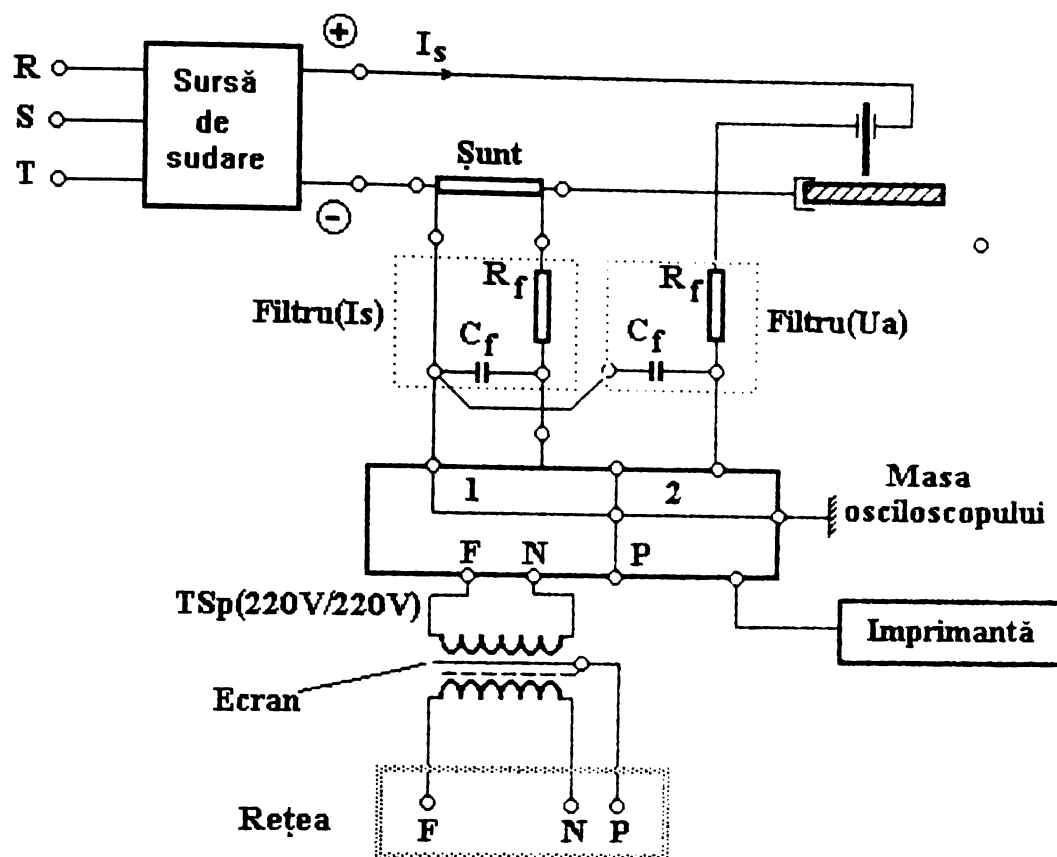


Figura 5.4. Schema bloc de măsurare și înregistrare a parametrilor tehnologici principali de sudare

În circuitul de sudare se montează un șunt electric corespunzător valorii curentului de sudare ($C_s = 2A/mV$). Ieșirile de semnal de pe șunt, normal, trebuie introduse într-un filtru $R_f C_f$ pentru reducerea la minim a semnalelor de bruiere (în special în cazul utilizării surselor cu invertor). În locul unui șunt normal și a unui etaj de filtrare s-a folosit un șunt special cu autoecranare (tip țevă). De la filtru, semnalul util este introdus pe canalul 1 al osciloscopului. Tensiunea arcului este introdusă tot într-un filtru $R_f C_f$ pentru reținerea semnalelor de bruij furnizate de sursa de sudare, după care se introduce pe canalul 2. Frecvența de tăiere a filtrului se calculează aproximativ cu relația $f = 1/2\pi RC$ și pentru o frecvență de tăiere de 1450 Hz rezultă valorile elementelor de filtrare și anume $R_f = 5k\Omega$, respectiv $C_f = 22nF$.

Osciloscopul este alimentat de la rețea printr-un transformator de separare cu raportul de transformare 1:1 și prevăzut cu ecran metallic pus la masă între cele 2 înfășurări (primară și secundară). Acest transformator de separare evită pe de o parte curenții de circulație interioară prin circuitul de masă al osciloscopului și a piesei de sudat și pe de altă parte blochează eventuale semnale de bruij din rețeaua de alimentare. De asemenea prin acest transformator se întreprinde masa fizică a osciloscopului de legătura de protecție la pământ și de legătura de masă a piesei de sudat evitându-se distrugerea accidentală a osciloscopului prin conexiuni greșite.

5.2.2. Tahometrul digital

Pentru măsurarea turației motorului de antrenare, respectiv pentru determinarea frecvenței impulsurilor sârmei electrod se folosește un tahometru digital de mare precizie, [96].

Caracteristici tehnice:

- principiul de măsurare
 - stroboscopic (PHOTO TACH.) (rot/min);
 - prin contact (CONTACT TACH) (rot/min., m/min);
- domeniul de măsurare: 0,5 – 100000 rot/min.:
 - tahometru stroboscopic: 5 – 99999 rot/min;
 - tahometru prin contact (pentru turație): 0,5 – 19999 rot/min;
 - tahometru prin contact (pentru viteze): 0,05 – 1999,9 m/min;

- rezoluția:
 - tahometru stroboscopic: = 0,1 rot/min în intervalul (0,5 – 999,9 rot/min);
= 1 rot/min (peste 1000 rot/min);
 - tahometru prin contact (pentru turație):
= 0,1 rot/min în intervalul (0,05 – 99,99 rot/min);
= 1 rot/min (peste 1000 rot/min);
 - tahometru prin contact (pentru viteze):
= 0,01 m/min în intervalul (0,05 – 99,99 m/min);
= 0,1 m/min (peste 100 m/min);
- acuratețea: $\pm (0,05\%+1 \text{ digit})$;
- perioada de eșantionare:
 - 1 s la peste 60 rot/min (Photo tach.);
 - 1 s la peste 6 rot/min (Contact tach.);
- distanța de detectare stroboscopică: 50 – 150 mm (max. 300 mm funcție de lumina ambientală)
- măsurarea timpului: cristal de cuarț;
- selectarea domeniului de lucru: automat;
- comanda electronică: circuit LSI, chip de microcomputer;
- alimentare: baterii 4x1,5 V (UM-3);
- temperatura de operare: 0 – 50 °C;
- dimensiuni: 215x65x38 mm;
- masa: 300g;
- mod de memorare: ultima valoare; valoarea maximă; valoarea minimă;
- accesorii:
 - bandă reflectorizantă, 600 mm;
 - adaptor conic pentru măsurarea turației;
 - adaptor inelar (roțiță) pentru măsurarea turației;
 - adaptor cilindric (roată) pentru măsurarea vitezei de deplasare.

5.3. Analiza experimentală a formei impulsului de curent

Încercările experimentale au urmărit determinarea modului de variație a curentului de sudare (curentului prin arc) la antrenarea sârmei electrod cu ajutorul sistemului de avans prin impulsuri cu dispozitiv de prindere cu șaibă, [23], [72], [73]. Încercările s-au orientat pe două direcții principale și anume:

- determinarea formei de variație a curentului în domeniul vitezelor de avans reduse ale sârmei electrod specifice modului de transfer prin scurtcircuit;
- determinarea formei de variație a curentului în domeniul vitezelor de avans mari ale sârmei electrod specifice modului de transfer prin pulverizare;

În continuare se analizează diagramele de variație a parametrilor tehnologici principali ai arcului electric, *curent de sudare* I_s – *tensiunea arcului* U_a , oscilografiate în cele două cazuri.

În figura 5.5 se prezintă oscilograma celor 2 parametri de sudare I_s , respectiv U_a în cazul transferului prin scurtcircuit. Pe canalul CH₁ se prezintă modul de variație al curentului de sudare, iar pe canalul CH₂ modul de variație al tensiunii arcului electric.

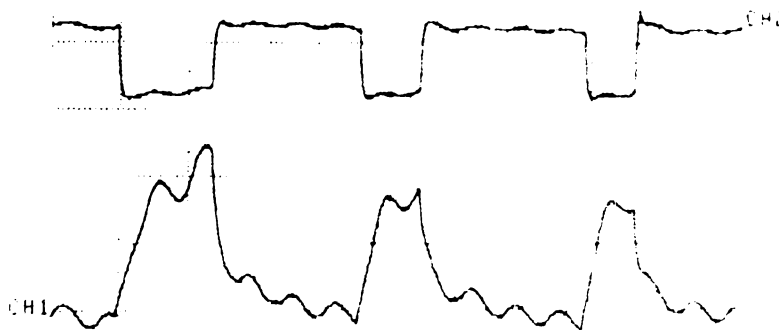


Figura.5.5. Oscilograma parametrilor tehnologici de sudare: curentul de sudare – tensiunea arcului

Condițiile tehnice ale determinării și măsurării:

- sursa de sudare: RSC - 400;
- gazul de protecție: Ar + 10% CO₂ (Q = 12 l/min);
- pasul de avans a sârmei electrod: p = 1 mm (e = 0,5 mm);
- frecvența impulsurilor pe sârmă: f = 66 Hz;
- viteza medie de avans a sârmei electrod: $v_{ac} = p \cdot f \cdot 60 \cong 4$ m/min;
- baza de timp B_t: 5 ms/div;
- constanta măsurării curentului: C_I = 100 A/div;
- constanta măsurării tensiunii: C_U = 12,5 V/div;
- baza de referință a curentului: diviziunea 0;
- baza de referință a tensiunii arcului: diviziunea 4;

Din analiza oscilogramei se constată că nu apar diferențe evidente între modul de variație a celor doi parametri I_s și U_a în cazul avansului prin impulsuri a sârmei electrod, respectiv a avansului continuu (standard) a acesteia. Cu alte cuvinte în cazul transferului prin scurtcircuit specific vitezelor de avans reduse ale sârmei electrod (de exemplu în cazul sârmei electrod cu diametrul de 1,2 mm din oțel nealiat la folosirea amestecurilor de gaze bogate în argon, viteza de avans specifică transferului prin scurtcircuit variază aproximativ în domeniul 2,5 – 6 m/min) nu se poate vorbi de apariția unui curent pulsant în circuitul de sudare ca efect a antrenării în impulsuri a sârmei electrod cu o anumită amplitudine și frecvență, cu viteză de avans variabilă în timpul unui impuls. Explicația acestui fenomen

este dată de suprapunerea etapelor de transfer a picăturii prin arc, respectiv a arderii arcului, cu fazele avansului sârmei electrod. Desfășurarea fenomenelor decurg în felul următor, figura 5.6:

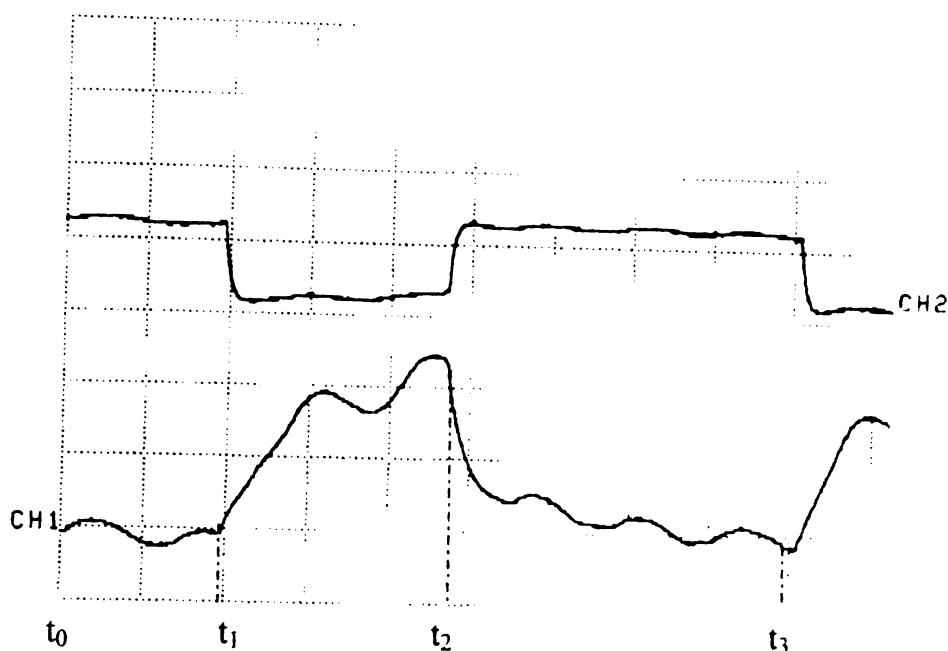


Figura 5.6. Desfășurarea etapelor de transfer a picăturii de metal

În intervalul ($t_0 - t_1$) arcul electric arde între vârful sârmei electrod și componentele de sudat, sârma electrod fiind blocată. Metalul topit se acumulează în vârful sârmei sub forma unei picături (sfere).

La timpul t_1 , are loc avansul sârmei electrod înspre baia metalică (cursa activă). Se produce scurtcircuitarea arcului electric de către picătura de metal formată în vârful sârmei în perioada de ardere a arcului. Tensiunea arcului scade aproape la 0, iar curentul de sudare crește la valoarea curentului de scurtcircuit (timpul $t_1 - t_2$). În funcție de tensiunea arcului electric, respectiv de lungimea acestuia, în această etapă pot să apară două aspecte.

Dacă lungimea arcului este prea mică avansul sârmei ar putea să aibă loc și în perioada de scurtcircuit cu efecte asupra valorii curentului de scurtcircuit, (vezi valorile diferite ale curentului de scurtcircuit pentru cele trei scurtcircuite înregistrate în oscilogramă). În caz extrem la lungime foarte mică a arcului și amplitudine mare a impulsului mecanic pătrunderea sârmei în baie și atingerea (lovirea) fundului acesteia poate produce scurtcircuitări puternice cu efecte asupra stabilității arcului și a creșterii nivelului de stropiri. Dacă lungimea arcului este prea mare este posibil ca avansul sârmei să nu ducă la scurtcircuitarea arcului electric.

La timpul t_2 are loc blocarea sârmei electrod (sfârșitul cursei active) care suprapusă cu valoarea ridicată a curentului de scurtcircuit determină strangularea punții de metal topit dintre sârmă și baia metalică sub acțiunea forțelor "pinch" de valori mari și desprinderea picăturii din vârful sârmei. Sub acțiunea tensiunilor superficiale picătura de metal este atrasă în baia metalică. Se produce reamorsarea arcului electric care arde în intervalul de timp ($t_2 - t_3$). În această etapă, sub acțiunea arcului electric are loc topirea vârfului sârmei, sârma electrod fiind blocată, cu tendința de lungire a arcului și în caz extrem cu pericolul de stingere al acestuia. Această alungire a arcului este determinată pe de o parte de blocarea vitezei de avans a sârmei, iar pe de altă parte de adunarea metalului topit din vârful sârmei sub acțiunea tensiunilor superficiale sub forma unei sfere de metal topit. În condiții normale însă, stingerea arcului nu are loc deoarece anterior pericolului de alungire la o valoare critică se produce din nou antrenarea cu un pas a sârmei electrod înspre baia de metal topit ceea ce determină scurtarea arcului electric și producerea scurtcircuitării acestuia, timpul t_3 . În continuare fenomenele se reiau și se desfășoară așa cum s-au prezentat mai sus.

În concluzie perioada de ardere a arcului electric coincide cu perioada blocării sârmei, respectiv perioada de scurtcircuit se suprapune peste perioada de avans a sârmei electrod. Această, din urmă,

suprapunere face să nu se observe evident influența avansului variabil a sârmei electrod asupra modificării curentului, respectiv fenomenul de scurtcircuitare a arcului electric să nu permită evidențierea apariției unei variații (impuls) de curent ca efect a variației vitezei de avans a sârmei electrod în timpul impulsului mecanic.

Această ipoteză este confirmată și de înregistrările făcute pentru alte valori medii ale vitezei de avans a sârmei electrod specifice domeniului transferului prin scurtcircuit, stabilite prin modificarea parametrilor mecanici ai impulsului, frecvență respectiv pas de avans (excentricitate).

În figurile 5.7 și 5.8 sunt prezentate oscilogrammele de variație ale parametrilor I_s , respectiv U_a , pentru două viteze medii de avans ale sârmei electrod $v_{as1} > v_{as2}$, realizate în condiții similare cu cele prezentate anterior. Modificarea vitezei de avans a sârmei s-a obținut prin modificarea turației motorului, respectiv a frecvenței impulsurilor mecanice aplicate sârmei electrod: $f_1 \cong 60$ Hz. (figura 5.7), respectiv $f_2 \cong 80$ Hz, (figura 5.8).

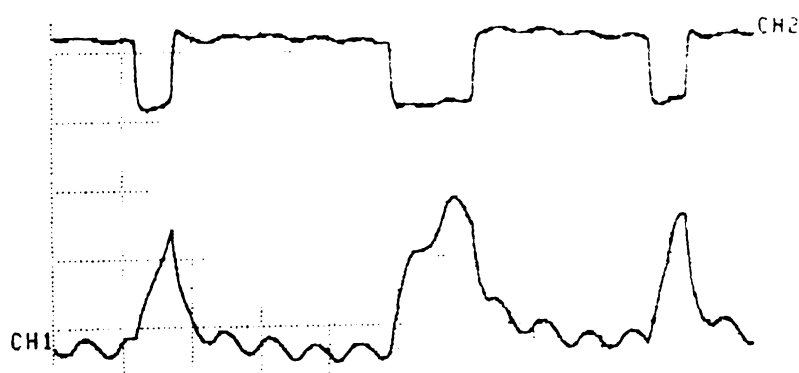


Figura 5.7. Oscilograma parametrilor tehnologici I_s , U_a la $f_p = 60$ Hz

Se observă că o creștere a vitezei de avans a sârmei electrod, respectiv creșterea frecvenței impulsurilor conduce la creșterea proporțională, și de așteptat de altfel, a frecvenței de scurtcircuit. În plus, corelația dintre frecvența impulsurilor sârmei electrod și frecvența scurtcircuitelor confirmă legătura, descrisă anterior, dintre etapele specifice transferului picăturii și fazele corespunzătoare mișcării (antrenării) sârmei electrod.



Figura 5.8. Oscilograma parametrilor tehnologici I_s , U_a la $f_p = 80$ Hz

Această sincronizare dintre frecvența scurtcircuitelor și frecvența impulsurilor de avans ale sârmei electrod arată că sunt posibile controlul și dirijarea modului de transfer a picăturii la sudarea cu

transfer prin scurtcircuit, ceea ce reprezintă o noutate în acest domeniu și un mare avantaj d.p.d.v. al transferului de metal. Este evident (sau cel puțin de presupus) că fenomenul descris mai sus conduce și la sincromizarea oscilațiilor băii metalice, răspunzătoare în mare parte de creșterea nivelului de stropiri la sudarea cu transfer prin scurtcircuit.

Prin urmare antrenarea prin impulsuri a sârmei electrod în domeniul transferului prin scurtcircuit aduce un mare avantaj, ca urmare a sincronizărilor care au loc în timpul transferului picăturii, și anume controlul fenomenului de transfer, respectiv reducerea nivelului de stropiri comparativ cu sudarea MIG/MAG standard. Se poate vorbi în acest caz de un *fenomen inedit* și anume controlul procesului de transfer prin scurtcircuit, respectiv de *transferul sinergic al picăturii* în acest domeniu sensibil al sudării MIG/MAG. D.p.d.v. teoretic acest fenomen este abordat (destul de timid) în literatura de specialitate //, iar d.p.d.v. practic se observă tot mai mult în preocupările producătorilor de echipamente moderne de sudare prin modelarea formei de variație a curentului de scurtcircuit atât pe panta de creștere cât și de descreștere a acestuia //, //. Această modelare însă, presupune folosirea unor surse de sudare cu invertor cu frecvență mare, respectiv cu un soft complex, relativ scumpe la ora actuală.

Concomitent cu înregistrarea oscilogramelor corespunzătoare celor două viteze de avans a sârmei s-au făcut și citirile aparatelor de măsură de pe sursa de sudare, RSC – 400, obținându-se următoarele valori medii:

$$\begin{array}{ll} v_{as1} \cong 3,6 \text{ m/min} & v_{as2} \cong 4,8 \text{ m/min} \\ I_{s1} \cong 130 \text{ A} & I_{s2} \cong 200 \text{ A} \\ U_{a1} \cong 17 \text{ V} & U_{a2} \cong 19 \text{ V} \end{array}$$

Cu ajutorul constantelor de măsurare a celor doi parametri ($C_I=100\text{A/div.}$, respectiv $C_U=12.5\text{V/div.}$) din cele două oscilograme rezultă următoarele valori ale curentului prin arc, tensiunii arcului, respectiv curentului de scurtcircuit I_{kv} :

$$\begin{array}{ll} v_{s1} \cong 3.6 \text{ m/min} & v_{s2} \cong 4.8 \text{ m/min} \\ f_{p1} \cong 60 \text{ Hz} & f_{p2} \cong 80 \text{ Hz} \\ I_{a1} \cong 70 \text{ A} & I_{a2} \cong 100 \text{ A} \\ U_{a1} \cong 15 \text{ V} & U_{a2} \cong 16 \text{ V} \\ I_{kv} \cong 260 \text{ A} & I_{kv} \cong 330 \text{ A} \\ I_{s1med.} \cong 120 \text{ A} & I_{s2med.} \cong 180 \text{ A (calcul aproximativ)} \\ f_{sc1} \cong 55 \text{ Hz} & f_{sc2} \cong 77 \text{ Hz} \end{array}$$

Se constată o corelație relativ bună între valorile măsurate și cele calculate. Diferențele care apar au drept cauză erorile inerente de măsurare și de calcul.

Din analiza oscilogramelor prezentate se mai constată că în cazul curentului acesta înregistrează unele pulsații periodice atât în faza de scurtcircuitare cât și în faza de ardere a arcului. Precizăm că aceste pulsații nu trebuie puse pe seama antrenării prin impulsuri a sârmei electrod. Natura lor provine de la pulsarea tensiunii redresate a sursei de sudare.

Pentru confirmarea acestei ipoteze în figura 5.9 pe canalul CH₁ este înregistrată variația curentului, iar pe canalul CH₂ variația tensiunii redresate a sursei, la mersul în gol. Se observă că pulsațiile acestea se sincronizează perfect cu pulsațiile corespunzătoare curentului.

Așa cum s-a arătat până acum datorită fenomenului de scurtcircuitare a arcului electric și de suprapunere a acestui fenomen cu fazele de avans ale sârmei electrod nu s-a putut evidenția apariția unei variații a curentului în circuitul de sudare ca efect a avansului variabil a sârmei electrod. Pentru evitarea fenomenului de scurtcircuitare a arcului la transferul picăturii s-a procedat la creșterea ușoară a tensiunii arcului și deci implicit a lungimii acestuia. Oscilograma de variație a parametrilor, *curentul de sudare – tensiunea arcului*, din figura 5.10, confirmă dispariția scurtcircuitelor la transferul picăturii ca efect a creșterii lungimii arcului, fără a deranja însă stabilitatea acestuia. Valorile corespunzătoare celor doi parametri mășurați de instrumentele de pe sursă, respectiv determinați de pe diagrame sunt:

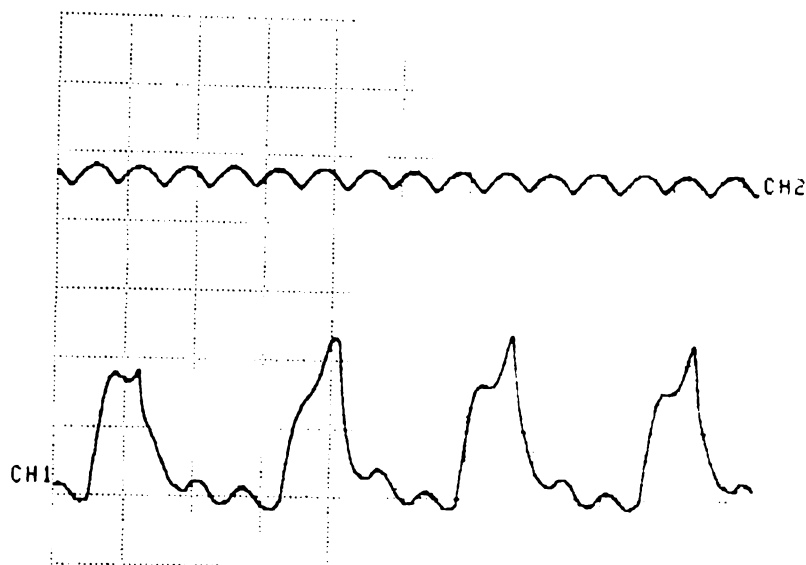


Figura 5.9. Oscilograma tensiunii redresate a sursei de sudare la mers în gol

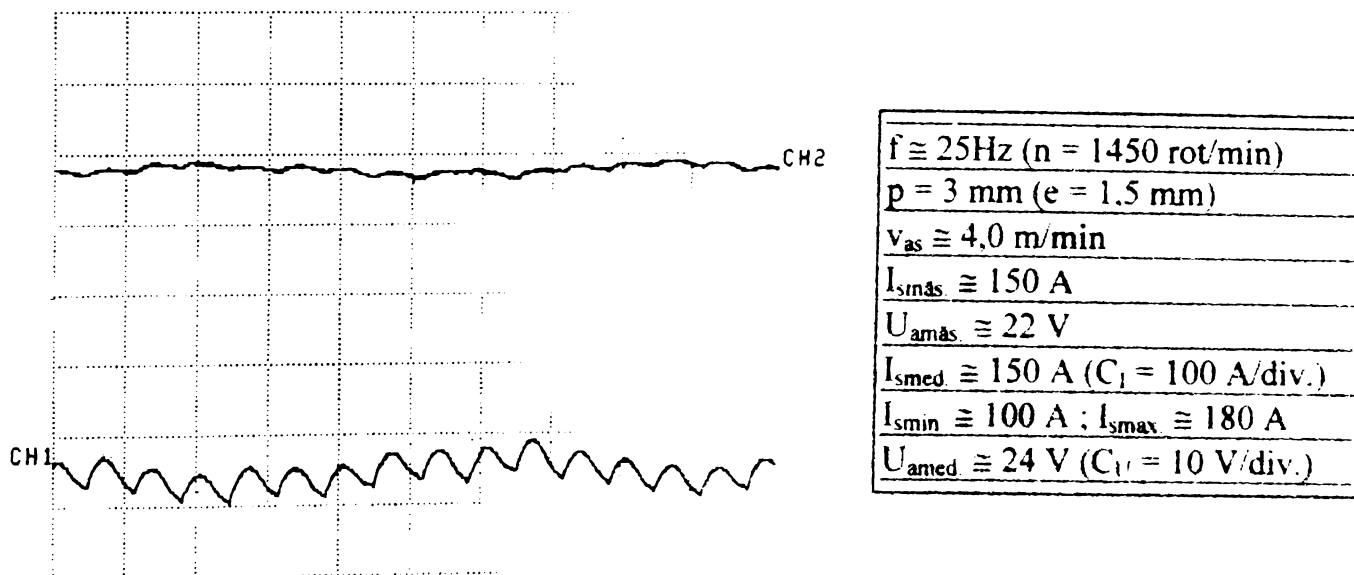


Figura 5.10. Oscilograma parametrilor tehnologici I_s , U_a , fără scurtcircuitarea arcului electric

Este interesant de observat că, analizând cu atenție oscilograma de variație a curentului se observă o ușoară variație sinusoidală a acestuia între două limite $I_{smin} \cong 100\text{A}$, respectiv $I_{smax} \cong 180\text{A}$. Această variație discretă a curentului confirmă apariția unui curent variabil în circuitul de sudare ca urmare a avansului variabil a sârmei electrod.

Aspectul cel mai interesant însă, este că se constată un lucru deosebit și anume obținerea unui transfer fără scurtcircuit pentru niște valori ale parametrilor tehnologici de sudare I_s , U_a , respectiv v_{as} , pentru care în cazul avansului continuu a sârmei electrod, se obține întotdeauna un transfer prin scurtcircuit caracterizat prin stropiri inerente procesului de transfer. Acest aspect este confirmat odată în plus și de diminuarea puternică a numărului de stropiri constat în timpul sudării.

Aceste constatări sunt confirmate și de oscilogramele prezentate în figurile 5.11, 5.12 și 5.13, pentru trei viteze medii de avans a sârmei electrod, care arată clar că avansul prin impulsuri al sârmei electrod determină modificarea tipului de transfer a picăturii prin coloana arcului, pentru valori ale parametrilor tehnologici de sudare caracteristici domeniului de transfer prin scurtcircuit, la un transfer fără scurtcircuitări, cu stropiri foarte reduse, asemănător transferului în curent pulsat.

Această observație constituie de asemenea un aspect inedit, evidențiind o proprietate deosebită (aparte) a sistemelor de avans prin impulsuri, care conduce la concluzia că este posibilă prin utilizarea

acestor sisteme obținerea unui transfer asemănător transferului în curent pulsant pe tot domeniul de variație a vitezei de avans a sârmei electrod, respectiv a parametrilor tehnologici principali U_a și I_s , specific transferului prin scurtcircuit și transferului intermediar.

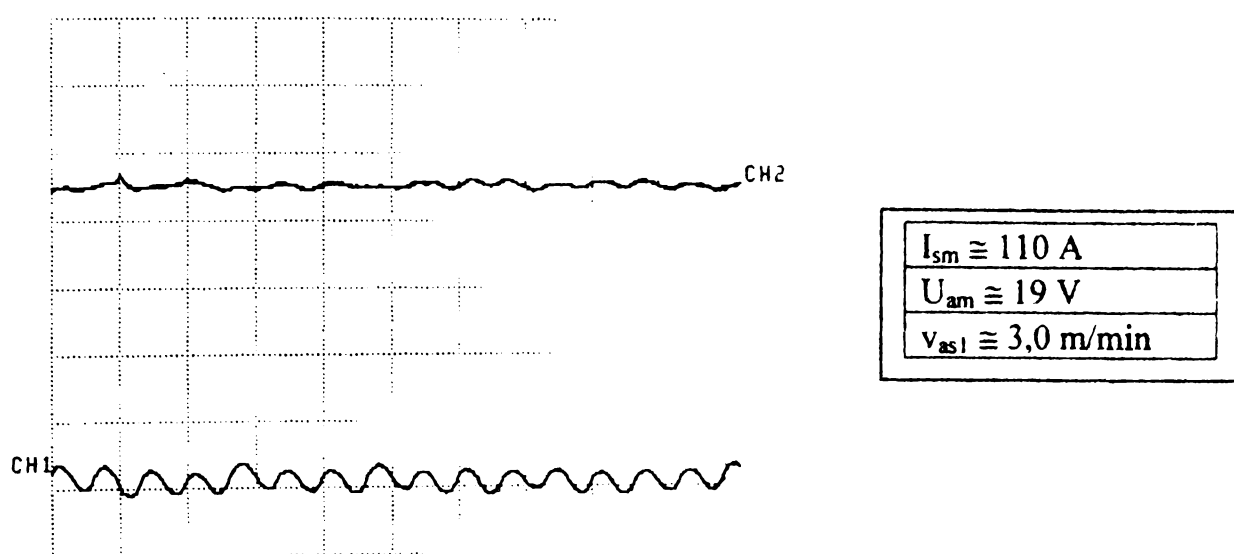


Figura 5.11. Oscilografiera arcului electric la $v_{as1} = 3,0 \text{ m/min}$

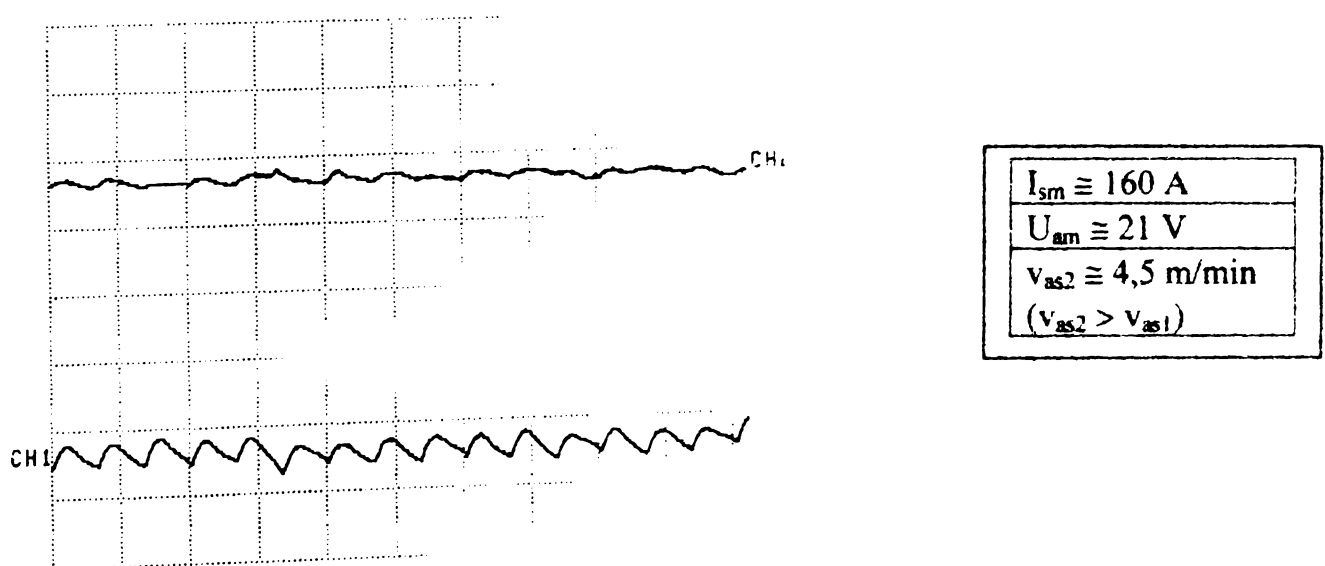


Figura 5.12. Oscilografiera arcului electric la $v_{as2} > v_{as1}$

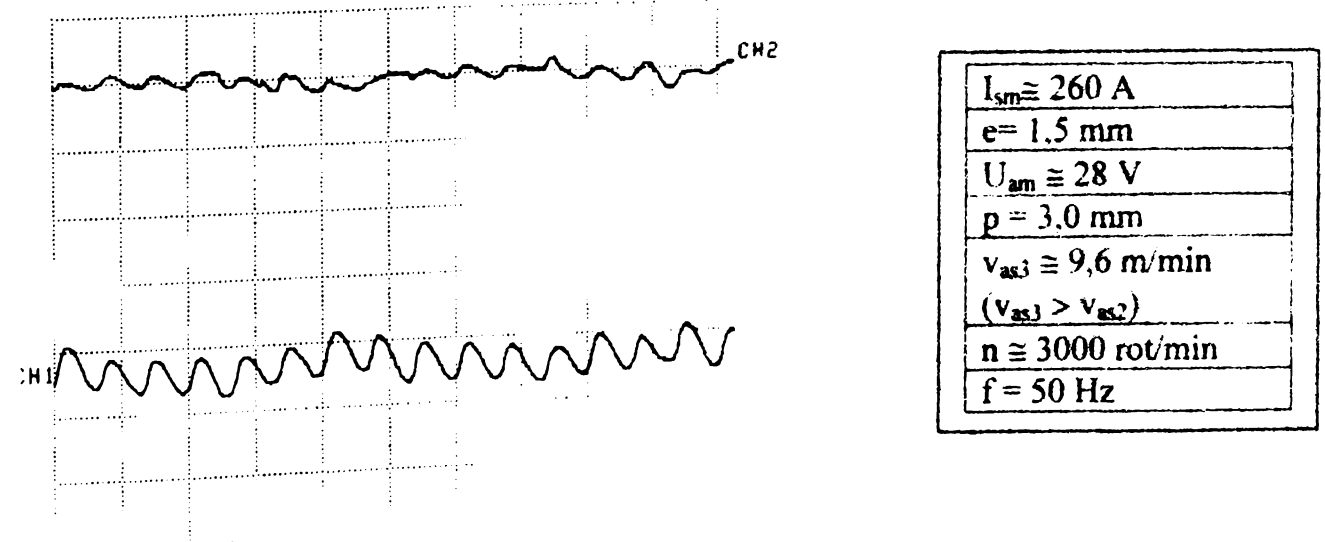


Figura 5.13. Oscilografiera arcului electric la $v_{as3} > v_{as2}$

Evidențierea neclară a pulsațiilor curentului de sudare pe oscilogramele prezentate mai sus se datorește pe de o parte pulsațiilor tensiunii redresate a sursei de sudare care determină suprapunerea unor pulsații periodice peste pulsația efectivă a curentului din circuit, iar pe de altă parte alegerii unei baze de timp B_t neadecvate, în speță prea mică.

Pe baza observației de mai sus cercetările au continuat în următoarele condiții:

- ✓ sursa de sudare : RSC – 400M (s-a înlocuit sursa);
- ✓ baza de timp $B_t = 20 \text{ ms/div}$ (a crescut baza de timp de 4 ori);
- ✓ constanta măsurării curentului $C_I = 100 \text{ A/div.}$ (nemodificată);
- ✓ constanta măsurării tensiunii $C_U = 10 \text{ V/div.}$ (a scăzut);

Aspectul oscilogramelor înregistrate în noile condiții sunt prezentate în figurile 5.14, 5.15, 5.16.

Din analiza oscilogramelor se observă conturarea mult mai clară a variației curentului de sudare. Această variație însă, se situează sub cea estimată în cadrul analizei teoretice. Și în aceste cazuri se confirmă transferul picăturii fără scurtcircuitarea arcului electric. Creșterea exagerată a tensiunii arcului a condus la creșterea dimensiunilor picăturilor, respectiv la apariția stropirilor (figura 5.14). Procentul dioxidului de carbon în gazul de protecție se pare că modifică intervalul de variație a curentului de sudare, un conținut de CO_2 mai redus în amestec, restrângând acest domeniu (comparați figurile 5.15 și 5.16).

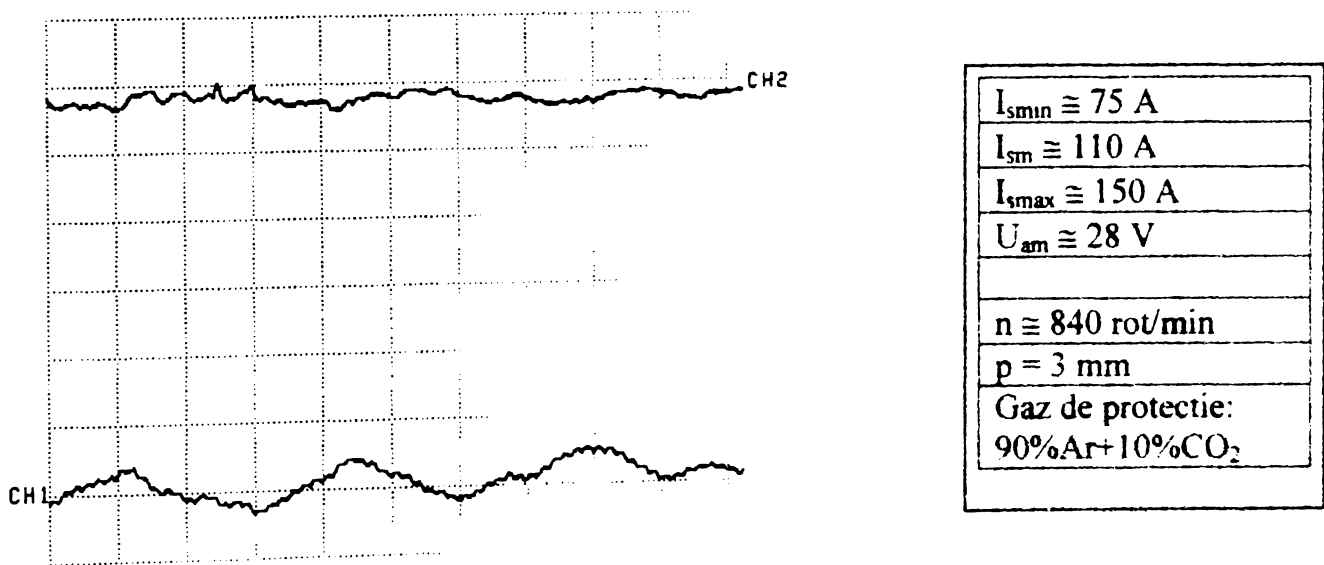


Figura 5.14. Oscilografierea arcului electric la $n = 840 \text{ rot/min}$ și $p = 3 \text{ mm}$

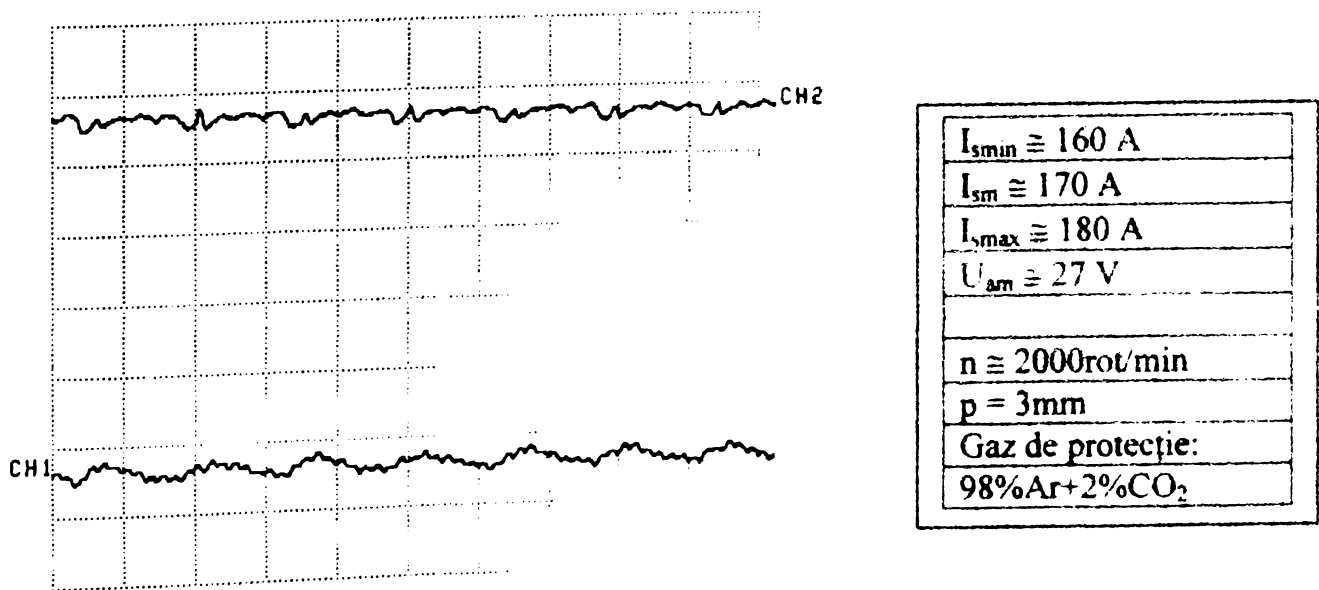
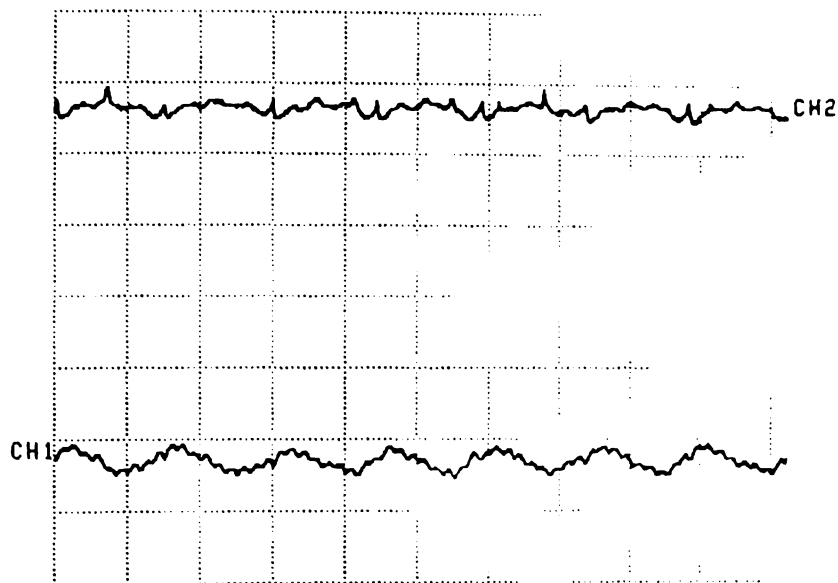


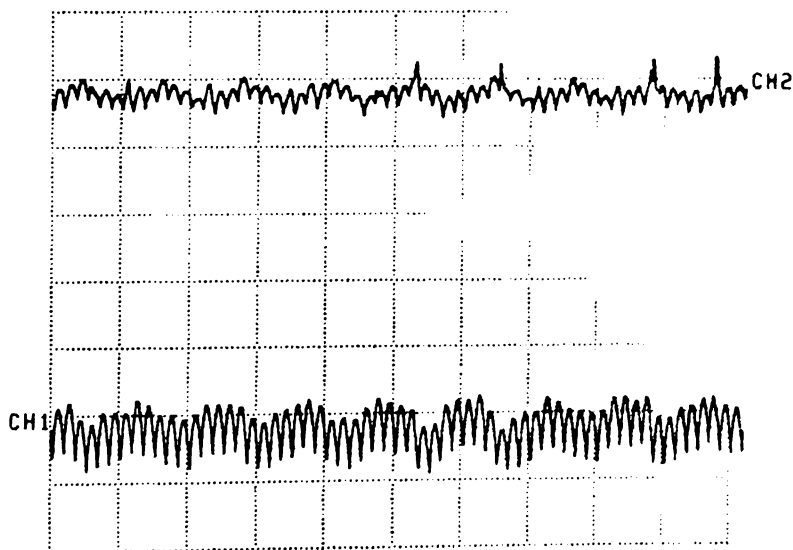
Figura 5.15. Oscilografierea arcului electric la $n = 2000 \text{ rot/min}$ și $p = 3 \text{ mm}$ (Amestec: Ar + 2%CO₂)



$I_{smin} \cong 150 \text{ A}$
$I_{sm} \cong 170 \text{ A}$
$I_{smax} \cong 190 \text{ A}$
$U_a \cong 27 \text{ V}$
$n \cong 2000 \text{ rot/min}$
$p = 3 \text{ mm}$
Gaz de protecție: 92%Ar+8%CO ₂

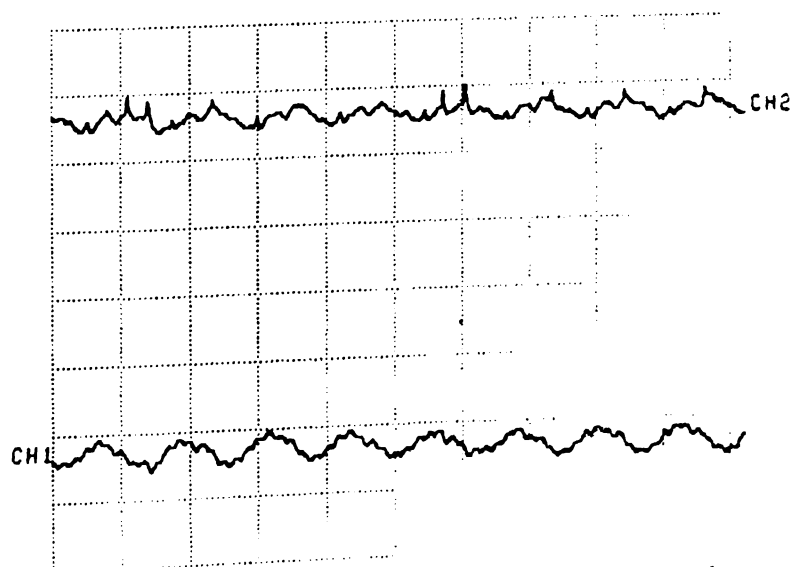
Figura 5.16. Oscilografiera arcului electric la $n = 2000 \text{ rot/min}$ și $p = 3 \text{ mm}$

În figurile 5.17 și 5.18 se prezintă influența performanțelor sursei de sudare, respectiv a reglării acesteia asupra calității imaginii oscilogramelor, lucru de care trebuie ținut cont pentru obținerea unor rezultate cât mai concludente în cadrul cercetărilor experimentale.



$I_{smin} \cong 160 \text{ A}$
$I_{sm} \cong 180 \text{ A}$
$I_{smax} \cong 200 \text{ A}$
$U_a \cong 28 \text{ V}$
$n \cong 2500 \text{ rot/min}$
$p = 3 \text{ mm}$
Gaz de protecție: 92%Ar + 8%CO ₂
Treapta de reglare: $U_a: \Delta$ (triunghi)

Figura 5.17. Oscilografiera arcului electric – treapta de reglare: triunghi



$I_{smin} \cong 160 \text{ A}$
$I_{sm} \cong 180 \text{ A}$
$I_{smax} \cong 200 \text{ A}$
$U_a \cong 28 \text{ V}$
$n \cong 2500 \text{ rot/min}$
$p = 3 \text{ mm}$
Gaz de protecție: 92%Ar+8%CO ₂
Treapta de reglare: $U_a: Y$ (stea)

Figura 5.18. Oscilografiera arcului electric. – treapta de reglare: stea

Diferența dintre cele două înregistrări constă în faptul că reglarea tensiunii arcului s-a făcut cu comutatorul pe poziția (treapta) triunghi (Δ) pentru înregistrarea din figura 5.17, respectiv pe poziția stea (Y) pentru înregistrarea din figura 5.18. Filtrarea foarte bună a tensiunii pe treapta Y, respectiv filtrarea (netezirea) mai slabă pe treapta Δ a condus la o înregistrare calitativ superioară a formei impulsului de curent. În concluzie folosirea unor surse de sudare performante poate conduce la rezultate net superioare în cadrul cercetărilor experimentale.

5.4. Interpretarea rezultatelor experimentale

Din analiza oscilogramelor de variație a parametrilor principali ai arcului electric, *curentul de sudare, respectiv tensiunea arcului*, și observarea desfășurării fenomenelor din timpul cercetărilor experimentale, se desprind două aspecte importante care caracterizează procesul de sudare cu ajutorul sistemelor de avans prin impulsuri a sârmei electrod:

- generarea unui curent variabil în circuitul de sudare, ca efect al antrenării sârmei cu o viteză variabilă sub forma unor impulsuri mecanice, dar a cărui amplitudine se găsește, conform cercetărilor experimentale întreprinse până în prezent, mult sub valoarea estimărilor analitice;
- evidențierea unui aspect inedit, novator, privind transferul de metal topit, a cărui confirmare certă ar putea avea consecințe deosebite asupra dezvoltării sistemelor de avans prin impulsuri; este vorba de constatarea modificării modului de transfer a picăturilor de metal topit prin coloana arcului, din transfer prin scurtcircuit specific vitezelor de avans mici, respectiv valorilor scăzute ale parametrilor principali ai arcului electric, *curent – tensiune*, într-un transfer fără scurtcircuit asemănător transferului în curent pulsant, cu toate avantajele oferite de acest tip de transfer. Fenomenul poate fi comparat ca efect cu sudarea MIG/MAG standard în curent pulsant.

În cele ce urmează se propune o interpretare teoretică a fenomenelor descrise mai sus.

În ceea ce privește variația slabă a amplitudinii curentului de sudare față de estimarea analitică, explicația poate fi dată de inerția sistemului *sursă de sudare – mecanism de avans – arc electric*, respectiv inerția fenomenului de autoreglare, față de viteza de variație a avansului sârmei electrod, specifică sistemelor de avans prin impulsuri, în timpul unui impuls aplicat acesteia.

Fenomenul de autoreglare sau reglare internă prin care se asigură stabilitatea arcului electric la sudare în mediul de gaze protectoare MIG/MAG la apariția unor factori perturbatori este binecunoscut în literatura de specialitate.

În cazul de față se constată că factorul perturbator cel mai important, generat de însuși principiul de funcționare a sistemelor de avans prin impulsuri, este variația continuă cu o anumită amplitudine și frecvență a vitezei de avans a sârmei electrod.

Calculul analitic a stabilității arcului electric prin fenomenul de autoreglare în cazul sudării cu viteză de avans constantă a sârmei electrod conduce la obținerea următoarei ecuații:

$$\Delta l_a = \Delta l_{a_0} \cdot \exp\left(\frac{-t}{T_{ar}}\right) \quad (5.1)$$

unde:

$$T_{ar} = \frac{1}{E_c \left[\frac{k_t}{k_s} + k_u \left(1 - \frac{R_{ad}}{k_s} \right) \right]} \quad (5.2)$$

Termenii din relațiile (5.1) și (5.2) au următoarele semnificații:

- Δl_a - variația momentană a lungimii arcului;
- Δl_{a_0} - variația inițială a lungimii arcului;
- T_{ar} - constanta de timp a procesului de autoreglare;
- E_c - intensitatea câmpului electric în coloana arcului;
- k_i - coeficientul de autoreglare funcție de curent; poate fi exprimat sub forma:

$$k_i = 0.00453 \frac{\alpha_t}{d_s^2} \quad (5.3)$$

unde: α_t - coeficientul de topire;
 d_s - diametrul sârmei electrod;
 k_s - coeficient de stabilitate; este dat de relația:

$$k_s = \frac{\partial u_a}{\partial i_a} - \frac{\partial u_s}{\partial i_a} \quad (5.4)$$

- k_u - coeficientul de autoreglare funcție de tensiune;
- R_{ad} - rezistența diferențială a arcului electric, definită de relația:

$$R_{ad} = \frac{\partial u_a}{\partial i_a} = \operatorname{tg} \alpha_a \quad (5.5)$$

În cazul surselor de sudare cu caracteristică externă rigidă specifică sudării MIG/MAG valoarea $R_{ad} = 0$ și rezultă următoarea expresie a constantei de timp T_{ar} :

$$T_{ar} = \frac{1}{E_c \left(\frac{k_i}{k_s} + k_u \right)} \quad (5.6)$$

Din analiza ecuației (5.6) rezultă că procesul tranzitoriu este cu atât mai scurt cu cât constanta de timp T_{ar} este mai mică. Acest lucru presupune în consecință următoarele //:

- ✓ mărirea intensității câmpului electric în coloana arcului (E_c); La sudarea MIG/MAG $E_c \approx 0,8 \div 1,5$ V/mm;
- ✓ mărirea coeficientului (k_i). Acesta este favorizat de micșorarea diametrului sârmei electrod (d_s), respectiv de mărirea coeficientului de topire (α_t) prin mărirea densității de curent. Valorile pentru (k_i) sunt cuprinse, de regulă, în limitele $2 \times 10^{-2} \div 5,5 \times 10^{-1}$ mm/As;
- ✓ micșorarea coeficientului de stabilitate (k_s) prin utilizarea surselor cu caracteristică cât mai rigidă. Valorile uzuale ale lui (k_s) pentru surse cu caracteristică rigidă se încadrează între limitele 1...7 V/100A;
- ✓ mărirea coeficientului k_u . De obicei, ia valori cuprinse în domeniul $0,5 \times 10^{-1} \dots 2,0$ mm/Vs.

Luând în considerare valorile medii pentru mărimile care intervin în relația (5.6), și considerând că durata procesului tranzitoriu este de circa $5T_{ar}$, se obține valoarea constantei de timp a procesului de autoreglare $T_{ar} = 0,2$ s sau 200ms.

Dacă în calculul timpului T_{ar} se iau în considerare inerția electromagnetică a sursei de sudare (pentru redresoare constanta de timp variază între $2 \times 10^{-3} \dots 30 \times 10^{-3}$ s) și inerția termică a electrodului (pentru care constanta de timp este cuprinsă între 0...0,15s), T_{ar} poate atinge o durată de $\approx 0,6$ s. La aceasta se mai poate adăuga inerția termică și mecanică a băii de metal topit.

În realitate însă, durata procesului tranzitoriu, respectiv timpul T_{ar} în cazul sudării MIG/MAG are valori mai scăzute decât cele determinate prin calcul analitic. Astfel, cercetătorii germani au stabilit că valoarea constantei de timp T_{ar} este de aproximativ 0,1...0,15s (100...150ms). Această valoare a fost determinată pe baza următorului experiment, figura 5.19.

Pentru evidențierea influenței lungimii capătului liber a sârmei electrod asupra parametrilor tehnologici de sudare I_s , respectiv U_a capul de sudare montat pe un robot a simulat două modificări bruște ale lungimii capătului liber (l_{cl}) de la 12 mm la 16 mm, respectiv 20 mm. Simultan s-a înregistrat și variația curentului de sudare, constatându-se că durata procesului tranzitoriu de stabilizare a curentului de sudare pentru cele trei lungimi diferite ale capătului liber, a variat între 0,1 și 0,15 s (vezi figura 5.19). Totodată, se observă că valoarea curentului de sudare în urma stabilizării procesului a scăzut o dată cu creșterea lungimii capătului liber, ca efect a creșterii căderii de tensiune pe capătul sârmei electrod. Încercările s-au făcut cu o sârmă electrod cu $d_s = 1,2$ mm, respectiv folosind un amestec de gaz 82%Ar + 18%CO₂.

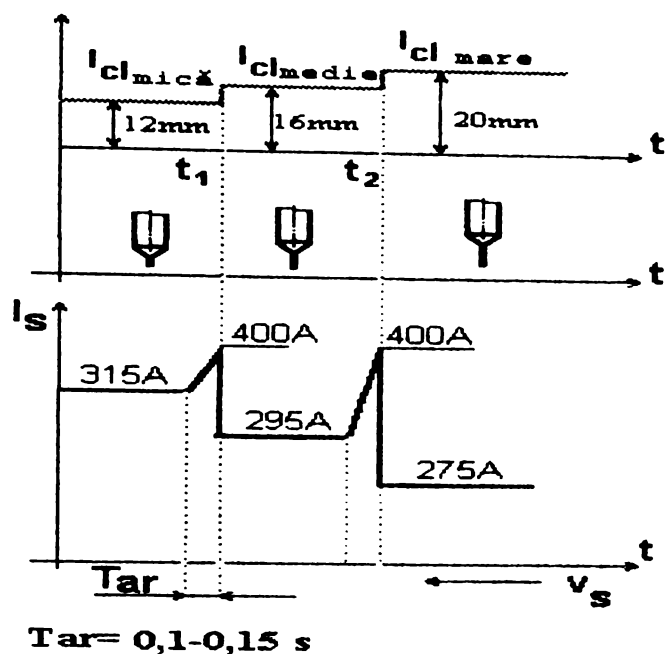


Figura 5.19. Influența lungimii capătului liber asupra stabilității arcului electric

Din analiza teoretică și experimentală a funcționării sistemului de avans pe care s-au făcut experimentările, se poate constata că perioada de timp în care are loc modificarea vitezei de avans a sârmei electrod este mult mai mică decât valoarea constantei de timp a procesului de autoreglare T_{ar} . Astfel, dacă considerăm că frecvența de variație a vitezei de avans a sârmei electrod pentru sistemul dat este cuprinsă între 10Hz și 80 Hz (corespunzătoare unor valori ale turației motorului cuprinse între 500 și 5000 rot/min) rezultă că perioada de timp în care se produce această variație este cuprinsă între 50 ms și 10 ms, deci se găsește sub valoarea constantei de timp $T_{ar} \approx 100 \dots 150 \text{ ms}$. Cu alte cuvinte, inerția fenomenului de autoreglare nu permite modificarea curentului de sudare proporțional cu modificarea vitezei de avans a sârmei electrod pe măsura estimărilor teoretice.

Cercetările axate în direcția reducerii duratei T_{ar} , prin acționarea asupra factorilor de influență analizați mai sus, poate permite confirmarea sau infirmarea ipotezei prezentate pe baza încercărilor experimentale efectuate. Chiar și în aceste condiții nu este de așteptat obținerea unor rezultate practice spectaculoase.

În ceea ce privește cel de-al doilea fenomen, el a fost interpretat și explicat pe larg cu ajutorul forței inerțiale și a transferului inerțial în cadrul subcapitolelor 1.2.7, respectiv 1.3.7.

5.5. Cercetări privind funcționarea sistemului de avans prin impulsuri cu electromagnet și determinarea experimentală a formei impulsurilor de alimentare ale acestuia

5.5.1. Stabilirea frecvenței de lucru a electromagnetului

Schema de principiu a sistemului de avans prin impulsuri cu electromagnet, funcționarea și caracteristicile tehnice ale acestuia sunt prezentate și analizate pe larg în cadrul capitolului 3.2.3.

Având în vedere că în faza experimentală de verificare a funcționării sistemului de avans s-a constatat blocarea electromagnetului, fenomen datorat frecvenței prea ridicate a impulsurilor de alimentare (18 – 80Hz) s-a impus necesitatea modificării schemei de generare a impulsurilor de curent pentru alimentarea electromagnetului prin introducerea unor elemente de circuit suplimentare și cu valori modificate, [65].

Schema electrică a circuitului de alimentare și comandă a electromagnetului este prezentată în figura 5.20. Schema cuprinde modificările efectuate față de schema inițială. Aceasta a impus recalcularea frecvenței impulsurilor generate cu ajutorul circuitului integrat din figură.

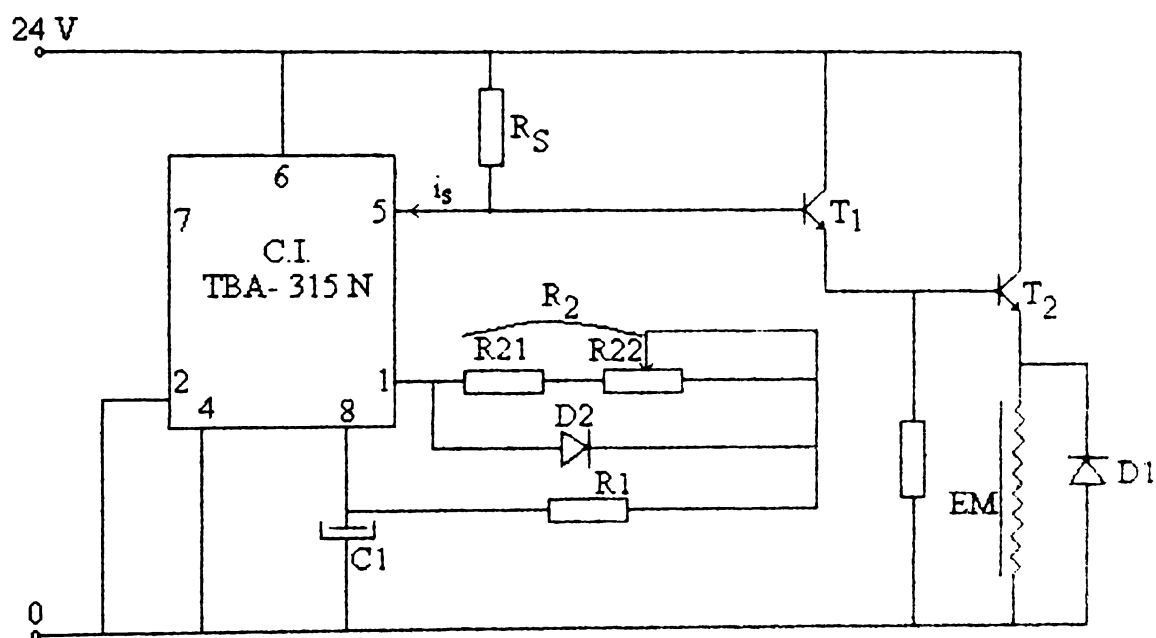


Figura 5.20. Schema modificată a circuitului de alimentare și comandă a electromagnetului

Pentru stabilirea relației de calcul a frecvenței de alimentare a EM se pornește de la observația că electromagnetul este blocat (nealimentat) când integratul conduce și invers. Conform schemei se obțin următoarele relații de calcul:

$$t_{ci} = t_{pEM} = 0,6 \cdot (R_1 + R_2) \cdot C_1 \text{ (ms)} \quad (5.7)$$

respectiv,

$$t_{pi} = t_{cEM} = R_1 C_1 = ct \text{ (ms)} \quad (5.8)$$

unde:

- t_{ci} - timp de conducție integrat (ms);
- t_{pi} - timp de pauză integrat (ms);
- t_{cEM} - timp de conducție electromagnet (ms);
- t_{pEM} - timp de pauză electromagnet (ms).

Pentru valorile date ale elementelor din schemă:

- $R_1 = 10 \text{ K}\Omega$ (fixă);
- $R_2 = R_{21} + R_{22}$;
- $R_{21} = 33 \text{ K}\Omega$ (fixă);
- $R_{22} = 0 - 250 \text{ K}\Omega$ (variabilă);
- $C_1 = 3,3 \mu\text{F}$;

prin înlocuire în relațiile de mai sus se obține:

respectiv,

$$t_{pi} = t_{cEM} = R_1 C_1 = 10 \cdot 3,3 = 33 \text{ ms}$$

$$t_{ci} = t_{pEM} = 0,6 \cdot (R_1 + R_2) \cdot C_1 = 0,6(10 + 33 + R_{22}) \cdot 3,3$$

Pentru: $R_{22} = 0$ $\Rightarrow t_{pEM \text{ min}} = 0,6 \times 43 \times 3,3 \approx 85 \text{ ms}$
și $R_{22} = 250 \text{ K}\Omega$ $\Rightarrow t_{pEM \text{ max}} = 0,6 \times 293 \times 3,3 \approx 518 \text{ ms}$

Cu valorile obținute se calculează intervalul de variație a frecvenței de lucru a electromagnetului folosind relația:

$$f = \frac{1}{t_{cEM} + t_{pEM}} \text{ (Hz)} \quad (5.9)$$

Înlocuind se obține:

$$f_{\text{max}} = \frac{1 \times 10^3}{33 + 85} \approx 8,5 \text{ Hz}$$

respectiv,

$$f_{\text{min}} = \frac{1 \times 10^3}{33 + 518} \approx 1,5 \text{ Hz}$$

Caracteristicile tehnico-funcționale ale sistemului în noile condiții sunt :

- tensiunea de alimentare a cutiei de comandă: 220 V c.a.;
- tensiunea de ieșire spre integrat: 24 V c.c.;
- curentul de ieșire maxim (amplitudinea): 0,8 A;
- frecvența impulsurilor de comandă: 1,5 – 8,5 Hz ;
- diametrul sârmei electrod: 1,0 ; 1,2 ; 1,6 ; 2,0 mm ;
- pasul (amplitudinea) avansului sârmei: 0,5 – 3 mm ;
- posibilități de reglare a vitezei de avans a sârmei:
 - prin modificarea întrefierului electromagnetului;
 - prin modificarea frecvenței impulsurilor.

5.2. Analiza experimentală a formei impulsurilor de alimentare a EM

Determinarea experimentală a parametrilor principali ai impulsurilor de alimentare a electromagnetului s-a făcut prin oscilografieră. În acest scop s-a utilizat osciloscopul numeric cu memorie de tip HAMEG 205/3 cu imprimantă grafică de tip HD 148 HAMEG.

Schema bloc de măsurare și înregistrare a impulsurilor este prezentată în figura 5.21. Deosebirea față de schema de înregistrare utilizată la determinarea impulsurilor de curent din circuitul de sudare, din subcapitolul 5.2, constă în înlocuirea arcului electric cu electromagnetul, respectiv eliminarea filtrelor RC pentru înregistrarea curentului de sudare și a tensiunii arcului ca urmare a absenței (dispariției) surselor de bruij din timpul măsurătorilor. Șuntul din schema de măsurare corespunde valorilor curentului din circuit: 1,5 A/75 mV.

Constantele de măsurare necesare determinării valorilor efective ale parametrilor electrici ai impulsurilor cu ajutorul oscilogramelor, sunt calculate și prezentate mai jos:

- ✓ canalul de înregistrare a curentului de impuls CH₁;
- ✓ canalul de înregistrare a tensiunii de alimentare CH₂;
- ✓ linia de referință pentru curent: 0;
- ✓ linia de referință pentru tensiune: 4;
- ✓ baza de timp (funcție de înregistrare):
 - B₁₁ = 0,1 s / div. = 100 ms / div;
 - B₁₂ = 0,02 s / div. = 20 ms / div;
 - B₁₃ = 0,01 s / div. = 10 ms / div;

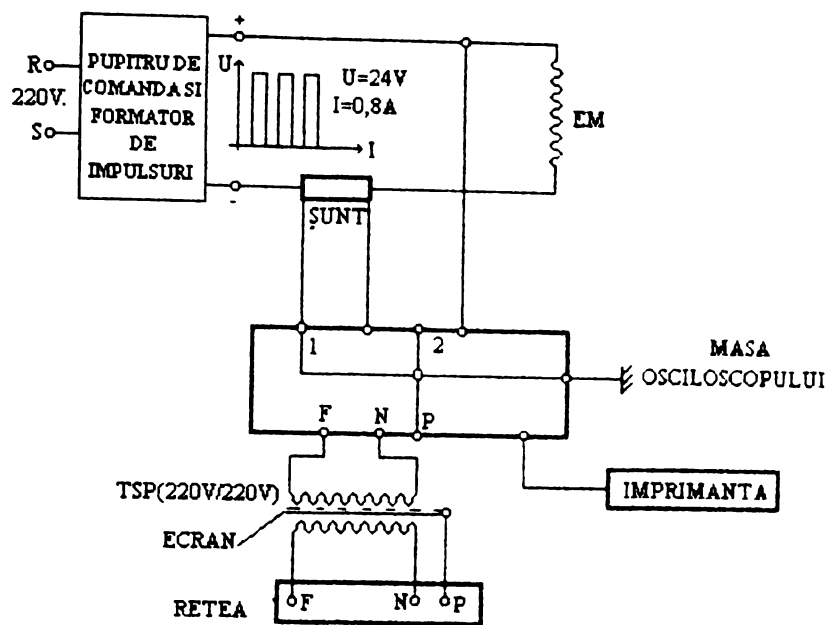


Figura 5.21. Schema bloc de înregistrare și măsurare a impulsurilor

- ✓ constanta măsurării curentului (după caz):

$$C_{I_1} = C_s \cdot C_m = \frac{1,5A}{75mV} \cdot \frac{50mV}{1div} = 1A/div \quad (5.10)$$

sau

$$C_{I_2} = C_s \cdot C_m = \frac{1,5A}{75mV} \cdot \frac{20mV}{1div} = 0,4A/div \quad (5.11)$$

- ✓ constanta măsurării tensiunii de alimentare:

$$C_U = 10 V/div;$$

În continuare sunt prezentate înregistrările cu oscilogramele parametrilor impulsurilor de alimentare ale electromagnetului, după cum urmează:

- figura 5.22: la frecvență minimă: $f_{min} = \frac{1}{T} = \frac{1}{0,550} \cong 1,8Hz$;
- figura 5.23: Idem figura 5.22, cu mărirea imaginii zonei de impuls (Zoom) prin reducerea bazei de timp, $B_t = 20$ ms;
- figura 5.24: Idem figura 5.22, cu modificarea constantei de măsurare a curentului, $C_{I_2} = 0,4$ A/div;
- figura 5.25: Idem figura 5.22, cu modificarea lui B_t și C_{I_1} ;
- figura 5.26: la frecvență medie: $f_{med} = \frac{1}{T} = \frac{1}{0,36} \cong 2,8Hz$
- figura 5.27: Idem figura 5.26, zoom pentru zona de impuls prin reducerea bazei de timp, $B_t = 20$ ms;
- figura 5.28: la frecvență maximă: $f_{max} = \frac{1}{T} = \frac{1}{0,36} \cong 8,7Hz$
- figura 5.29: Idem figura 5.28, Zoom pentru zonele (2 și 3), prin reducerea bazei de timp, $B_t = 20$ ms;
- figura 5.30. Idem figura 5.28, pentru zona (8), cu modificarea lui $B_t = 10$ ms/div și $C_{I_1} = 0,4$ A/div;

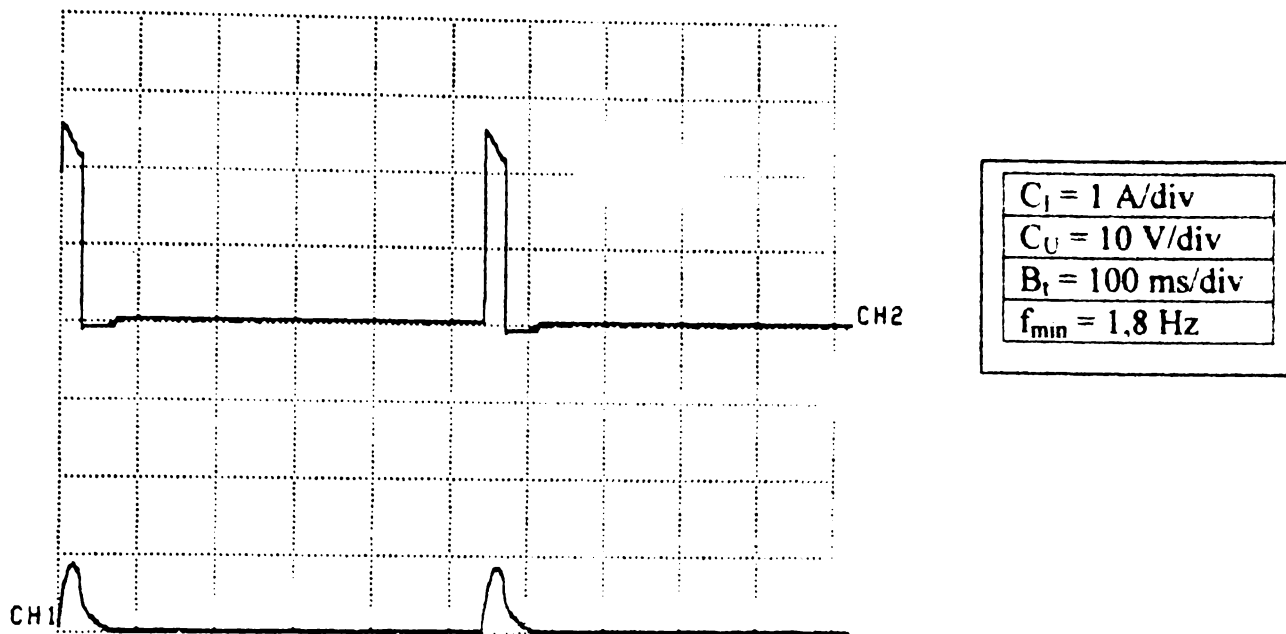


Figura 5.22. Oscilografiera impulsului la $f_{\min} = 1,8 \text{ Hz}$

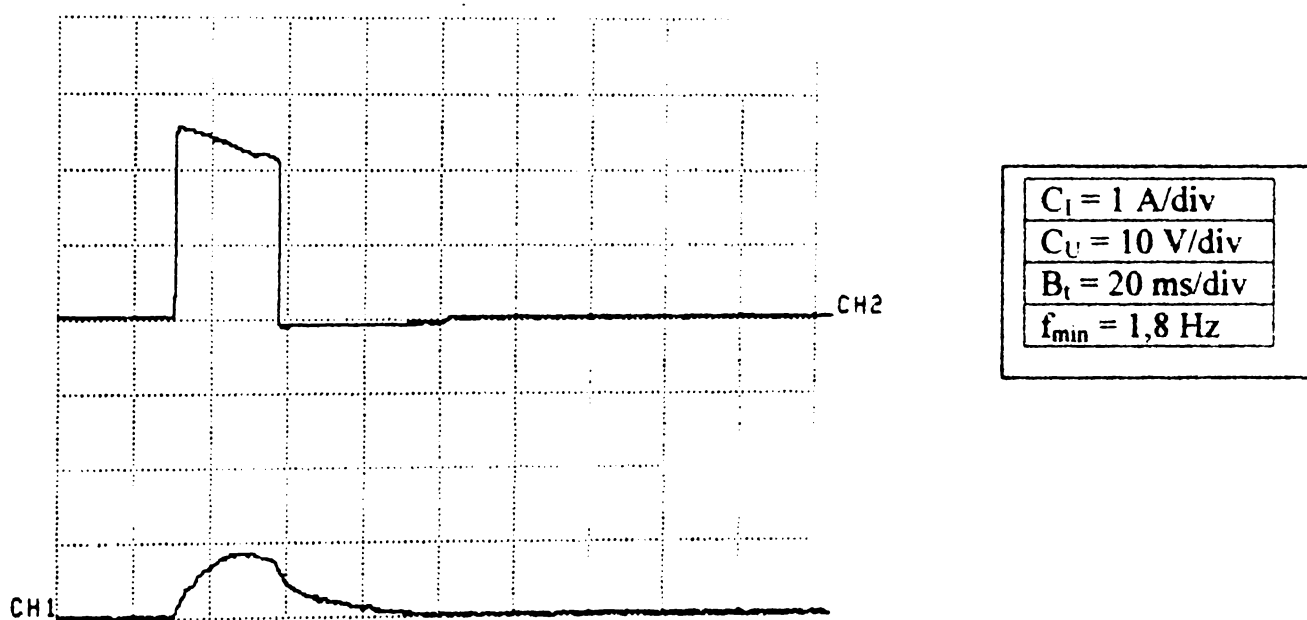


Figura 5.23. Detaliu (Zoom) a zonei de impuls, $B_t = 20 \text{ ms}$

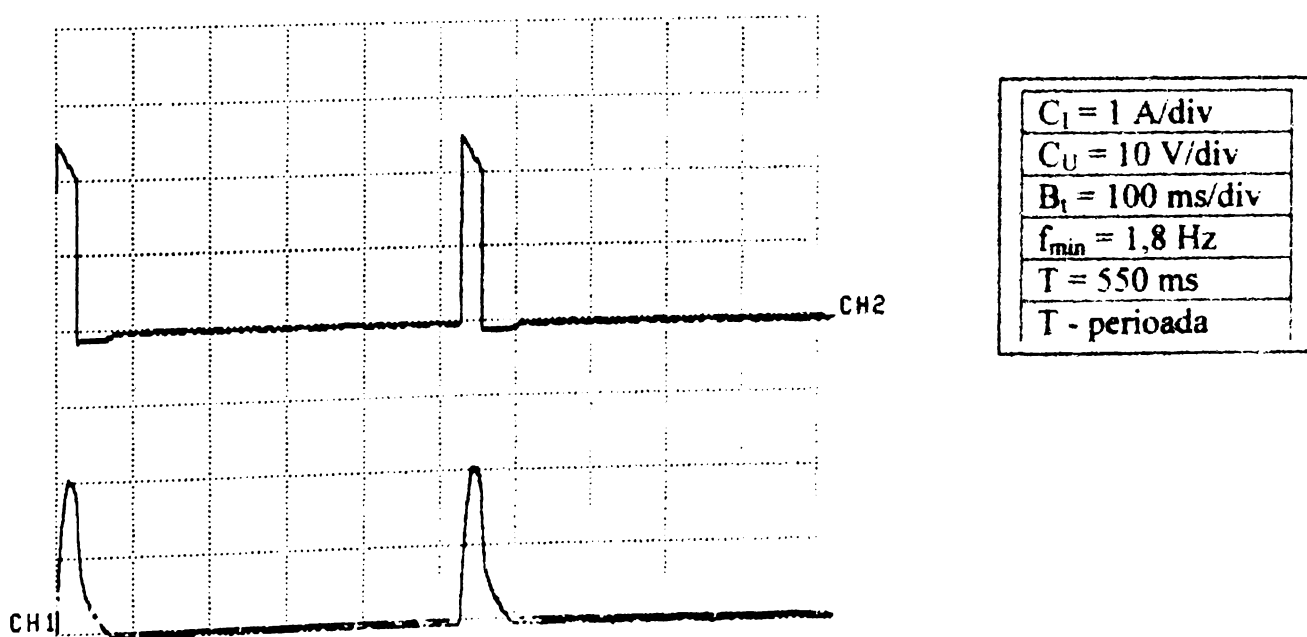


Figura 5.24. Detaliu (Zoom), a zonei de impuls, $C_I = 0,4 \text{ A/div}$

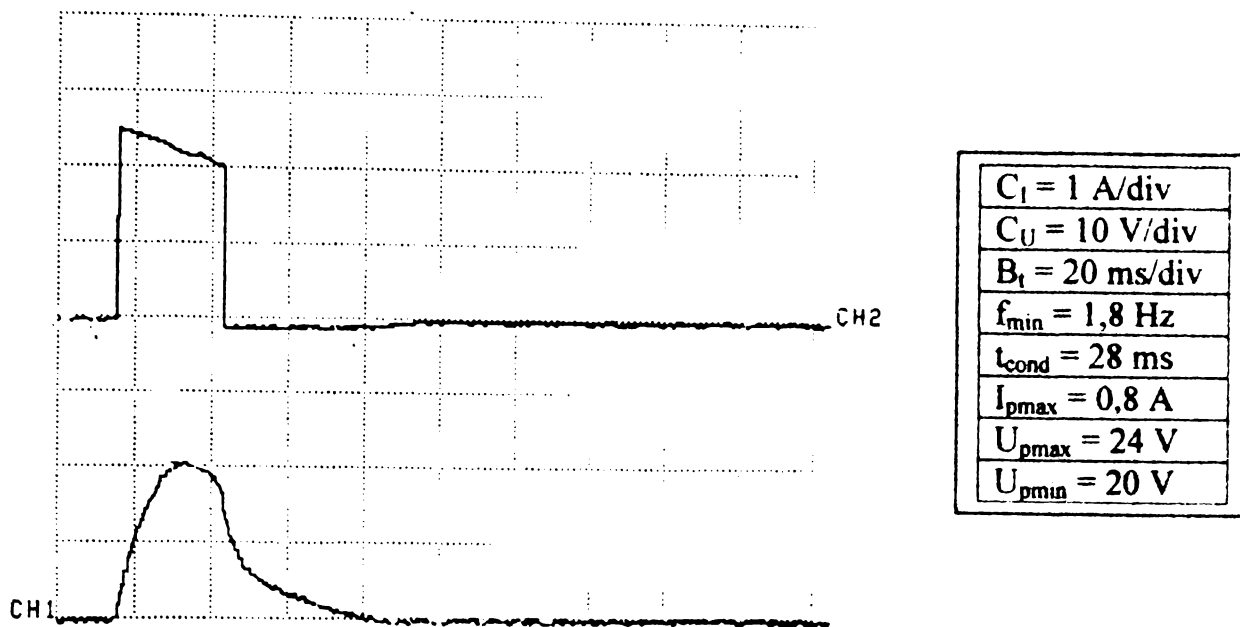


Figura 5.25. Detaliu (Zoom) a zonei de impuls, $B_t = 20 \text{ ms}$, $C_I = 1 \text{ A/div}$

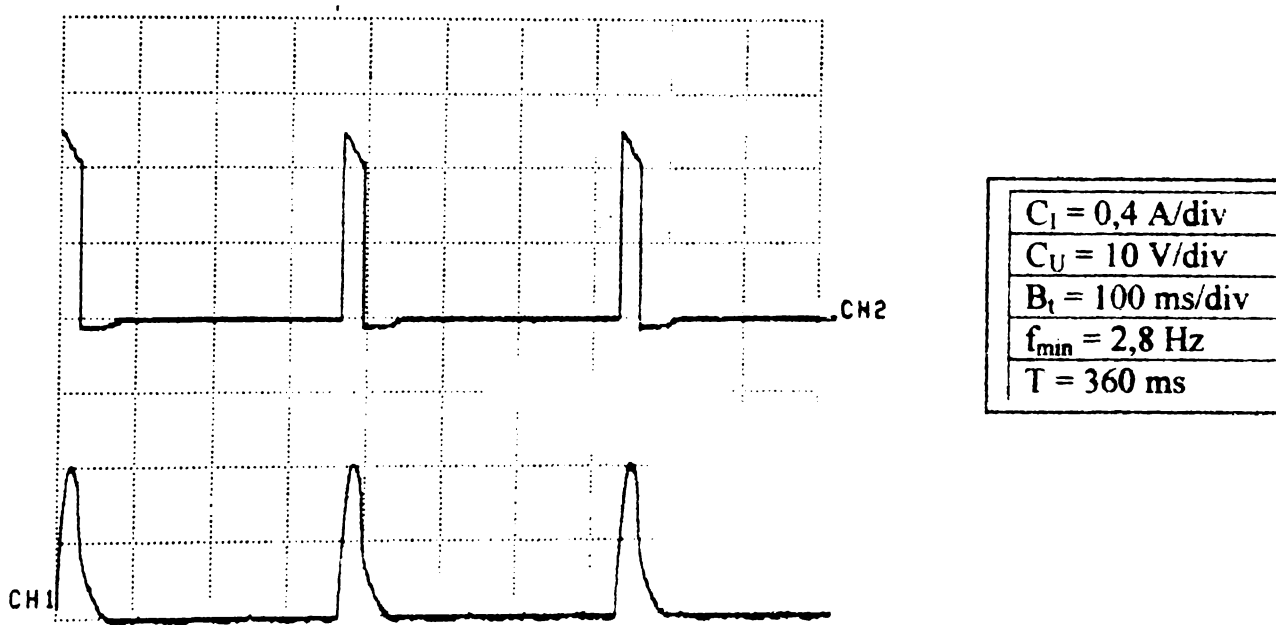


Figura 5.26. Oscilografiera impulsului la $f_{\text{med}} = 2,8 \text{ Hz}$

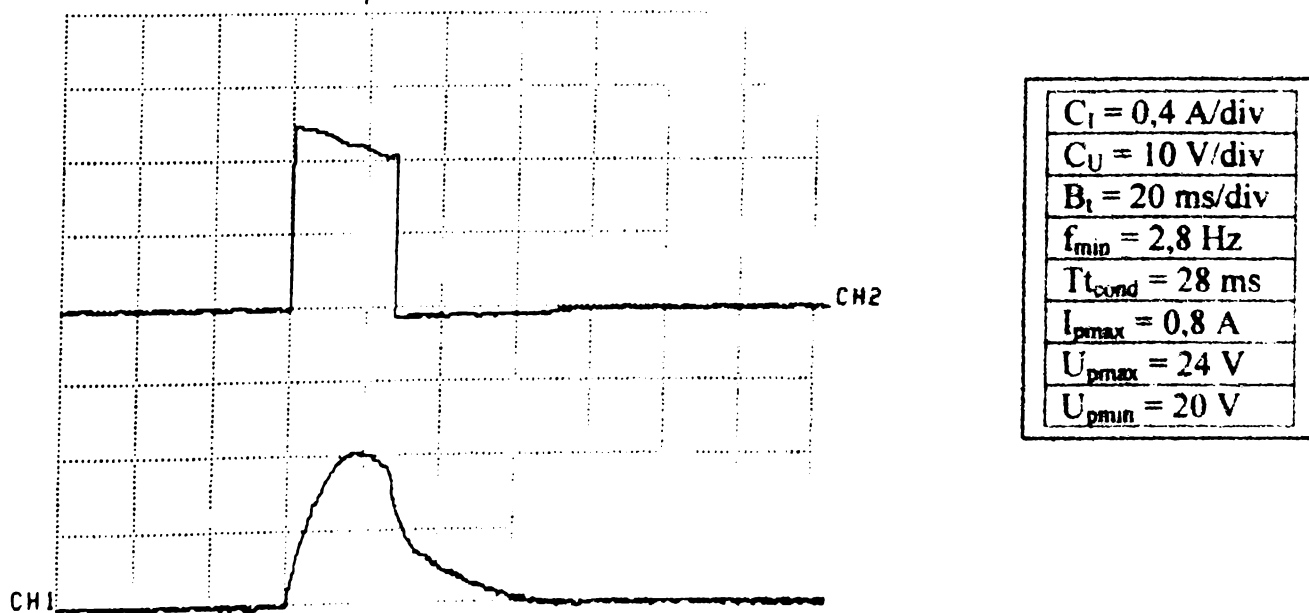


Figura 5.27. Detaliu (Zoom) a zonei de impuls, $B_t = 20 \text{ ms}$

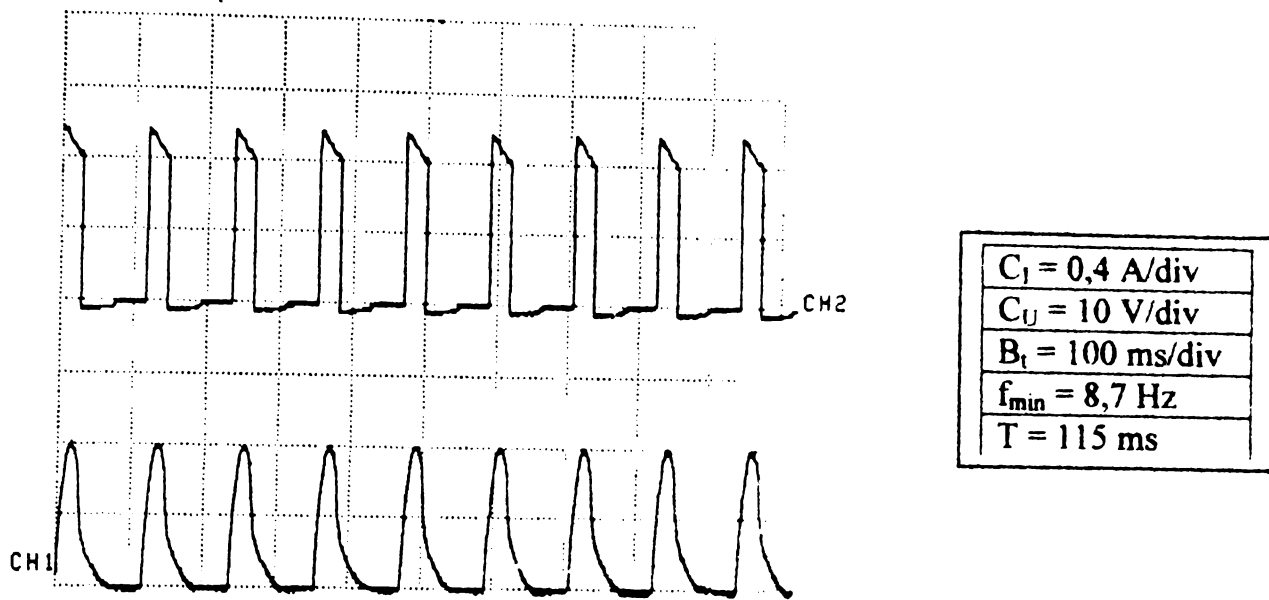


Figura 5.28. Oscilografiera impulsului la $f_{\max} = 8,7 \text{ Hz}$

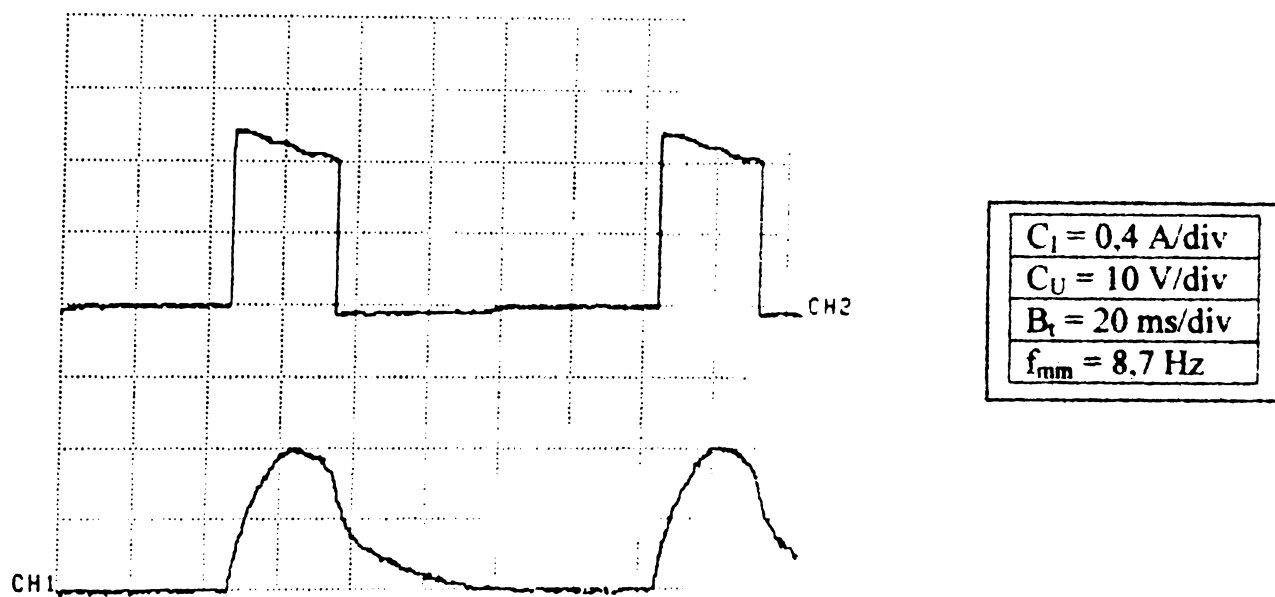


Figura 5.29. Detaliu (Zoom) a impulsurilor 2 și 3, $B_t = 20 \text{ ms}$

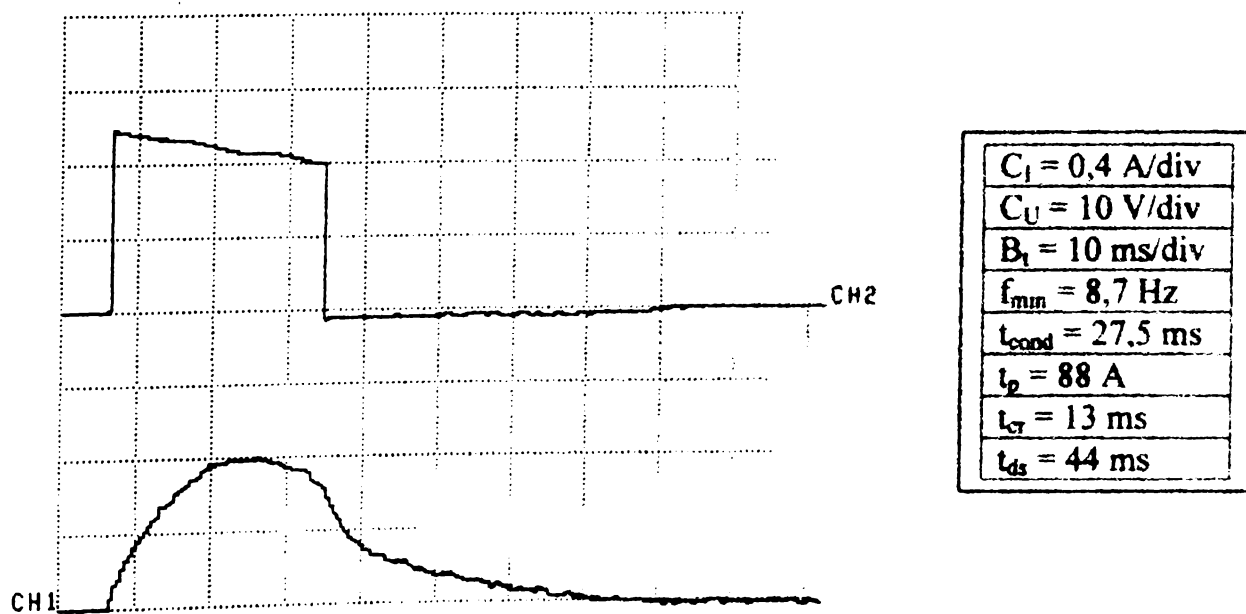


Figura 5.30. Detaliu (Zoom) a impulsului 8, $B_t = 10 \text{ ms/div}$, $C_I = 0,4 \text{ A/div}$

Din analiza oscilogramelor și interpretarea rezultatelor rezultă următoarele:

- O corelare bună între valorile minime și maxime ale frecvenței impulsurilor calculate teoretic și cele obținute experimental ceea ce confirmă corectitudinea relațiilor de calcul utilizate;
- Tensiunea impulsului nu este constantă pe durata conducerii ci variază scăzând de la 24 V la 20 V (figura 5.30); mai mult, la blocarea conducerii datorită fenomenului de autoinducție tensiunea schimbă de semn luând valori de (- 0,6; - 1,0)V;
- Blocarea conducerii și scăderea bruscă a tensiunii nu este însoțită de o scădere pe măsură a curentului de impuls care are încă valori apreciabile și scade lent. Această scădere lentă a curentului este deosebit de defavorabilă din punct de vedere al funcționării electromagnetului, deoarece face ca eliberarea miezului acestuia să se producă cu întârziere. La limită pentru frecvențe mai mari decât o valoare critică miezul electromagnetului rămâne atras tot timpul de bobină făcând imposibilă funcționarea sistemului. Acest lucru depinde în principal de caracteristicile electrice ale electromagnetului. În cazul analizat valoarea critică a frecvenței este de 9Hz. Cu alte cuvinte creșterea performanțelor electromagnetului în direcția creșterii frecvenței trebuie să fie direcționată spre reducerea timpului de trecere a curentului prin bobina electromagnetului, respectiv scăderea cât mai rapidă a acestuia sub valoarea critică ce menține încă miezul electromagnetului atras. La aceasta se adaugă și necesitatea realizării unui miez cu o inerție mecanică cât mai mică, respectiv un sistem de readucere în poziția inițială a sistemului de apucare a sârmei performant (realizat în general cu resoarte).

De exemplu pornind de la analiza modului de variație exponențială al curbei de creștere și descreștere a curentului de impuls pe baza măsurării timpilor de creștere și descreștere a acestuia se pot obține valorile caracteristicilor electrice ale bobinei electromagnetului.

Ecuția de creștere a curentului este dată de relația:

$$i = \frac{U}{R}(1 - e^{-\frac{t}{T}}) \quad \text{unde} \quad T = \frac{L}{R} \quad (5.12)$$

Din oscilograma din figura 12, prin măsurare se obține:

$$t_{cr} = 1,3 \times 10 = 13 \text{ ms}$$

$$t_{ds} = 4,4 \times 10 = 44 \text{ ms}$$

Considerând:

$$U = 22 \text{ V (valoarea medie)}$$

$$R = 23 \ \Omega \text{ (rezistența bobinei electromagnetului)}$$

$$i = 1,9 \times 0,4 = 0,76 \text{ A}$$

și înlocuind se obține:

$$0,76 = \frac{22}{23}(1 - e^{-\frac{t}{T}})$$

$$1 - e^{-\frac{t}{T}} = \frac{0,76 \times 23}{22} = 0,7945$$

$$e^{-\frac{t}{T}} = 0,2055$$

$$-\frac{t}{T} = -1,58255$$

$$T = \frac{t}{1,58255} = \frac{13}{1,58255} = 8,215 \text{ ms}$$

$$T = 8,2 \text{ ms}$$

Ecuția de descreștere a curentului de impuls este dată de relația:

$$i = \frac{U}{R} e^{-\frac{t}{T}} = i_0 e^{-\frac{t}{T}} \quad (5.13)$$

Din oscilograma din figura 12 se obțin valorile:

$$t = (0,8 - 0,45) \times 10 = 0,35 \times 10 = 3,5 \text{ ms}$$

$$i = 0,4 \text{ A}$$

$$i_0 = 1,5 \times 0,4 = 0,6 \text{ A}$$

Înlocuind se obține:

$$0,4 = 0,6 e^{-\frac{t}{T}}$$

$$e^{-\frac{t}{T}} = \frac{0,4}{0,6} = 0,66(6)$$

$$-\frac{t}{T} = -0,4054$$

$$T = \frac{3,5}{0,4054} = 8,6 \text{ ms}$$

$$T = 8,6 \text{ ms}$$

Prin urmare:

$$T \in (8,2 - 8,6) \text{ ms}$$

Pentru $T = 8,4 \text{ ms}$ se poate calcula valoarea inductivității din relația:

$$T = \frac{L}{R}$$

$$L = T \cdot R = 8,4 \cdot 23 = 193 \text{ mH}$$

(5.14)

Considerând că durata procesului tranzitoriu de scădere a curentului ($t_{pr.tr}$) este egală cu $5 \cdot T$ și comparându-l cu valoarea determinată pe cale experimentală, figura 12, se observă o bună corelare între calculele teoretice și determinările experimentale:

$$(t_{pr.tr})_{teoretic} = 5 \times T = 5 \times 8,4 = 42 \text{ ms}$$

respectiv,

$$(t_{pr.tr})_{exp.} \cong 4,5 \times B_t = 4,5 \times 10 \cong 45 \text{ ms}$$

Calculule de mai sus arată limpede că pentru creșterea performanțelor de lucru ale electromagnetului – creșterea domeniului de variație a frecvenței de lucru utile – este necesară reducerea cât mai rapidă a duratei procesului tranzitoriu de descreștere a curentului impulsului. Acest lucru presupune o constantă de timp a circuitului electromagnetului “ T ” cât mai mică. Pentru satisfacerea acestei cerințe se impune proiectarea unei bobine pentru electromagnet cu inductivitate L cât mai mică la o rezistență R cât mai ridicată.

Utilitatea cercetărilor experimentale efectuate rezidă tocmai în aceste concluzii importante din punct de vedere practic.

În concluzie se poate aprecia că în cazul sistemelor de avans prin impulsuri cu EM frecvența maximă de lucru (vibrarea sârmei) este limitată la valori mai scăzute comparativ cu sistemele de avans mecanice, fiind strâns legată de soluția constructivă și de caracteristicile electromagnetului. Cercetările ulterioare trebuie orientate spre realizarea unor electromagneți cu performanțe superioare.

5.6. Cercetări experimentale privind utilizarea sistemelor de avans prin impulsuri cu electromagneți la sudarea WIG

5.6.1. Motivație

Sudarea WIG (Wolfram Inert Gas) este un procedeu de sudare prin topire cu arcul electric cu electrod nefuzibil, pentru protecția arcului electric și a băii de metal folosindu-se un gaz inert, de obicei Ar sau amestec de Ar și He. În general se poate considera că sudarea WIG este un procedeu de sudare manual. Procedeu se pretează însă cu ușurință la mecanizare și chiar automatizare. Sudarea se poate face cu sau fără material de adaos. Materialul de adaos se prezintă sub formă de baghete sau vergele la sudarea WIG manuală, respectiv sub formă bobinată la sudarea WIG mecanizată, [3], [26], [32], [77], [79], .

Sudarea WIG se utilizează la sudarea oțelurilor aliate, a metalelor și aliajelor nefieroaase Cu, Al, Ni, Ti, etc, la sudarea stratului de rădăcină în cazul îmbinărilor de rezistență de mare importanță sau când nu există posibilitatea resudării la rădăcină, în cazul oțelurilor nealiate și slab aliate (de exemplu sudarea țevilor). În ceea ce privește grosimea materialului, sudarea WIG se recomandă pentru grosimi mici, $s \leq 3,0$ mm fără material de adaos, respectiv $3 < s < 10$ mm cu material de adaos.

Procedeu se caracterizează prin: cel mai înalt grad de universalitate, putându-se suda practic toate materialele metalice, prin realizarea unor cusături de foarte bună calitate cu un înalt grad de puritate, prin stabilitate foarte bună a arcului electric, absența stropirilor la sudare, absența zgurii, prin posibilitatea sudării în orice poziție.

Procedeu are însă un mare dezavantaj și anume productivitatea foarte scăzută la sudare, rata depunerii $A_D \approx 0,5 - 1,0$ g/s, ceea ce limitează utilizarea procedeuului la sudarea tablelor de grosimi mici, respectiv la execuția îmbinărilor de mare importanță. Cauza principală rezidă din desfășurarea manuală a sudării, cu toate dezavantajele legate de aceasta, precum și din modul de introducere a materialului de adaos în arcul electric.

În figura 5.31 se prezintă etapele de desfășurare a modului operator la sudarea WIG manuală, [32]:

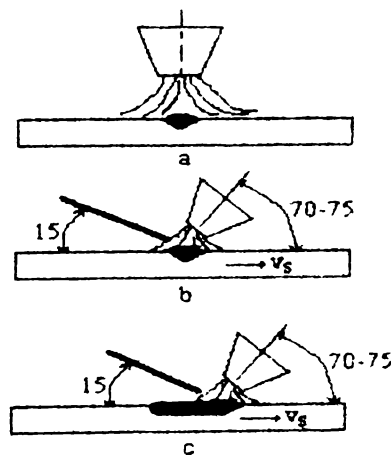


Figura 5.31. Modul operator la sudarea manuală WIG

Prin menținerea pistolului în poziție verticală, la o distanță $l_a = 2 - 4$ mm, sub acțiunea arcului electric se formează pe suprafața componentelor o baie metalică mobilă, (a). Se înclină apoi pistolul în funcție de sensul de sudare (spre stânga sau spre dreapta) și se aduce vergeaua de metal în spațiul arcului electric prin introducerea în marginea băii, (b). Sub acțiunea căldurii arcului electric și a băii are loc topirea vârfului vergelei și absorbția picăturii în baia metalică sub acțiunea tensiunilor superficiale. Vergeaua se retrage ușor, iar pistolul avansează cu un pas (c). Procesul se continuă aducând vergeaua din nou în zona arcului electric și fenomenele de transfer se reiau. Frecvența cu care are loc introducerea vergelei în spațiul arcului este redusă, 1 - 2 (3) Hz, datorită posibilităților limitate ale factorului uman. Pentru prevenirea pericolului de oxidare a vârfului vergelei se va evita scoaterea acestuia din zona de protecție a arcului. De desfășurarea corectă a

acestor etape depinde în mare măsură calitatea îmbinării sudate. Aceasta presupune însă o îndemănare deosebită a operatorului sudor obținută printr-un exercițiu îndelungat.

Pornind de la aceste aspecte rezultă că o metodă de creștere a productivității la sudarea WIG este introducerea mecanizată a materialului de adaos în arcul electric, pe plan mondial cunoscându-se numeroase încercări în această direcție cea mai cunoscută fiind sudarea orbitală WIG a țevilor. În toate situațiile însă introducerea sârmei electrod se face continuu prin intermediul unor sisteme de avans cu motoreductor și role de antrenare, asemănătoare sistemelor de avans standard utilizate la sudarea MIG/MAG.

Analiza etapelor privind desfășurarea modului operator la sudarea WIG, prezentat mai sus și a principiului de funcționare a sistemelor de avans prin impulsuri, arată cât se poate de limpede similitudinea dintre fenomenele ce au loc în cele două cazuri, ceea ce conduce la concluzia că sistemele de avans prin impulsuri se pretează perfect la sudarea WIG cu material de adaos.

Utilizarea sistemelor de avans prin impulsuri a sârmei electrod la sudarea WIG, prin mecanizarea introducerii acesteia în arcul electric, se caracterizează prin următoarele particularități distincte față de sistemele de avans clasice:

- simplitatea constructivă și funcțională a acestor sisteme;
- dozare precisă și riguros reproductibilă a materialului de adaos introdus în arcul electric, prin corelarea pasului și frecvenței impulsurilor la antrenarea sârmei electrod;

5.6.2. Instalația de sudare

Cercetările experimentale, [17], au urmărit verificarea posibilităților de utilizare a sistemelor de avans prin impulsuri cu electromagneți (EM) la introducerea mecanizată a sârmei electrod la sudarea WIG. Cercetările s-au axat pe două direcții:

- Sudare semimecanizată WIG, la care sârma electrod este adusă în zona arcului cu ajutorul sistemului de avans prin impulsuri cu EM, plasat în vecinătatea mesei de sudare, prin intermediul unui tub de ghidare și a unei piese de conducere, operatorul sudor realizând viteza de sudare și dirijarea materialului de adaos în baia metalică;
- sudarea mecanizată WIG prin montarea pistolului de sudare și a dispozitivului de avans prin impulsuri cu EM pe tractorul de sudare TUT.

Pentru efectuarea încercărilor experimentale s-a folosit o instalație de sudare WIG. Vederea de ansamblu a instalației este prezentată în figura 5.32.

Instalația cuprinde următoarele subansamble (părți principale):

- ✓ Sursa de sudare: MAGIC WAVE 300 (Firma Fronius), [99]. Sursa MW-300 este destinată sudării prin două procedee:
 - sudarea WIG în c.c. și c.a.;
 - sudarea cu electrod învelit, în c.c. și c.a.;

Echipamentul are o construcție modulară, subansamblele fiind fixate și montate pe o structură robustă. Părțile componente ale echipamentului sunt:

- sursa de sudare (invertor), cu blocul electronic de comandă;
- instalația de răcire în circuit închis (tip FK-7);
- pistolul de sudare WIG tip AW 42;
- Cleștele de sudare manuală cu electrozi înveliți;
- cablu de legare la masă (piesă);
- telecomenzi pentru comanda la distanță (opționale): sudarea în curent pulsant, sudarea prin electronituire, sudarea cu electrod învelit, sudarea WIG, pedală de picior pentru reglarea curentului;

Caracteristici tehnico – funcționale:

- tensiunea de alimentare (cu toleranță de $\pm 10\%$): 3 x 380 /400/ 415 V;
- frecvența: 50/60 Hz;
- puterea aparentă (la DA = 100%): 8,3 KVA;
- factorul de putere :0,98 – 0,99 ;
- randamentul: 81%;

- domeniu de reglare al curentului: 3 – 300 A;
- curentul nominal la DA=60 %: 300 A;
- frecvența c.a. la sudarea WIG și SE: 40 – 250 Hz;
- frecvența inverterului: 60 KHz;
- curentul permanent, la DA = 100%: 210 A;
- tensiunea de sudare (arcului): WIG = 0 – 48 V; SE = 0 - 48 V;
- tensiunea de mers în gol: 50 V;
- clasa de izolație: F;
- clasa de protecție: IP-21;
- masa: 118 Kg;

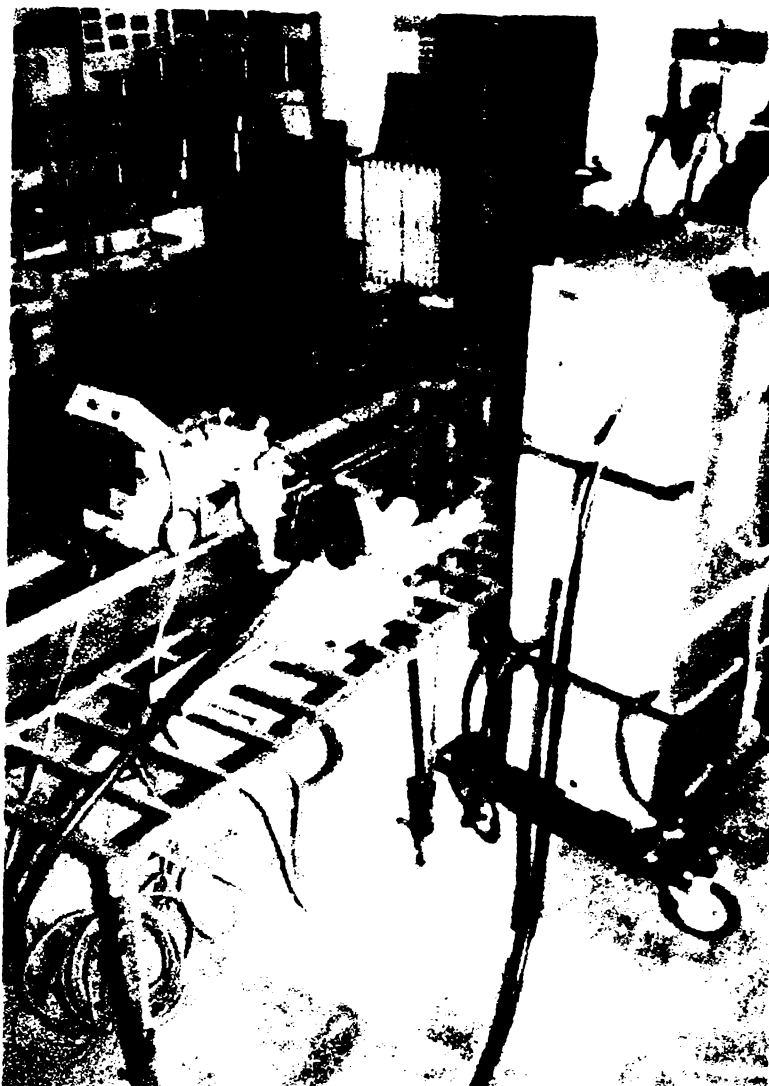


Figura 5.32. Vedere de ansamblu a instalației de sudare mecanizate WIG

- ✓ Tractorul de sudare TUT;
- ✓ Sistemul de avans prin impulsuri cu EM;
- ✓ Pistoletul de sudare;
- ✓ Masa de sudare cu calea de rulare;
- ✓ Elemente auxiliare: tahometru pentru măsurarea vitezei de sudare, dispozitiv de fixare a sistemului de avans, butelie de gaz, reductor cu debitmetru, cabluri de alimentare, furtun de gaz, etc..

Ciclograma de lucru în patru tacte a instalației de sudare WIG, MW -300 este prezentată în figura 5.33.

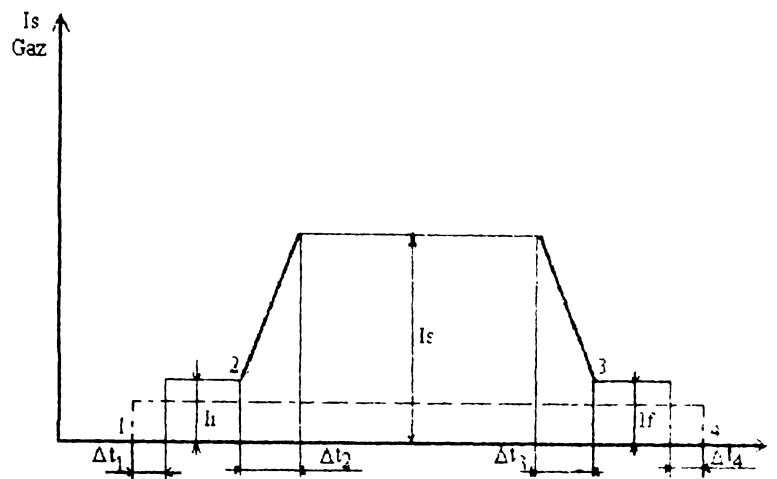


Figura 5.33. Ciclograma de lucru în patru tacte

În figura 5.34 se prezintă vederea de ansamblu a sudării semimecanizate WIG, respectiv în figura 5.35, se prezintă aspecte din timpul sudării semimecanizate cu avans prin impulsuri al sârmei electrod. Se observă plasarea sistemului de avans pe masa de lucru, în apropierea piesei de sudat, respectiv sistemul de conducere a sârmei electrod la locul sudării printr-un tub flexibil de ghidare (spirală din oțel sau tub de teflon). Dirijarea sârmei în zona rostului se face prin intermediul unei sonde formată dintr-o tijă de alamă prevăzută la capăt cu un ajutoraj (duză de contact) calibrat pe diametrul sârmei electrod.



Figura 5.34. Vedere de ansamblu la sudarea semimecanizată WIG

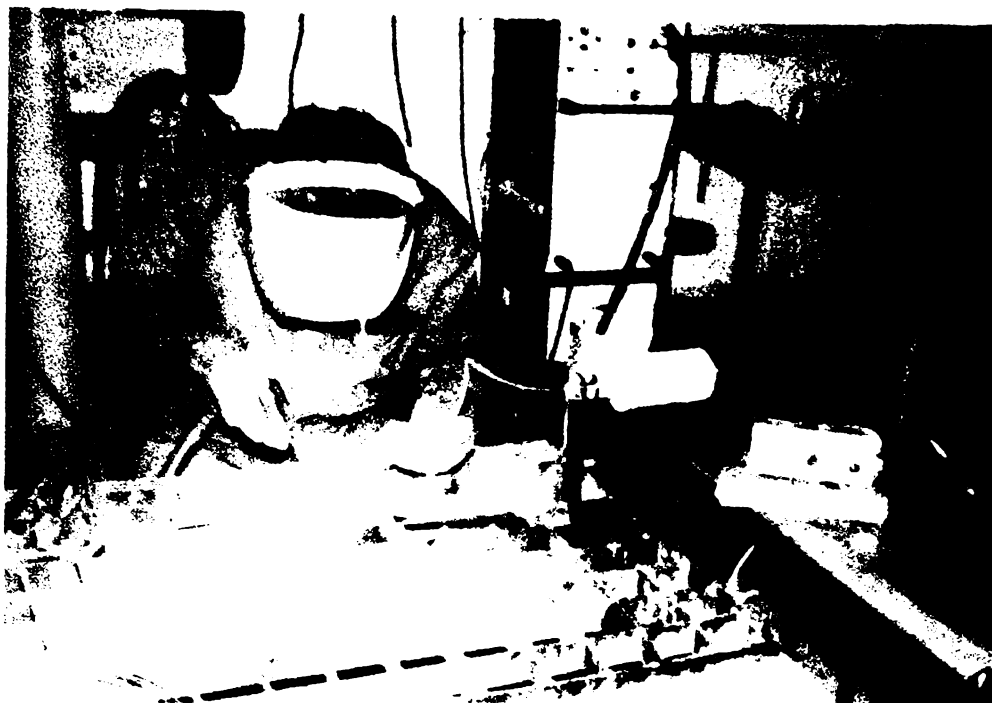


Figura 5.35. Sudarea semimecanizată WIG cu avans prin impulsuri a sârmei electrod

În figura 5.36 se prezintă un detaliu al fixării sistemului de avans, respectiv al capului de sudare pe tractor, la sudarea mecanizată WIG, iar în figura 5.37 se prezintă un detaliu din timpul sudării mecanizate WIG folosind sistemul prin impulsuri cu EM pentru avansul sârmei electrod. Se observă poziția relativă a capului de sudare față de sistemul de conducere a sârmei electrod în arcul electric.

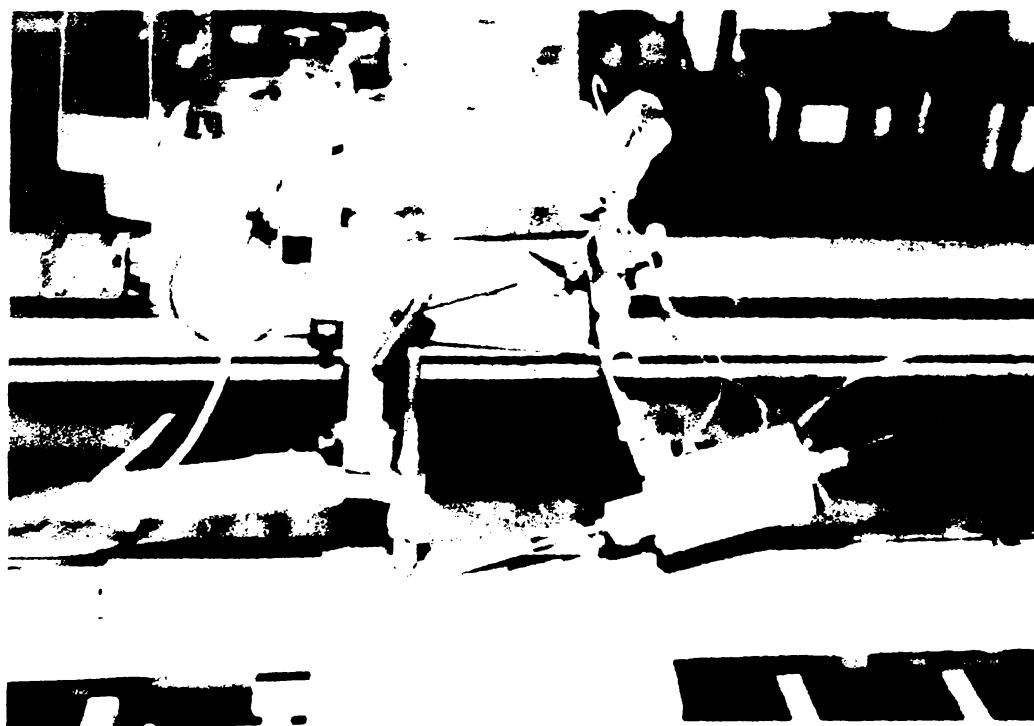


Figura 5.36. Vedere de ansamblu la sudarea mecanizată WIG



Figura 5.37. Sudarea mecanizată WIG cu avans prin impulsuri a sârmei electrod

5.6.3. Analiza rezultatelor experimentale

Cercetările au urmărit modul de funcționare a dispozitivului de avans prin impulsuri cu EM la sudarea mecanizată WIG cu material de adaos sub formă de sârmă bobinată pe tambur și observarea aspectelor tehnologice privind sudarea propriu zisă. Încercările au constatat în efectuarea unor depuneri pe o tablă de oțel folosind diverse regimuri de sudare prin modificarea succesivă a frecvenței impulsurilor aplicate sârmei electrod, folosind tehnica de sudare spre stânga sau spre dreapta. S-a urmărit influența frecvenței impulsurilor de avans a sârmei și a sensului de sudare asupra esteticii și geometriei depunerii, păstrând nemodificați parametrii tehnologici principali de sudare. În final s-a realizat stratul de rădăcină pentru o îmbinare cap la cap

În tabelul 5.7 sunt prezentate regimurile tehnologice de sudare utilizate.

Tabelul 5.7. Regimuri tehnologice de sudare WIG

Nr. crt.	Parametrii tehnologici de sudare WIG								Obs
	I_s (A)	U_a (V)	v_s (cm/min)	d_{cw} (mm)	d_c (mm)	Q (l/min)	$A(p)$ (mm)	f (Hz)	
1.	80	14	15	2.4	1.2	10	1	2	Depuneri
2.								5	
3.								8	
4.	120	15	15	2.4	1,2	8	1	7	Strat de rădăcină

Marca sârmei: OK Autrod 12.51 Esab (SG 2), Gazul de protecție: Ar 100%

În figura 5.38 se prezintă aspectul exterior al depunerilor realizate modificând succesiv frecvența impulsurilor (implicit viteza de avans a sârmei) de la valoarea minimă $f = 1,8$ Hz, cusătura 1, la valoarea maximă $f = 8,4$ Hz, cusătura 2, respectiv valoarea intermediară $f = 5$ Hz, cusătura 3.



Figura 5.38. Aspectul exterior al depunerilor (sudare spre dreapta)

În figura 5.39 se prezintă geometria depunerilor realizate, prin prelevarea și pregătirea unei probe metalografice macroscopice, (atac cu NITAL 10%). Sensul de sudare utilizat a fost spre dreapta sau prin “tragerea cusăturii”.



Figura 5.39. Analiza macroscopică a depunerilor (atac Nital 10%)

În figurile 5.40 și 5.41 se prezintă depunerile executate în condițiile de mai sus modificând doar sensul de sudare, spre stânga sau prin “împingerea cusăturii”.

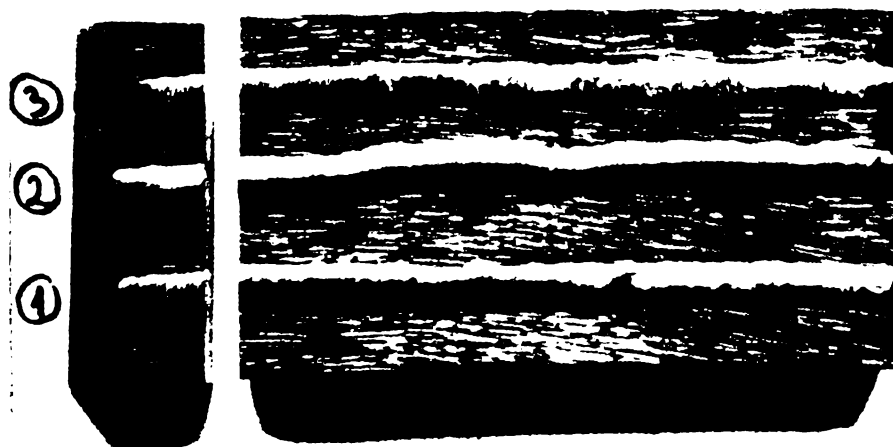


Figura 5.40. Aspectul exterior al depunerilor (sudare spre stânga)

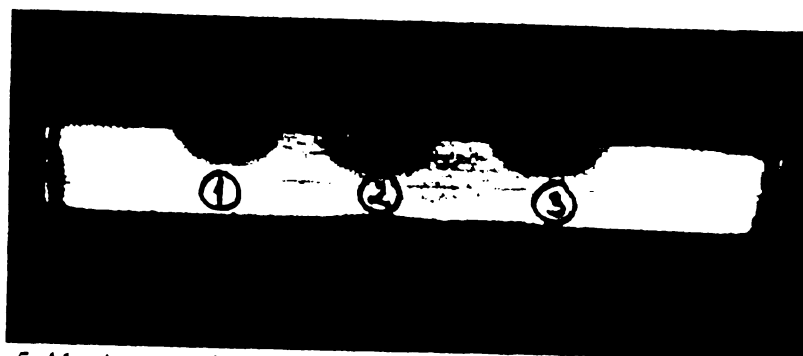


Figura 5.41. Aspectul macroscopic al depunerilor (atac Nital 10%)
În figura 5.42 se prezintă forma și dimensiunile rostului utilizat. [104]:

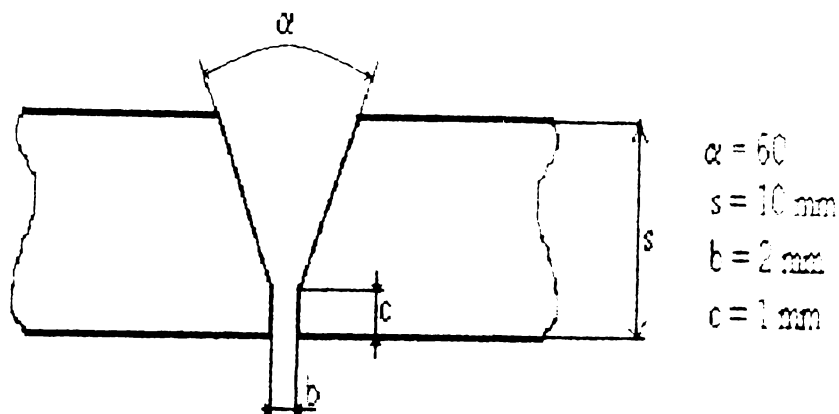


Figura 5.42. Forma și dimensiunile rostului
Aspectul suprafeței exterioare al cusăturii sudate, respectiv aspectul macroscopic al rădăcinii sunt prezentate în figura 5.43.



Figura 5.43. Aspectul rădăcinii sudate WIG folosind sistemul de avans prin impulsuri cu EM

În urma cercetărilor efectuate se desprind unele concluzii interesante, [17]:

- ✓ În cazul sudării semimecanizate condițiile de sudare sunt mai ușoare și mai confortabile, iar calitatea și estetica cusăturii mult îmbunătățite;
- ✓ Este posibilă creșterea frecvenței de introducere a sârmei electrod în arc, comparativ cu sudarea manuală WIG, cu efecte asupra creșterii productivității muncii prin creșterea ratei depunerii, respectiv posibilitatea creșterii vitezei de sudare. La sudarea manuală WIG cu material de adaos frecvența de introducere a vergelei este limitată la 2 Hz din motive obiective dictate de posibilitățile fizice ale operatorului sudor, pe când la sudarea semimecanizată frecvența de lucru depinde în principal de performanțele dispozitivului și de necesitățile tehnologice;
- ✓ Se evită pericolul contaminării electrodului prin atingerea cu materialul de adaos și se asigură în cel mai înalt grad protecția vârfului sârmei împotriva oxidării fiind evitată scoaterea acestuia în afara zonei de protecție a arcului;

- ✓ Volumul de material de adaos introdus este de fiecare dată riguros constant și egal cu volumul de sârmă aferent diametrului sârmei electrod și amplitudinii impulsului, rezultând o cusătură cu o geometrie (lățime, supraînălțare) practic constantă pe toată lungimea cusăturii;
- ✓ Avansul prin impulsuri a sârmei electrod determină apariția pe suprafața exterioară a cusăturii a unor solzi la fel ca în cazul sudării în curent pulsant cu avans continuu a sârmei electrod, respectiv ca la sudarea manuală WIG cu material de adaos, dar în acest ultim caz solzii sunt mai fini și mai regulați datorită frecvenței crescute și unei dozări precise a cantității de metal introdus la un impuls;
- ✓ Creșterea frecvenței impulsurilor de avans determină finisarea solzilor de pe suprafața exterioară a cusăturii și îmbunătățirea esteticii cusăturii la fel ca la sudarea WIG în curent pulsant prin creșterea frecvenței pulsurilor de curent;
- ✓ În condițiile păstrării constanței parametrilor tehnologici principali de sudare, cu creșterea frecvenței se observă creșterea supraînălțării și reducerea ușoară a pătrunderii cusăturii ca efect al creșterii cantității de metal de adaos topit în arcul electric;
- ✓ Schimbarea sensului de sudare determină modificarea geometriei cusăturii: sudarea spre stânga sau prin "împingerea cusăturii" crește lățimea și reduce pătrunderea și supraînălțarea cusăturii, îmbunătățind estetica acesteia, comparativ cu celălalt sens de sudare; se asigură și o mai bună dirijare a materialului de adaos în baia metalică, neexistând însă diferențe esențiale ca la sudarea manuală WIG;
- ✓ Unghiul de introducere a materialului de adaos în baia metalică poate influența stabilitatea arcului electric și transferul picăturii; valorile pot fi cuprinse în domeniul $15^\circ - 30^\circ$;
- ✓ Nu au fost semnalate defecte interne sau de legătură;
- ✓ Aspectul și calitatea deosebită a stratului de rădăcină, figura 5.43, dovedesc excelentele aptitudini ale sistemelor de avans prin impulsuri la antrenarea mecanizată a sârmei electrod la sudarea WIG;
- ✓ Instalațiile de sudare realizate constituie un excelent mijloc pentru însușirea corectă a modului operator specific sudării manuale WIG cu material de adaos, în cadrul ședințelor de instruire a specialiștilor, operatorilor sudori sau chiar a studenților, care doresc să-și însușească deprinderile practice la sudarea WIG.

În concluzie se apreciază că dispozitivele de avans prin impulsuri cu EM a sârmei electrod se pretează perfect la sudarea semimecanizată și mecanizată WIG cu material de adaos, cu profunde implicații asupra productivității, calității, modului operator, etc.. La toate acestea se adaugă simplitatea constructivă și funcțională a acestor mecanisme ceea ce le face competitive cu dispozitivele de avans clasice. Utilizarea acestor dispozitive în viitor va fi legată de mai buna cunoaștere a funcționării lor și a avantajelor pe care le conferă.

5.6.4. Perspective

Avantajul incontestabil al sistemelor de avans prin impulsuri cu EM la sudarea WIG cu material de adaos introdus mecanizat îl constituie utilizarea acestui sistem la sudarea WIG în curent pulsant, [17]. Principiul procedurii WIG în curent pulsant este prezentat în figura 5.44. [32], [109].

Parametrii principali ai curentului pulsant sunt :

- curentul de puls I_p ;
- curentul de bază I_b ;
- timpul de puls t_p ;
- timpul de bază t_b ;
- frecvența $f = 1/T$;
- curentul mediu I_m ;
- curentul efectiv I_{ef} ;

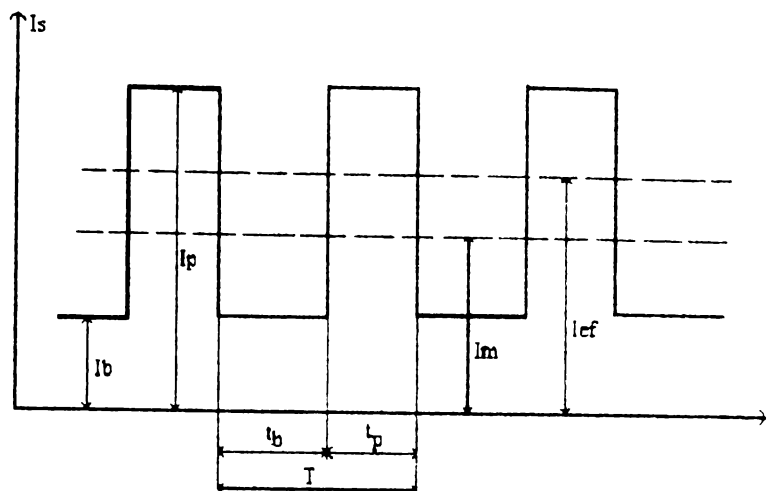


Figura 5.44. Principiul sudării WIG în curent pulsant

Dacă în cazul sudării în curent constant modul de introducere al sârmei electrod, continuu sau variabil (pulsat) nu are prea mare importanță (nu a fost dovedit clar până în prezent), în cazul sudării în curent pulsant el nu mai poate fi neglijat având în vedere desfășurarea procesului de sudare cu material de adaos.

Curentul de puls I_p de valori ridicate produce topirea metalului de bază și a materialului de adaos. Din acest motiv introducerea materialului de adaos în arc trebuie să se realizeze în timpul de puls. În timpul de bază valoarea redusă a curentului I_b , ($I_b \cong 25\% I_p$), permite solidificarea parțială a băii topite. În acest timp sârma electrod este retrasă, iar pistolul de sudare se deplasează cu un pas în direcția de sudare. Procesul se reia păstrând o bună sincronizare între frecvența impulsurilor de curent și frecvența de introducere a vergelei. Acest lucru este posibil în cazul frecvențelor reduse. De exemplu în cazul sudării manuale WIG cu material de adaos frecvența curentului pulsant se limitează la mai puțin de 5Hz, de obicei 1 – 2 Hz, [34], [51]. Totuși, în practică, sudarea WIG în curent pulsant folosind avansul continuu al sârmei electrod se întâlnește frecvent, cea mai cunoscută fiind sudarea orbitală în curent pulsant. În acest caz însă, sincronizarea descrisă mai sus nu are loc (sârma electrod este antrenată continuu) și prin urmare, pentru desfășurarea corectă a procesului de sudare trebuie asigurată o bună corelare între puterea medie a arcului pulsant și viteza de avans a sârmei electrod.

Pornind de la aspectele prezentate mai sus rezultă că depășirea acestei dileme se poate realiza cu ajutorul sistemelor de avans prin impulsuri, prin sincronizarea pulsurilor de avans ale sârmei electrod cu impulsurile de curent ale curentului pulsant.

Avantajele preconizate sunt:

- sincronizarea perfectă între puterea arcului electric și momentul introducerii materialului de adaos în arc;
- extinderea domeniului de lucru a frecvenței curentului pulsant în cazul sudării manuale cu material de adaos cu implicații asupra creșterii productivității prin creșterea ratei depunerii, respectiv creșterea vitezei de sudare; nu este de neglijat nici aspectul estetic al cusăturii prin finisarea solzilor;
- corelarea perfectă între viteza medie de avans a sârmei electrod și frecvența impulsurilor de curent, între cei doi parametri existând o corelație de forma $v_{as} = k \cdot f$;
- modificarea geometriei cusăturii;
- creșterea ratei depunerii prin creșterea vitezei de avans a sârmei electrod, la aceeași putere efectivă a arcului electric.

În această direcție se pare că sistemele de avans prin impulsuri cu EM, a sârmei electrod, au cea mai mare perspectivă de aplicare și dezvoltare.

5.7. Cercetări experimentale privind utilizarea sistemelor mecanice de avans prin impulsuri ale sârmei electrod la sudarea WIG

Cercetările au urmărit analiza posibilităților de utilizare a sistemelor mecanice de avans prin impulsuri a sârmei electrod la sudarea WIG mecanizată, pornind de la observația că acestea se caracterizează prin valori ale frecvenței pulsurilor aplicate sârmei electrod relativ mai mari decât în cazul sistemului de avans cu EM. Concret este vorba de utilizarea sistemului de avans prin impulsuri cu dispozitiv de prindere cu bile.

Cercetările s-au canalizat pe două direcții și anume:

- Curent de sudare constant și viteză de avans pulsată a sârmei electrod: $I_s = \text{ct}$, $v_{as} = \text{pulsat}$,
- Curent de sudare pulsă și viteză de avans pulsată a sârmei electrod: $I_s = \text{pulsat}$; $v_{as} = \text{pulsat}$.

În figura 5.45 se prezintă vederea de ansamblu a instalației de sudare pregătită în vederea efectuării cercetărilor experimentale.



Figura 5.45. Vedere de ansamblu a instalației experimentale pentru sudarea mecanizată WIG

- ◆ Instalația de sudare se compune din:
- ◆ sursa universală de sudare MW 300 (Fronius);
- ◆ sistemul de avans prin impulsuri a sârmei electrod cu dispozitiv de prindere cu bile (fixat pe suport);
- ◆ cutia de comandă și reglare a dispozitivului de avans a sârmei;
- ◆ pistolul de sudare pentru ghidarea sârmei electrod CSM – 315E, modificat;
- ◆ tractorul de sudare TUT;
- ◆ dispozitivul de fixare și poziționare a capului de sudare WIG (AW 42) și de ghidare a sârmei;
- ◆ masa de sudare cu calea de rulare;
- ◆ suportul cu bobina de sârmă;
- ◆ accesorii.

În figurile 5.46 și 5.47 sunt prezentate detaliile privind pregătirea pentru sudare, respectiv sudarea propriu-zisă, cu indicarea posibilităților de reglare și a poziției relative a capului de sudare, respectiv sistemului de dirijare a sârmei electrod în arcul electric.

Modificarea pistolului de sudare CSM 315E a constat în montarea pe corpul acestuia a unui potențiomtru pentru reglarea de la distanță a turației motorului de antrenare, implicat a vitezei de avans a sârmei electrod. Utilizarea pistolului de sudare în ansamblul instalației mecanizate a fost legată de faptul că el era deja adaptat la cutia de comandă pentru sudarea semimecanizată WIG

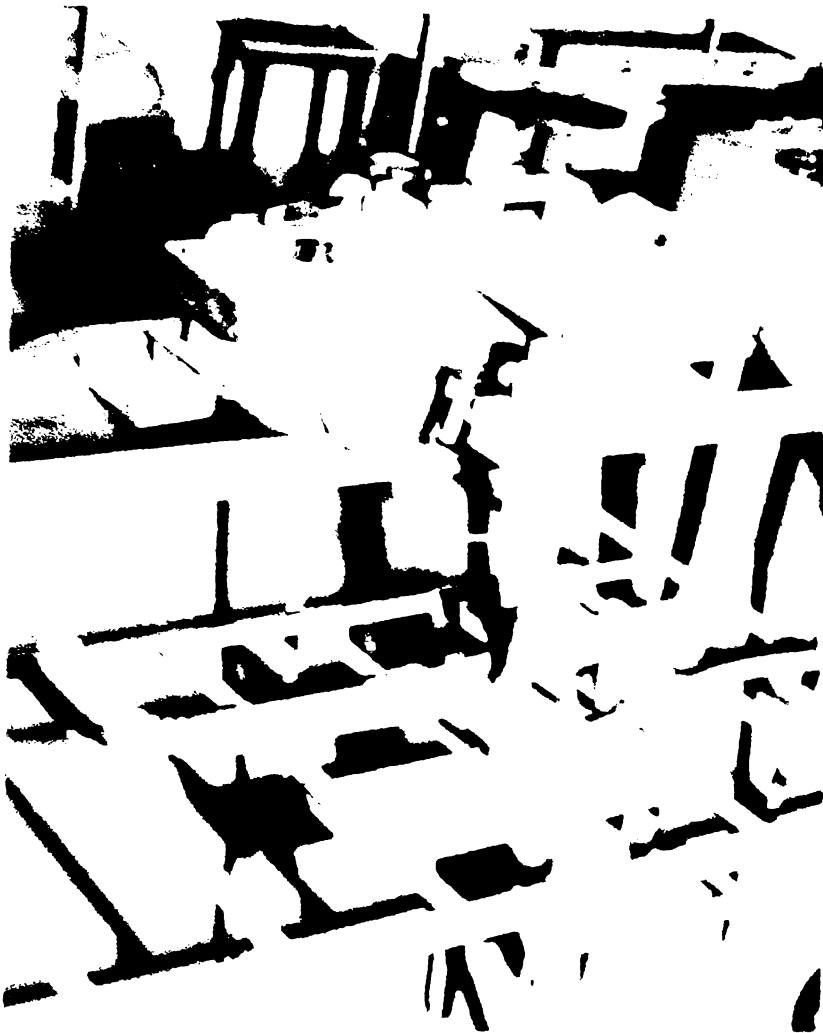


Figura 5.46. Detaliu cu dispozitivul de poziționare și reglare a capului de sudare

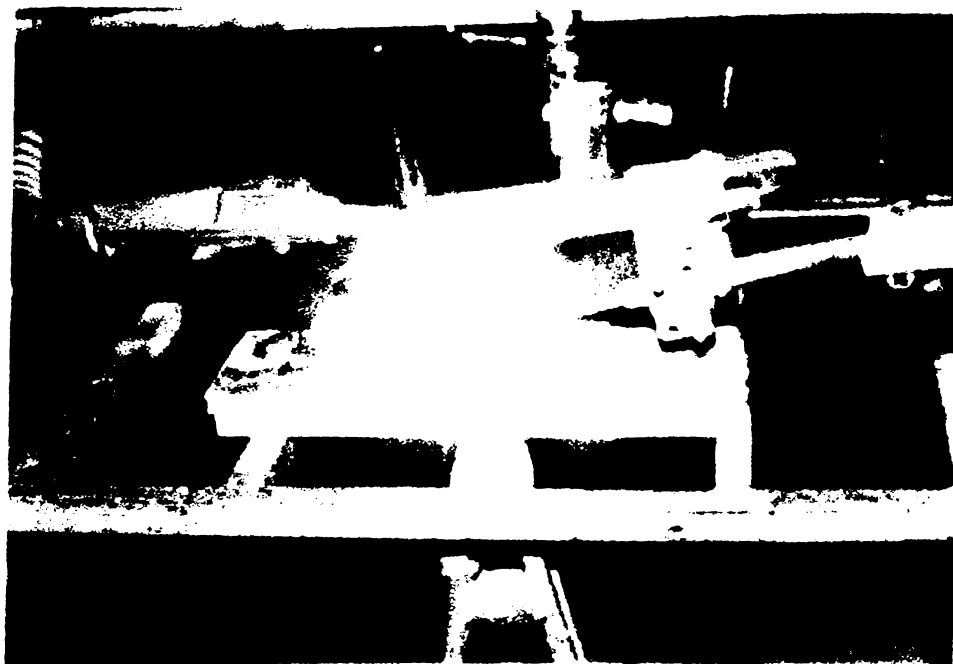


Figura 5.47. Detaliu privind poziția relativă a capului de sudare și a dispozitivului de dirijare a sârmei

5.7.1. Sudarea mecanizată WIG cu $I_s = ct.$ și $v_{as} = pulsat$

Deteminările au constat în efectuarea unor depuneri pe o tablă de oțel. Condițiile de realizare a încercărilor au fost:

- curentul de sudare $I_s=250$ A;
- viteza de sudare $v_s = 15 - 16$ cm/min;
- lungimea arcului $l_{arc} = 3$ mm
- debitul de gaz $D_g = 10$ l/min;
- tipul electrodului nefuzibil: EW Th20 //;
- diametrul electrodului $d_{ew} = 3.2$ mm;
- marca sârmei electrod: OK Autrod 12.51 (SG 2);
- diametrul sârmei electrod: $d_s = 1,2$ mm;
- unghiul dintre electrodul și piesă $\alpha=80-85^\circ$;
- unghiul dintre sârmă și piesă $\beta=15^\circ$;
- metalul de bază: OL 37; $s = 10$ mm.

Au fost realizate trei depuneri în condițiile prezentate în tabelul 5.8.

Tabelul 5.8. Condițiile de realizare a depunerilor

Nr. depunere	Parametrii regimului	Mărimea
I	Viteza de avans a sârmei v_{as}	≈ 2 m/min.
	Amplitudinea pulsului (pasul) A	4 mm
	Frecvența pulsurilor f	8 Hz
	Sensul de sudare	arc împins
II	Viteza de avans a sârmei v_{as}	≈ 2 m/min.
	Amplitudinea pulsului (pasul) A	4 mm
	Frecvența pulsurilor f	8 Hz
	Sensul de sudare	arc tras
III	Viteza de avans a sârmei v_{as}	$\approx 2,5$ m/min.
	Amplitudinea pulsului (pasul) A	4 mm
	Frecvența pulsurilor f	12 Hz
	Sensul de sudare	arc împins

În figura 5.48 se prezintă geometria depunerilor realizate în varianta arc împins, arc tras.



Figura 5.48. Aspectul macroscopic al depunerilor

5.7.2. Sudarea mecanizată WIG cu $I_s = pulsat$ și $v_{as} = pulsat$

Cercetarea urmărește analiza influenței și efectele sincronizării dintre frecvența impulsurilor curentului pulsat cu frecvența pulsurilor de avans a sârmei electrod asupra fenomenelor de transfer a materialului de adaos, asupra geometrie depunerilor, asupra ratei depunerii, etc la sudarea mecanizată WIG cu material de adaos.

În figura 5.49 se prezintă vederea de ansamblu a instalației de sudare. Aceasta se compune în principal din aceleași părți componente ca și instalația precedentă cu deosebirea că în locul pistolului CSM 315E s-a utilizat, pentru aducerea și ghidarea sârmei electrod în arc electric, un tub flexibil de teflon, prevăzut la un capăt cu un racord de cuplare la sistemul de avans, iar la celălalt capăt cu un sistem de dirijare precisă a sârmei în arc. Această modificare a permis reducerea forțelor de frecare a sârmei în tubul de ghidare prin folosirea unui material recunoscut prin coeficientul de frecare redus, respectiv prin scurtarea lungimii tubului de ghidare, cu efecte benefice asupra avansului sârmei electrod și a calității depunerilor.

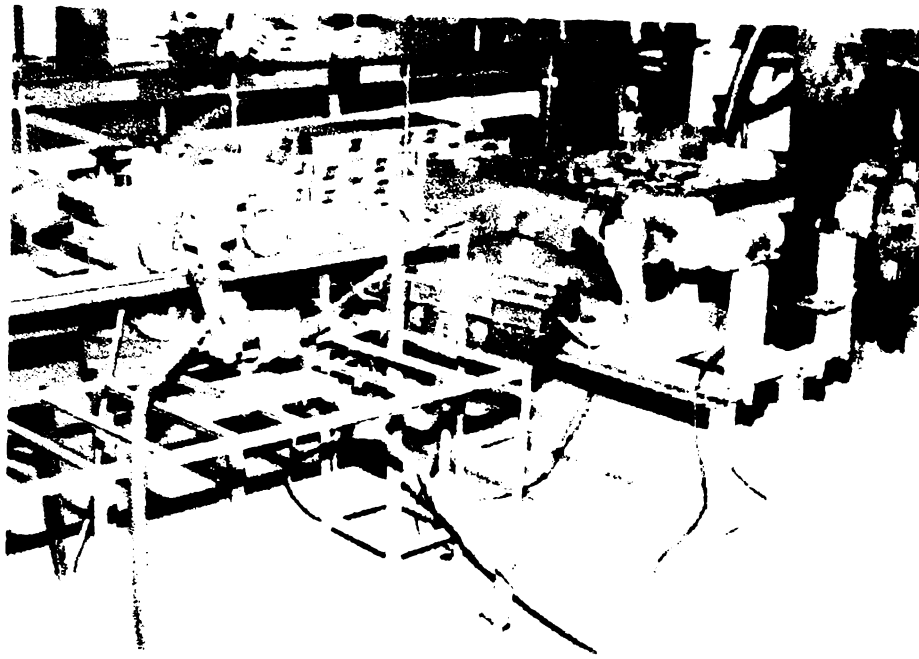


Figura 5.49. Instalația de sudare mecanizată WIG

Și în acest caz deteminările au constat în efectuarea unor depuneri pe o tablă de oțel. Au fost realizate 4 depuneri în condițiile prezentate în tabelul 5.9.

Parametrii tehnologici de sudare a depunerilor:

- ◆ curentul de impuls: $I_p=260$ A;
- ◆ curentul de bază: $I_b=50\%$ I_p ;
- ◆ timp de impuls: $t_p=70\%$ t_c ;
- ◆ timp de bază: $t_b=30\%$ t_c ;
- ◆ timp de ciclu: $t_c=1/f$;
- ◆ frecvența impulsurilor: $f = 10$ Hz; 20 Hz;
- ◆ viteza de sudare: $v_s = 14-15$ cm/min;
- ◆ lungimea arcului: $l_{arc}=4$ mm;
- ◆ debitul de gaz: $D_g=10$ l/min;
- ◆ tipul electrodului nefuzibil: EW Th20, [103];
- ◆ diametrul electrodului $d_{ew} = 3,2$ mm;
- ◆ marca sârmei electrod: OK Autrod 12.51 (G2Si), [94], [106];
- ◆ lungimea capătului liber: $l_{cl} = 20$ mm;
- ◆ unghiul dintre electrodul și piesă: $\alpha = 80-85^\circ$;
- ◆ unghiul dintre sârmă și piesă: $\beta=15^\circ$;

Tabelul 5.9. Condițiile de realizare a depunerilor

Nr. depunerii	Parametrii regimului	Mărimea
I	Viteza de avans a sârmei v_{as}	2,5 m/min
	Frecvența f	10 Hz
	Sensul de sudare	arc împins
II	Viteza de avans a sârmei v_{as}	2,5 m/min
	Frecvența f	10 Hz
	Sensul de sudare	arc tras
III	Viteza de avans a sârmei v_{as}	5,3 m/min
	Frecvența f	20 Hz
	Sensul de sudare	arc împins
IV	Viteza de avans a sârmei v_{as}	5,3 m/min
	Frecvența f	20 Hz
	Sensul de sudare	arc tras

În figura 5.50 este prezentat aspectul exterior al depunerilor.



Figura 5.50. Aspectul exterior al depunerilor

În figura 5.51 se prezintă aspectul macroscopic al depunerilor



Figura 5.51. Aspectul macroscopic al depunerilor

Analiza cercetărilor experimentale permite desprinderea următoarelor concluzii:

- ✓ Utilizarea sistemelor mecanice de avans a sârmei electrod, caracterizate prin frecvență mărită, la sudarea mecanizată WIG cu material de adaos este posibilă;
- ✓ Sincronizarea frecvenței impulsurilor de curent cu pulsurile de avans la frecvențe mai mari de 10 Hz este dificil de realizat fără existența unui sistem de reglare automată SRA. În cazul cercetărilor experimentale sincronizarea celor două frecvențe s-a realizat prin oscilografieră, respectiv prin măsurare cu ajutorul tahometrului de mare rezoluție, folosind metoda stroboscopică, [96];
- ✓ Se remarcă diluția mică a metalului de bază caracterizată de pătrunderea redusă a cusăturii. Geometria depunerilor este diferită de cazul sudării clasice prin pătrundere minimă la mijlocul depunerilor și topire mai pronunțată pe margini, asemănătoare unei "cocoase". Căldura necesară topirii sârmei electrod, introduse în mijlocul băii, produce scăderea temperaturii acestei zone cu consecințe asupra pătrunderii. Pe de altă parte diluția mică și pătrunderea redusă și uniformă este o consecință a bilanțului termic al arcului electric. Pentru o putere constantă a arcului electric topirea unei cantități mai mari de material de adaos conduce evident la diminuarea proporțională a puterii cedate metalului de bază și prin urmare la un volum mai redus de metal topit. Aceste particularități recomandă aplicarea procedurii la operații de încărcare prin sudare WIG. La acestea se mai adaugă geometria favorabilă a depunerilor caracterizată prin pătrundere uniformă, supraînălțare redusă, lățime adecvată, cu suprafață exterioară netedă cu solzi abia perceptibili o dată cu creșterea frecvenței.
- ✓ Creșterea frecvenței pulsurilor de avans determină creșterea vitezei de antrenare a sârmei și implicit creșterea ratei depunerii A_D . Aceasta este limitată însă de puterea arcului electric, care determină puterea de topire. Dacă amplitudinea și frecvența pulsurilor depășește valoarea optimă, pentru o putere dată a arcului electric, sârma electrod intră în baia metalică fără să se topească și la limită atinge fundul băii producând instabilitatea procesului de sudare și chiar stropiri. Aceasta a determinat în cadrul cercetărilor limitarea frecvenței pulsurilor la 20Hz pentru puterea dată a arcului electric.

- ✓ Rata depunerii este maximă la sudarea WIG cu $I_s = \text{pulsat}$, $v_{as} = \text{pulsat}$. Introducerea sârmei electrod în spațiul arcului electric în timpul de puls, când puterea arcului este maximă, permite introducerea unei cantități suplimentare de material de adaos materializată prin posibilitatea majorării amplitudinii pulsului. Desfășurarea optimă a procesului de sudare presupune însă sincronizarea perfectă a celor două frecvențe. În caz contrar procesul devine instabil, iar la limită se blochează.
- ✓ Creșterea frecvenței determină creșterea supraînălțării cusăturii, prin urmare trebuie corelată cu ceilalți parametri tehnologici pentru obținerea unei cusături cu geometrie și estetică favorabile. Creșterea lungimii arcului (implicit a tensiunii arcului) este limitată de evitarea topirii exagerate a capătului sârmei prin creșterea distanței dintre vârful acesteia și suprafața băii metalice.
- ✓ Folosirea diametrului de sârmă de 1,2 mm s-a dovedit a fi un dezavantaj, având în vedere coeficientul de topire mai mic ($\alpha_t = 0,0053 \frac{I_s}{d_s^2}$), [53], și prin urmare, topirea mai dificilă a acesteia în baia metalică. Folosirea sârmelor subțiri cu diametrul 0,8; 1,0 mm îmbunătățește productivitatea la sudare, prin creșterea ratei depunerii, respectiv îmbunătățește stabilitatea procesului de topire a sârmei electrod. În sprijinul acestei ipoteze stă utilizarea sârmelor cu diametru de max. 1 mm la sudarea orbitală, cel mai cunoscut procedeu de sudare mecanizată WIG cu material de adaos sub formă de sârmă bobinată.

Concluzii finale

Apărute la începutul anilor '70, utilizarea sistemelor de avans prin impulsuri a urmărit două aspecte principale, în primul rând posibilitatea reducerii forței de frecare din tubul flexibil de ghidare, respectiv influența și analiza avansului variabil prin impulsuri a sârmei electrod asupra transferului de metal topit din vârful sârmei. Această preocupare era motivată de găsirea unor metode mai simple, mai ieftine și mai eficiente de îmbunătățire a performanțelor echipamentelor de sudare în mediu de gaze protectoare MIG/MAG.

La baza acestui demers au stat, pe de o parte posibilitatea reducerii coeficientului de frecare dintre tubul flexibil de ghidare și sârma electrod prin antrenarea sârmei electrod cu viteză de avans relativ mare pe perioada impulsului, pornind de la relația invers proporțională dintre coeficientul de frecare și viteză în general, iar pe de altă parte proporționalitatea dintre viteza de avans a sârmei electrod și curentul de sudare, conform căreia o viteză de avans variabilă în timp determină generarea în circuitul de sudare a unui curent variabil, proporțional.

În acea perioadă teoria și utilizarea surselor de sudare în curent pulsant pentru modificarea modului de transfer erau în faza de pionerat și în plus foarte costisitoare. Sistemele de avans prin impulsuri se dovedeau a fi o alternativă viabilă și o soluție ideală având în vedere avantajele pe care le ofereau: simplitate constructivă și funcțională, gabarit redus, preț de cost scăzut, etc..

Deosebirea esențială dintre sistemele de avans clasice cu motoreductor și role de antrenare și sistemele de avans prin impulsuri constă în faptul că în primul caz sârma electrod este antrenată cu o viteză de avans continuă și constantă în timp, pe când în cel de-al doilea caz sârma electrod este antrenată cu o viteză de avans variabilă periodic cu o anumită amplitudine și frecvență, sub forma unor impulsuri. În funcție de modul de generare a acestor impulsuri aceste sisteme de avans sunt de două tipuri și anume, sisteme de avans cu generare mecanică a impulsurilor, respectiv sisteme de avans cu generare electromecanică folosind electromagneți.

O dată cu dezvoltarea electronicii de putere de după anii '80 și introducerea invertoarelor în construcția surselor de sudare a avut loc impulsivitatea și dezvoltarea surselor de sudare în curent pulsant cu performanțe superioare și la prețuri acceptabile. În acest context părea că interesul pentru sisteme de avans prin impulsuri a sârmei electrod va dispărea definitiv.

Se pare însă că sistemele de avans prin impulsuri revin în actualitate și că interesul pentru ele va crește în viitorul apropiat.

În sprijinul acestei afirmații stau preocupările, existente la ora actuală pe plan mondial a marilor producători de echipamente de sudare, privind realizarea unor instalații de sudare MIG/MAG în curent pulsant la care sârma electrod este antrenată cu o viteză de avans variabilă în timp cu o frecvență relativ scăzută, sub 10 Hz, determinată de posibilitățile limitate ale sistemelor de avans standard de antrenare a sârmei electrod cu frecvențe mai ridicate, ca urmare a inerției electromecanice a acestor sisteme. Se pare că nici utilizarea motoarelor cu rotor disc nu rezolvă prea mul această problemă. În plus deocamdată acestea sunt și foarte scumpe.

Această nouă variantă de sudare este cunoscută la ora actuală sub diferite denumiri în funcție de firma producătoare: INTERPULS (Firma MERCKLE), MEGAPULS (Firma REHM), SUPERPULS (Firma EWM), ALUPLUS (Firma CLOOS). În practică însă din motivele prezentate mai sus frecvența impulsurilor sârmei electrod este limitată la maximum 2 – 3 Hz.

Principiul sudării în curent pulsant cu avans variabil a sârmei electrod. Interpuls, este prezentat în figura 5.52, [100].

Viteza de avans a sârmei electrod este variabilă între două limite v_{as1} , respectiv v_{as2} , $v_{as1} < v_{as2}$, cu o frecvență teoretică de max 10 Hz. Corespunzător frecvența impulsurilor curentului pulsant se modifică de la f_1 la f_2 , cu $f_1 > f_2$, pentru a păstra nemodificate condițiile de transfer, respectiv mărimea picăturii de metal să rămână aproximativ constantă pentru cele două viteze de avans a sârmei. Este cunoscută proporționalitatea dintre viteza de avans a sârmei și frecvența impulsurilor de curent. Tot pentru păstrarea constantă a dimensiunilor picăturii se observă că valoarea curentului de impuls și valoarea timpului de impuls rămân nemodificate pentru cele două viteze de avans și prin urmare condițiile de topire și transfer a picăturii sunt riguros identice. Datorită modificării

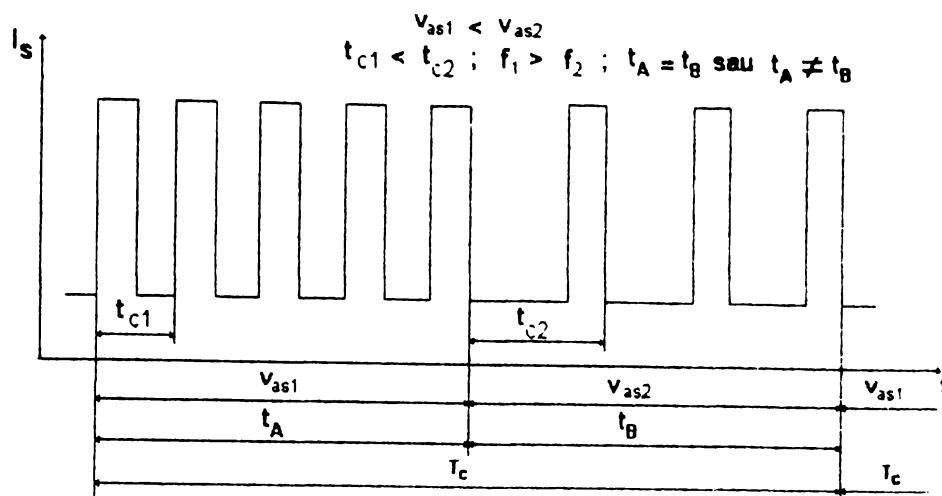


Figura 5.52. Principiul sudării MIG/MAG Interpuls

proportională a frecvenței rezultă că se modifică corespunzător valoarea timpului de bază. Frecvența impulsurilor de curent este mult mai mare decât frecvența de avans a sârmei electrod, ceea ce determină detașarea mai multor picături de metal pentru fiecare din cele două viteze de avans a sârmei, respectiv pentru cele două durate ale vitezelor v_{as1} , respectiv v_{as2} , care pot fi egale sau diferite între ele în funcție de necesitățile tehnologice. Se precizează că viteza de avans a sârmei în perioadele t_A , respectiv t_B este constantă.

Avantajele acestei variante de sudare, conform producătorilor, constau în:

- Calitate superioară a îmbinării sudate; calitatea cusăturii este comparabilă cu cea obținută la sudarea WIG.
- Productivitate ridicată prin viteza de sudare mare, respectiv rata depunerii ridicată specifică sudării MIG/MAG.
- Cusătură estetică, cu solzi pe suprafața exterioară, specifică sudării WIG; mărimea solzilor este determinată de frecvența impulsurilor de avans a sârmei electrod;
- Reducerea drastică a porilor comparativ cu sudarea MIG/MAG standard cu avans continuu a sârmei electrod; efectul este deosebit de favorabil la sudarea aluminiului și aliajelor sale, unde această tehnică se recomandă să se utilizeze preponderent la ora actuală. Mecanismul de reducere a porilor nu este pe deplin elucidat. Se pare însă că are loc o vibrație controlată a băii care favorizează eliminarea gazelor din baia metalică.
- În cazul aliajelor de titan s-a remarcat o finisare a granulației cusăturii. Explicația poate fi dată de vibrația băii metalice, dar și de energia liniară mai mică introdusă la sudare. Vibrația băii metalice produce sfărâmarea grăunților formați în baia metalică mărind numărul centrelor de cristalizare care determină finisarea granulației, teorie dezbătută în literatura de specialitate.
- Aport caloric mai redus și prin urmare tensiuni și deformări mai scăzute, ceea ce o recomandă în special la sudarea tablelor subțiri, etc..

Depășirea inconvenientului legat de frecvența scăzută, limitată, determinată de inerția electromecanică a sistemului de avans standard în ansamblul lui, se poate obține prin utilizarea sistemelor de avans prin impulsuri "clasice" la care frecvențele de avans a impulsurilor depășesc cu mult limitele actuale ale sistemelor moderne putând atinge valori de zeci sau chiar sute de herți. Posibilitatea utilizării frecvențelor ridicate de antrenarea sârmei electrod ar putea lărgi și mai mult avantajele prezentate mai sus. Nivelul cercetărilor la care s-a ajuns până în prezent în cadrul tezei nu permite tragerea unor concluzii ferme și fără echivoc, motiv pentru care nu se fac afirmații legate de acest aspect.

Sistemele de avans prin impulsuri s-au dovedit a fi ideale pentru antrenarea materialului de adaos (sârmă electrod) la sudarea WIG atât în variantă semimecanizată cât și în variantă mecanizată. Avantajele estimate sunt: creșterea productivității la sudare, calitate mai bună a cusăturii cu aspect estetic și geometrie favorabilă, ușurarea modului operator, dozare precisă a materialului de adaos introdus în arc și protecție sigură a acestuia împotriva oxidării, etc.. Prin

sincronizarea frecvenței impulsurilor de curent cu frecvența pulsurilor de avans a sârmei electrod se creează premisele și condițiile sudării WIG sinergice cu implicații majore asupra transferului de metal, respectiv asupra calității îmbinării sudate. Aceste sisteme de avans, simple și ieftine, ar putea echipa pe viitor instalațiile de sudare mecanizată WIG.

Dar, poate avantajul cel mai important al sistemelor de avans prin impulsuri a sârmei electrod rămâne modificarea modului de transfer a picăturii de metal topit la sudarea MIG/MAG, în domeniul transferului prin scurtcircuit și intermediar, dintr-un transfer nefavorabil caracterizat prin instabilitatea arcului electri, stropiri și pierderi mari de material de adaos prin stropi, într-un transfer fără scurtcircuit asemător transferului în curent pulsant, fără stropiri sau cu stropiri puține.

Deosebirea principală dintre cele două moduri de transfer constă în faptul că la sudarea în curent pulsant mecanismul de transfer se realizează prin generarea unui curent pulsant cu frecvență mare 50 – 300 Hz, sub acțiunea curentului de puls de valori ridicate 300 – 500 A care determină apariția unei importante forțe electromagnetice “pinch” care produce desprinderea picăturii dimensiuni mici, comarabile cu diametrul sârmei electrod, pe când la sudarea cu avans în impulsuri a sârmei electrod desprinderea picăturii este realizată de generarea unei forțe suplimentare favorabile desprinderii picăturii care a fost denumită sugestiv “forță inerțială” a cărei valoare este comparabilă cu forța “pinch”, dar a cărei natură este de această dată mecanică.

În acest context prin utilizarea sistemelor de avans prin impulsuri ar putea fi reconsiderate echipamentele clasice de sudare MIG/MAG care ar putea dota dispozitivele de avans a sârmei electrod prin înlocuirea mecanismelor de avans standard, cu obținerea unor rezultate spectaculoase, comparabile cu cele ale asurselor moderne de sudare MIG/MAG în curent pulsant cu invertor.

La toate aceste aspecte nu trebuie neglijate simplitatea constructivă și funcțională, gabaritul și greutatea redusă, prețul de cost scăzut, etc..

În acest context studiul și cercetarea sistemelor de avans prin impulsuri sunt pe deplin justificate și merită acordarea unei atenții sporite în continuare putând constitui în orice moment o alternativă viabilă. Rezultatele obținute pot constitui temeiul unor cercetări ulterioare, respectiv lărgirea acestor cercetări, domeniul rămânând larg deschis în acest sens.

Teza de doctorat și-a propus studiul și analiza sistemelor de avans prin impulsuri a sârmei electrod la sudarea în mediu de gaze protectoare și prin rezultatele obținute și-a dorit aducerea unei contribuții privind mecanismele și factorii care stau la baza funcționării acestor sisteme de avans în particular, respectiv o contribuție la preocupările de creștere a performanțelor de sudare în mediu de gaze protectoare în general, preocupări care cunosc o cea mai mare dinamică la ora actuală pe plan mondial în acest domeniu.

1. Sistematizarea și analiza unitară a modurilor de transfer ale picăturii, a forțelor care acționează în coloana arcului, a proprietăților termo-fizice ale gazelor de protecție, și acțiunea lor asupra procesului tehnologic de sudare MIG/MAG, cap. 1.2 și 1.3.

- Este dezvoltată teoria mecanismului care generează forța de reacție anodică, insuficient analizată și explicată în literatura de specialitate, cap. 1.2.4.

- Este explicată teoriei forței electrodinamice ca efect conjugat a două acțiuni, acțiunea electromagnetică a forței “pinch” de strangulare a picăturii, respectiv acțiunea termodinamică a forței de reacție generată de vaporizarea instantanee a metalului topit la interfața picătură – sârmă electrod, cap. 1.2.5.

- Se descrie, în premieră pentru literatura de specialitate românească, teoria mecanismului de transfer prin tensiune superficială S.T.T. în corelație cu problematica stabilității procesului de transfer, cap. 1.3.6.

- Este dezvoltată teoria distribuției gradientului de temperatură din coloana arcului, figura 1.2 și implicațiile complexe asupra procesului de sudare.

2. Definirea și dezvoltarea, pentru prima dată (premieră absolută) în literatura de specialitate, a teoriei “FORȚEI INERȚIALE”, cap. 1.2.7.

Este prezentat și analizat mecanismul de generare a “forței inerțiale”, specifică sistemelor de avans prin impulsuri a sârmei electrod, și acțiunea ei asupra fenomenului de acumulare a metalului topit la vârful sârmei electrod și a modificării modului de transfer al picăturii la sudarea MIG/MAG comparativ cu modurile de transfer clasice.

Calculul “forței inerțiale” arată că ponderea acesteia, în ansamblul forțelor standard care acționează în arcul electric, este foarte mare, comparabilă ca ordin de mărime cu valoarea forței electromagnetice “pinch”, figura 1.10, ceea ce explică capacitatea ei de influențare asupra modificării modului de transfer a picăturii de metal.

Fiind favorabilă desprinderii picăturii, acțiunea “forței inerțiale” este comparată cu acțiunea forței electromagnetice “pinch” la sudarea în curent pulsant, cu diferența că natura ei este una mecanică.

Acțiunea forței inerțiale este benefică la puteri mici și medii ale arcului electric, specifice zonelor de transfer prin scurtcircuit și intermediar, fiind total defavorabilă la puteri mari ale arcului specifice zonei transferului prin pulverizare, datorită accelerațiilor foarte mari imprimată picăturilor de metal, producând defecte tipice de genul creștăturilor marginale și stropiri intense din baia metalică.

3. Enunțarea “TEORIEI MECANISMULUI TRANSFERULUI INERȚIAL”, ca un mod nou de transfer al picăturii de metal topit la sudarea MIG/MAG, cap. 1.3.7.

“Transferul inerțial” al picăturii de metal este specific sistemelor de avans prin impulsuri ale sârmei electrod și este o consecință a acțiunii “forței inerțiale” generate cu ajutorul acestor sisteme.

Datorită condițiilor tehnologice în care are loc și a suprapunerii domeniilor de transfer, de interes, pe care le acoperă (zonele transferului prin scurtcircuit și intermediar), “transferul inerțial” este comparat cu sudarea sinergică în curent pulsant, diferind doar modul în care se realizează transferul în cele două cazuri.

Sunt analizate aspectele de ordin tehnologic ale acestui inedit și totodată simplu mod de transfer. Ca și implicații tehnologice se remarcă în mod deosebit:

- ✓ sincronizarea transferului prin scurtcircuit al picăturii ca efect al transferului inerțial, fiind enunțată teoria transferului sinergic la acest tip de transfer, figura 1.42, teorie *Know How*, care

preocupă specialiștii și marile firme producătoare de echipamente de sudare MIG/MAG la ora actuală;

- ✓ are loc modificarea modului de transfer a picăturii de metal dintr-un transfer prin scurtcircuit, sau intermediar, caracterizat prin arc instabil și stropiri mari, într-un transfer fără scurtcircuitări ale arcului electric, figura 1.40, caracterizat prin stabilitate procesului, reducerea stropirilor și chiar eliminarea acestora, prin creșterea ușoară a tensiunii arcului electric.

4. Sistematizarea soluțiilor constructive ale sistemelor de avans prin impulsuri și a dispozitivelor de prindere (apucare) ale sârmei electrod, cap. 3.1.1, cap. 3.1.3.

5. Realizarea unui număr de trei sisteme de avans prin impulsuri ale sârmei electrod, cap. 3.2

5.1. Primul sistem de avans prin impulsuri al sârmei electrod este un sistem mecanic cu dispozitiv de prindere cu șaibă, cap. 3.2.1, figura 3.34.

Mecanismul de avans se remarcă prin soluția constructivă și funcțională extrem de simplă și o concepție modulară flexibilă. Se remarcă montarea dispozitivelor de avans și de blocare a sârmei electrod într-un “cartuș” cilindric interschimbabil care se înlocuiește foarte rapid prin intermediul unui sistem de fixare cu excentric. Pentru lărgirea gamei parametrilor de impuls (amplitudine și frecvență), s-au realizat elemente de acționare a șaibei sub formă de camă cu două și trei profile active.

5.2. Al doilea sistem de avans mecanic prin impulsuri al sârmei electrod are la bază un dispozitiv de prindere cu bile, cap. 3.2.2, figura 3.38.

Soluția constructivă și funcțională este mai pretențioasă, însă oferă o gamă mult mai largă de posibilități de reglare a vitezei de avans a sârmei electrod.

Au fost efectuate cercetări experimentale pentru studiul modificării pasului de avans în funcție de mărimea forței de rezistență la avansul sârmei electrod, modelate prin răsucirea sârmei pe un canal de ghidare elicoidal, efectuate pentru sârme din oțel, respectiv din aluminiu, figura 5. S-a demonstrat că la frecvențe mici ale impulsurilor pentru avansul sârmei sub 10Hz, pentru pasul de avans de 1,5 mm și lungimea tubului flexibil de ghidare de 3m eroarea măsurată a pasului de avans, a sârmei electrod cu diametrul de 1,2 mm, corespunde practic cu cea calculată. La creșterea frecvenței, viteza de avans reală a sârmei electrod se deosebește de viteza teoretică. Probabil cauza este determinată de fenomenele dinamice datorate deformațiilor elastice ale sârmei electrod în tubul de ghidare. Acest lucru trebuie luat în considerare la alegerea tipului de sistem de avans prin impulsuri a sârmei electrod și la proiectarea acestuia pentru obținerea unui impuls de avans cât mai apropiat de valoarea prescrisă.

5.3. Al treilea sistem de avans prin impulsuri al sârmei electrod este cu electromagnet, cap. 3.4.3, figura 3.46.

A fost proiectat și realizat un electromagnet de construcție specială, de tip plonjor, cu dispozitiv de comutație rapidă, figura 3.41. Pentru alimentarea electromagnetului s-a conceput o sursă de tensiune fixă, cu frecvența reglabilă între 20 –80 Hz printr-un grup RC, calculată să funcționeze într-un regim dinamic puternic, folosind ca element principal de comandă un circuit integrat temporizator de putere TBA 315, figura 3.43.

6. Proiectarea cutiei de alimentare și comandă a sistemelor de avans prin impulsuri, cap 3.2.4.

S-a proiectat și realizat un echipament de comandă și reglare flexibil în construcție modulară și compactă (valiză) care se poate adapta cu ușurință sistemelor de avans realizate, respectiv poate comanda o instalație sau echipament de sudare semimecanizată sau mecanizată în mediu de gaze protectoare MIG/MAG.

7. Determinarea analitică a legii de mișcare a sistemelor de avans prin impulsuri, cap. 4

Au fost stabilite prin metoda analitică și grafică legile de mișcare ale mecanismelor de avans prin impulsuri cu dispozitiv de prindere cu șaibă, respectiv cu dispozitiv de prindere cu bile. relațiile, 4.19 și 4.20. Din analiza parametrilor cinematici ai celor două mecanisme se constată că acestea au o legea de mișcare armonică cosinusoidală.

Se demonstrează că, deși graficul de variație teoretică al vitezei de avans a sârmei, respectiv al curentului pulsant generat cu ajutorul sistemelor de avans prin impulsuri are o variație intermitentă (cu întreruperi), arcul electric nu se stinge, păstrându-și stabilitatea, ca urmare a alungirii arcului sub valoarea critică, în perioada blocării sârmei electrod (cursa de mers în gol).

8. Analiza funcționării sistemelor de avans prin impulsuri și influența asupra transferului de metal și a îmbinării sudate, cap. 5.1.

Pentru efectuarea cercetărilor experimentale a fost concepută și realizată o instalație de sudare mecanizată în care pentru antrenarea sârmei electrod au fost utilizate sistemele de avans prin impulsuri realizare.

Sunt evidențiate aspectele tehnologice care apar la sudare, dintre care se menționează:

- ✓ Utilizarea avansului prin impulsuri a sârmei electrod nu produce modificarea modului de transfer a picăturii de metal dacă gazul de protecție utilizat este dioxidul de carbon în proporție de 100%. Mai mult, împrășcările de material prin stropi sunt mai mari ca la sudarea clasică cu avans continuu a sârmei electrod, iar arcul electric este mai instabil.
- ✓ Creșterea stropirilor în acest caz se poate explica prin accelerarea picăturii de metal la trecerea prin coloana arcului electric determinată de acțiunea forței inertiiale care face ca picătura să plonjeze în baia de metal cu viteză mare producând împrășcări de metal din baia topită. Datorită dimensiunilor mari ale picăturii și a accelerației de nivel ridicat forța inercială are valori considerabile.
- ✓ Accelerarea puternică a picăturii de metal la sudarea cu valori mari de curent conduce la apariția creștăturilor marginale foarte adânci, defect caracteristic, frecvent întâlnit în timpul cercetărilor experimentale, care probabil va limita aplicarea procedurii de sudare în domeniul puterilor mari ale arcului electric.
- ✓ Stabilitatea mult mai bună a arcului electric (comparabilă cu sudarea standard), în cazul folosirii amestecului bogat în argon; modul de transfer al picăturii este prin scurtcircuit nesensibilizându-se diferențe față de cazul avansului continuu al sârmei electrod;
- ✓ Creșterea ușoară a tensiunii arcului conduce la dispariția scurtcircuitelor obținându-se un transfer asemănător cu cel specific arcului pulsant. Desprinderea picăturii la acest nivel al curentului de sudare este favorizată de generarea forței inertiiale a cărei pondere este relativ mare și care acționează favorabil desprinderii picăturii de metal.

9. Determinarea experimentală a formei impulsurilor de curent folosind sistemele de avans prin impulsuri ale sârmei electrod, cap. 5.3.

Oscilografierea formei de variație a celor doi parametri tehnologici de sudare curent – tensiune, a permis evidențierea celor două moduri de transfer inercial ale picăturii de metal, specifice sistemelor de avans prin impulsuri și anume transferul prin scurtcircuit, respectiv transferul fără scurtcircuit. Trecerea de la un mod de transfer la celălalt se realizează prin creșterea ușoară a tensiunii arcului electric. Această analiză permite desprinderea a două concluzii importante:

1. În cazul transferului prin scurtcircuit nu se observă nici o diferență între oscilogramele de variație a parametrilor tehnologici curent – tensiune în cazul avansului prin impulsuri al sârmei electrod comparativ cu avansul continuu (standard), respectiv nu se poate vorbi de apariția unui curent variabil (pulsant) ca efect a antrenării prin impulsuri a sârmei electrod cu o anumită amplitudine și frecvență, figurile 5.5,...,5.9. Explicația acestui fenomen este dată de suprapunerea etapelor de transfer a picăturii prin arc, respectiv a arderii arcului, cu fazele avansului sârmei electrod.

2. Creșterea ușoară a tensiunii arcului și deci implicit a lungimii acestuia determină evitarea fenomenului de scurtcircuitare a arcului la transferul picăturii. Oscilogramele de variație a parametrilor, *curentul de sudare – tensiunea arcului*, figurile 5.10,...,5.18, confirmă dispariția scurtcircuitelor la transferul picăturii ca efect a creșterii lungimii arcului, fără a deranja însă stabilitatea acestuia. Analizând cu atenție oscilogramele se observă o ușoară variație sinusoidală a curentului de sudare între două limite I_{smin} , respectiv I_{smax} . Această variație discretă a curentului confirmă apariția unui curent variabil în circuitul de sudare ca urmare a avansului variabil a sârmei electrod. Se arată că variația curentului de sudare nu poate fi responsabilă de modificarea modului de transfer a picăturii, și că acesta are loc exclusiv pe seama forței inerțiale.

10. Determinarea experimentală a formei impulsurilor de alimentare a electromagnetului, cap. 5.5.

Au fost evidențiate cauzele care determină blocarea electromagnetului la depășirea valorii critice a frecvenței de alimentare.

Rezultatele determinărilor experimentale permit stabilirea condițiilor practice privind proiectarea bobinei electromagnetului și a sistemului de revenire în poziția inițială a dispozitivului mecanic de apucare a sârmei electrod pentru creșterea performanțelor electromagneților de acționare a sistemelor de avans.

11. Cercetări experimentale privind utilizarea sistemelor de avans prin impulsuri cu electromagneți la sudarea WIG, cap. 5.6.

➤ S-a urmărit în premieră posibilitatea utilizării sistemelor de avans prin impulsuri cu electromagneți (EM) la introducerea mecanizată a sârmei electrod la sudarea WIG, atât în varianta semimecanizată cât și mecanizată. În acest sens au fost concepute două standuri de lucru, figurile 5.32 și 5.35.

Aspecte tehnologice și concluzii:

- ✓ În cazul sudării semimecanizate condițiile de sudare sunt mai ușoare și mai confortabile, iar calitatea și estetica cusăturii mult îmbunătățite;
- ✓ Este posibilă creșterea frecvenței de introducere a sârmei electrod în arc, comparativ cu sudarea manuală WIG, cu efecte asupra creșterii productivității muncii prin creșterea ratei depunerii, respectiv posibilitatea creșterii vitezei de sudare.
- ✓ Se evită pericolul contaminării electrodului prin atingerea cu materialul de adaos și se asigură în cel mai înalt grad protecția vârfului sârmei împotriva oxidării fiind evitată scoaterea acestuia în afara zonei de protecție a arcului;
- ✓ Avansul prin impulsuri a sârmei electrod determină apariția pe suprafața exterioară a cusăturii a unor solzi fini și reguțați datorită frecvenței crescute și unei dozări precise a cantității de metal introdus la un impuls, asemanător cu sudarea WIG în curent pulsant;
- ✓ Unghiul de introducere a materialului de adaos în baia metalică poate influența stabilitatea arcului electric și transferul picăturii; valorile pot fi cuprinse în domeniul $15^\circ - 30^\circ$;
- ✓ Calitatea deosebită a îmbinării sudate, fără defecte interne sau de legătură;
- ✓ Aspectul și calitatea deosebită a stratului de rădăcină, figura 5.43, dovedesc excelențele aptitudini ale sistemelor de avans prin impulsuri la antrenarea mecanizată a sârmei electrod la sudarea WIG;
- ✓ Instalațiile de sudare realizate constituie un excelent mijloc pentru observarea și analizarea modului operator specific sudării WIG cu material de adaos, utilă la instruirea operatorilor sudori sau chiar a studenților, care doresc să-și însușească deprinderile practice la sudarea WIG.

12. Cercetări experimentale privind utilizarea sistemelor mecanice de avans prin impulsuri a sârmei electrod la sudarea WIG, cap. 5.7.

Au fost analizate și comparate două cazuri inedite la sudarea WIG și anume:

- *Curent de sudare constant și viteză de avans pulsată a sârmei electrod: $I_s = ct$; $v_{as} = pulsat$;*
 - *Curent de sudare pulsat și viteză de avans pulsată a sârmei electrod: $I_s = pulsat$; $v_{as} = pulsat$.*
- Aspecte tehnologice și concluzii:
- ✓ Utilizarea sistemelor mecanice de avans prin impulsuri a sârmei electrod, caracterizate prin frecvență mărită, la sudarea mecanizată WIG cu material de adaos este posibilă;
 - ✓ Sincronizarea frecvenței impulsurilor de curent cu impulsurile de avans ale sârmei, la frecvențe mai mari de 10 Hz, este dificil de realizat fără existența unui sistem de reglare automată SRA.
 - ✓ Se remarcă diluția mică a metalului de bază caracterizată de pătrunderea redusă a cusăturii. Geometria depunerilor este diferită de cazul sudării clasice, prin pătrundere minimă la mijlocul depunerilor și topire mai pronunțată pe margini, asemănătoare unei "cocoșe". Căldura necesară topirii sârmei electrod, introduse în mijlocul băii, produce scăderea temperaturii acestei zone cu consecințe asupra pătrunderii. Pe de altă parte diluția mică și pătrunderea redusă și uniformă este o consecință a bilanțului termic al arcului electric. Pentru o putere constantă a arcului electric topirea unei cantități mai mari de material de adaos conduce evident la diminuarea proporțională a puterii cedate metalului de bază și prin urmare la un volum mai redus de metal topit. Aceste particularități recomandă aplicarea procedurii la operații de încărcare prin sudare WIG. La acestea se mai adaugă geometria favorabilă a depunerilor caracterizată prin pătrundere uniformă, supraînălțare redusă, lățime adecvată, cu suprafață exterioară netedă cu solzi abia perceptibili o dată cu creșterea frecvenței.
 - ✓ Creșterea frecvenței impulsurilor de avans determină creșterea vitezei de antrenare a sârmei. Aceasta este limitată însă de puterea arcului electric, care determină puterea de topire. Dacă amplitudinea și frecvența impulsurilor sârmei depășește valoarea optimă, pentru o putere dată a arcului electric, sârma electrod intră în baia metalică fără să se topească și la limită atinge fundul băii producând instabilitatea procesului de sudare și chiar stropiri.
 - ✓ Rata depunerii este maximă la sudarea WIG cu $I_s = pulsat$, $v_{as} = pulsat$. Introducerea sârmei electrod în spațiul arcului electric în timpul de puls, când puterea arcului este maximă, permite introducerea unei cantități suplimentare de material de adaos materializată prin posibilitatea majorării amplitudinii pulsului. Desfășurarea optimă a procesului de sudare presupune însă sincronizarea perfectă a celor două frecvențe. În caz contrar procesul devine instabil, iar la limită se blochează.
 - ✓ Folosirea diametrului de sârmă de 1,2 mm s-a dovedit a fi un dezavantaj, având în vedere coeficientul de topire mai mic și prin urmare topirea mai dificilă a acesteia în baia metalică. Folosirea sârmelor subțiri cu diametrul 0,8; 1,0 mm îmbunătățește productivitatea la sudare, prin creșterea ratei depunerii, respectiv îmbunătățește stabilitatea procesului de topire a sârmei electrod. În sprijinul acestei ipoteze stă utilizarea sârmelor cu diametru de max. 1 mm la sudarea orbitală, cel mai cunoscut procedeu de sudare mecanizată WIG cu material de adaos sub formă de sârmă bobinată.

Bibliografie

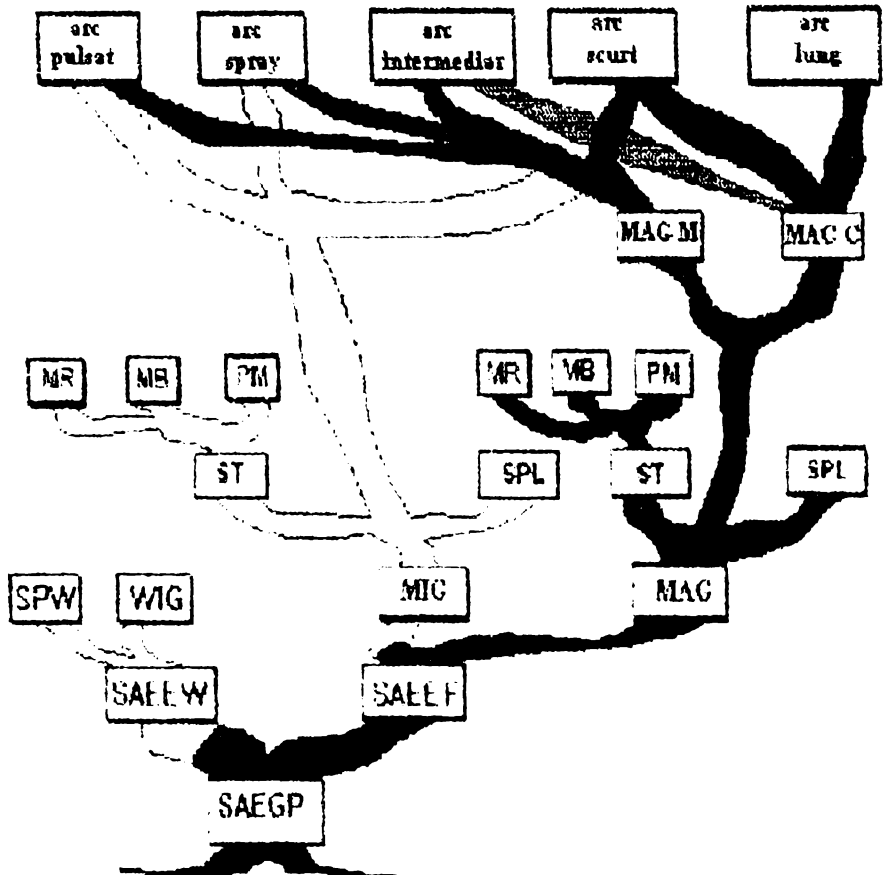
1. *Aichele Günter* – 116 Reguli de sudare în mediu de gaz protector. Ed. Sudura, Timișoara, 1999.
2. *Andea, P.* – Electromagneți. Ed. Helicon, Timișoara, 1993.
3. *Anghela, N. ș.a.* – Sudarea în mediu de gaze protectoare. Ed. Tehnică, București, 1982.
4. *Backman, A.* – Development within materials technology-Consumables in the 21st century. Rev. Svetsaren, Vol. 49, nr. 1, The Esab Group, Suedia, 1995.
5. *Backman, A. ș.a.* – Welding Consumables for the 1991's. Rev. Svetsaren, vol. 46, nr. 2, Suedia, 1992.
6. *Baum, L., Fichter, V.* – Der Schutzgaz-Schweisser, Teil II: MIG/MAG Schweißen. DVS Verlag GmbH, Düsseldorf, Germania, 1990.
7. *Benea, F.* – Fenomene de transfer în arcul electric de sudare. Colecția ARES, OID-ICM, 1985.
8. *Breat, I.L., Eliot, D.* – Utilisation des sources de courant pulse en soudage MIG. Rev. Soudage et Techniques Connexes, nr. 5, 1987.
9. *Burcă, M.* - Asupra conductibilității termice a gazului de protecție la sudarea MIG/MAG. Analele "Universității din Oradea", Fascicola Mecanică, Secțiunea: Tehnologii în construcția de mașini, Oradea, 1999.
10. *Burcă, M.* - Modelarea forțelor ce determină transferul de metal la sudarea MIG/MAG. Contract de cercetare științifică nr. 584, INCDSIM ISIM, Timișoara, 2000.
11. *Burcă, M.* - Observații asupra zonelor de transfer la sudarea MIG/MAG. Analele "Universității din Oradea", Fascicola Mecanică, Secțiunea: Tehnologii în construcția de mașini, Oradea, 1999.
12. *Burcă, M. Gliša, Gh. ș.a.* - Influența gazului de protecție asupra geometriei rostului la sudarea MIG/MAG. Conferința anuală A.S.R. "SUDURA - 2000", Arad, 2000.
13. *Burcă, M. ș.a.* - Caracterizarea tipurilor de transfer al picăturii de metal la sudarea MIG/MAG. Proceedings of the scientific communications meeting of Aurel Vlaicu University, 3rd edition, vol. 2, Arad, 1996.
14. *Burcă, M. ș.a.* - Determinarea analitică a formei impulsurilor de curent generate cu ajutorul sistemelor de avans prin impulsuri ale sârmei electrod. A IX-a Conferință "Tehnologii moderne de sudare", Galați, 1996.
15. *Burcă, M. ș.a.* - Forțele dezvoltate în arcul electric și acțiunea lor asupra transferului de metal la sudarea MIG/MAG. Proceedings of the scientific communications meeting of Aurel Vlaicu University, 3rd edition, vol. 2, Arad, 1996.
16. *Burcă, M. ș.a.* - Instalație de sudare mecanizată în mediu de gaze protectoare MIG/MAG folosind avansul prin impulsuri al sârmei electrod. Consfătuirea anuală a sudorilor, Timișoara, 1988.
17. *Burcă, M., Negoșescu, St. ș.a.* - Cercetări experimentale privind utilizarea sistemelor de avans prin impulsuri cu electromagneți la sudarea mecanizată WIG. Conferința internațională ASR "SUDURA – prezent și viitor" Sibiu, 1998.
18. *Burcă, M., Negoșescu, St. ș.a.* - Considerații asupra parametrilor tehnologici la sudarea MIG/MAG în curent pulsant. A III - a sesiune de comunicări științifice "Creație și creativitate universitară în perioada de tranziție", Analele Universității, Seria A, Nr. 2, Tg. Jiu, 1995.
19. *Burcă, M., Negoșescu, St. ș.a.* - Stabilitatea arcului electric la sudarea MIG/MAG în curent pulsant. A II-a sesiune de comunicări științifice a Universității "Aurel Vlaicu" Arad. "Realizări tehnice și cultural –științifice pe meleaguri arădene". Secțiunea: Sudura. Roboți industriali. Arad, 1994.
20. *Burcă, M., Pavel, M.* - Dispozitiv de avans prin impulsuri al sârmei electrod la sudarea MIG/MAG. Noutăți în domeniul tehnologiilor și utilajelor pentru prelucrări la cald. Vol.III. Tehnologii și utilaje pentru sudare, Brașov, 1988.
21. *Burcă, M., Popa, D.* - Acțiunea proprietăților fizico-chimice ale gazelor de protecție la sudarea MIG/MAG. A XIV-a sesiune de comunicări științifice a cadrelor didactice, vol. II, Constanța, 1995.

22. *Burcă, M., Safta, V.* - Considerații asupra transferului de metal la sudarea MIG/MAG cu avans prin impulsuri al sârmei electrod. Revista "SUDURA", An VII, nr. 2/1999.
23. *Burcă, M., Safta, V. ș.a.* - Determinarea experimentală a formei impulsului de curent generat cu ajutorul sistemelor de avans prin impulsuri ale sârmei electrod. A IX-a Conferință "Tehnologii moderne de sudare", Galați, 1996.
24. *Burcă, M., ș.a.* - Studiul influenței polarității directe a arcului electric la sudarea MIG/MAG asupra diluției. A IX-a Conferință "Tehnologii moderne de sudare", Galați, 1996.
25. *Burcă, M., ș.a.* - Sudarea MIG/MAG în curent pulsat – o cale de creștere a productivității la sudarea în gaze protectoare. Sesiunea de comunicări științifice a Universității din Oradea, Analele Universității din Oradea, Fascicola Mecanica, Oradea, 1998.
26. *Burcă, M., Țunea, D.* – Tehnologia sudării prin topire, Îndrumător de laborator. Lito. UTT, Timișoara, 1993.
27. *Civertko, A.I., ș.a.* – Napravlenia razrabotok mehanizmov podaci elektrodnoi provoloki v sovremenih aparatih glia dugovoi svarki. Rev. Avtomaticheskaiia svarka, nr. 10, 1975.
28. *Cooksey, C.J., Milner, D.R.* – Metal transfer in gas-shielded arc welding. Physics of the welding arc, A Symposium, Londra, 1962.
29. *Davies, H. ș.a.* – An investigation of the interaction of a molten droplet with a liquid weld pool surface: a computational and experimental approach. Rev. Welding Journal, nr. 1, 2000.
30. *Defize, L.F.* – Metal transfer in gas-shielded welding arcs. Physics of the welding arc, A Symposium, Londra, 1962.
31. *Dehelean, D.* – Tehnologia sudării prin topire, vol. I. Lito. UTT, Timișoara, 1994.
32. *Dehelean, D.* Sudarea prin topire. Ed. Sudura, Timișoara, 1997.
33. *Dilthey, U. ș.a.* – Domenii de lucru la sudarea cu arc electric în mediu de gaz protector CO₂ și amestec de gaze utilizând surse de curent de sudare moderne, tranzistorizate. Seminar româno-german "Sudarea în mediu de gaz protector-Stadiu actual și perspective", Timișoara, 1991.
34. *Dzelnitzki, L., Killing, R.* – Sudarea WIG cu impulsuri în diferite domenii de frecvență. Rev. Sudura, nr.2, 2001.
35. *Farwer, A.* – Folosirea gazelor de protecție la sudarea MAG-stadiu de aplicare și direcții de dezvoltare. Vol. ARS-DVS, 1993.
36. *Haas, B. ș.a.* – Training mit dem Lichtbogenprojektor. Rev. Der Praktiker, nr.8, 1993.
37. *Hermans, M.J.M. ș.a.* – Characteristic features of the short circuiting arc welding process. Rev. Welding Review International, mai, 1993.
38. *Hermans, M.J.M., Ouden, G.* – Physical aspects of short circuiting gas metal arc welding. Vol. Welding and Related Technologies for the 21st Century, Kiyv, Ukraine, 1998.
39. *Ishizaki, K.* – The behavior of a liquid drop and the phenomenon of metal transfer. Physics of the welding arc, A Symposium, Londra, 1962.
40. *Killing, R.* – Schutzgase zum Lichtbogenschweißen-schweißtechnische Eigenschaften. Rev. Der Praktiker, nr.8, Germania, 1993.
41. *King, L.A., Howes, J.A.* – Material transfer in the welding arc. Physics of the welding arc. A Symposium, Londra, 1962.
42. *Kovacs, Fr., Perju, D.* – Sinteza mecanismelor, vol. II. Lito. IPTVT, Timișoara, 1977.
43. *Koveșnikov, S.P. ș.a.* – Bezreductornie mehanizmi impulsnoi podaci svarocinoi provoloki. Rev. Zvarocinoie proizvodstvo, nr. 5, 1984.
44. *Lebedev, V.A.,* – Zahvatii dlia impulsnoi podaci elektrodnoi provoloki. Rev. Avtomaticheskaiia svarka, nr. 10, 1984.
45. *Lebedev, V.A., Nikitenko, V.P.* – Perspektivnie napravlenia v konstruirovani mehanizmov podaci elektrodnoi provoloki. Rev. Avtomaticheskaiia svarka, nr. 7, 1983.
46. *Ludwig, H.C.* – Plasma-energy transfer in gasshielded welding ares. Rev. Welding Journal, vol. 38, nr. 7, 1959.
47. *Manolescu, N.* – Probleme de teoria mecanismelor și a mașinilor, vol II. EDP, București, 1968.
48. *Mantel, W.* – On the physics of welding arcs. Physics of the welding arc, A Symposium, Londra, 1962.

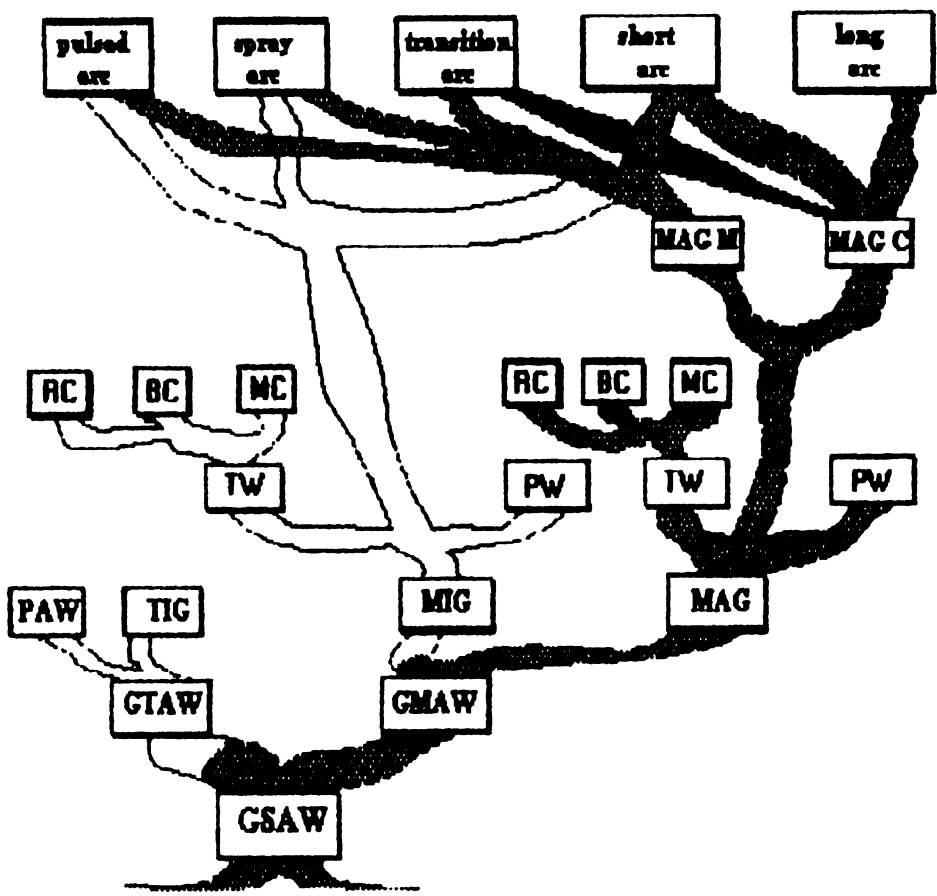
49. *Micloși, V. ș.a.* – Bazele proceselor de sudare. EDP, București, 1982.
50. *Micloși, V. ș.a.* – Echipamente pentru sudare. EDP, București, 1984.
51. *Miloș, L., Burcă, M.* - Tehnologii specifice de sudare în mediu de gaze protectoare. Contract de cercetare științifică nr. 5004/386, Consiliul Național al cercetării științifice universitare, CNCSU, 1996.
52. *Negoîtescu St.* – Instalații specializate de sudare în gaze protectoare. Curs, Studii aprofundate, anul VI, Catedra UTS, Timișoara, 1988/1999.
53. *Negoîtescu St.* – Stabilitatea sistemelor sursă-arc. Curs, Master, anul VI, Catedra UTS, 1999/2000.
54. *Negoîtescu, St. ș.a.* – Echipamente pentru sudare-Îndrumător de laborator. Lito IPTVT, Timișoara, 1985.
55. *Negoîtescu, St., Burcă, M. ș.a.* – Cercetări asupra sudării în impulsuri în vederea aplicării în România. Contract de cercetare științifică nr. 71, ISIM, Timișoara, 1992.
56. *Negoîtescu, St., Burcă, M. ș.a.* - Considerații asupra stabilității arcului electric la sudarea MIG/MAG cu sârme subțiri. A II-a sesiune de comunicări științifice a Universității "Aurel Vlaicu" Arad. "Realizări tehnice și cultural -științifice pe meleaguri arădene". Secțiunea: Sudura. Roboți industriali, Arad, 1994.
57. *Negoîtescu, St., Burcă, M. ș.a.* - Optimizarea vitezei de sudare în mediu de gaze protectoare MIG/MAG. Noutăți în domeniul tehnologiilor și utilajelor pentru prelucrare la cald a metalelor, Vol. VII, Tehnologii de sudare, Brașov, 1993.
58. *Oliveira Santos, J.F.* – Processo MIG. Lito. Instituto de soldadura e qualidade, ISQ Lisabona, Portugalia, 1982.
59. *Paton, B.E.* – Problems and advances in welding at the transition of the centuries. Vol. Welding and Related Technologies for the 21st Century, Kiyv, Ukraine, 1998.
60. *Peicov, A., Tușaliu, P.* – Aparate electrice – Proiectare și construcție. Ed. Scrisul Românesc. Craiova, 1088.
61. *Pekkari, Bertil* – Framtida svetsmetoder I en uthållig miljö. Rev. Svetsen, nr. 6, Finlanda, 2000.
62. *Pixley, M.* – Inverter technology in welding power source. Rev. Welding Review International, vol. 13, nr. 1, SUA, 1994.
63. *Platz, J.* – Moderne Schweißgeräte mit transistor Leistung steilen zum MIG/MAG und WIG-Schweißen. Rev. Schweißtechnik, vol. 49, Germania, 1995.
64. *Pomaska, H.U.* – MAG Welding-Not a sealed book. Verlag G.J. Munz AG, by Linde AG, 8023 Höllriegelskreuth, München, Germania, 1991.
65. *Pop, E., Chivu, M.* – Măsurile electrice și magnetice, vol. 2. Litografia IPTVT, Timișoara, 1976.
66. *Popescu, I.* Fizica plasmei și aplicații. Ed. Științifică și Enciclopedică, București, 1981.
67. *Popovici, Vl. ș.a.* – Echipamente pentru sudare, vol. I. Lito. IPTVT, Timișoara, 1980.
68. *Prezytochi, W.* – Transistors and microprocessors in new design of welding arc power supplies it means foreign the implementation of effective welding methods. Rev. Biuletyn Instytutu Stawalnictwa w gliwicach, nr. 2-3, Polonia, 1991.
69. *Sadler, H.* – A look at the fundamentals of gas metal arc welding. Rev. Welding Journal, vol. 78, nr. 5, 1999.
70. *Safta, V.* – Controlul îmbinărilor și produselor sudate, Ed. Facla, Timișoara, Vol. I 1984, Vol. II 1986.
71. *Safta, V., Burcă, M.* - Sistem de avans prin impulsuri al sârmei electrod cu dispozitiv de prindere cu bile. Sesiunea de comunicări ASR "Procedee speciale în tehnica sudării și acoperirii", Arad, 1991.
72. *Safta, V., Burcă, M. ș.a.* - Cercetarea unor sisteme noi de avans prin impulsuri și determinarea influenței asupra calității îmbinărilor sudate. Contract de cercetare științifică nr. 90 - Faza II, Ministerul învățământului și științei, MIS, 1992.
73. *Safta, V., Burcă, M. ș.a.* - Extinderea procedeelelor, tehnologiilor și echipamentelor de sudare mecanizată în mediu de gaze protectoare. Contract de cercetare științifică nr. 90 - Faza I, Ministerul învățământului și științei, MIS, 1991.

74. *Safta, V., Burcă, M. ș.a.* - Particularități ale polarității curentului la sudarea în mediu de gaze protectoare MIG/MAG. Noutăți în domeniul tehnologiilor și utilajelor pentru prelucrare la cald a metalelor, Vol. VI, Echipamente pentru sudare, Brașov, 1993.
75. *Safta, V., Burcă, M. ș.a.* - Sisteme noi de avans al sârmei electrod pentru sudarea în mediu de gaze protectoare. Seminar româno – german “Sudarea în mediu de gaze protectoare - Stadiu actual și tendințe de dezvoltare”, Timișoara, 1991, Revista “SUDURA”, Nr. 4/91.
76. *Safta, V.I. și Safta, V.I. jr.* – Defectoscopie industrială nedistructivă. Ed. Sudura, Timișoara, 2001.
77. *Sălăgean, Tr.* – Sudarea cu arcul electric. Ed. Facla, Timișoara, 1977.
78. *Sălăgean, Tr.* – Tehnologia procedeelor de sudare cu arc. Ed. Tehnică, București, 1985.
79. *Scorobețiu, L.* – Bazele proceselor de sudare. Lito. Universitatea din Brașov, 1979.
80. *Serđjuk, G.B.* – Magnetic forces in arc welding metal transfer. Physics of the welding arc, A Symposium, Londra, 1962.
81. *Smith, A.A.* – Characteristics of the short-circuiting CO₂-shielded arc. Physics of the welding arc, A Symposium, Londra, 1962.
82. *Stava, E.K.* – Low Spatter, Low Smoke, GMAW Welding Process. Rev. Steel Fabricators' Review, vol. 9, USA, 1996.
83. *Stava, E.K.* – Soldatura con reduccion de chispa. Rev. Metalmeccanica International, nr. 2, 1996.
84. *Stava, E.K.* – The Surface-tension-transfer power source: A new low spatter arc welding machine. Rev. Welding Journal, nr.1, vol. 73, SUA, 1993.
85. *Stava, E.K.* – Źródło prądu spawania STT-nowa generacja inwertorowych zrodela prądu. Biuletyn Instytutu Spawalnictwa W Gliwicach, nr. 1, Polonia, 1995.
86. *Stava, E.K., Lazaro, A.* – Fuente de energia de transferencia por tension superficial (Surface-Tension-Transfer). Nueva maquina para la soldadura MAG con muy bajas proyecciones. Rev. Soldadura y Tecnologias De Union, nr. 32/12, Portugalia, 1995.
87. *Stănescu, I. Tache, V.* – Dispozitive pentru mașini unelte, ediția a II-a. Ed. Tehnică, București, 1977.
88. *Stenke, V.* – Gaze utilizate pentru protecția rădăcinii și pentru sudare. Rev. Sudura, nr. 3, 1991.
89. *Trofin, I.* – Sudarea sinergică. SID 115, OID-ICM, 1992.
90. *Tušek, J.* – Nov izvor vasilnega toka za obločno varjenje – Skoraj brez brizganja. Rev. Varilna tehnika, nr. 4, Slovenia, 1995.
91. *Vaş, Al ș.a.* – Analiza oportunității re tehnologizării în România a sudării manuale prin sudare în mediu de CO₂. Conferința comună DVS-ASR “Tendințe noi de dezvoltare în sudură”, Timișoara, 1993.
92. *Zgură, Gh. ș.a.* – Tehnologia sudării prin topire. EDP, București, 1983.
93. *Wang, X. ș.a.* – A wave controlling method for CO₂ welding using saturable inductor. Rev. China Welding, vol. 8, nr. 1, China, 1999.
94. *** – Filler materials for manual and automatic welding, ESAB Welding Handbook, Fifth edition, Göteborg, Suedia, 1998.
95. *** – Materiale pentru sudare, încărcare și lipire fabricate în România, ediția a II-a. Ed. 2B, Tipografia Brumar, Timișoara 1998.
96. *** - Digital Photo/Contact Tachometer-Operation manual. Japonia.
97. *** – Gaze de protecție la sudare. Dezvoltare-consultanță-utilizare. Linde, Linde Gaz România SRL.
98. *** – Instalația de sudare Luc500 Aristo; Dispozitivul de avans al sârmei electrod MED-44. Esab GmbH, 1992.
99. *** – Instalația de sudare WIG MW 300. Fronius Schweisstechnik, 1992.
100. *** – Pulse-Arc Schweisstechnik. Vol. Merkle- Schweißmaschinenbau GmbH.
101. *** – Reduction of metal spatter in consumable-electrode welding in CO₂. Rev. Paton Welding, nr. 6, Ucraina, 2000.
102. *** – Schweißschutzgase: Entwicklung-beratung-anwendung. Linde AG Werksgruppe Technische Gase.

103. *** – SR EN 26848/93 – Electrozi de wolfram pentru sudare cu arc electric în mediu de gaz inert și pentru sudare și tăiere cu plasmă.
104. *** – SR EN 29692/94 – Sudarea cu arc electric cu electrod învelit, sudarea cu arc electric în mediu de gaz protector și sudarea cu gaze prin topire. Pregătirea pieselor de îmbinat de oțel.
105. *** – SR EN 439/96 –. Materiale pentru sudare consumabile. Gaze de protecție pentru sudare și tăiere cu arc electric.
106. *** – SR EN 440/96 – Materiale pentru sudare consumabile. Sârme electrod și depuneri prin sudare pentru sudare cu arc electric în mediu de gaz protector cu electrod fuzibil a oțelurilor nealiate și cu granulație fină. Clasificare.
107. *** – The physics of welding, 2nd Edition. Pergamon Press. Maxwell House, New York, SUA, 1986.
108. *** – The Procedure Handbook of Arc Welding, thirteenth edition. The Lincoln electric company, printed în USA, 1994.
109. *** – Welding Handbook-Welding Processes, 8th edition, vol.2. R.L.O. Brien Editor, 1991.
110. *** – Welding Handbook-Welding Technology, 8th edition. vol.1. R.L.O. Brien Editor, 1991.
111. *** – Welding power sources-The requirements and the options. Rev. Welding & Metal Fabrication, nr. 8, 1995.
112. *** – Welding processes for year 2000. Rev. Svetsarea, vol. 46, nr. 2, Suedia, 1992.
113. *** – STAS 7502/87 – Îmbinări sudate. Formele și dimensiunile rosturilor la sudarea prin procedeele MAG și MIG.



Structura genealogică a procedeelor de sudare în mediu de gaze protectoare (abrevieri – limba română)



Structura genealogică a procedeelor de sudare în mediu de gaze protectoare (abrevieri – limba engleză)