

STUDII ȘI CERCETĂRI ASUPRA PROCESULUI DE SUDARE SUB STRAT DE FLUX, DE MARE PRODUCTIVITATE

Teză destinată obținerii
titlului științific de doctor inginer
la
Universitatea "Politehnica" din Timișoara
în domeniul ȘTIINȚA ȘI INGINERIA MATERIALELOR
de către

Ing. Gheorghe Găvănescu

| | |
|------------------------|---|
| Conducător științific: | prof.univ.dr.ing. MITELEA ION |
| Referenți științifici: | prof.univ.dr.ing. MANGRA MIHAI C.P.I.dr.ing. FARBAȘ NICOLAE prof.univ.dr.ing. TRUȘCULESCU MARIN |

Data susținerii tezei: 24.10.2008

Seriile Teze de doctorat ale UPT sunt:

- | | |
|------------------------|---|
| 1. Automatică | 7. Inginerie Electronică și Telecomunicații |
| 2. Chimie | 8. Inginerie Industrială |
| 3. Energetică | 9. Inginerie Mecanică |
| 4. Ingineria Chimică | 10. Știința Calculatoarelor |
| 5. Inginerie Civilă | 11. Știința și Ingineria Materialelor |
| 6. Inginerie Electrică | |

Universitatea „Politehnica” din Timișoara a inițiat seriile de mai sus în scopul diseminării expertizei, cunoștințelor și rezultatelor cercetărilor întreprinse în cadrul școlii doctorale a universității. Seriile conțin, potrivit H.B.Ex.S Nr. 14 / 14.07.2006, tezele de doctorat susținute în universitate începând cu 1 octombrie 2006.

Copyright © Editura Politehnica – Timișoara, 2008

Această publicație este supusă prevederilor legii dreptului de autor. Multiplicarea acestei publicații, în mod integral sau în parte, traducerea, tipărirea, reutilizarea ilustrațiilor, expunerea, radiodifuzarea, reproducerea pe microfilme sau în orice altă formă este permisă numai cu respectarea prevederilor Legii române a dreptului de autor în vigoare și permisiunea pentru utilizare obținută în scris din partea Universității „Politehnica” din Timișoara. Toate încălcările acestor drepturi vor fi penalizate potrivit Legii române a drepturilor de autor.

România, 300159 Timișoara, Bd. Republicii 9,
tel. 0256 403823, fax. 0256 403221
e-mail: editura@edipol.upt.ro

Cuvânt înainte

Teza de doctorat a fost elaborată pe parcursul activității mele în producție, în cadrul unei societăți de confecții metalice sudate de mari dimensiuni, motivat fiind de descoperirea unor modalități de creștere a productivității și calității îmbinărilor sudate.

Înscrierea la doctorat mi-a permis un studiu aprofundat al transformărilor ce intervin în îmbinările sudate și descoperirea unor noi procedee de sudare care îmbunătățesc calitatea îmbinărilor sudate

Mulțumiri deosebite se cuvin conducătorului de doctorat prof. univ. dr. ing. Mitelea Ion pentru modul în care m-a susținut pe parcursul întregului stagiu de doctorat, atât în ceea ce privește fundamentarea științifică a cercetării, cât și în elaborarea tezei de doctorat.

Timișoara, octombrie 2008

Găvănescu Gheorghe

Familiei mele.

Găvănescu, Gheorghe

Studii și cercetări asupra procesului de sudare sub strat de flux, de mare productivitate

Teze de doctorat ale UPT, Seria 11, Nr. 9, Editura Politehnica, 2008, 184 pagini, 91 figuri, 26 tabele.

ISSN: 1842-7588

ISBN: 978-973-625-723-0

Cuvinte cheie: sudare, TWIN-ARC, flux

Rezumat,

Lucrarea contribuie la aprofundarea procesului de sudare sub strat de flux cu două sârme TWIN-ARC sau în TANDEM, având ca scop fructificarea avantajelor tehnice și economice ale acestuia, comparativ cu sudarea sub strat de flux cu un arc singular.

Aprecierea calității îmbinărilor sudate s-a făcut prin investigații macro- și micrografice, examinări sclerometrice și analize de difracție cu raze X. De asemenea s-au efectuat încercări de tracțiune și reziliență.

Studiul experimental a demonstrat că procedul de sudare sub strat de flux TWIN-ARC permite optimizarea parametrilor de regim termic și îmbunătățirea calității îmbinărilor sudate. Modificările intervenite în macro- și microstructura îmbinărilor sudate realizate prin acest procedeu permit îmbunătățirea caracteristicilor de rezistență mecanică și de tenacitate.

CUPRINS

| | |
|---|-----------|
| LISTA DE TABELE | 9 |
| LISTA DE FIGURI | 10 |
| 1. STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR PRIVIND MODALITĂȚILE DE CREȘTERE A PRODUCTIVITĂȚII LA SUDAREA SUB STRAT DE FLUX..... | 14 |
| 1.1. INTRODUCERE..... | 14 |
| 1.2. PRINCIPIUL METODEI DE SUDARE SUB STRAT DE FLUX..... | 15 |
| 1.3. CARACTERISTICILE ARCULUI ELECTRIC LA SUDAREA SUB STRAT DE FLUX | 18 |
| 1.4. BILANȚUL ENERGETIC..... | 19 |
| 1.5. REACȚII METALURGICE LA SUDAREA SUB STRAT DE FLUX.... | 20 |
| 1.6. MATERIALE UTILIZATE LA SUDAREA SUB STRAT DE FLUX | 24 |
| 1.6.1. <i>Metale de bază.....</i> | 25 |
| 1.6.2. <i>Sârma electrod.....</i> | 25 |
| 1.6.3. <i>Fluxuri.....</i> | 26 |
| 1.6.3.1. <i>Fluxuri topite.....</i> | 26 |
| 1.6.3.2. <i>Fluxuri ceramice (aglomerate).....</i> | 27 |
| 1.6.3.3. <i>Fluxuri amestecate.....</i> | 27 |
| 1.6.4. <i>Mărimea granulelor de flux și repartizarea acestora.....</i> | 28 |
| 1.6.5. <i>Utilizarea fluxului.....</i> | 28 |
| 1.6.6. <i>Alegerea cuplului sârmă-flux.....</i> | 30 |
| 1.7. TIPURI DE ÎMBINĂRI SUDATE..... | 36 |
| 1.7.1. <i>Sudarea în jgheab.....</i> | 37 |
| 1.7.2. <i>Sudarea în colț.....</i> | 38 |
| 1.7.3. <i>Sudarea straturilor tampon.....</i> | 38 |
| 1.7.4. <i>Sudarea de încărcare.....</i> | 39 |
| 1.8. VARIANTE TEHNOLOGICE ALE SUDĂRII SUB STRAT DE FLUX DE MARE PRODUCTIVITATE | 39 |
| 1.8.1. <i>Sudarea sub strat de flux cu o sârmă.....</i> | 39 |
| 1.8.2. <i>Sudarea sub strat de flux în curent continuu, polaritate directă (CC-) 41</i> | 41 |
| 1.8.3. <i>Sudarea sub strat de flux cu o lungime mărită a capătului liber al sârmei.....</i> | 43 |
| 1.8.4. <i>Sudarea sub strat de flux cu sârmă tubulară.....</i> | 44 |
| 1.8.5. <i>Sudarea sub strat de flux cu pulberi metalice.....</i> | 45 |
| 1.8.6. <i>Sudarea sub strat de flux cu două sârme în tandem.....</i> | 47 |
| 1.8.7. <i>Sudarea sub strat de flux cu două sârme TWIN – ARC.....</i> | 48 |

| | |
|--|-----------|
| 1.9. OBIECTIVE URMĂRITE ÎN TEZA DE DOCTORAT | 48 |
| 2. CERCETĂRI EXPERIMENTALE ASUPRA PROCESULUI DE SUDARE SUB STRAT DE FLUX CU DOUĂ SÂRME TWIN-ARC | 50 |
| 2.1. DESCRIEREA PROCEDEULUI DE SUDARE SUB STRAT DE FLUX TWIN-ARC | 50 |
| 2.2. POZIȚIA COMPONENTELOR LA SUDARE | 51 |
| 2.3. POZIȚIONAREA LEGĂTURII DE MASĂ | 52 |
| 2.4. CURENTUL DE SUDARE | 52 |
| 2.5. VITEZA DE SUDARE | 53 |
| 2.6. DIAMETRUL ELECTRODULUI | 53 |
| 2.7. TENSIUNEA ARCULUI | 54 |
| 2.8. POLARITATEA SUDĂRII ÎN CURENT CONTINUU | 55 |
| 2.9. SUDAREA ÎN CURENT ALTERNATIV (CA) | 57 |
| 2.10. CARACTERISTICA EXTERNĂ A SURSEI | 57 |
| 2.11. STARTUL ARCULUI (AMORSAREA) | 57 |
| 2.12. SUDURI CAP LA CAP | 58 |
| 2.13. SUDURI ÎN COLȚ | 59 |
| 2.14. SUDAREA PE TABLE ÎNCLINATE | 60 |
| 2.15. TABLE ADIȚIONALE ȘI DISTANȚIERI | 61 |
| 2.16. SUFLAJUL ARCULUI | 61 |
| 2.17. ECHIPAMENT A2-MULTIARC UTILIZAT PENTRU SUDAREA SUB STRAT DE FLUX | 63 |
| 2.18. METALUL DE BAZĂ | 75 |
| 2.19. FLUXUL LINCOLNWELD 780 | 77 |
| 2.20. SÂRMA ELECTROD | 79 |
| 2.21. OPTIMIZAREA PROCESULUI DE SUDARE SUB STRAT DE FLUX TWIN-ARC | 79 |
| 2.22. RATA DE DEPUNERE ȘI APRECIEREA PRODUCTIVITĂȚII | 86 |
| 2.22.1. <i>Rata de depunere determinată experimental</i> | <i>87</i> |
| 2.22.2. <i>Aprecierea productivității</i> | <i>87</i> |
| 2.23. CONCLUZII | 88 |

| | |
|---|------------|
| 3. OPTIMIZAREA MICROSTRUCTURII ȘI A PROPRIETĂȚILOR MECANICE ALE ÎMBINĂRILOR SUDATE SUB STRAT DE FLUX CU DOUĂ SÂRME TWIN-ARC..... | 90 |
| 3.1. INTRODUCERE..... | 90 |
| 3.2. INFLUENȚA PROCESULUI DE TOPIRE ȘI A COMBINAȚIEI SĂRMĂ-FLUX..... | 90 |
| 3.3. EFECTUL STĂRII STRUCTURALE..... | 91 |
| 3.4. PARTICULARITĂȚILE PROCESULUI TEHNOLOGIC DE SUDARE SUB STRAT DE FLUX CU MAI MULTE SÂRME..... | 93 |
| 3.5. MORFOLOGIA TRANSFORMĂRILOR STRUCTURALE ÎN ÎMBINĂRILE SUDATE CU DOUĂ SÂRME TWIN-ARC..... | 95 |
| 3.6. FENOMENE DE SEGREGARE LA CRISTALIZAREA BĂII DE METAL TOPIT..... | 106 |
| 3.7. NATURA FAZELOR PREZENTE ÎN MICROSTRUCTURA DE SOLIDIFICARE A BĂII TOPITE..... | 114 |
| 3.8. ÎNCERCĂRI STATICE DE TRACȚIUNE..... | 117 |
| 3.9. ÎNCERCĂRI DINAMICE DE ÎNCOVOIERE PRIN ȘOC..... | 120 |
| 3.10. CONCLUZII..... | 124 |
| 4. OPORTUNITĂȚI ALE SUDĂRII SUB STRAT DE FLUX CU DOUĂ SÂRME ÎN TANDEM..... | 126 |
| 4.1. BAZELE PROCESULUI DE SUDARE..... | 126 |
| 4.2. CONEXIUNILE CURENTULUI DE SUDARE, PRESCRIPTIILE DE ÎMBUNĂTĂȚIRE A CALITĂȚII SUDĂRII ȘI DE CREȘTERE A RATEI DEPUNERII..... | 130 |
| 4.3. MODALITĂȚI DE OPERARE..... | 133 |
| 4.4. PROCEDURA EXPERIMENTALĂ. EVALUAREA REZULTATELOR..... | 135 |
| 4.5. CONCLUZII..... | 142 |
| 5. MODELAREA PROCESULUI DE SUDARE SUB STRAT DE FLUX CU DOUĂ SÂRME..... | 144 |
| 5.1. INTERACȚIUNEA ELECTROMAGNETICĂ LA SUDAREA CU DOUĂ SÂRME..... | 144 |
| 5.2. MODELAREA MATEMATICĂ A DEZVOLTĂRII FORȚELOR ELECTRODINAMICE CA EFECT AL INTERACȚIUNII ELECTROMAGNETICE DIN ZONA DE SUDARE..... | 144 |
| 5.3. INFLUENȚA INTERACȚIUNII ELECTROMAGNETICE ASUPRA CURENTULUI DE SUDARE EFECTIV..... | 156 |

| | |
|--|------------|
| 5.4. CONCLUZII | 169 |
| 6. CONCLUZII FINALE ȘI CONTRIBUȚII ORIGINALE..... | 171 |
| LUCRĂRI PUBLICATE..... | 174 |
| BIBLIOGRAFIE..... | 176 |

Lista de tabele

Tab 1.1. Parametrii tehnologici recomandați la utilizarea diverselor fluxuri

Tab 1.2. Simbolizarea sârmelor pentru sudarea sub strat de flux corespunzătoare compoziției chimice, conform SR EN 756-97

Tab 1.3. Simbolizarea sârmelor pentru sudarea sub strat de flux după compoziția chimică, conform STAS 1126-87

Tab 1.4. Clasificarea fluxurilor pentru sudare sub strat de flux după compoziția chimică, conform SR EN 760-97

Tab 2.1. Prescripții de compoziție chimică pe metalul de bază lichid

Tab 2.2. Prescripții de compoziție chimică pe metalul de bază solid

Tab 2.3. Valorile minime ale limitei de curgere și rezistenței la rupere pentru diverse grosimi

Tab 2.4. Valorile minime ale energiei de rupere

Tab 2.5. Compoziția chimică garantată a metalului depus

Tab 2.6. Proprietățile mecanice garantate pentru metalul depus

Tab 2.7. Simbolizarea sârmei electrod

Tab 2.8. Prescripții de compoziție chimică pentru sârma electrod

Tab 2.9. Regimuri tehnologice

Tab 2.10. Parametrii de proces și geometria depunerilor

Tab 2.11. Valoarea parametrilor de proces pentru sudurile cap la cap

Tab 2.12. Valoarea parametrilor de proces pentru sudurile de colț

Tab 2.13. Valoarea ratei de depunere pentru $I_s = 800$ A

Tab 2.14. Valoarea ratei de depunere pentru $I_s = 750$ A

Tab 2.15. Analiza comparativă a sudurilor cap la cap

Tab 2.16. Analiza comparativă a sudurilor de colț

Tab 3.1. Listarea distanțelor dintre planele cristalografice și înălțimea picurilor de interferență la o sudură cap la cap

Tab 3.2. Listarea distanțelor dintre planele cristalografice și înălțimea picurilor de interferență la o sudură de colț (prima trecere)

Tab 3.3. Listarea distanțelor dintre planele cristalografice și înălțimea picurilor de interferență la o sudură de colț (a doua trecere)

Tab 3.4. Valorile rezistenței la rupere

Tab 3.5. Valorile energiei de rupere

Tab 4.1. Caracteristicile mecanice ale îmbinărilor sudate din oțel S 355J2 G3

Lista de figuri

- Fig 1.1. Schema procesului de sudare sub strat de flux
- Fig 1.2. Procesul de formare a cusăturii
- Fig 1.3. Bilanțul energetic la sudarea cu electrozi înveliți și sub strat de flux
- Fig 1.4. Schema reacțiilor metalurgice la sudarea sub strat de flux
- Fig 1.5. Factori și reacții chimice specifice sudării sub strat de flux
- Fig 1.6. Sudarea îmbinărilor de colț în poziția jgheab
- Fig 1.7. Sudură de colț
- Fig 1.8. Influența diametrului sârmei asupra ratei de depunere
- Fig 1.9. Influența polarității electrodului asupra ratei de depunere
- Fig 1.10. Influența lungimii capătului liber asupra ratei de depunere
- Fig 1.11. Influența procesului de sudare sub strat de flux cu sârmă tubulară (CC+) asupra ratei de depunere
- Fig 1.12. Influența adaosului de pulberi metalice asupra ratei depunerii la sudarea cu o sârmă
- Fig 2.1. Legătura de masă
- Fig 2.2. Pătrunderea la îmbinările de colț
- Fig 2.3. Bara suport
- Fig 2.4. Prescripții pentru suduri de colț
- Fig 2.5. Echipament de sudare sub flux
- Fig 2.6. Tractor de sudare A2 MULTIARC
- Fig 2.7. Duză de contact pentru sudare sub strat de flux TWIN-ARC
- Fig 2.8. Tractor de sudare A2 MULTIARC echipat cu pupitru de comandă PEG-1
- Fig 2.9. Sursa de sudare LAE 800
- Fig 2.10. Caracteristicile externe ale sursei
- Fig 2.11. Ciclograma de sudare
- Fig 2.12. Imaginea macrografică a depunerilor
- Fig 2.13. Imaginea macrografică a îmbinărilor cap la cap
- Fig 2.14. Imaginea macrografică a îmbinărilor de colț
- Fig 2.15. Rata depunerii în CC+ a sudării sub strat de flux TWIN-ARC comparativ cu sudarea sub strat de flux cu o sârmă
- Fig 3.1. Ratele depunerilor și curenții de sudare la unele variante de sudare sub strat de flux

Fig 3.2. Imaginea macrografică a interfeței MD – ZIT la îmbinarea sudată cap la cap

Fig 3.3. Arhitectura grăunților în zona centrală a îmbinării cap la cap

Fig 3.4. Orientarea grăunților de metal depus la îmbinarea sudată de colț

Fig 3.5. Imaginea micrografică a interfeței MD – ZIT la prima sudură realizată din îmbinarea de colț

Fig 3.6. Imaginea micrografică a interfeței MD – ZIT la cea de-a doua sudură realizată din îmbinarea de colț

Fig 3.7. Imaginea micrografică a metalului depus, MD, la îmbinarea sudată de colț

Fig 3.8. Imaginea micrografică a metalului de bază MB

Fig 3.9. Imaginea micrografică a interfeței MD – ZIT la prima trecere a îmbinării sudate cap la cap (zona centrală)

Fig 3.10. Imaginea micrografică a interfeței MD – ZIT la a doua trecere a îmbinării sudate cap la cap (zona centrală)

Fig 3.11. Imaginea micrografică a interfeței MD – ZIT la îmbinarea sudată cap la cap (zona exterioară)

Fig 3.12. Imaginea micrografică a MD la îmbinarea sudată cap la cap

Fig 3.13. Imaginea micrografică a ZIT la îmbinarea sudată cap la cap (zona exterioară)

Fig 3.14. Imaginea micrografică a ZIT la îmbinarea sudată cap la cap (zona centrală)

Fig 3.15. Spectrul dispersiei în energie a razelor X la analiza zonelor centrale ale cristalelor dendritice dintr-o sudură de colț

Fig 3.16. Spectrul dispersiei în energie a razelor X la analiza zonelor intermediare ale cristalelor dendritice dintr-o sudură de colț

Fig 3.17. Spectrul dispersiei în energie a razelor X la analiza zonelor exterioare ale cristalelor dendritice dintr-o sudură de colț

Fig 3.18. Spectrul dispersiei în energie a razelor X la analiza zonelor centrale ale cristalelor dendritice dintr-o sudură cap la cap

Fig 3.19. Spectrul dispersiei în energie a razelor X la analiza zonelor intermediare ale cristalelor dendritice dintr-o sudură cap la cap

Fig 3.20. Spectrul dispersiei în energie a razelor X la analiza zonelor exterioare ale cristalelor dendritice dintr-o sudură cap la cap

- Fig 3.21 Spectrul de difracție caracteristic sudurii de îmbinare cap la cap
- Fig 3.22. Spectrul de difracție caracteristic sudurii de îmbinare în colț (prima trecere)
- Fig 3.23. Spectrul de difracție caracteristic sudurii de îmbinare în colț (a doua trecere)
- Fig 3.24. Localizarea epruvetelor pentru o sudură cap la cap la table
- Fig 3.25. Forma și dimensiunile epruvetelor folosite la încercările de tracțiune statică
- Fig 3.26. Variația energiei de rupere cu temperatura de încercare
- Fig 3.27. Imaginea micrografică a unei epruvete testate la +20⁰ C, rupere ductilă
- Fig 3.28. Imaginea micrografică a unei epruvete testate la - 20⁰ C, rupere ductilă
- Fig 4.1. Sudarea în tandem cu una sau două băi de metal topit
- Fig 4.2. Forma cusăturii și pătrunderea la sudarea sub strat de flux pentru diferite valori ale vitezei de sudare
- Fig 4.3. Poziționarea capetelor de sudare și acțiunea arcului electric la sudarea în tandem
- Fig 4.4. Imaginea macrografică a unei suduri sub strat de flux în tandem, grosimea tablei 110 mm
- Fig 4.5. Conexiunea în V deschis
- Fig 4.6. Conexiunea în triunghi închis (delta)
- Fig. 4.7. Dispunerea sîrmelor-electrod la realizarea sudurilor de colț prin sudarea în tandem în curent alternativ, conexiunea Scott
- Fig. 4.8. Influența distanței dintre arcele electrice la sudarea sub strat de flux în tandem asupra geometriei sudurii
- Fig. 4.9. Macrografia îmbinării sudate
- Fig. 4.10. Micrografia sudurii
- Fig. 4.11. Micrografia Z.I.T. – subzona de supraîncălzire
- Fig. 4.12. Micrografia M.B.
- Fig. 4.13. Evoluția durității Vickers pe secțiunea transversală a îmbinării sudate
- Fig. 4.14. Efectul temperaturii de încercare asupra energiei de rupere a Z.I.T. și sudurii

- Fig. 4.15. Spectrul de difracție caracteristic sudurii cap la cap
- Fig. 5.1 Intersectarea câmpurilor electromagnetice din jurul celor două sârme de sudare și dezvoltarea forței electrodinamice
- Fig. 5.2 Modelul fizic considerat pentru aplicarea teoremei Biot-Savart-Laplace
- Fig. 5.3 Reprezentarea fizică a produsului vectorial $(d\vec{l}_2 \times \vec{r})$
- Fig. 5.4 Modelul fizic specific sudării cu două sârme, necesar aplicării teoremei Biot-Savart-Laplace
- Fig. 5.5 Modelul geometric pentru exprimarea elementului de curent $I \cdot dy$
- Fig. 5.6 Direcția și sensul forțelor electrodinamice când conductorii sunt paraleli (a.) și când conductorii nu sunt paraleli (b.)
- Fig. 5.7 Forța electrodinamică în cazul a două sârme paralele
- Fig. 5.8 Modelul nesimplificat considerat în calcul
- Fig. 5.9 Vizualizarea evoluției valorilor calculate ale forței electrodinamice
- Fig. 5.10 Valorile calculate ale forței electrodinamice elementare
- Fig. 5.11 Devierea primului arc către cea de-a doua sârmă și constituirea sa într-o sursă suplimentară de căldură
- Fig. 5.12 Modelul fizic al arcului considerat
- Fig. 5.13. Distribuția temperaturilor în arc pentru studierea transferului termic
- Fig. 5.14 Distribuția termică în arcul MAG pentru un curent de 200 A și o lungime a arcului de 10 mm, după Ushio și Matsuda, 1982
- Fig. 5.15 Modelul fizic considerat pentru emisie de energie termică și transfer prin radiație
- Fig. 5.16 Distribuția temperaturii de la axa arcului spre sârma de sudare vecină
- Fig. 5.17 Cantitatea de căldură primită de sârmă prin radiație de la arcul vecin
- Fig. 5.18 Sistemul fizic utilizat în simulare
- Fig. 5.19 Evoluția iterativă a analizei neliniare
- Fig. 5.20 Puterea calorică primită de sârma de sudare
- Fig. 5.21 Valorile înregistrate ale curentului de sudare la trecerea de la sudarea cu o sârmă la sudarea cu două sârme și invers

1. STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR PRIVIND MODALITĂȚILE DE CREȘTERE A PRODUCTIVITĂȚII LA SUDAREA SUB STRAT DE FLUX

1.1. INTRODUCERE

Ideea acoperirii arcului de sudare cu un strat de flux, se dezvoltă între anii 1929-1936 în Rusia și S.U.A., fapt care permite atestarea sudării mecanizate sub strat de flux, apărând și primele echipamente specifice acestui procedeu.

Sudarea sub strat de flux poate fi considerată drept procedeu de bază al sudării mecanizate cu arc electric care s-a dezvoltat în permanență din punct de vedere al automatizării, al productivității și al proprietăților metalului depus. Extinderea domeniului său de aplicare a permis în final exploatarea avantajelor cu caracter tehnico-economic la cele mai diverse construcții sudate și în special la fabricația produselor cu volum mare de sudură.

Comparativ cu alte procedee de sudare cu arcul electric, sudarea mecanizată sub strat de flux oferă avantajul productivității și al calității. Aceste două obiective se realizează prin creșterea vitezei de sudare și a densității de curent. Experimental, s-a constatat că mărirea vitezei de sudare este limitată, din cauza condițiilor nefavorabile de formare a cusăturii la viteze ridicate, atunci când operația este condusă sub flux cu un singur arc.

Creșterea vitezei de sudare s-a putut obține prin dezvoltarea unor noi variante tehnologice, ca de exemplu:

- sudarea sub strat de flux cu sârmă tubulară;
- sudarea sub strat de flux cu adaos de sârmă caldă;
- sudarea sub strat de flux cu două sau mai multe sârme în tandem;

- sudarea TWIN – ARC;
- sudarea sub strat de flux cu pulberi metalice, etc.

1.2. PRINCIPIUL METODEI DE SUDARE SUB STRAT DE FLUX

La sudarea cu arc electric sub strat de flux, căldura necesară procesului se obține de la arcul electric format între piesa de sudat și electrod. Descărcarea (funcționarea) arcului are loc sub un strat de material mineral, granulat, ușor fuzibil, prin a cărui topire se produce un strat de zgură care protejează funcționarea arcului și formarea sudurii.

La acest procedeu, electrodul se prezintă sub forma unei sau mai multor sârme neînvelite, benzi (platbenzi) introduse continuu în procesul de sudare.

Folosirea sârmei neînvelite ca electrod, permite ca încărcarea cu curent de sudare a acesteia, să se facă foarte aproape de locul de formare a arcului electric. Deoarece lungimea liberă a sârmei folosite este mică, se pot folosi pentru sudare intensități de curent de până la 2000 A, în curent continuu sau curent alternativ. Ambele surse de curent (curent continuu, cât și curent alternativ) pot fi folosite la aceeași sudură în același timp.

Fluxul care acoperă arcul și baia de sudură joacă un rol principal prin faptul că:

- zgura rezultată stabilizează arcul electric;
- proprietățile mecanice și chimice ale metalului depus pot fi reglate prin fluxul utilizat;
- calitatea sudurii poate fi influențată de felul în care este folosit stratul de flux și de tipul acestuia.

Schema de principiu a sudării sub strat de flux este prezentată în figura 1.1 [2].

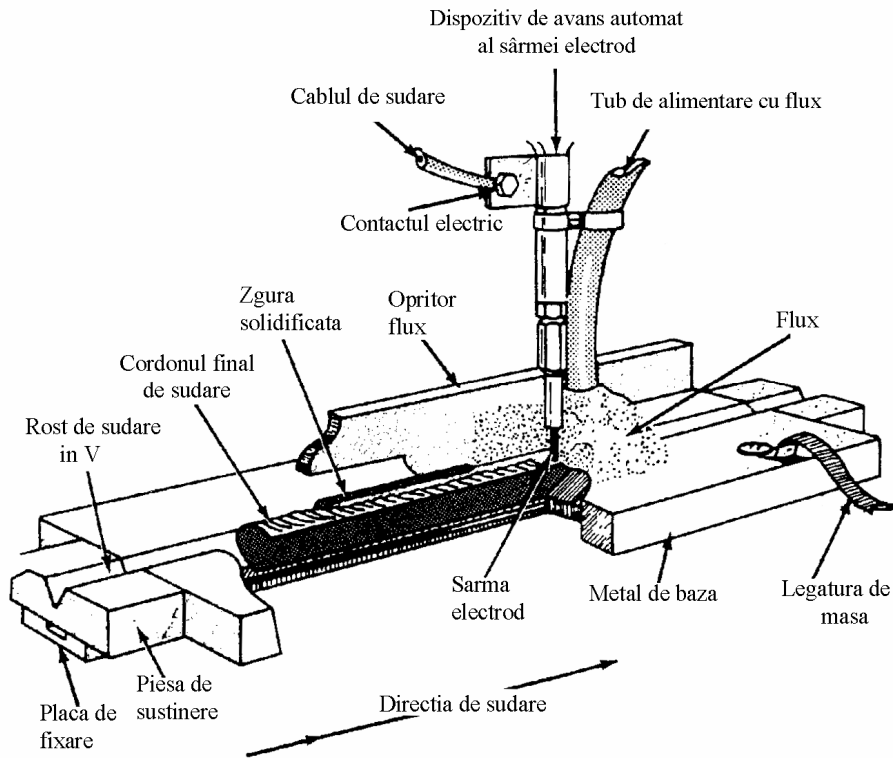


Figura 1.1. Schema procedurii de sudare sub strat de flux

Amorsarea arcului electric se produce între piesa de sudat și sârma electrod. Pe măsura topirii electrodului, el este împins în zona arcului prin dispozitivul de avans al sârmei, acesta alimentând cu sârma-electrod îmbinarea sudată cu o rată controlată. Dispozitivul automat de sudare poate funcționa sau se poate mișca sub dispozitivul fix de avans al sârmei.

Fluxul este depus într-un strat continuu și uniform cu grosimea de 20 – 50 mm, înaintea arcului, în jurul electrodului și peste marginile care se sudează. Căldura dezvoltată de arcul electric topește progresiv o parte din flux, capătul sârmei, cât și marginile adiacente ale metalului de bază, formând o baie metalică protejată de acțiunea gazelor din atmosferă prin bolta de zgură lichidă. De asemenea, fluxul poate să adauge sau să înlăture anumite elemente de aliere ale metalului de bază și adaos. Pe măsură ce zona supusă sudării progresează de-a lungul rostului, metalul topit și fluxul lichid se răcesc și se solidifică, formându-se îmbinarea sudată și un strat de zgură deasupra acesteia. Este foarte important ca zgura să fie complet înlăturată înainte de a se face o altă trecere în vederea sudării.

În figura 1.2 este reprezentată o secțiune prin zona de sudare la sudarea sub flux. Fluxul este transferat în fața arcului electric printr-un dozator de flux, după care se apropie capul de sudare la distanța necesară asigurării lungimii capătului liber al sârmei, parametru stabilit în prealabil, o dată cu elaborarea regimului termic necesar pentru anumite grosimi și tipuri de materiale. Arcul electric arde sub un strat de zgură care este acoperit de flux; zgura ia naștere nemijlocit după aprinderea arcului. Atmosfera arcului electric este compusă în principal din CO, vapori de metal și din gazele formate din zgură; ea este protejată pe deplin de influențele deranjante din exterior prin bolta de zgură formată după aprinderea arcului [16].

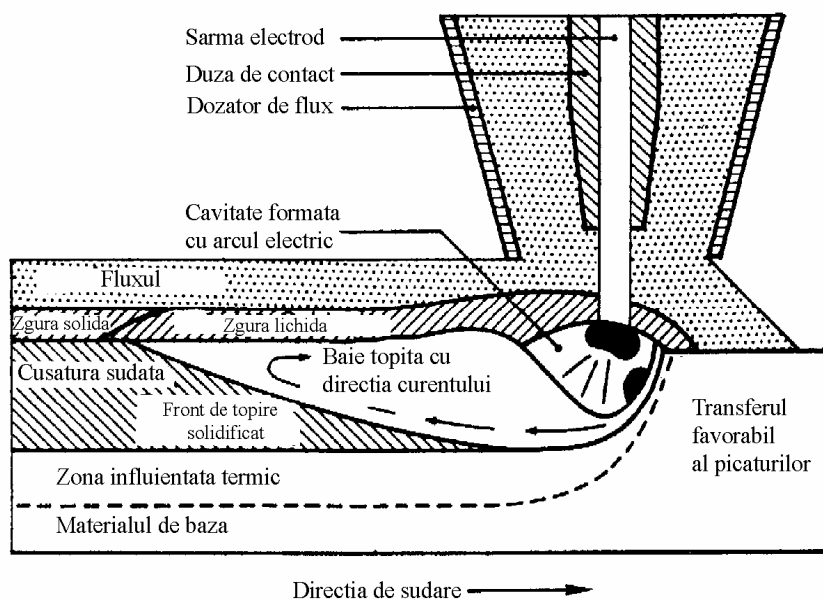


Figura 1.2. Procesul de formare a cusăturii

Fenomenul de curgere datorat acțiunii arcului electric și transferului de material produce la deplasarea înaintea, o mișcare a băii topite care facilitează amestecarea uniformă a materialului de adaos cu materialul de bază. Baia de metal topit, relativ mare, se solidifică prin cedarea căldurii către zonele limitrofe ale materialului de bază. În cursul procesului de solidificare, zgura împreună cu fluxul netopit acoperă cusătura sudată. Fluxul care nu a intrat în zgură poate fi aspirat și reutilizat, stratul de zgură fiind ușor îndepărtat în urma fazei de răcire. Din cauza volumului mare al băii de metal topit, procesul de sudare sub strat de flux poate fi condus numai perpendicular pe piesă, în poziție orizontală.

Factorii determinanți ai selecției metodei de sudare sub strat de flux sunt:

- compoziția chimică și proprietățile mecanice impuse materialului depus;
- grosimea metalului de bază ce urmează a fi sudat;
- accesibilitatea în zona de sudare;
- poziția în care trebuie efectuată operația propriu-zisă;
- repetabilitatea sau volumul mare al sudurilor realizate.

1.3. CARACTERISTICILE ARCULUI ELECTRIC LA SUDAREA SUB STRAT DE FLUX

Arcul electric de la sudarea sub strat de flux diferă de arcurile care ard liber prin stratul de zgură și prin atmosfera acestuia. Întrucât energiile de ionizare a vaporilor de metal sunt relativ mici, arcurile electrice la sudarea sub strat de flux în comparație cu cele deschise necesită tensiuni mai mici de ardere. La o intensitate a curentului de sudare de 200A este suficientă o tensiune de ardere de 20V. Stratul de zgură concentrează energia arcului electric, formând o atmosferă uniformă în crater, cu efect stabilizator asupra acestuia; îndeosebi la sudarea în curent alternativ nu se poate renunța la un supliment de ionizare pentru metalul depus.

Aprinderea arcului electric prin scurtcircuit, caracteristică sudării cu electrod învelit, nu este posibilă din cauza acoperirii cu flux a rostului și din cauza transportului mecanizat al sârmei.

Principalele metode de amorsare sunt:

- a) Amorsarea prin curenți de înaltă frecvență (C.I.F.) La această metodă sârma electrod fiind acoperită de un strat de flux va fi apropiată cu o viteză cât mai mică de suprafața piesei. Tensiunii de mers în gol la sudare i se suprapun impulsurile de tensiune de aprindere, de înaltă frecvență, care înainte de atingerea dintre sârma electrod și piesă, conduc la o descărcare și deci la o ionizare a spațiului intermediar; astfel se amorsează arcul și se realizează trecerea curentului electric.
- b) Amorsarea prin retragerea sârmei. Sârma electrod se coboară până la atingerea piesei, apoi capătul ei se acoperă cu flux și se conectează curentul. Tensiunea mică dintre electrod și piesă semnalează dispozitivului

de avans al sârmei să retragă vârful electrodului de pe suprafața piesei. În momentul retragerii se amorsează un arc electric. Crescând tensiunea, dispozitivul de avans al sârmei-electrod îi inversează direcția, îndreptând-o spre piesă. Avansul sârmei-electrod crește până când rata sa de topire și arcul se stabilizează la valorile prescrise. Dacă se sudează materiale metalice subțiri, electrodul trebuie să facă doar un contact ușor cu piesa, în condițiile unui contact electric bun.

- c) Amorsarea cu sârmă ascuțită. Cu ajutorul unui clește de sârmă, vârful acesteia capătă o formă de daltă. Apoi, sârma este coborâtă până când vârful ei atinge piesa, moment în care se dă drumul la flux și începe operația de sudare. Vârful în formă de daltă se topește rapid, amorsând arcul electric.

Stingerea arcului electric. La unele sisteme electrice avansul electrodului și al căruciorului de sudare se întrerupe odată cu apăsarea butonului „OPRIT”. Alte sisteme opresc avansul căruciorului, dar electrodul continuă să avanseze pentru o anumită perioadă de timp. Un al treilea tip de sisteme inversează direcția căruciorului de sudare pentru o perioadă scurtă, în timp ce sudarea continuă.

1.4. BILANȚUL ENERGETIC

În figura 1.3 a, b se prezintă comparativ, din punct de vedere energetic, participarea materialului de bază și a materialului de adaos la sudarea manuală cu electrozi înveliți, respectiv la sudarea sub strat de flux. Astfel, în cazul sudării manuale cu electrozi înveliți, această participare este de circa 25%, iar la sudarea sub strat de flux, de aproximativ 68%. Această diferență este dată de posibilitatea aplicării unei viteze mari de sudare, precum și de stratul de flux care acoperă îmbinarea sudată, reducându-se astfel pierderile de energie către exterior. Diferența de energie față de sudarea manuală cu electrozi înveliți se exprimă prin randamentul mai mare de topire al materialului de bază. La sudarea sub strat de flux cu o sârmă, raportul dintre volumul de material de adaos topit și cel al materialului de bază topit este de cca. 1:2 [23].

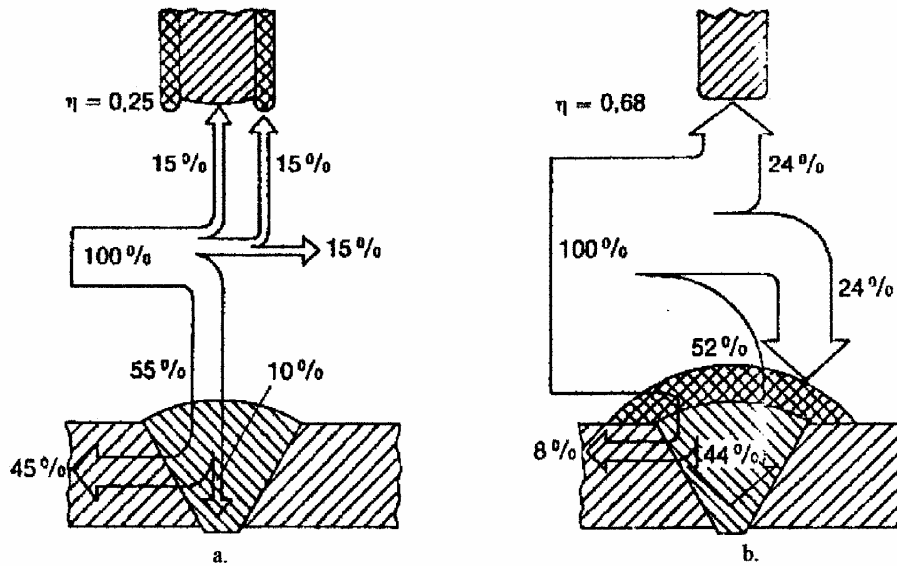


Figura 1.3. Bilanțul energetic la:
a – sudarea cu electrozi înveliți; b – sudarea sub strat de flux

1.5. REACȚII METALURGICE LA SUDAREA SUB STRAT DE FLUX

Formarea băii la sudarea sub strat de flux constituie una dintre particularitățile acestui proces. Arderea arcului și formarea îmbinării într-un mediu de protecție previne, pe de o parte, contaminarea cu aerul atmosferic, iar pe de altă parte favorizează producerea unor reacții metalurgice între zgură și metalul lichid.

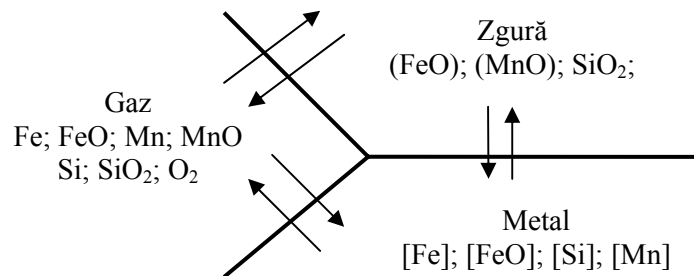


Figura 1.4. Schema reacțiilor metalurgice la sudarea sub strat de flux

Reacțiile se produc atât la nivelul celor trei faze existente în zona de sudare, cât și între ele, având loc o interacțiune complexă: metal – zgură – gaz (figura 1.4). La reacțiile metalurgice din baie participă aerul atmosferic pătruns printre granulele de flux sau existent în rostul îmbinării, hidrogenul provenit din arderea materiilor organice sau din umiditatea fluxului, oxidul de carbon, precum și o serie de vapori ai oxizilor și elementelor din flux și metal. Cantitatea de gaze dizolvate de metalul lichid depinde de presiunea parțială a gazului în atmosfera arcului și de temperatură. Pe măsura scăderii temperaturii, se produce o micșorare a solubilității gazelor în metalul lichid. Oxidul de carbon este practic insolubil în metalul lichid, în schimb hidrogenul și azotul au o mare solubilitate.

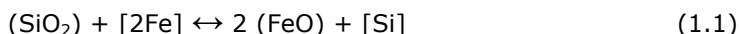
Hidrogenul se dizolvă în metal, nereacționând în interiorul acestuia cu nici un element, astfel că la scăderea temperaturii se separă ca fază gazoasă, formând porozități.

Azotul se dizolvă în metalul topit, legându-se apoi în combinații chimice de tipul nitrurilor. Conținutul de azot în materialul îmbinării este în general mic, depinzând de natura fluxului și de compoziția chimică a oțelului. Astfel, conținutul de azot scade cu creșterea conținutului de siliciu și de fluor din flux. O importanță deosebită pentru compoziția chimică a îmbinării o prezintă reacțiile metal-zgură, care, din cauza amestecului direct și de durată mai mare, au rezultatele cele mai consistente.

Carbonul provine din metalul de bază și cel de adaos, iar fluxul numai în cazuri cu totul speciale conține acest element. Oxidarea carbonului are loc în special la trecerea metalului din sârmă în baie, continuându-se în baia de sudură și chiar în faza de cristalizare. Producerea oxidului de carbon (insolubil în metalul lichid) în faza

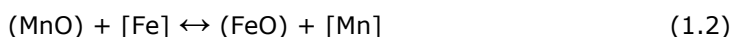
de cristalizare primară, când vâscozitatea metalului crește mult, este cauza principală a apariției porozităților. Existența în baie a unor elemente ca: aluminiu, zirconiu, siliciu, mangan, împiedică prelungirea oxidării carbonului în faza de cristalizare primară. În general, la sudarea sub strat de flux se contează pe o reducere a conținutului de carbon cu circa 0,03%, oxidul de carbon produs fiind eliminat în atmosferă.

Siliciul provine în baie de sudură atât din metalul de bază și de adaos cât și din flux. Între dioxidul de siliciu existent în zgură și fierul din baie metalică are loc reacția de oxidare:

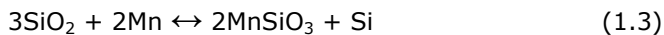


Acestea conduc la creșterea conținutului de siliciu în metal și la îmbogățirea zgurii în oxid de fier (FeO).

Manganul provine, ca și siliciu, atât din metalul de bază cât și din flux. Îmbogățirea cusăturii în mangan se produce ca urmare a reacției:



Trecerea manganului în cusătură depinde de conținutul fluxului în oxid de mangan (MnO) și dioxid de siliciu (SiO₂), precum și de bazicitatea fluxului. Concentrația de mangan în îmbinarea sudată crește cu mărirea conținutului de oxid de mangan în flux și scade o dată cu ridicarea conținutului de dioxid de siliciu, producându-se chiar o sărăcire în mangan a îmbinării. Eventualele segregatii pot apărea în centrul îmbinării, ele referindu-se la îmbogățirea cu impurități și elemente de aliere. Prezența segregatiilor se manifestă prin creșterea durității și reducerea tenacității în centrul îmbinării. Zgura se compune în principal din oxizi metalici complecși, ea fiind sediul unor reacții de schimb ale elementelor de aliere, cel mai frecvent în zona arcului electric. Aici, în primul rând, au loc deplasări ale concentrațiilor de mangan și siliciu, ele corespunzând reacției:



Direcția și intensitatea acestor reacții depind de bazicitatea fluxului, de relația concentrațiilor de mangan și siliciu în sârma electrod și baie de metal topit și de raportul:



Sulfur are o mare influență asupra tendinței de fisurare la cald a cusăturii, datorită formării sulfurii de fier (FeS) care, segregând pe marginile dendritelor, formează cu fierul un eutectic cu temperatura de solidificare de 988°C, astfel că la apariția contracțiilor de solidificare produce fisurarea îmbinării. Sulfura de fier are o mare solubilitate în metalul topit în timp ce sulfura de mangan (MnS) din îmbinare are o solubilitate redusă, prezentându-se în îmbinare solidificată sub forma unor incluziuni globulare. Sulfur ajunge în îmbinare atât din metalul de bază, cât și din metalul de adaos și din flux. Dacă sulfur se găsește în flux sub forma de sulfură de fier, datorită solubilității sale în fier, îmbinarea se îmbogățește în sulfur. În cazul în care sulfur se găsește în flux sub formă de sulfură de mangan, cu solubilitate mică în fier, trecerea sa în îmbinare este redusă. Sub forma de incluziuni nemetalice se prezintă și o parte din oxizii de mangan și siliciu, rezultați din reacțiile petrecute, precum și sulfura de fier și de mangan, care reușesc să treacă în zgură.

Cantitatea de incluziuni nemetalice din îmbinare depinde în special de conținutul în dioxid de siliciu și oxid de mangan al fluxului. Conținutul de incluziuni nemetalice al îmbinării crește foarte mult pentru valori ale raportului Mn/Si mai mari de 3.

Compoziția chimică a metalului depus va fi determinată esențial de reacția picăturii în zona arcului electric și de gradul de omogenizare cu materialul de bază topit. Reacția băii cu zgura este neglijabilă la cele mai multe fluxuri de sudare, doar câteva fluxuri aglomerate cu adaosuri înalte de elemente feritizante au o reacție certă. Ambele procese, reacția topiturii și topirea materialului de bază vor fi determinate de mai mulți factori. Reacția topiturii este reacția dintre fluxul de sudare și materialul de adaos, aceasta fiind puternic influențată de parametrii regimului de sudare.

Diluția cu metalul de bază depinde de cantitatea de metal de bază topit și aceasta la rândul ei este puternic influențată de parametrii regimului de sudare. Totodată compoziția chimică a materialului de bază are o mare importanță; toți acești factori care acționează în comun definesc compoziția metalului depus. În figura 1.5 sunt redați factorii și reacțiile chimice specifice sudării sub strat de flux.

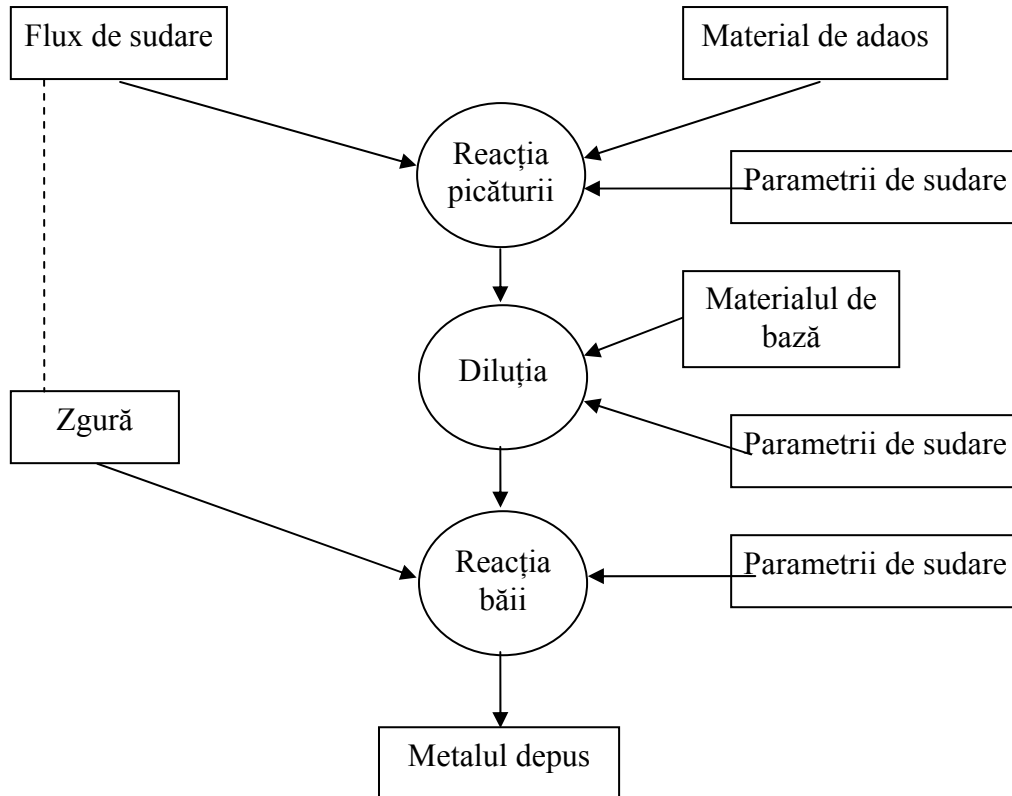


Figura 1.5. Factori și reacții chimice specifice sudării sub strat de flux

1.6. MATERIALE UTILIZATE LA SUDAREA SUB STRAT DE FLUX

Sudarea sub strat de flux este folosită pentru îmbinarea celor mai multe materiale întâlnite astăzi, începând cu cele mai simple oțeluri carbon și până la aliajele pe bază de nichel.

Cele mai multe oțeluri nealiat și aliate pot fi sudate cu sârme și fluxuri care se găsesc în comerț. Totuși, unele metale necesită încălziri ale sârmei electrod special fabricată pentru a se obține o anumită compoziție chimică și selecția unor fluxuri care să asigure obținerea proprietăților dorite pentru metalul depus.

Materialele folosite la sudarea sub strat de flux se împart în trei mari categorii:

- metale de bază;
- sârmă electrod;
- fluxuri.

1.6.1. Metale de bază

Următoarele clase de materiale metalice sunt în general sudabile prin procedeul de sudare sub strat de flux:

- oțeluri carbon cu până la 0,29% carbon;
- oțeluri slab aliate (cu până la 690 N/mm² – limita de curgere);
- oțeluri aliate cu crom și molibden: 0,50 – 9,0 % Cr ; 0,50 – 1,0 % Mo;
- oțeluri inoxidabile;
- aliaje pe bază de nichel.

Compoziția chimică a aliajelor care pot fi sudate sub strat de flux s-a extins, dezvoltându-se astfel noi serii de sârme și fluxuri.

1.6.2. Sârma electrod

Sârma electrod utilizată la sudarea sub strat de flux produce depuneri corespunzătoare pentru: oțeluri carbon, oțeluri slab aliate, oțeluri cu conținut ridicat în carbon, oțeluri speciale, oțeluri inoxidabile, aliaje pe bază de nichel și aliaje speciale pentru încărcări de suprafață. Electrozii sunt livrați sub formă de sârmă plină și de sârmă tubulară. Ei sunt împachetați și livrați sub formă de bobine sau de tamburi, cu o greutate cuprinsă între 11 și 454 kg. Pachetele mari sunt mai economice. Ele măresc eficiența de operare și elimină risipa de „sfârșit de bobină”.

Sârmele electrod din oțel sunt cuprate, cu excepția celor pentru sudarea materialelor rezistente la coroziune sau a celor pentru anumite aplicații nucleare. Învelișul din cupru garantează un termen de valabilitate ridicat, scade uzura rolor și a duzei de contact și îmbunătățește conductibilitatea electrică.

Diametrul sârmei – electrod variază de la 1,6 mm la 6,4 mm.

1.6.3. Fluxuri

Fluxul protejează baia de metal topit de acțiunea nocivă a gazelor atmosferice, acoperind baia de metal topit cu un strat de zgură lichidă (flux topit). Fluxurile curăță baia metalică de impurități, modifică compoziția chimică a metalului topit și influențează forma sudurii și proprietățile mecanice ale acesteia. Fluxurile sunt granulate și au în compoziția lor compuși minerali amestecați în diverse proporții. Avându-se în vedere numeroasele metode de fabricare, se disting: fluxuri topite, fluxuri aglomerate și fluxuri obținute prin amestecare mecanică.

1.6.3.1. Fluxuri topite

Pentru a fabrica un flux topit, materia primă este amestecată în stare uscată și apoi este topită într-un cuptor electric. După topire se adaugă ultimele componente și șarja cuptorului va fi turnată și răcită. Răcirea poate fi însoțită de împrăștierea fluxului cu o perdea de apă, sau șarja este turnată deasupra unor blocuri mari răcite. Produsul care rezultă are un aspect lucios și este apoi măcinat și cernut la diferite dimensiuni, iar în final va fi împachetat.

Avantajele fluxurilor topite sunt:

- o bună omogenitate chimică;
- ușoară îndepărtare de pe cordonul de sudură fără a afecta compoziția chimică a fluxului;
- în mod normal nu este higroscopic, fapt care simplifică întrebuințarea, depozitarea și problemele de sudare;
- se reciclează ușor prin alimentarea sistemului de recuperare și distribuție fără schimbări semnificative în dimensiunea particulelor sau a compoziției chimice.

Dezavantajul major constă în dificultatea de a adăuga în compoziția lor dezoxidanți și fero-aliaje în timpul fabricării, fără apariția segregațiilor sau a unor pierderi extrem de mari.

1.6.3.2. Fluxuri ceramice (aglomerate)

Pentru a fabrica un flux ceramic, materia primă sub formă de pulbere este amestecată în stare uscată și legată fie cu ajutorul silicaturii de potasiu, fie cu ajutorul silicaturii de sodiu, sau cu o combinație a acestora. După legare, amestecul umed este prelucrat sub formă de sfere și apoi acestea sunt calcinate la o temperatură mai joasă decât temperatura de topire a fluxurilor topite. În final, sferile sunt măcinate, sortate pe dimensiuni prin cernere și împachetate.

Avantajele fluxurilor ceramice sunt următoarele:

- adăugarea ușoară a dezoxidanților și a elementelor de aliere; elementele de aliere sunt adăugate ca fero-aliaje sau ca metale elementare;
- sunt folosite ca strat mai gros de flux când se sudează;
- se identifică după culoare.

Dezavantajele acestora sunt următoarele:

- tendința unor fluxuri de a absorbi umezeala de o manieră similară cu cea a unor electrozi utilizați la sudarea cu sârmă tubulară;
- o posibilă dezvoltare a gazelor din zgura topită;
- o posibilă schimbare a compoziției fluxului, datorită segregărilor sau transformării în particule fine.

1.6.3.3. Fluxuri amestecate

Pentru a produce un flux amestecat, două sau mai multe fluxuri topite sau ceramice sunt amestecate în orice raport necesar pentru a se obține rezultatele dorite.

Avantajul fluxurilor amestecate mecanic este acela că se pot amesteca numeroase fluxuri care se găsesc în comerț, în vederea obținerii unor proprietăți bine definite.

Dezavantajele fluxurilor amestecate mecanic sunt următoarele:

- segregarea fluxurilor combinate în timpul transportului, depozitării sau mânuirilor;
- segregarea care se produce în cadrul sistemelor de alimentare și recuperare în timpul operației de sudare;
- inconsistență în fluxul combinat de la un amestec la altul.

1.6.4. Mărimea granulelor de flux și repartizarea acestora

Mărimea granulelor de flux și distribuirea lor în unitatea de volum a fluxului este importantă pentru că aceasta influențează alimentarea și recuperarea fluxului, nivelul curentului de sudare, forma și netezimea sudurii. În timp ce curentul de sudare crește, mărimea medie a granulelor de flux pentru fluxurile topite ar trebui să scadă, procentul acestora crescând. Când curentul de sudare este prea mare, la o mărime a granulelor de flux anume, atunci arcul poate deveni instabil și pe suprafața sudurii apar stropi sau rugozități (asperități). Când este sudat un oțel corodat atunci este indicată folosirea unor fluxuri cu granule grosiere (aspre), pentru că ele permit o evacuare mai ușoară a gazelor. Unii fabricanți de fluxuri pot să-și marcheze pachetele cu informații ce indică mărimea granulelor fluxului sub forma a două numere. Aceste numere reprezintă cele mai mari și cele mai mici dimensiuni ale granulelor prezente în acel flux, determinate prin folosirea unor site standardizate de măsurare. Primul număr identifică sita prin care vor trece în mod fundamental toate granulele, iar al doilea număr identifică sita prin care majoritatea granulelor de flux nu vor mai trece. Mărimea granulelor nu furnizează toate informațiile care sunt necesare. De exemplu, descriind un flux ca având o mărime a granulelor de 20 x 200 nu indică dacă fluxul este grosier cu unele granule fine, sau este fin cu unele granule grosiere; tot ce se știe este variația dimensiunilor. Unii fabricanți de flux oferă fluxuri doar într-o singură variație de mărime, obișnuită pentru o arie generală de aplicații ale fluxului.

1.6.5. Utilizarea fluxului

Dacă un flux este prea fin, se va aglomera și nu va mai alimenta corespunzător dispozitivul cu flux. Dacă un flux fin sau cu granule fine este aspirat de către un sistem de aspirație al fluxului, granulele fine de flux pot fi prinse în sistemul de aspirație. Doar granulele grosiere se vor întoarce la sistemul de alimentare cu flux pentru a fi refolosite, ceea ce poate cauza probleme la sudare.

În aplicațiile în care se cere o prezență foarte redusă a hidrogenului, fluxul trebuie menținut uscat. Fluxurile topite nu conțin apă în compoziția lor chimică, dar granulele mențin suprafața umedă. Fluxurile ceramice au în compoziția lor apă și pot menține suprafața umedă. Fluxurile ceramice trebuie protejate la fel ca și electrozii avizi de hidrogen, folosiți la sudarea manuală cu arc electric. Ele sunt livrate în butoaie de metal care au capacele lipite cu smoală. Utilizatorul trebuie să urmeze instrucțiunile date de către fabricant cu privire la depozitarea fluxurilor ceramice, cât și diferitele proceduri de calcinare a acestor tipuri de fluxuri.

Când sunt utilizate fluxurile cu aliaje, este necesar a se menține o proporție bine stabilită între cantitatea de sârmă-electrod topită și cantitatea de flux topit, pentru a obține o compoziție chimică dorită a sudurii. Această proporție poate fi stabilită prin modificarea parametrilor variabili ai procesului de sudare. De exemplu, o modificare de tensiune și curent va schimba proporția elementelor de aliere din metalul depus prin schimbarea ratei de topire sârmă–electrod–flux.

Fluxurile sunt de asemenea clasificate ca fiind:

- fluxuri cu caracter bazic;
- fluxuri cu caracter acid;
- fluxuri neutre.

Bazicitatea sau aciditatea fluxurilor este dată de ușurința cu care oxizii din componența fluxurilor se disociază într-un cation de metal și un anion de metal. Fluxurile cu caracter bazic au o proporție mai ridicată de compuși ca oxid de magneziu (MgO) sau oxid de calciu (CaO), pe când fluxurile acide au o proporție mai ridicată de dioxid de siliciu. Bazicitatea sau aciditatea unui flux face referire la raportul dintre oxidul de calciu sau oxidul de magneziu și dioxidul de siliciu. Fluxurile care au un raport mai mare decât unitatea se numesc *fluxuri cu caracter bazic*. Cele cu un raport apropiat de unitate sunt *fluxuri cu caracter neutru*, iar cele cu un raport mai mic decât unitatea sunt *fluxuri cu caracter acid*.

Fluxurile cu caracter bazic au devenit, recent, primele fluxuri pentru sudare în condiții critice, la care se impune un control foarte strâns al proprietăților metalului depus. Cele mai multe dintre fluxurile bazice sunt concepute pentru a fi utilizate cu sârme electrod specifice fluxurilor care stabilizează sau compensează pierderile de crom sau de carbon. Ele limitează transferurile de siliciu/mangan/oxigen din zgură spre baia de metal topit. Fluxurile cu caracter bazic sunt utilizabile pentru toate materialele care se pretează la sudare sub strat de flux.

1.6.6. Alegerea cuplului sârmă-flux

Caracteristicile metalului depus (cusăturii) depind în principal de combinația sârmă-flux, corelată cu tehnica operatorie și cu parametrii tehnologici de sudare. Prin urmare, alegerea corelată a celor două materiale de sudare se face dependent unul de celălalt; unei anumite mărci de sârmă, îi corespunde, în general, o anumită marcă de flux pentru obținerea unei suduri cu caracteristicile dorite.

Criteriile de alegere a cuplului sârmă-flux sunt similare celor prezentate la alegerea electrodului învelit în ceea ce privește metalul de bază, temperatura de exploatare, nivelul și importanța îmbinării, etc., la care se mai adaugă următoarele recomandări:

- activitatea fluxului apreciată în combinație cu o anumită sârmă. Compoziția chimică a metalului depus este determinată doar de compoziția chimică a sârmei în cazul fluxurilor pasive, respectiv de sârmă și de flux în cazul fluxurilor active. Activitatea fluxului se definește ca fiind raportul dintre compoziția chimică a sârmei electrod și a metalului depus. Dacă cele două compoziții chimice sunt relativ aceleași, fluxurile sunt pasive din punct de vedere chimic sau nu au activitate chimică. Dacă compoziția chimică a materialului depus diferă de cea a sârmei, fluxul este activ din punct de vedere chimic, adică are activitate chimică. Fluxurile topite sunt în general fluxuri pasive, iar fluxurile ceramice sunt în general fluxuri active. Activitatea unui flux este prezentată în cataloagele de materiale de sudare sub formă tabelară sau sub formă grafică, în funcție de tensiunea arcului și de curentul de sudare și trebuie ținut cont de sensul activității sale la alegerea compoziției chimice a sârmei electrod. În plus, se are în vedere:
- varianta de sudare: într-o trecere sau în treceri multiple. Această alegere se face în funcție de metalul de bază (sensibil sau insensibil la supraîncălziri) și de temperatura de exploatare (pozitivă sau negativă). La sudarea în treceri multiple se vor folosi fluxuri neutre, având în vedere că fluxurile active produc modificarea gradului de aliere de la un

- strat la altul cu consecințele care decurg din acest lucru; se impune și o detașabilitate bună a zgurii pentru evitarea incluziunilor de zgură;
- tratamentul termic post-sudare, dacă se efectuează sau nu. Dacă nu se efectuează tratamentul termic post-sudare metalul depus trebuie să asigure plasticitatea necesară preluării tensiunilor introduse la sudarea sub strat de flux;
 - valorile parametrilor tehnologici de sudare: curentul de sudare, tensiunea arcului, viteza de sudare; recomandați de producătorii de fluxuri (tab. 1.1.).

Tabelul 1.1. Parametrii tehnologici recomandați la utilizarea diverselor fluxuri

| Tipul fluxului | Parametrii tehnologici recomandați | | |
|----------------------|------------------------------------|-------|-----------|
| | Is [A] | Ua[V] | Vs[m/min] |
| FB 10;FB20 | 450-600 | 28-32 | 0,5-0,7 |
| FSM 20 | 600-1000 | 35-40 | 1,4-1,6 |
| FSM 37; FSM 37B | 600-1000 | 35-40 | 0,4-0,6 |
| FSM403; FC603; FA801 | 530-580 | 28-32 | 0,5-0,6 |

- starea suprafeței rostului. În cazul suprafețelor oxidate, ruginite, se recomandă fluxuri insensibile la oxizi, vopsele, grăsimi, de ex. F8M37B;
- tipul îmbinării sudate: cap la cap sau de colț. Se vor prefera fluxurile care produc o cantitate redusă de gaze, respectiv o degazare ușoară având în vedere viteza mare de răcire a băii metalice (trei căi de răcire). În funcție de compoziția lor chimică, simbolizarea sârmelor se face conform SR EN 756-97 (tab. 1.2), respectiv STAS 1126-87 (tab. 1.3.). Fluxurile se simbolizează în conformitate cu normele SR EN 760-97 (tab. 1.4).

Tabelul 1.2. Simbolizarea sârmelor pentru sudare sub strat de flux corespunzătoare compoziției chimice, conform SR EN 756-97

| Simbol | Compoziție chimică (%) | | | | | | | |
|--------|-------------------------------------|------|-----------|-------|-------|------|------|------|
| | C | Si | Mn | P | S | Mo | Ni | Cr |
| S0 | Orice altă compoziție pusă de acord | | | | | | | |
| S1 | 0,05-0,15 | 0,15 | 0,35-0,60 | 0,025 | 0,025 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| S2 | 0,07-0,15 | 0,15 | 0,80-1,3 | 0,025 | 0,025 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| S3 | 0,07-0,15 | 0,15 | >1.3-1.75 | 0,025 | 0,025 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| S4 | 0,07-0,15 | 0,15 | >1,75- | 0,025 | 0,025 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |

| | | | | | | | | |
|-----------|-----------|-----------|------------|-------|-------|-----------|------------|------|
| | | | 2,25 | | | | | |
| S1Si | 0,07-0,15 | 0,15-0,40 | 0,35-0,60 | 0,025 | 0,025 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| S2Si | 0,07-0,15 | 0,15-0,40 | 0,80-1,30 | 0,025 | 0,025 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| S2Si2 | 0,07-0,15 | 0,15-0,40 | 0,80-1,30 | 0,025 | 0,025 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| S3Si | 0,07-0,15 | 0,15-0,40 | >1,30-1,85 | 0,025 | 0,025 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| S4Si | 0,07-0,15 | 0,15-0,40 | >1,85-2,25 | 0,025 | 0,025 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| S1Mo | 0,07-0,15 | 0,05-0,25 | 0,35-0,60 | 0,025 | 0,025 | 0,45-0,65 | 0,15 | 0,15 |
| S2Mo | 0,07-0,15 | 0,05-0,25 | 0,80-1,30 | 0,025 | 0,025 | 0,45-0,65 | 0,15 | 0,15 |
| S3Mo | 0,07-0,15 | 0,05-0,25 | >1,30-1,75 | 0,025 | 0,025 | 0,45-0,65 | 0,15 | 0,15 |
| S4Mo | 0,07-0,15 | 0,05-0,25 | >1,75-2,25 | 0,025 | 0,025 | 0,45-0,65 | 0,15 | 0,15 |
| S2Ni1 | 0,07-0,15 | 0,05-0,25 | 0,80-1,30 | 0,020 | 0,020 | 0,15 | 0,80-1,20 | 0,15 |
| S2Ni1,5 | 0,07-0,15 | 0,05-0,25 | 0,80-1,30 | 0,020 | 0,020 | 0,15 | >1,20-1,80 | 0,15 |
| S2Ni2 | 0,07-0,15 | 0,05-0,25 | 0,80-1,30 | 0,020 | 0,020 | 0,15 | >1,80-2,40 | 0,15 |
| S2Ni3 | 0,07-0,15 | 0,05-0,25 | 0,80-1,30 | 0,020 | 0,020 | 0,15 | >2,80-3,70 | 0,15 |
| S2Ni1Mo | 0,07-0,15 | 0,05-0,25 | 0,80-1,30 | 0,020 | 0,020 | 0,45-0,65 | 0,80-1,20 | 0,20 |
| S3Ni1,5 | 0,07-0,15 | 0,05-0,25 | >1,30-1,70 | 0,020 | 0,020 | 0,15 | >1,20-1,80 | 0,20 |
| S3Ni1Mo | 0,07-0,15 | 0,05-0,25 | >1,30-1,80 | 0,020 | 0,020 | 0,45-0,65 | 0,80-1,20 | 0,20 |
| S3Ni1,5Mo | 0,07-0,15 | 0,05-0,25 | 1,20-1,80 | 0,020 | 0,020 | 0,30-0,50 | 1,20-1,80 | 0,20 |

Notarea se face în felul următor. Cuplul sârmă – flux: EN 756-S 46 3 AB S2; simbolul care reprezintă: EN 756 = numărul standardului; S = sârma electrod și/sau cuplul sârmă – flux / sudare cu arc electric sub strat de flux; 46 = caracteristicile la

tracțiune; 3 = caracteristicile la încovoiere prin șoc; AB = tipul de flux pentru sudare (tab. 1.4); S = compoziția chimică a sârmei electrod (tab. 1.2).

Tabelul 1.3. Simbolizarea sârmelor pentru sudare sub strat de flux după compoziția chimică conform STAS 1126 – 87

| Marca sârmei | Principalele domenii de utilizare |
|-------------------|--|
| S 10 | Fabricarea electrozilor destinați sudării oțelurilor carbon și slab aliate și sudării sub strat de flux |
| S 10 Mn 1 | Sudare sub strat de flux a oțelurilor nealiate, exploatate la temperaturi până la -20°C |
| S 10 Mn 1,5 | Sudare sub strat de flux a oțelurilor slab aliate cu mangan |
| S 12 Mn 2 | Sudare sub strat de flux în baie de zgură a oțelurilor carbon și slab aliate, cu limită de curgere și rezistență la rupere ridicată |
| S 12 Mn 2 Si | Sudare în mediu de gaz protector (CO ₂) a oțelurilor cu granulație fină, cu rezistență ridicată la rupere fragilă, exploatate la temperaturi până la -20°C |
| S 07 Mn 1,4 Si | Sudare în mediu de gaz protector (CO ₂) a oțelurilor carbon și slab aliate, cu rezistență ridicată la rupere, exploatate la temperaturi până la -20°C |
| S 10 Mo | Sudare sub strat de flux a oțelurilor slab aliate pentru cazane și recipiente sub presiune, exploatate la temperatură negativă, ambientă sau ridicată până la 450°C |
| S 12 MoCr 1 | Sudare sub strat de flux a oțelurilor pentru industria aeronautică și a oțelurilor termorezistente pentru țevi |
| S 22 MoCr 1 | Încărcare și recondiționare prin sudare a pieselor de uzură, exploatate în condiții de solicitare termică și sudarea oțelurilor cu rezistență ridicată la rupere, aliate cu Cr-Mo-Si |
| S 12 SiMoCr 1 | Încărcare prin sudare și sudare în mediu de gaz protector a oțelurilor pentru cazane și recipiente sub presiune, exploatate la temperaturi până la 450°C |
| S 10 VMoCr 1 | Sudare mecanizată sub strat de flux a oțelurilor termorezistente |
| S 10 Mn 1 VMoCr 1 | Sudare mecanizată sub strat de flux a oțelurilor termorezistente |
| S 12 Mn 2 Mo | Sudare sub strat de flux și baie de zgură a oțelurilor carbon și slab aliate cu limită de curgere și rezistență la rupere ridicate, tratate termic |
| S 10 Mn 1 Mo | Sudare sub strat de flux și baie de zgură a oțelurilor carbon și slab aliate pentru cazane și recipiente sub presiune |

| | |
|--------------------------|---|
| | exploatate la temperatură ambiantă și la temperaturi până la 450°C |
| S 10 Mn 1 MoCr 1 | Sudare sub strat de flux a oțelurilor pentru țevi exploatare în mediu de hidrogen la temperaturi până la 530°C |
| S 10 Mn 1 SiMoCr 1 | Sudare sub strat de flux a oțelurilor pentru țevi exploatare în mediu de hidrogen la temperaturi până la 530°C |
| S 12 Mn 1 SiNi 1 Ti | Sudare în mediu de gaz protector a oțelurilor cu granulație fină, a oțelurilor pentru construcții navale |
| S 10 Mn 1 SiNiCu | Sudare în mediu de gaz protector a oțelurilor rezistente la coroziune atmosferică |
| S10Mn 1 SiVMoCr1 | Sudare în mediu de gaz protector a oțelurilor termorezistente |
| S 10 Mn 1 Ni1 | Sudare sub strat de flux a oțelurilor cu granulație fină, a oțelurilor pentru construcții navale, cu limită de curgere ridicată, exploatată la temperaturi negative |
| S 10 Mn 1 NiCu | Sudare sub strat de flux a oțelurilor rezistente la coroziune atmosferică |
| S 10 Mn 1 Ni2 | Sudare sub strat de flux a oțelurilor slab aliate, cu granulație fină și limită de curgere ridicată, pentru recipiente sub presiune exploatare la temperaturi până la -50°C |
| S 80 Cr | Încărcare și recondiționare prin sudare a pieselor de uzură mare, exploatare în industria minieră |
| S 40 CrMn 1 Si 1 | Încărcare și recondiționare prin sudare în mediu de gaz protector a pieselor de uzură exploatare în condiții de temperaturi ridicate |
| S 12 Mn 1,5 Ni 1,5 Mo | Sudare sub strat de flux cu unul sau trei arce a oțelurilor cu granulație fină rezistente la temperaturi scăzute |
| S 32 MoCr 6 | Încărcare și recondiționare prin sudare a pieselor exploatare la temperaturi ridicate în industria chimică și petrochimică |
| S 55 MoCr 6 | Încărcare și recondiționare prin sudare a pieselor supuse la uzură abrazivă pentru industria metalurgică și minieră |
| S 10 Mn 1 SiMo | Sudare în mediu de gaz protector a oțelurilor termorezistente |
| S 10MnSiMo1Cr2,5 | Sudare în mediu de gaz protector a oțelurilor termorezistente |
| C 10Mn1Mo1Cr2,5 | Sudare sub strat de flux a oțelurilor termorezistente |
| S 28 Mn 1 Cr 12 Mo1VW0,5 | Sudare oțeluri inoxidabile cu 12% Cr |

| | |
|---------------------------|--|
| S 12 Mo 1 Cr 17 | Sudare în mediu de gaz protector a oțelurilor inoxidabile solificate mecanic și exploatare la temperaturi de 450-600°C |
| S 12 Cr 26 Ni 20 | Sudare în mediu de gaz protector a oțelurilor de tip 25/20 și sudarea îmbinărilor eterogene |
| S 11 Cr 25 Ni 20 | Sudare oțeluri rezistente la coroziune și refractare |
| S 10 Cr 18 Ni 9 | Sudare oțeluri inoxidabile de tip 19/9 |
| S 0,3 Cr 19 Ni 12 Mo 2 Nb | Sudare oțeluri inoxidabile de tip 19/12/2 |

Simbolizarea mărcii sârmei pentru sudare cuprinde, în ordine: litera S (prescurtare a cuvântului „sudare”); grupa de cifre care reprezintă conținutul maxim de carbon în sutimi de procente; simbolurile principalelor elemente de aliere, urmată de cifra care indică conținutul mediu al acestor elemente, când acesta este peste 1%.

Tabelul 1.4. Clasificarea fluxurilor pentru sudarea sub strat de flux după compoziția chimică conform SR EN 760-97

| Simbol | Constituenți chimici caracteristici | Limita constituentului % |
|-------------------------|--|-------------------------------|
| MS Silico-manganos | MnO + SiO ₂ CaO | min. 50 max. 15 |
| CS Silico-calcic | CaO + MgO + SiO ₂ CaO + MgO | min. 55 max. 15 |
| ZC Silico-zirconic | ZrO ₂ + SiO ₂ + MnO ZrO ₂ | min. 45 max. 15 |
| RS Silico-rutilic | TiO ₂ + SiO ₂ TiO ₂ | min. 50 max. 20 |
| AR Alumino-rutilic | Al ₂ O ₃ + TiO ₂ | min. 40 |
| AB Alumino-bazic | Al ₂ O ₃ + CaO + MgO Al ₂ O ₃ CaF ₂ | min. 40 min. 20 max. 22 |
| AS Alumino-siliconic | Al ₂ O ₃ + SiO ₂ + ZrO ₂ CaF ₂ + MgO | min. 40 min. 30 |

| | | |
|--------------------------------|--|----------------------|
| | ZrO ₂ | min. 5 |
| AF Alumino-fluoro- bazic | Al ₂ O ₃ + CaF | min. 70 |
| FB Fluoro-bazic | CaO + MgO + CaF ₂ + MnO SiO ₂ CaF ₂ | min. 50 max. 2015 |
| Z | Orice altă compoziție | |

Notarea se face în felul următor:

Fluxul pentru sudare EN 760-S F CS 1 67 AC H10, fiind obligatorie următoarea notare: *Flux pentru sudare EN 760-S F CS 1* în care: EN 760 = numărul standardului; S = flux pentru sudare cu arc electric sub strat de flux (tab. 1.4); F = flux topit (tab. 1.4); CS = tipul fluxului (tab. 1.4); 1 = utilizare în clasa 1 (tab. 1.4); 67 = activitatea metalurgică; AC = tipul curentului; H10 = conținutul de hidrogen difuzibil.

1.7. TIPURI DE ÎMBINĂRI SUDATE

Sudarea sub strat de flux se utilizează la realizarea:

- sudurilor în jgheab;
- sudurilor în colț;
- straturilor tampon;
- sudurilor de încărcare.

Sudarea în jgheab se face în poziție orizontală, iar sudarea în colț tot în poziție orizontală în jgheab, pentru că baia de metal topit și fluxul se pot menține doar în această poziție. Se pot executa suduri bune și pe plan înclinat la un unghi de maxim 15°, sudurile de încărcare și sudarea straturilor tampon se fac în poziție orizontală.

Sudurile realizate prin acest procedeu se pot clasifica după următoarele criterii:

- felul îmbinării;

- tipul rostului;
- metoda de sudare;
- poziția de sudare;
- numărul de depuneri;
- numărul de sârme utilizate;
- tipul surselor de sudare: singulare, multiple (serie, paralel, conexiuni multiple).

1.7.1. Sudarea în jgheab

Aceste suduri se fac de obicei la sudarea cap la cap, de la table subțiri (1,2 mm) până la table groase. Pătrunderea mare la sudarea sub strat de flux permite sudarea cap la cap a unor grosimi ale pieselor de 13 mm cu acces dintr-o parte, necesitând un umăr de reazem pentru a susține baia de metal topit. Sudarea într-o singură trecere se face până la grosimi de 8 mm și în două treceri până la grosimi de 16 mm, când se realizează sudarea cap la cap cu rost fără deschidere și fără umăr de reazem. Sudarea în straturi multiple cu unul sau mai mulți electrozi permite sudarea tablelor de orice grosime. Forma rostului la grosimi mari, cu acces bilateral, va fi în V sau în U pe o parte sau pe ambele părți. Sudarea cap la cap se poate face simultan pe ambele părți. În cele mai multe cazuri, electrozii se poziționează la un unghi de $10-30^{\circ}$ față de orizontală. Pentru a susține fluxul și metalul topit, se folosește un suport culisant. În figura 1.6 este reprezentată sudarea îmbinărilor în colț în poziție jgheab.

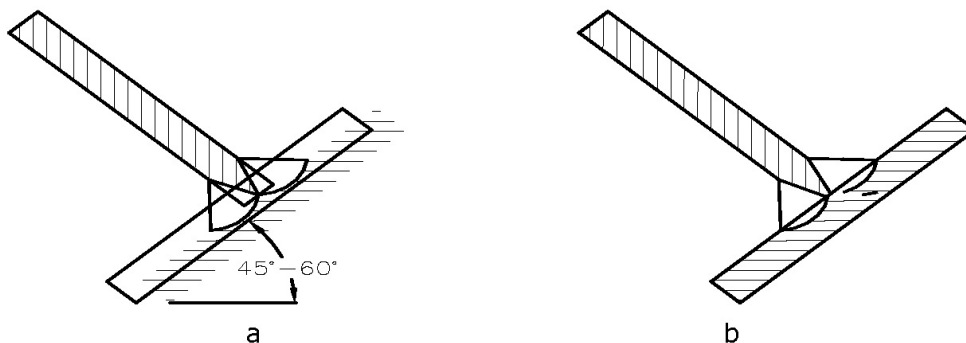


Figura 1.6. Sudarea îmbinărilor de colț în poziție jgheab

1.7.2. Sudarea în colț

Cu un singur electrod se poate face sudarea în colț de grosime 9,5 mm în poziție orizontală, într-o singură trecere (figura 1.7). Sudurile de dimensiuni mai mari se pot face într-o singură trecere, dar cu mai mulți electrozi. De regulă, sudurile cu grosimi de peste 8 mm se fac în poziție plană sau orizontală, cu treceri multiple. Sudurile în colț sub strat de flux au o pătrundere mai mare decât cele executate cu electrod învelit, de aceea ele pot fi solicitate la eforturi de forfecare mai mari pentru aceeași grosime a sudurii.

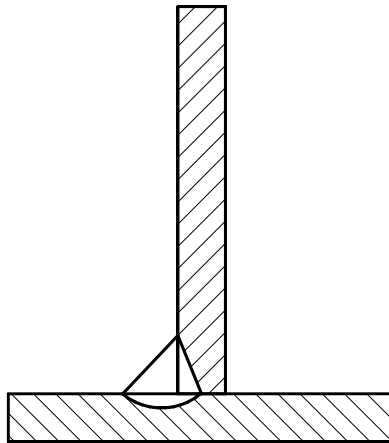


Figura 1.7. Sudură în colț

1.7.3. Sudarea straturilor tampon

Electrodul este poziționat în mijlocul defectului și se menține în aceeași poziție până la finele sudurii. Timpul necesar depinde de curentul de sudare și de mărimea defectului. Datorită pătrunderii mari obținute cu acest procedeu, este foarte important ca umărul de reazem să aibă o grosime corespunzătoare.

1.7.4. Sudarea de încărcare

Ambele procedee de sudare sub strat de flux, cu electrod singular sau multiplu, se folosesc pentru a asigura un metal depus cu proprietăți deosebite la suprafață. Scopul urmărit poate fi repararea sau recondiționarea echipamentelor uzate. Ratele înalte de depunere, obținute la sudarea sub strat de flux, își găsesc o largă aplicabilitate la încărcarea prin sudare.

1.8. VARIANTE TEHNOLOGICE ALE SUDĂRII SUB STRAT DE FLUX DE MARE PRODUCTIVITATE

Acest proces se pretează la o mare varietate de sârme, combinații de flux, electrozi singulari sau multipli, sudarea în curent continuu sau curent alternativ. El este adaptat la o gamă largă de materiale și grosimi. Configurațiile multiarc se pot utiliza pentru controlul profilului sudurii și la creșterea ratei de depunere față de arcul singular. Se pot obține astfel, de la suduri late cu pătrundere mică până la suduri înguste cu pătrundere mare pentru îmbinări de grosimi mari. În continuare se vor prezenta câteva variante tehnologice de creștere a ratei de depunere și implicit a productivității.

1.8.1. Sudarea sub strat de flux cu o sârmă

Această variantă are ponderea cea mai mare. Practic sunt folosite arcuri electrice cu intensități ale curentului de la 150 A până la 2000 A. Prin această variantă se pot suda într-un singur strat grosimi de 2÷30 mm, iar în mai multe straturi se pot suda grosimi de până la 600 mm sau mai mari. Principalele caracteristici ale procesului sunt:

- o sârmă;
- curent continuu, polaritate inversă (CC+);
- diametrul sârmei: 1,2 - 6 mm;
- distanța de la duza de contact: 20 - 40 mm;

Așa cum se poate vedea în figura 1.8, rata de depunere depinde de mărimea curentului de sudare și de diametrul sârmei electrod.

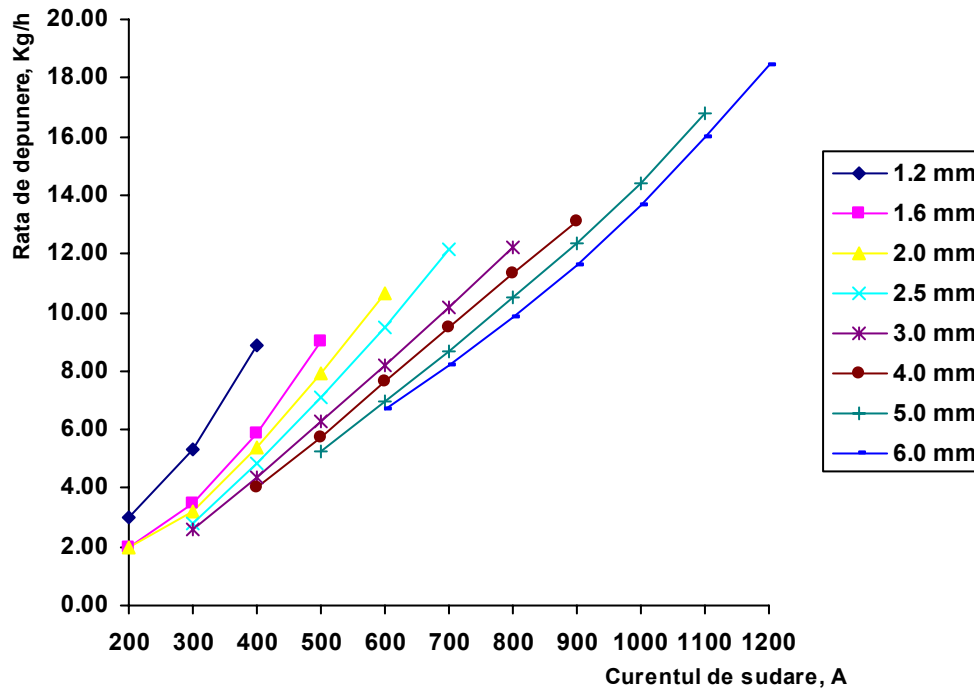


figura 1.8. Influența diametrului sârmei asupra ratei de depunere (CC+, lungimea liberă a sârmei 1,2 și 1,6 mm; 20 mm; 2,0 mm; 25 mm; 2,5 -6,0 mm; 30 mm)

La aceeași valoare a curentului de sudare, un diametru mai mic al sârmei conduce la o rată de depunere mai mare, fenomen explicabil prin densitățile mai mari de curent. Este de la sine înțeles că la diametre mai mari ale sârmei, sunt necesare valori mai mari ale curentului și astfel se pot obține rate mai înalte de depunere. În schimb, la diametre mai mici ale sârmei se obțin pătrunderi mai mari și lățime mai redusă ale cusăturii sudate. De aceea, selecția unor sârme cu diametre mici permite sudarea cu energii liniare mai scăzute, la aceleași rate de depunere. Această soluție este foarte avantajoasă, îndeosebi la sudarea oțelurilor sensibile la durificare prin tratament termic de călire. Pentru majoritatea cazurilor practice, sârma electrod are un diametru de 4,0 mm. La un curent de sudare de 900 A, cu o asemenea sârmă se obține o rată de depunere de 11,7 kg/h.

Exemplul 1: Influența diametrului sârmei asupra densității de curent

- curentul de sudare: 400 A

- 1,2 mm: 354 A/mm²
- 1,6 mm: 199 A/mm²
- 2,0 mm: 127 A/mm²
- 2,5 mm: 81 A/mm²
- 3,0 mm: 57 A/mm²
- 4,0 mm: 32 A/mm²

Exemplul 2: *Influența diametrului sârmei asupra ratei de depunere*

- 4,0 mm: (650 A): 7,5 kg/h
- 3,0 mm: (650 A): 8,6 kg/h (= +15%)

Productivitatea poate fi apreciată cu relația:

$$\text{Timpul de sudare} = \frac{\text{Metalul depus}}{\text{Rata depunerii} \times \text{Durata de acționare relativă a arcului}}$$

Principalele modalități de creștere a productivității vizează în principal mărirea ratei de depunere, a duratei de acționare relativă a arcului și micșorarea cantității de metal depus prin reducerea volumului rostului.

Dintre procesele care asigură o înaltă rată de depunere se menționează:

- sudarea în curent continuu, polaritate directă (CC-);
- sudarea cu o lungime mare a capătului liber al sârmei;
- sudarea cu sârmă tubulară;
- sudarea cu pulberi metalice;
- sudarea cu două sârme TWIN ARC;
- sudarea cu două sârme în TANDEM.

1.8.2. Sudarea sub strat de flux în curent continuu, polaritate directă (CC-)

În mod obișnuit, se sudează în curent continuu cu polaritate inversă (DC+) deoarece se asigură o bună pătrundere și o mare reproductibilitate a rezultatelor. Dacă sârma electrod este legată la polul negativ polaritate directă, se obține o creștere semnificativă a ratei de depunere ca urmare a încălzirii catodice a sârmei (figura 1.9). Această creștere a ratei de depunere va fi atinsă fără costuri suplimentare.

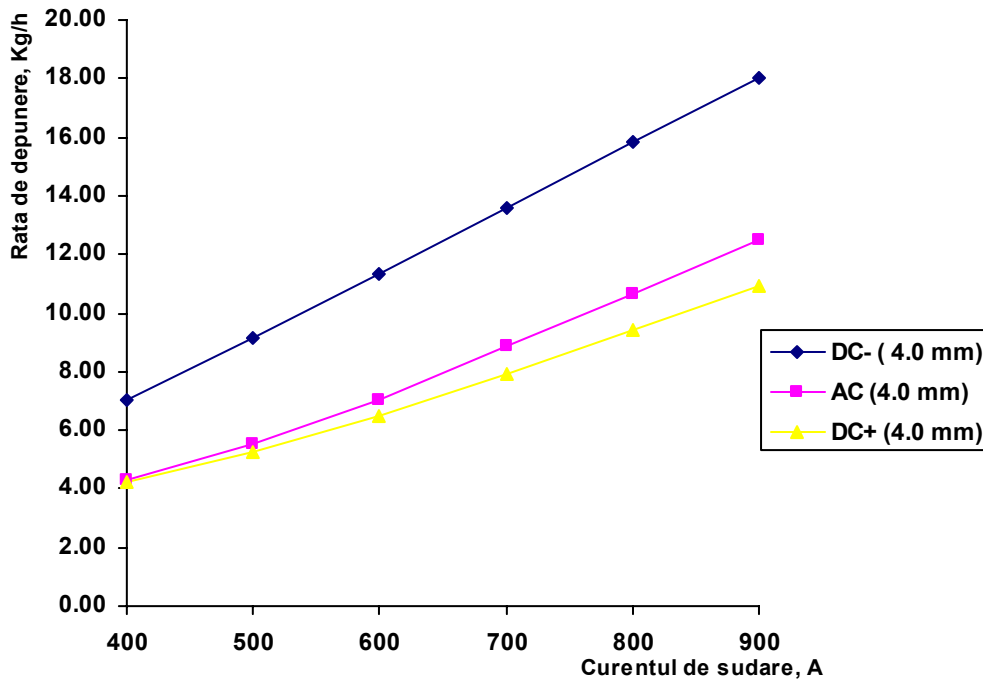


figura 1.9 Influența polarității electrodului asupra ratei de depunere (diametrul sârmei 4,0 mm și lungimea capătului liber 30 mm)

F

Pentru un diametru de sârmă de 4,0 mm la sudarea cu polaritate directă este necesară o tensiune a arcului cu circa 2 V mai mare decât la sudarea cu polaritate inversă; în schimb, curentul de sudare rămâne același. De asemenea, comparativ cu sudarea cu polaritate inversă, la sudarea cu polaritate directă, se obține o reducere a pătrunderii cu cca. 20 – 30%. Acest lucru nu prezintă o importanță deosebită, excepție făcând cazurile care impun o anumită mărime a pătrunderii la rădăcină. Creșterea ratei de depunere prin polaritate directă va trebui să conducă la o mărire a vitezei de sudare și, prin aceasta, la o cusătură sudată cu grosime mai mică. În cazul încărcării prin sudare, ambele caracteristici ale polarității directe sunt foarte avantajoase, întrucât o rată mai înaltă de depunere micșorează timpul efectiv de sudare, iar o pătrundere mai redusă conduce la un grad de diluție mai mic.

1.8.3. Sudarea sub strat de flux cu o lungime mărită a capătului liber al sârmei

Uzual, lungimea capătului liber al sârmei este de 20 – 40 mm, ea depinzând de diametrul acesteia. La stabilirea unui regim tehnologic de sudare se pornește de la o lungime liberă egală cu aproximativ 8 ori diametrul electrodului. Aceasta se modifică în cursul experimentelor, astfel încât să se obțină o rată de depunere optimă la o valoare constantă a curentului de sudare. Prin folosirea unei lungimi mărite a capătului liber se obține o creștere a ratei de depunere (fig.1.10), dar și o reducere a pătrunderii.

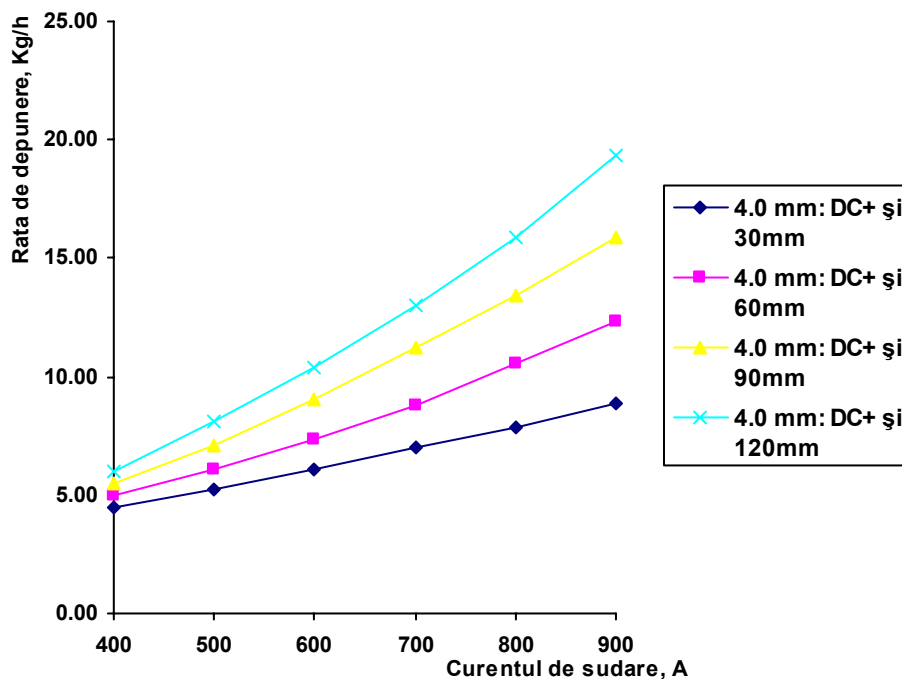


Figura 1.10 Influența lungimii capătului liber asupra ratei de depunere (DC+; 4,0 mm)

Încălzirea prin rezistență a sârmei (efectul Joule-Lentz) conduce la înmuierea acesteia și partea finală care se află în apropierea rostului tinde să se deplaseze. De aceea, se impune ca sârma caldă să fie protejată cu un izolator. Pentru un diametru de sârmă de 4,0 mm, lungimea maximă a capătului liber se ia

egală cu 150 mm. Dacă se recurge la combinarea unei lungimi mărite a capătului liber cu o polaritate directă, se va putea obține o rată de depunere dublă comparativ cu sudarea cu polaritate inversă și lungime normală a capătului liber al sârmei.

Exemplul 3: *Rata de depunere la sudarea cu polaritate directă și lungime mărită a capătului liber*

- 4,0 mm: CC+, 700 A și 30 mm → 9 Kg/h
- 4,0 mm: CC-, 700 A și 120 mm → 18 Kg/h

Nu se cunoaște exact cât de mult este folosită această variantă de creștere a productivității în cazul sudurilor de îmbinare. În schimb, ea se utilizează cu bune rezultate la încărcarea prin sudare, deoarece similar variantei cu polaritate directă se obține o rată înaltă de depunere și o pătrundere mică.

1.8.4. Sudarea sub strat de flux cu sârmă tubulară

Această variantă utilizează o sârmă tubulară în locul sârmei pline. Întrucât densitatea de curent (cu valori mari, de 250 – 300 A/mm²) determină viteza de topire a sârmei, se va obține o rată de depunere mult mai mare decât cea realizată cu sârma plină (fig.1.11).

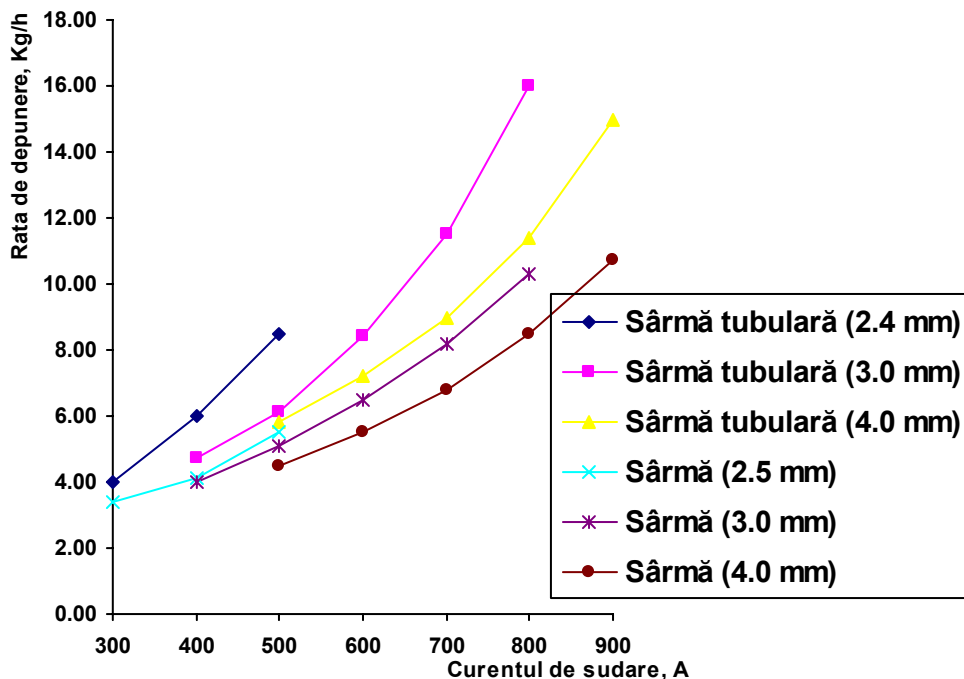


Figura 1.11 Influența procesului de sudare sub strat de flux cu sârmă tubulară (CC+) asupra ratei de depunere

Curentul electric parcurge doar teaca exterioară metalică a sârmei și nu miezul pulverulent care conține elemente dezoxidante, gazeifiante, zgurifiante, de aliere, etc. Conducerea procesului de sudare este foarte simplă, întrucât nu necesită o aparatură suplimentară, iar energia liniară rămâne neschimbată.

1.8.5. Sudarea sub strat de flux cu pulberi metalice

La sudarea convențională sub strat de flux numai o parte mică din energia disponibilă a arcului electric este utilizată pentru topirea materialului de adaos. Căldura rămasă este folosită pentru topirea fluxului și a materialului de bază, precum și la supraîncălzirea băii de sudură. Prin adaosul unor pulberi de fier se vor putea atinge creșteri semnificative ale ratei de depunere la procesele de sudare cu o sârmă și cu două sârme în tandem (fig.1.12).

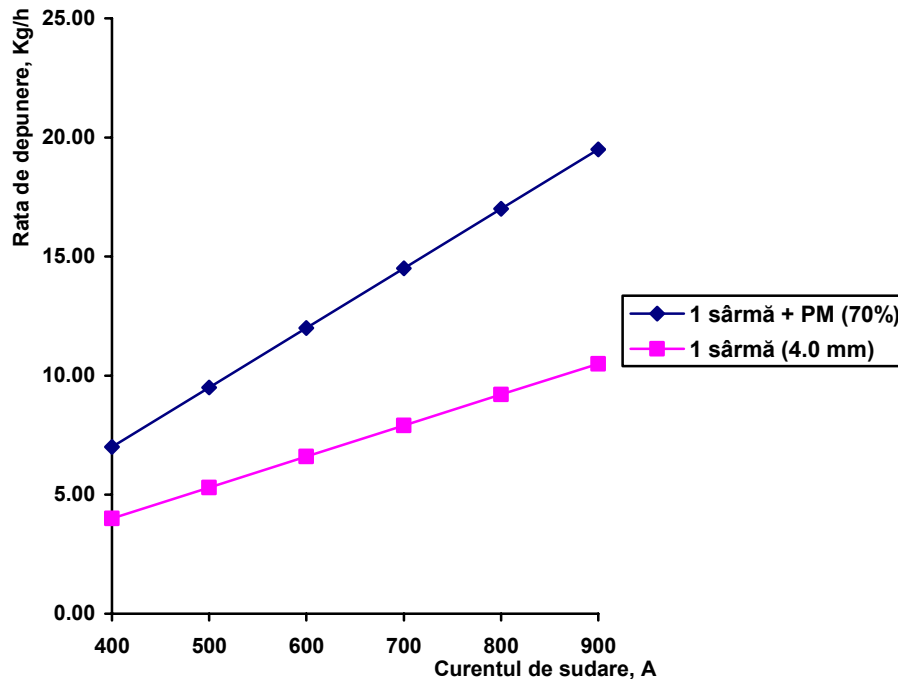


Figura 1.12 Influența adaosului de pulberi metalice asupra ratei de depunere la sudarea cu o sârmă (CC+; 4,0 mm; lungimea liberă 30 mm; cantitatea de pulbere 70% din greutatea sârmei, de ex. 50-130 g/min.)

Au fost dezvoltate următoarele două metode de adăugare a pulberilor metalice:

- introducerea pulberilor în rost înaintea alimentării cu flux;
- adiția de pulberi peste sârmă utilizând, forța de atracție magnetică a acesteia.

Ambele metode utilizează un echipament convențional de sudare sub strat de flux, prevăzut cu un sistem de dozare a pulberilor metalice. Spre deosebire de prima metodă, cea de-a doua prezintă avantajul că permite și executarea de suduri de încărcare a pieselor rotunde și a îmbinărilor de colț în poziție orizontală. Metoda la care pulberea metalică este alimentată separat în rost este destinată în special sudurilor de îmbinare. Prin acest procedeu pot fi îmbinate table relativ groase, cu introducerea de energie redusă, fără pericol de străpungere atât într-o singură trecere, cât și în mai multe treceri. Valorile tipice ale ratelor de depunere sunt de 5

– 6 kg/h pentru sudarea cu o sârmă și de 6 – 8 kg/h pentru sudarea cu două sârme în tandem.

Exemplu 4: *Introducerea de pulberi metalice*

- sudarea cu o sârmă de 4,0 mm (700 A → 8,9 kg/h)
- adaos de pulberi metalice: 7kg/h (corespunde la 70% din greutatea sârmei)
- sudarea cu 2 sârme în tandem: 4,0 mm + 4,0 mm (2 x 700 A → 19,1 kg/h)
- adaos de pulberi metalice: 8 kg/h (corespunde la 50% din greutatea sârmei)

Această variantă tehnologică de sudare se aplică intens în construcția platformelor maritime pentru obținerea unor productivități ridicate și fără o deteriorare a proprietăților mecanice ale metalului depus.

1.8.6. Sudarea sub strat de flux cu două sârme în tandem

În acest caz fiecare sârmă este alimentată cu curent electric de la o sursă proprie și printr-o unitate proprie de avans. Primul arc electric operează la curent înalt de sudare (normal în polaritate inversă CC -) și tensiune joasă; el produce o pătrundere mare. Valoarea curentului celui de-al doilea arc electric (normal în curent alternativ – AC) este mai scăzută pentru a nivela și completa baia de metal topit. Utilizarea curentului alternativ la cea de-a doua sârmă vizează evitarea acțiunii de suflaj prin atracție magnetică a ambelor arcuri electrice. În mod normal, primul arc electric este ușor tras, iar cel de-al doilea ușor împins. Sârmele folosite au diametre mari, cuprinse între 3,0 mm și 6,0 mm. Este de la sine înțeles că rata de depunere va crește semnificativ, dar investițiile de capital vor fi destul de ridicate, deoarece este necesar aproape un set dublu de echipament. Metoda poate fi aplicată în construcția de nave maritime și fluviale, la fabricarea țevilor și a structurilor portante.

1.8.7. Sudarea sub strat de flux cu două sârme TWIN – ARC

La această variantă de proces se folosesc două sârme-electrod care se topesc în aceeași baie. Ele sunt conectate la aceeași sursă de sudare și la un singur dispozitiv de avans. Operația de sudare se execută în curent continuu cu polaritate inversă. Comparativ cu procesul convențional de sudare cu o sârmă de diametru mare, în acest caz se obțin creșteri importante (30 – 50%) ale ratelor de depunere. Fenomenul se explică prin densitățile mari de curent atins la sârmele cu diametre mici (1,2 – 2,5 mm) și implicit prin amplificarea încălzirii prin rezistență.

1.9. OBIECTIVE URMĂRITE ÎN TEZA DE DOCTORAT

Având în vedere modalitățile de creștere a productivității la sudarea sub strat de flux și extinderea domeniului său de aplicare la realizarea produselor cu volum mare de sudură, în cadrul tezei de doctorat ne-am propus atingerea următoarelor obiective:

1. aprofundarea procesului de sudare cu două sârme, fie în varianta TWIN-ARC, fie în varianta TANDEM, prin care să fructificăm avantajele tehnice și economice ale acestuia, comparativ cu sudarea sub strat de flux cu arc singular;

2. studierea influenței parametrilor de proces asupra geometriei depunerilor realizate, definirea prin experiment a valorilor optime ale acestora și aprecierea nivelului de creștere a ratei depunerii și a productivității față de sudarea convențională sub strat de flux;

3. investigarea modificărilor microstructurale și submicrostructurale intervenite în metalul depus și în zona influențată termic. Apreciem că folosirea unor viteze mari de sudare va conduce la micșorarea valorilor energiei liniare introduse în piese și implicit la finisarea microstructurii de solidificare a metalului depus și, totodată, este de așteptat o creștere mai puțin intensă a granulației în subzona de supraîncălzire adiacentă liniei de fuziune cu consecințe pozitive asupra caracteristicilor de tenacitate;

4. caracterizarea potențialului de proprietăți mecanice ale îmbinărilor sudate TWIN-ARC, respectiv în TANDEM și stabilirea căilor de îmbunătățire a acestora prin operații de tratament termic ulterior sudării.

2. CERCETĂRI EXPERIMENTALE ASUPRA PROCESULUI DE SUDARE SUB STRAT DE FLUX CU DOUĂ SÂRME TWIN-ARC

2.1. DESCRIEREA PROCEDEULUI DE SUDARE SUB STRAT DE FLUX TWIN-ARC

Procedeul de sudare sub strat de flux TWIN-ARC utilizează două sârme electrod cu diametru redus și viteză mare de avans. El oferă substanțiale economii la unele aplicații când înlocuiește procedeul de sudare sub strat de flux convențional cu o sârmă electrod. Aceste economii rezultă din viteza mare de sudare și o rată de depunere utilizabilă mai înaltă. Cele două sârme sunt plasate foarte aproape una de cealaltă (7 mm) rezultând o baie topită alungită care îmbunătățește caracteristicile îmbinării și permite viteze mai mari de sudare; în același timp menține o formă potrivită pentru îmbinare. Echipamentul constă dintr-o sursă de sudare, un cap de sudare mecanizat sau tractor de sudare, cu două role de antrenare cu canal dublu și o duză comună de contact.

Principalele avantaje ale procedeului de sudare TWIN-ARC față de sudarea sub strat de flux cu un arc singular sunt [19,32]:

- asigurarea unor rate înalte de depunere;
- viteze mari de sudare indiferent de grosimea componentelor;
- căldură redusă introdusă în piese și deformații mai mici ale acestora; această căldură redusă ajută la controlul deformațiilor și devine importantă la sudarea oțelurilor sensibile la fragilizarea zonei influențate termic (Z.I.T.) ca urmare a creșterii granulației;
- consum redus de energie pe kilogram de metal depus; procedeul de

sudare sub strat de flux TWIN-ARC este simplu și rapid având ca rezultat un preț de cost redus la o calitate egală sau mai bună decât cea oferită de procedeul convențional de sudare sub strat de flux.

Aplicațiile potențiale ale acestui procedeu se regăsesc în fabricația echipamentelor terasiere, excavatoarelor, morilor de ciment, vagoanelor, tancurilor petroliere, vaselor sub presiune, recipientelor cu pereți subțiri și a altor produse sudate executate din materiale care au grosimea de la 1,9 mm până la valori mari.

Acest sistem este multilateral și este ușor de utilizat pentru [35]:

- structuri sudate de gabarit redus;
- structuri sudate grele;
- realizarea sudurilor circulare de diametre mari, unde sunt necesare rate de depunere ridicate;
- suduri de colț în jgheab, suduri de colț orizontale și suduri prin suprapunere;
- suduri cap la cap, inclusiv cele realizate orizontal pe perete vertical;
- aplicații de încărcare.

2.2. POZIȚIA COMPONENTELOR LA SUDARE

Practic, la sudarea sub strat de flux poziția componentelor este orizontală. Totuși în două cazuri se obțin avantaje când tablele sunt înclinate [2]:

- când se sudează table subțiri, viteza de sudare poate fi crescută prin poziționarea înclinată la maxim 25° și sudare descendentă;
- când se sudează table groase cu rosturi adânci, o înclinare de la 2° până la 5° și sudarea ascendentă este avantajoasă deoarece baia de metal topit nu curge în față, sub arc.

2.3. POZIȚIONAREA LEGĂTURII DE MASĂ

În general cele mai bune rezultate se obțin sudând dinspre legătura de masă (figura 2.1.a.)

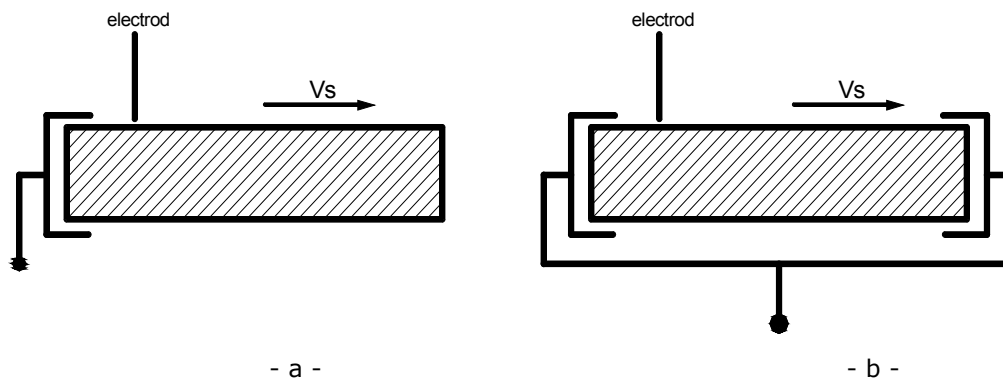


Figura 2.1. Legătura de masă

O slabă legătură la masă poate cauza fie creșterea suflajului și are ca rezultat porozitatea, fie o slabă formă a îmbinării sudate. În anumite cazuri, rezultate mai bune sunt obținute cu legătură de masă dublă la piesă (fig. 2.1.b.) sau chiar în mai multe puncte [9].

2.4. CURENTUL DE SUDARE

Dacă celelalte variabile sunt menținute constante, *modificarea curentului* are următoarele efecte [3]:

- creșterea curentului conduce la mărirea pătrunderii și a ratei de topire;
- curenții excesiv de înalți produc un arc critic, creștături sau o depunere înaltă și îngustă;
- curenții excesiv de reduși produc un arc instabil.

2.5. VITEZA DE SUDARE

Modificarea vitezei de sudare conduce la efecte asemănătoare varierii curentului, schimbându-se lățimea și pătrunderea [10].

Principial se recomandă:

- la sudarea într-o singură trecere să se regleze curentul și viteza de sudare cât mai sus posibil, la nivelul la care încă se mai poate obține lățimea și pătrunderea dorită a sudurii, dar fără străpungeri;
- la sudarea în treceri multiple, să se regleze viteza de sudare pentru a obține o lățime dorită a depunerii.

Dacă celelalte variabile sunt menținute constante, *modificarea vitezei* are următoarele efecte [35]:

- viteza de sudare excesiv de înaltă micșorează acțiunea de umectare și crește tendința spre crestături, suflaj, porozitate și forme neregulate ale depunerii;
- viteza de sudare lentă dă posibilitatea gazelor din metal să iasă din baia de metal topit, reducând pericolul de porozitate;
- vitezele excesiv de lente produc:
 - o îmbinare în formă de pălărie, care este un factor de fisurare;
 - străpungeri excesive prin stratul de flux care sunt inconfortabile pentru operator;
 - o baie topită largă, care curge în jurul arcului, rezultând o depunere rugoasă, stropiri și incluziuni de zgură;
 - pătrundere redusă.

2.6. DIAMETRUL ELECTRODULUI

La sudarea sub strat de flux semimecanizat, valabil și pentru sudarea sub strat de flux TWIN-ARC, sunt utilizate doar trei diametre de sârmă electrod [19]. Influențele diametrului sârmei asupra sudurii sunt următoarele:

- electrozii cu diametrul mai mare conduc la curenți mai mari;
- electrozii cu diametrul mai mare și curenți mai mici ajută la unirea rostului când se întâlnește o preasamblare greșită;

- la un curent dat, reducerea diametrului crește pătrunderea și stabilitatea arcului electric;
- electrozii cu diametrul redus au un start mai ușor.

2.7. TENSIUNEA ARCULUI

Tensiunea este utilizată în primul rând pentru controlul aspectului depunerii. Dacă celelalte variabile sunt menținute constante, *modificarea tensiunii* are următoarele efecte:

- creșterea tensiunii conduce la:
 - o depunere mai largă și mai turtită;
 - crește consumul de flux;
 - se îmbunătățește îndepărtarea zgurii la îmbinările cap la cap cu rostul în **I** și în colț;
 - crește rezistența la porozitate dată de rugină și murdărie;
 - ajută unirea rostului când preasablarea este slabă;
 - crește doza de aliere de la flux. Aceasta poate fi utilizată ca un avantaj când se sudează cu fluxuri aliate sau de încărcare, pentru a crește gradul de aliere al sudurii. Se poate însă reduce tenacitatea și crește sensibilitatea la fisurare, în particular când se lucrează cu treceri multiple.
- dacă tensiunea este excesiv de mare se produce;
 - o formă de pălărie a cusăturii care stă la originea amorsării fisurilor;
 - o slabă îndepărtare a zgurii;
 - la sudurile în treceri multiple, crește conținutul de elemente de aliere, producând o sensibilizare la fisurare a sudurii;
 - o sudură concavă de colț care va fi la originea fisurării;
 - descrește rezistența la porozitate dată de suflaj.
- reducerea tensiunii produce un arc electric mai rigid necesar pentru obținerea pătrunderii în rosturile adânci și o rezistență a arcului la suflaj în cazul vitezelor mari de lucru. De asemenea, îmbunătățește îndepărtarea zgurii în rosturi adânci.
- reducerea excesivă a tensiunii produce o depunere înaltă, îngustă cu slabă îndepărtare a zgurii.

2.8. POLARITATEA SUDĂRII ÎN CURENT CONTINUU

Polaritatea curentului ia în considerare avantajele sau dezavantajele sudării în curent continuu cu polaritate inversă față de sudarea în curent continuu cu polaritate directă [32].

- Sudarea în curent continuu polaritate inversă (CC+)

Este recomandată pentru majoritatea aplicațiilor deoarece produce o sudură netedă (lucioasă) și are o pătrundere mai mare. De asemenea, aceasta asigură o rezistență la porozitate mai bună cu excepția oțelurilor cu conținut ridicat de sulf și fosfor.

- Sudarea în curent continuu polaritate directă (CC-)

Asigură o topire mai mare cu o treime și pătrundere redusă. Aceasta se utilizează:

- pentru suduri de colț convenționale la care tablele sunt curate și fără rugină;
- în aplicații la care ratele de topire mai mari sunt benefice, cum ar fi încărcări;
- unde pătrunderea redusă este necesară pentru a reduce diluția, pentru a controla fisurarea sau porozitatea la încărcarea dură prin sudare a oțelurilor;
- unde o preasamblare mai mare (spațiu mai mare) și o pătrundere redusă ajută la prevenirea fisurării primului strat în rosturi prelucrate adânc;
- pentru aplicații cu lungime mărită a capătului liber al sârmei electrod (cu dispozitive speciale).

Când se modifică polaritatea de la curent continuu polaritate inversă la curent continuu polaritate directă, la același curent, trebuie mărită tensiunea în jurul a 4 volți pentru a menține o formă similară a depunerii.

Pătrunderea la sudurile în colț: la sudarea în curent continuu polaritate inversă față de sudarea în curent continuu polaritate directă.

Pătrunderea mai adâncă la sudarea în curent continuu polaritate inversă (fig. 2.2.a.) poate reduce costurile sub cele convenționale la sudarea în curent continuu

polaritate directă (fig. 2.2.b.)

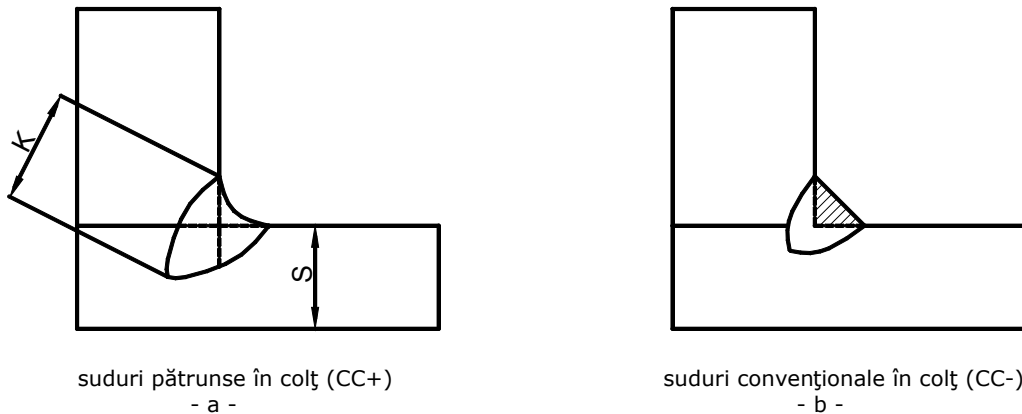


Figura 2.2. Pătrunderea la îmbinările în colț.

Observație: se recomandă $k = S / 2$

Rezistența îmbinării în colț depinde de mărimea grosimii efective. Mărimea grosimii sudurilor convenționale de colț se determină prin măsurarea cu dispozitive speciale de măsură. Pentru catete egale grosimea este $a=0,707k$ ($k = \text{cateta}$). Atunci când catetele nu sunt egale se măsoară cateta cea mai mică și se înmulțește cu 0,707 pentru a obține pătrunderea „a”. Această metodă presupune pătrunderea sudurii de colț până la colțul îmbinării.

Grosimea sudurilor de colț pătrunse include metalul sudat adăugat pe partea exterioară a îmbinării plus pătrunderea începând de la colț. Astfel, o sudură mică cu o pătrundere adâncă poate avea aceeași rezistență cu o sudură largă de colț construită în exterior. O sudură de dimensiuni mai reduse conduce la rosturi mai reduse.

Pentru un curent specific mărimea capătului liber al sârmei electrod duce la creșterea ratei de topire, însă sunt necesare dispozitive auxiliare pentru capul de sudare. Tipic este $16\div 28$ mm, iar cu dispozitiv auxiliar $44\div 75$ mm, în funcție de diametrul sârmei electrod.

Pentru sudarea sub strat de flux TWIN-ARC la sârmele electrod cu diametrul de 1,6 mm lungimea capătului liber este de 22 mm, iar pentru sârme electrod cu diametrul de 2.4 mm lungimea capătului liber este de 29 mm.

2.9. SUDAREA ÎN CURENT ALTERNATIV (CA)

Sudarea în curent alternativ este recomandată pentru două tipuri de suduri automate [19]:

- pentru arcul tras când se sudează în tandem;
- orizontal, cu aplicații de arc singular, când suflajul magnetic al arcului nu poate fi învins prin reajustarea legăturii de masă.

Pentru o bună stabilitate a arcului, o densitate mai mare de curent este mai utilă pentru curent alternativ decât pentru curent continuu. Când apar condiții de arc instabil trebuie mărit curentul sau trebuie utilizat următorul diametru mai mic la același curent.

2.10. CARACTERISTICA EXTERNĂ A SURSEI

Multe suduri sub strat de flux sunt realizate cu caracteristica externă a sursei abrupt coborâtoare. Sursele cu caracteristică externă rigidă – sunt uneori utilizate pentru execuția sudurilor mici cu viteze foarte mari de sudare. Unele surse mai noi au caracteristica externă brusc coborâtoare, rigidă și special rigidă, numită „sub arc mode”. În general, caracteristica rigidă este utilizată pentru execuția sudurilor mici și mari, iar caracteristica externă brusc coborâtoare este utilizată pentru execuția sudurilor mari orizontale.

2.11. STARTUL ARCULUI (AMORSAREA)

În scopul unei amorsări ușoare și pentru a evita arsuri ale duzei de contact se recomandă tăierea vârfului sârmei electrod, cu cleștele, sub un unghi de maxim 45° . Poziția la sudurile în colț este cu arc ușor tras, cu un unghi de $15^{\circ} \div 30^{\circ}$, la sudurile cap la cap cu un unghi de $15^{\circ} \div 20^{\circ}$, iar pentru sudurile cap la cap în două treceri cu un unghi de $10^{\circ} \div 15^{\circ}$.

2.12. SUDURI CAP LA CAP

Sunt realizate într-un domeniu larg de grosimi. În general, sudurile cap la cap se împart în următoarele categorii: table subțiri, rost în **I** și rost adânc.

- Table subțiri

Controlul deformațiilor și prevenirea străpungerilor sunt principalele considerații la executarea sudurilor cap la cap sub strat de flux. Pentru controlul deformațiilor pieselor, acestea trebuie să fie rigid fixate pe un suport prin utilizarea unei bare din cupru sau oțel pe verso (fig. 2.3.). Bara din partea opusă este de asemenea importantă pentru prevenirea străpungerilor.

Când se utilizează o bară din oțel ca suport, între table trebuie lăsată o mică deschidere. Sudura pătrunde în banda de oțel care devine parte integrantă a structurii sudate.

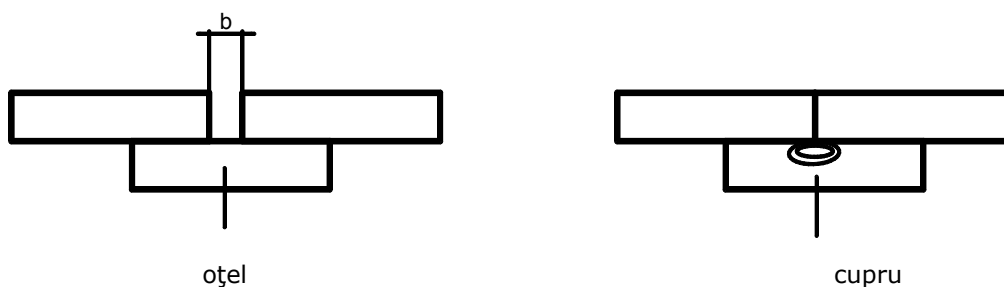


Figura 2.3. Bară suport

Când utilizarea unei benzi din oțel este indezirabilă, se utilizează o bandă din cupru. Banda din cupru trebuie să fie orizontală (dreaptă, plană, fără canal) sau poate avea un mic canal prelucrat, în funcție de forma dorită a îmbinării de pe verso. Canalul trebuie să fie mai lat decât îmbinarea de pe verso pentru a preveni creștăturile la marginile îmbinării. Când este necesară o trecere extralină a cusăturii de pe verso, canalul se face suficient de larg pentru a intra flux înainte ca piesele să fie strânse.

- Suduri cap la cap cu rost în **I**

Pătrunderea 100% este uzual necesară la execuția sudurilor cap la cap, rost

în **I**, pentru o rezistență completă a sudurii, fără străpungeri.

Tablele de până la 19 mm grosime pot fi pregătite cap la cap, rost în **I**, deschidere zero, strânse și apoi sudate printr-o trecere pe fiecare parte. În cazul stanțării normale (la foarfecă) sau tăierii cu flacăra a marginilor, o pătrundere de 60% este practică pentru prima trecere. Dacă marginile sunt prelucrate și potrivite strâns împreună, este posibilă o pătrundere de 80%.

Când cele două margini sunt strânse cap la cap, în particular pentru grosimi de 15 mm până la 19 mm, supraînălțarea îmbinării devine mare, cu margini neregulate. O supraînălțare excesivă sau îmbinări neregulate pot fi reduse prin pregătirea rostului în **V** sau prin lăsarea unei distanțe între table.

2.13. SUDURI ÎN COLȚ

Principalele considerații avute în vedere la execuția sudurilor în colț includ: echipamentul, forma îmbinării, pătrunderea, suflajul arcului și faptul că sudurile în colț sunt îmbinări contractante.

- Forma îmbinării

Pentru sudarea într-o trecere, mărimea maximă a catetei care poate fi sudată normal cu un electrod, la o sudură în colț, este de 8 mm. Încercarea de a face îmbinări mai largi poate conduce la îmbinări ca în figura 2.4. Îmbinări în colț orizontale cu mărimea catetei până la 12,7 mm, pot fi executate într-o trecere utilizând procedurile de sudare în TANDEM sau TWIN-ARC. Astfel de proceduri permit mărimi ale catetei, în practică, de până la 19 mm.

În figura 2.4. se prezintă considerații adiționale în execuția sudurilor de colț.

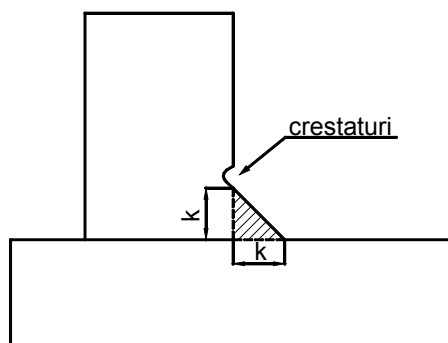


Figura 2.4. Prescripții pentru suduri de colț

Îmbinări de acest tip rezultă dintr-o excesivă viteză de sudare, o grămadă adâncă de flux, curent înalt, tensiune redusă sau o poziție ascendentă de sudare. Dacă sudurile de colț preiau o formă concavă la marginea superioară, făcând dificilă îndepărtarea zgurii, descreșterea tensiunii este absolut suficientă pentru a face sudura ușor convexă. Sudurile care sunt ușor mai late decât adânci sunt cele mai bune. Sudurile înguste și adânci prezintă tendința de fisurare internă. Secvența potrivită a cusăturilor pentru suduri în colț cu treceri multiple joacă un rol important.

- Suflajul arcului electric

Suflajul arcului poate cauza porozități. Polaritatea inversă și electrozii de diametru mic sunt susceptibili la apariția sa. Suflajul apare cel mai frecvent la viteze înalte de sudare pe table subțiri din oțel, dar poate apărea și la table mai groase, în special în cazul îmbinărilor complexe. Porozitatea datorată suflajului apare uneori în aplicații semimecanizate cu treceri multiple când se utilizează tehnica „arc tras”. Cea mai bună cale de a elimina porozitatea este de a elimina suflajul.

- Contractția îmbinărilor

La o contractie a sudurilor în colț pe parcursul răcirii, există tendința de a atrage cele două table împreună (una spre cealaltă). Când tablele sunt fixate rigid, metalul nu se contractă pe parcursul răcirii, astfel că el este supus unor tensiuni de întindere. Aceasta cauzează o tendință naturală pentru fisurare la sudurile în colț. Cea mai bună metodă de a evita această tendință de fisurare este de a lăsa un spațiu (distanță) de 1,6 mm în îmbinare.

2.14. SUDAREA PE TABLE ÎNCLINATE

În mod normal, componentele trebuie să fie poziționate la nivel orizontal deoarece sudarea pe o tablă înclinată poate deforma îmbinarea și poate afecta pătrunderea, iar sudarea descendentă duce la o reducere a îmbinării. Totuși există două situații când înclinarea componentelor este avantajoasă [76]:

- în cazul sudării tablelor subțiri, întrucât este de dorit o pătrundere excesivă, un unghi de $10^{\circ} \div 20^{\circ}$ descendent reduce pătrunderea permițând utilizarea curenților mai înalți și viteză de sudare mai mare. Înclinarea cu mai mult de 20°

conduce la îmbinări deformate.

- în cazul tablelor groase, la îmbinări cu rosturi adânci, în particular când se execută cu arcuri multiple, se recomandă sudarea ușor ascendent (2°). Aceasta se datorează faptului că la acest tip de îmbinare există o baie topită, largă, care este fluidă. Dacă piesele sunt poziționate ușor descendent baia va rula înaintea arcului și va produce suduri slabe calitativ.

Când baia topită merge înaintea arcului, arcul acționează pe baie și nu pe metalul de bază și formează crater. Ca rezultat apar următoarele efecte:

- arcul devine instabil;
- îmbinarea este ondulată;
- se obține o îmbinare cu lipsă de pătrundere.

2.15. TABLE ADIȚIONALE ȘI DISTANȚIERI

La îmbinările unde sudarea trebuie să meargă până la capătul tablelor trebuie să fie prevăzute unele căi de contracție, astfel încât metalul să nu curgă. Pentru aceasta, în majoritatea cazurilor, sunt utilizate table adiționale. Arcul este amorsat pe una din tablele adiționale plasată la începutul îmbinării și este oprit pe a doua tablă adițională plasată la sfârșitul îmbinării. Tablele sunt suficient de mari ca întreaga îmbinare a componentelor să fie formată potrivit. Ele trebuie să fie suficient de late pentru a susține fluxul și să fie etanșate la fund pentru a preveni străpungerile. În plus, ele ar trebui să aibă rostul conform configurației rostului îmbinării. După terminarea sudării tablele adiționale se îndepărtează. Când unele părți sunt plasate una lângă alta, blocurile din cupru plasate între table permit ca arcul electric să fie menținut pentru a se obține o sudură continuă.

2.16. SUFLAJUL ARCULUI

Suflajul arcului poate cauza porozitatea. Polaritatea directă și electrozii subțiri sunt susceptibili în particular. Suflajul apare cel mai frecvent la sudarea cu

viteze mari, automată, la table subțiri, dar poate apărea și la table groase, în special la îmbinări complexe. Porozitatea datorată suflajului înapoi apare la treceri multiple de sudare când se utilizează tehnica „arc tras” [77]. Porozitatea datorată suflajului înapoi este cea mai întâlnită la terminarea sudurilor la table subțiri decât la orice alt tip de sudare. La table subțiri din oțel porozitatea de la suflajul arcului se întâmplă în ultimii câțiva centimetri ai sudurii. Cea mai bună cale de limitare a porozității este eliminarea suflajului. Unele posibilități de eliminare a suflajului sunt:

- sudarea prin îndepărtare față de legătura la masă;
- realizarea unei puternice prinderi provizorii la sfârșitul îmbinării;
- strângerea tare a legăturii de masă la startul sudării și în plus se sudează spre sfârșitul închis al dispozitivului de fixare.

În construcția dispozitivelor de fixare pentru sudarea tablelor ușoare, se utilizează cupru masiv sau materiale nemagnetice; toate dispozitivele din oțel trebuie ținute la cel puțin 25,4 mm depărtare de arc și de oțelul sudat. Dacă aceste soluții sunt insuficiente, se utilizează sârme electrod cu puțin siliciu, tensiune redusă, curent redus, viteză de sudare redusă și curent continuu polaritate inversă. Când porozitatea de suprafață se manifestă la sudarea semimecanizată în treceri multiple, în plus față de utilizarea electrodului cu puțin siliciu, curent continuu polaritate inversă și sudare prin îndepărtare față de legătura la masă cu reducerea tensiunii se pot încerca următoarele:

- trebuie evitată înclinarea electrodului cu vârful orientat înapoi spre sudura terminată, deoarece aceasta crește suflajul înapoi. Electrocul trebuie ținut cât mai aproape posibil de verticală;
- dacă tabla sudată este mai subțire de 25,4 mm se utilizează flux cu rezistență la porozitatea dată de suflajul înapoi;
- creșterea deschiderii conului buncărului de flux pentru o acoperire mai mare cu flux;
- trebuie evitată plecarea sudurii din poziții care permit fluxului topit să curgă în afara rostului. Un strat gros de flux trebuie să acopere baia tot timpul sudării.

2.17. ECHIPAMENT A2-MULTIARC UTILIZAT PENTRU SUDAREA SUB STRAT DE FLUX

Echipamentul de sudare A2-Multiarc a fost utilizat pentru cercetările experimentale privind sudarea sub strat de flux TWIN-ARC. Acest echipament este destinat sudării mecanizate prin două procedee:

- sudarea sub strat de flux cu una sau două sârme electrod, în curent continuu și curent alternativ;
- sudarea MIG/MAG.

Echipamentul de sudare A2-Multiarc are în componență următoarele:

- sursa electrică de putere mare ($I_s \leq 2000$ A) cu caracteristică externă rigidă;
- tractorul de sudare ce poartă dispozitivul de avans al sârmei, bobina cu sârmă, buncărul sau dozatorul de flux, cutia de comandă, care realizează viteza de sudare;
- șinele de sudare pe care se deplasează tractorul;
- cabluri electrice.

În figura 2.5. este prezentat echipamentul pentru sudare sub strat de flux care a servit la conducerea programului experimental.

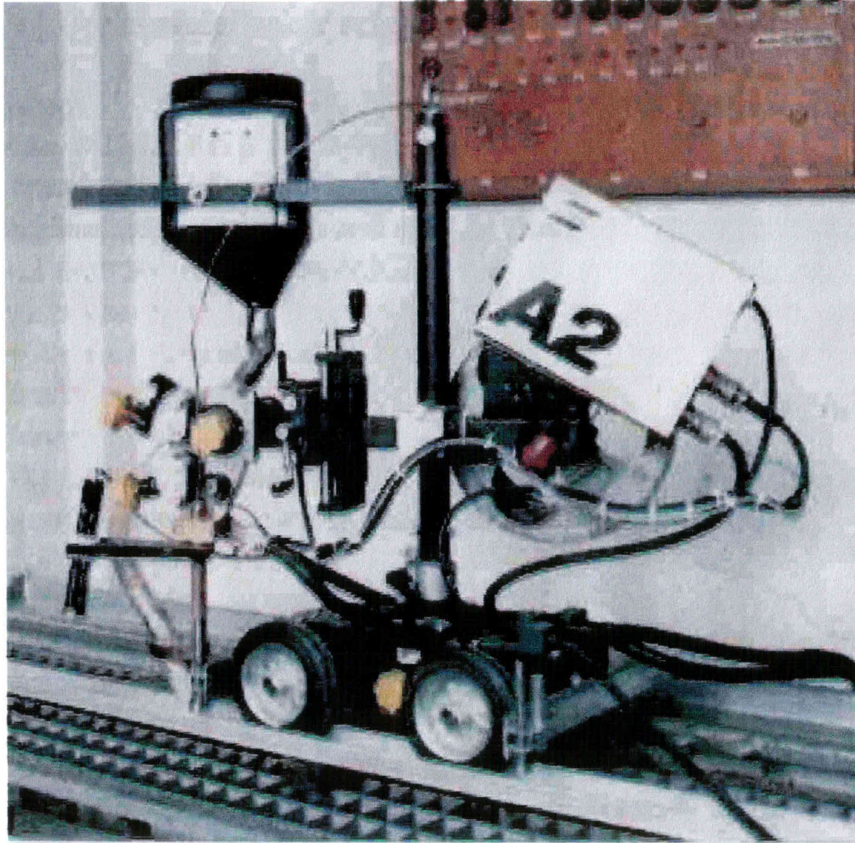


Figura 2.5. Echipament de sudare sub flux

Caracteristici tehnice:

- Echipamentul de sudare sub flux:
 - sursă de putere LAE 800 – ESAB cu accesorii;
 - tractor de sudare sub flux A2-Multiarc – ESAB.
- Instalația de sudare sub flux STK 1000:
 - sursă de putere TS 1000;
 - tractor de sudare TU 1000.
- Instalația de sudare ISF 1000:
 - sursă de putere RSAR 1000;
 - tractor de sudare AST – 3.
- Echipament de sudare semimecanizat sub flux PS 54 prevăzut cu:
 - sursă de putere PSO 500;
 - cap de sudare TSD 500.

Părțile componente ale utilajului sunt:

- tractor de sudare A2-Multiarc;
- sursă de sudare, de tip redresor, cu caracteristică externă rigidă, tip LAE-800;
- pupitru de comandă PEG-1;
- dispozitiv de aspirație a fluxului OPC.

Caracteristicile tehnice ale echipamentului sunt:

- curentul maxim de sudare: 800 A (pentru sudarea sub strat de flux), 600 A (pentru sudarea MIG/MAG);
- diametrul sârmelor de sudare:
 - $\varnothing=1,6\div 4,0$ mm pentru sudarea sub strat de flux;
 - $\varnothing=1,0$ mm $\div 3,2$ mm pentru sudarea MIG/MAG.
- viteza de avans a sârmei
 - $0\div 9$ m/min pentru sudarea sub strat de flux;
 - $0\div 16$ m/min pentru sudarea MIG/MAG.
- viteza de sudare: $0,1\div 1,7$ m/min;
- raza minimă pentru suduri circulare: 1500 mm;
- diametrul minim al conductei pentru sudare interioară: 1100 mm;
- deschiderea dintre roți: 600 mm;
- masa maximă a sârmelor: 30 kg;
- capacitatea buncărului de flux: 6 dm^3 ;
- masa tractorului fără sârme și fără flux: 47 kg;
- panta maximă: 25° ;
- tensiunea de alimentare: 42 V în curent alternativ.

În vederea sudării MIG/MAG tractorul se completează opțional cu următoarele anexe:

- cap de sudare MIG/MAG;
- electrosupapă de gaz;
- set de extindere;
- sistem de răcire în circuit închis;
- reductor de presiune cu debitmetru.

Accesoriile pentru sudare sunt:

- role de antrenare pentru o singură sârmă cu diametrul sârmelor de: $\varnothing=1,6; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0$ mm.

- duze de contact pentru sudarea sub strat de flux cu o singură sârmă cu diametre de: $\varnothing = 1,6; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0$ mm.
- role de antrenare pentru sudarea cu două sârme, cu două canale, pentru sârme cu diametre de : $\varnothing = 1,2; 1,6; 2,0; 2,5$ mm.
- bacuri de contact pentru sudarea cu două sârme cu diametre : $\varnothing = 1,6; 2,0; 2,5$ mm.
- dispozitiv de ghidare cu două role pentru rost în **V**;
- dispozitiv de ghidare cu traversă și două sisteme de role pentru suduri în colț;
- pompă de ghidare după rost;
- roți cu canal în **V** pe o parte a căruciorului care permit ghidarea după o bară de tip cornier;
- opțional, duze de contact pentru MIG/MAG, corespunzător sârmelor utilizate.

Elemente constructive

Tractorul A2-Multiarc face parte din categoria denumită „universal” adică permite mai multe poziționări ale capului de sudare.

Pe căruciorul tractorului este montată o coloană centrală care se poate roti cu $\pm 180^\circ$ într-un pivot. Pe această coloană este fixată o traversă principală care susține la extremitatea din dreapta rolele cu sârmă și pupitrul de comandă, iar la extremitatea din stânga glisierile de poziționare pe orizontală și verticală și dispozitivul de înclinare transversală cu $\pm 45^\circ$ pentru capul de sudare, dispozitivul de avans al sârmei, sistemul de role de antrenare, presare și îndreptare cât și capul de sudare propriu-zis.

Traversa principală poate fi poziționată pe coloană la diverse înălțimi. Deasupra traversei principale este fixată o traversă auxiliară care susține buncărul de flux; tractorul de sudare este prezentat în figura 2.6.

Tractorul permite mai multe variante de urmărire a rostului:

- suduri în colț. Urmărirea rostului se realizează prin două bare montate în fața și în spatele tractorului care sunt prevăzute la extremități cu role ce ating placa verticală de sudat. Datorită unghiului de circa 2° pe care îl fac roțile de antrenare cu placa verticală tractorul urmărește permanent această placă;
- suduri în plan orizontal sau înclinat până la 25° . Se utilizează următoarele variante de sudare:

- un spot luminos furnizat de o lampă fixată în fața tractorului a cărui fascicul cade pe rost, iar operatorul corectează manual cu manivelele celor două glisiere poziția capului de sudare;

- un sistem de două role baladoare care ghidează pe rostul în formă de **V**, montat pe capul de sudare;

- unul sau mai multe corniere fixate mecanic sau cu magneți permanenți pe care rulează roțile cu canal în **V** ale tractorului;

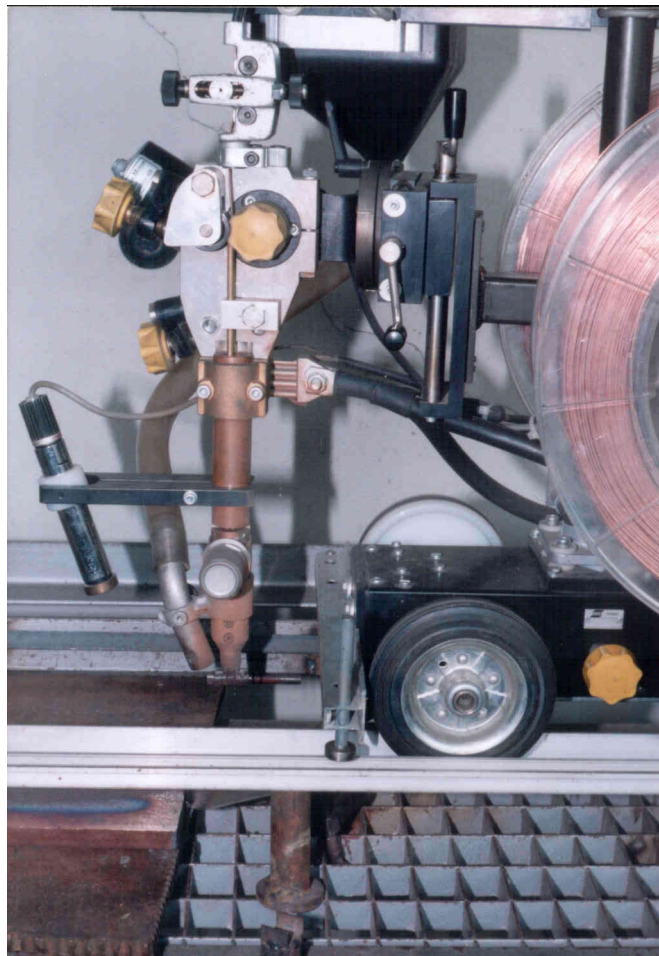


Figura 2.6. Tractor de sudare A2-MULTIARC

- suduri circulare de colț. Urmărirea rostului se face cu barele din fața și din spatele tractorului care se sprijină pe peretele vertical;

- suduri circulare interioare. Urmărirea rostului se face cu cele două role baladoare fixate pe capul de sudare și care urmăresc rostul în **V**.

În vederea deplasării manuale a tractorului de sudare este prevăzută o rozetă cu care se decuplează mecanic arborele de ieșire din reductorul de la sistemul de antrenare cu lanț a roților tractorului. Pentru sudarea sub strat de flux TWIN-ARC bacurile de contact sunt prevăzute cu două canale semicirculare prin care trec sârmele pentru sudare, distanțate la circa 7 mm și cu un cap special. De asemenea, se utilizează role de antrenare cu două canale și două sisteme de role pentru îndreptarea sârmelor în cazul sudării TWIN-ARC. Duza de contact folosită este prezentată în figura 2.7.



Figura 2.7. Duza de contact pentru sudare sub strat de flux TWIN-ARC

Principiul de funcționare

Acționarea tractorului se realizează cu un motoreductor de curent continuu care asigură antrenarea simultană a celor patru roți printr-un sistem de transmisie cu lanț. Turația motorului sau viteza de sudare se reglează continuu cu ajutorul unei scheme electrice prevăzută cu un tiristor de reglare plus un tranzistor pentru frânare. Schema mai este prevăzută cu două limitări de curent absorbit de motor: una rapidă pentru curent de 20 A, iar cealaltă temporizantă pentru un curent rotoric mai mare de 50% decât curentul nominal.

Sârma sau sârmele pentru sudare sunt antrenate cu un al doilea motoreductor de curent continuu. Turația motorului sau sistemului de avans al sârmei se reglează printr-o schemă electronică ce are o construcție aproximativ similară cu cea a tractorului.

Ambele scheme completează atât fluctuațiile cuplului mecanic rezistent la arbore cât și fluctuațiile tensiunii rețelei menținând turația constantă.

Pupitrul de comandă PEG-1 prezentat în figura 2.8. are în componența sa următoarele blocuri electrice:

- bloc de alimentare, care asigură tensiunile stabilizate necesare blocurilor electrice;
- bloc de măsură care permite măsurarea cu trei instrumente digitale a curentului de sudare, tensiunii arcului și vitezei de sudare, atât ca valori reale cât și ca valori prescrise sau de reglare;
- bloc de reglare al vitezei de sudare;
- bloc de reglare a vitezei de avans a sârmei;
- bloc secvențial care asigură ciclul de sudare;
- bloc opțional care permite realizarea unui ciclu complex de sudare.

Pupitrul de comandă cuprinde și un număr de potențiometre de reglare, comutatoare, butoane de comandă care sunt utilizate pentru controlul, reglarea, pornirea și oprirea tractorului.

Panoul frontal al pupitrului de comandă cuprinde următoarele:

- comutatorul pentru conectarea funcțiilor de reglare și prereglare cu patru poziții:
 - a) poziția „O” – deconectarea tuturor funcțiilor;
 - b) poziția „U” – $[v_{ae}=f(U_a)]$;
 - c) poziția „I” – $[v_{ae}=f(I_s)]$;

d) poziția „PST” – „preselectarea” care permite prereglarea curentului, tensiunii și vitezei de sudare cu ajutorul potențiometrului aferent.

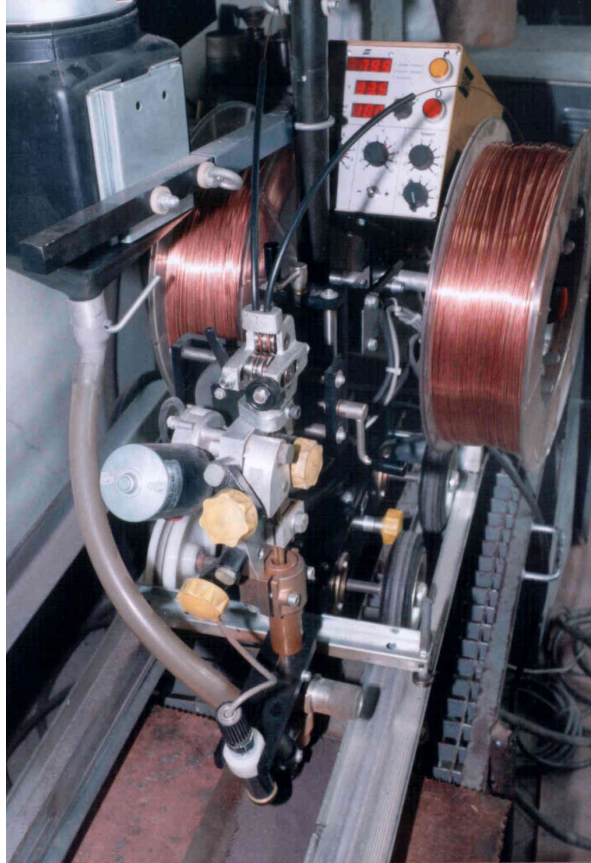


Figura 2.8. Tractor de sudare A2-MULTIARC echipat cu pupitrul de comandă PEG-1

Preselectarea tensiunii de sudare este posibilă deoarece sursa este prevăzută cu un circuit receptor de prereglare de la distanță. În cazul în care sursa nu este prevăzută cu un astfel de circuit, reglarea tensiunii sursei se face cu ajutorul potențiometrului propriu, al acesteia, acționat de un motoreductor care este comandat de la distanță printr-un comutator plasat pe panoul frontal al pupitrului. Se menționează că preselectarea curentului de sudare se poate face doar pe poziția „I” a comutatorului de funcții.

- trei potențiometre pentru reglarea curentului, tensiunii și vitezei de sudare;
- trei instrumente digitale pentru măsurarea curentului, tensiunii și vitezei

de sudare;

- buton de pornire cu lampă galbenă încorporată, utilizat pentru demararea procesului de sudare (lampa galbenă indică apariția curentului de sudare);

- buton de oprire cu lampă roșie încorporată, utilizat pentru oprirea procesului de sudare;

- comutator pentru poziționarea sârmei sus sau jos la mers în gol;

- comutator pentru selectarea modului de pornire al tractorului cu șapte poziții:

a) poziția „O” – tractor oprit;

b) poziția „A” – stânga sau dreapta permite pornirea tractorului odată cu amorsarea arcului (start normal);

c) poziția „Z” – stânga sau dreapta asigură pornirea imediată a tractorului odată cu sârma. Acest start se numește „zgâriat” și se utilizează la sudarea tablelor mai puțin curate;

d) poziția „M” – stânga sau dreapta asigură pornirea imediată a tractorului.

Panoul din spate al pupitrului de comandă cuprinde un număr de prize de racord pentru diverse utilități și funcții opționale și de asemenea potențiometrul pentru reglarea timpului de „Burn-Back”.

În interiorul pupitrului mai există un întrerupător care se comută pe poziția superioară pentru sudarea sub strat de flux cu o sârmă și pe poziția inferioară pentru sudarea sub strat de flux TWIN-ARC și MIG/MAG.

În vederea începerii procesului de sudare se poziționează sârma la vârf în **V** la un unghi de 45° pentru o mai ușoară amorsare a arcului.

Sursa pentru sudare LAE-800

Este un redresor semicomandat cu tiristoare având o caracteristică externă rigidă în domeniul de lucru și o tensiune de mers în gol mai mare.

Date tehnice:

- curent nominal la DA=100%: 800 A;
- plaja de reglare a curentului: 75 A / 17 V.....800 A / 44 V;
- tensiunea de mers în gol: 52 V;
- clasa de izolație: H;
- factor de putere: 0,93;
- randamentul (la $I_{nom}=800A$): 0,85;
- răcire forțată cu aer.

Sursa prezentată în figura 2.9. este formată dintr-un transformator principal trifazat care are prevăzut în secundar o punte redresoare de forță formată din trei diode înseriate cu o rezistență de sarcină, care asigură o caracteristică brusc coborâtore cu tensiunea de mers în gol de 52 V, puntea de forță asigură o caracteristică rigidă în intervalul 17÷44 V.

Sursa este prevăzută cu un sistem de ventilație forțată. Mai sunt montate în interiorul sursei următoarele:

- inductanța de netezire care asigură netezirea curentului de sudare;
- transformator auxiliar care furnizează tensiunile necesare blocurilor electrice și tractorului;
- contactor principal;
- potențiomtru propriu de reglare și comandă;
- protecții termice la suprasarcină, releu de curent pentru sesizarea apariției curentului de sudare și opțional instrumente de măsură pentru tensiune și curent, releu de timp pentru „Burn-Back” și dispozitiv de funcționare în paralel cu două surse.



Figura 2.9. Sursa de sudare LAE-800

Caracteristicile externe ale sursei LAE-800 sunt prezentate în figura 2.10.

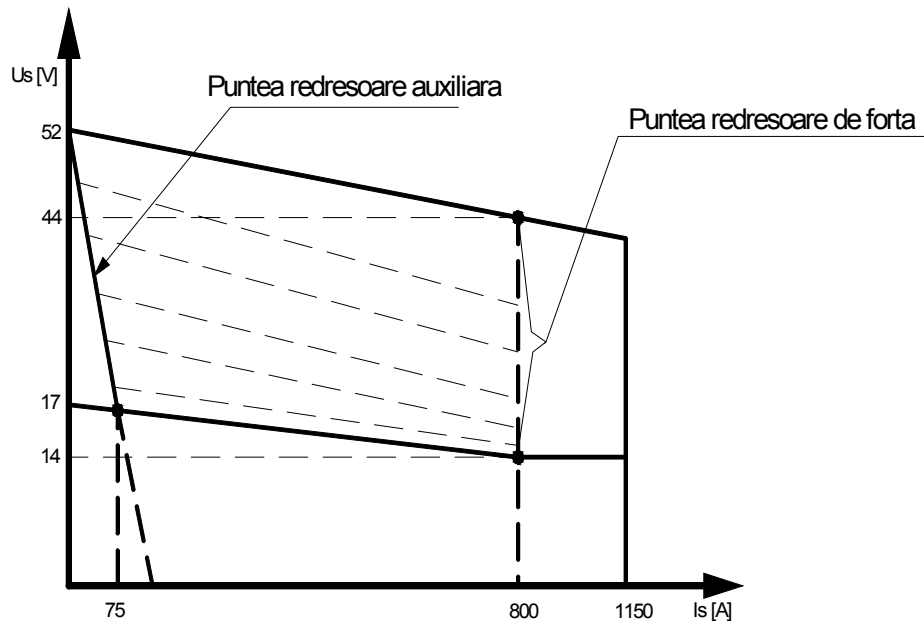


Figura 2.10. Caracteristicile externe ale sursei

Sistemul de redresare cu două punți asigură tensiunea relativ ridicată de mers în gol (52 V) necesară amorsării ușoare a arcului sub stratul de flux și pe de altă parte caracteristicile externe rigide necesare sudării sub flux și MIG/MAG. Sistemul de comandă și reglare asigură constanța tensiunii sursei la variațiile curentului de sudare și la variațiile cu $\pm 10\%$ ale tensiunii rețelei.

Dispozitivul de aspirație a fluxului OPC

Dispozitivul de aspirație este recomandat pentru echipamente mecanizate de sudare sub flux, fiind de greutate redusă, compact și robust.

Caracteristici tehnice:

- presiunea maximă a aerului comprimat: 6 bar;
- consumul maxim de aer: 250 l/min;
- viteza maximă de aspirație: 70 m/h la o înălțime de aspirație de 0,8 m;
- temperatura maximă a fluidului: 350° C.

Dispozitivul este format din:

- ejector pneumatic montat la intrarea în ciclon;

- tub de aspirație;
- duze de aspirație diferite pentru suduri cap la cap și în colț;
- suportul duzei de aspirație;
- ciclonul, care asigură separarea fluxului de aer și transmiterea acestuia în buncăr;
- sac filtrant pentru reținerea prafului din flux;
- filtrul de reținere a apei și uleiului din aerul comprimat.

Evitarea fărâmițării fluxului și a corodării pereților ciclonului se realizează prin captușirea pereților și a tubului de intrare cu o garnitură de cauciuc.

Ciclurile de sudare

Ciclul de funcționare ale tractorului A2-MULTIARC la sudarea sub strat de flux este prezentat în figura 2.11.

Ciclograma pentru sudarea MIG/MAG conține în plus o temporizare preliminară de pregaz și o temporizare finală de postgaz. După cum se observă din ciclogramă, din momentul startului, se conectează sursa și sârma avansează cu $v_{ae\ min}$ indiferent de reglarea inițială. La atingerea piesei și la amorsarea arcului, viteza de avans a sârmei crește brusc la valoarea corespunzătoare curentului preselectat. Tot din acest moment, pe start normal, pornește și căruciorul. La comanda STOP, viteza de avans a sârmei scade brusc la zero prin frânarea electronică a motorului de antrenare, iar după timpul de Burn-Back (timpul de ardere înapoi) se deconectează sursa, iar curentul de sudare devine zero și totodată se oprește și căruciorul. În felul acesta se evită blocarea sârmei în baia metalică care se solidifică.

Observație: timpul $t_{BB} = 0,1-0,2$ s; (timpul de „Burn-Back” – ardere înapoi) se reglează în funcție de diametrul sârmei (la limita inferioară pentru sârme subțiri și la limita superioară pentru sârme groase):

$$V_{ae\ min} = 1/10 \cdot v_{ae}$$

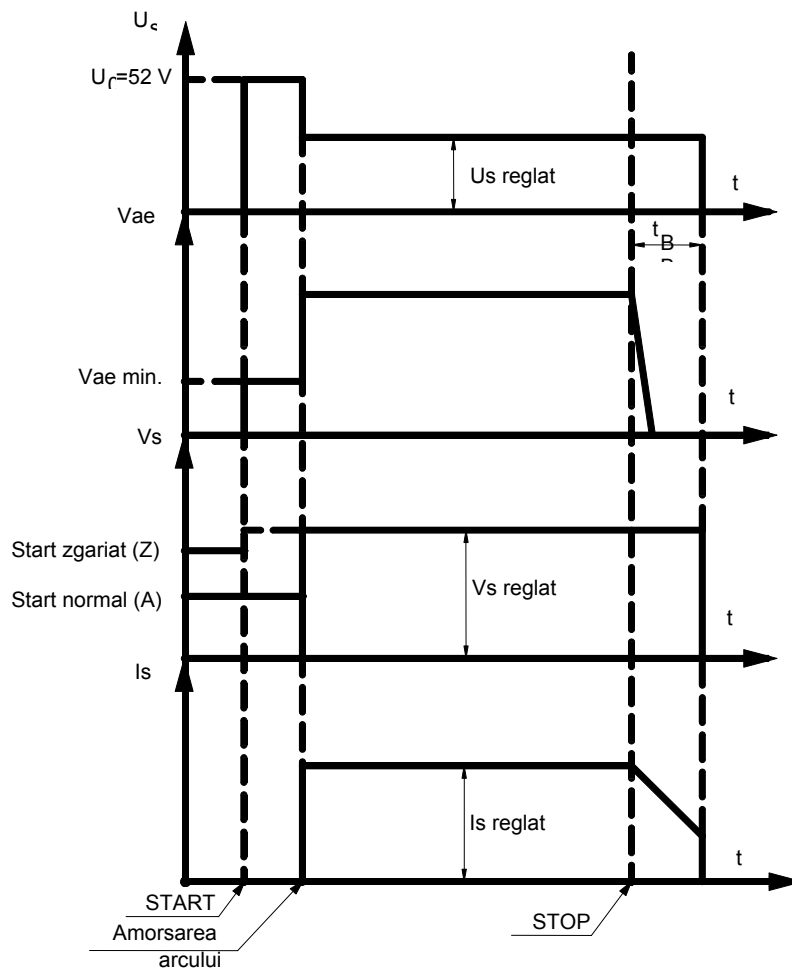


Figura 2.11. Ciclograma de sudare

2.18. METALUL DE BAZĂ

Oțelul utilizat ca metal de bază pentru cercetările experimentale este OL 52.3k, respectiv S-355J2 G3 conform normelor SR EN 10025 + A1. Compoziția chimică la analiza pe oțel lichid pentru produse plate și produse lungi este prezentată în tabelul 2.1., iar compoziția chimică pentru produsele de metal solid se prezintă în tabelul 2.2.

Tabelul 2.1. Prescripțiile de compoziție chimică pentru metalul de bază lichid

| Notare | | Metoda de dezoxidare | Subgrupa | C în % max. pentru o grosime nominală de produs | | | Mn % max | Si % max | P % max | S % max | N % max |
|-----------------------------------|--------------------|----------------------|----------|---|-----------|------|----------|----------|---------|---------|---------|
| Conform EN 10027-1 și ECISS IC 10 | Conform EN 10027-2 | | | ≤ 16 | > 16 ≤ 40 | > 40 | | | | | |
| S 355 J2 G3 | 1.0570 | FF | QS | 0,20 | 0,20 | 0,22 | 1,60 | 0,55 | 0,035 | 0,035 | - |

Tabelul 2.2. Prescripțiile de compoziție chimică pentru metalul de bază solid

| Notare | | Metoda de dezoxidare | Subgrupa | C în % max. pentru o grosime nominală de produs | | | Mn % max | Si % max | P % max | S % max | N % max |
|-----------------------------------|--------------------|----------------------|----------|---|-----------|------|----------|----------|---------|---------|---------|
| Conform EN 10027-1 și ECISS IC 10 | Conform EN 10027-2 | | | ≤ 16 | > 16 ≤ 40 | > 40 | | | | | |
| S 355 J2 G3 | 1.0570 | FF | QS | 0,23 | 0,23 | 0,24 | 1,70 | 0,60 | 0,045 | 0,045 | - |

Caracteristicile mecanice garantate pentru produsele plate și lungi sunt prezentate în tabelele 2.3. și 2.4.

Tabelul 2.3. Valorile minime ale limitei de curgere și rezistenței la rupere pentru diverse grosimi

| Notare | | Metoda de dezoxidare | Subgrupa | Limita de curgere minimă R_{eH} , N/mm ² Grosimea nominală, mm | | | | | | | | Rezistența la tracțiune R_m N/mm | | | |
|-----------------------------------|--------------------|----------------------|----------|--|-----------|-----------|-----------|------------|-------------|-------------|-------------|------------------------------------|-----------|-------------|-------------|
| Conform EN 10027-1 și ECISS IC 10 | Conform EN 10027-2 | | | ≤ 16 | > 16 ≤ 40 | > 40 ≤ 63 | > 63 ≤ 80 | > 80 ≤ 100 | > 100 ≤ 150 | > 150 ≤ 200 | > 200 ≤ 250 | < 3 | ≥ 3 ≤ 100 | > 100 ≤ 150 | > 150 ≤ 250 |
| S 355 J2 G3 | 1.0570 | FF | QS | 355 | 345 | 335 | 325 | 315 | 295 | 285 | 275 | 510-680 | 490-630 | 470-630 | 450-630 |

Tabelul 2.4. Valorile minime ale energiei de rupere

| Notare | | Metoda de dezoxidare | Subgrupa | Temperatura °C | Energia de rupere minimă, J Grosimea nominală, mm | |
|-----------------------------------|--------------------|----------------------|----------|----------------|--|----|
| Conform EN 10027-1 și ECISS IC 10 | Conform EN 10027-2 | | | | 40 | 33 |
| S 355 J2 G3 | 1.0570 | FF | QS | - 20 | 40 | 33 |

2.19. FLUXUL LINCOLNWELD 780

Acest flux este recomandat pentru sârmele Lincoln [77]:

- L-60;
- L-61;
- LSN 140 A;

Descriere generală:

- fluxul Lincolnweld este un flux activ folosit într-un număr limitat de treceri;
- este un flux cu bună utilizare generală inclusiv la sudarea semimecanizată;
- viteză de sudare mare pe table murdare;
- bună rezistență dată de rugină și de compuși organici;
- ușoară îndepărtare a zgurii, formă bună a cusăturii.

Notă: se va utiliza alt flux pentru table groase (treceri multiple) fără precauții particulare și pentru oțeluri slab aliate.

Compoziția chimică tipică în [%] a sudurii pentru sârmele utilizate este prezentată în tabelul 2.5., iar proprietățile mecanice ale metalului depus prin sudare sunt prezentate în tabelul 2.6.

Tabelul 2.5. Compoziția chimică garantată a metalului depus

| Tipul sârmei | C [%] | Mn [%] | Si [%] | P [%] | S [%] |
|--------------|-------|--------|--------|--------|-------|
| L-60 | 0,05 | 1,3 | 0,5 | <0,025 | <0,02 |
| L-61 | 0,05 | 1,4 | 0,6 | <0,025 | <0,02 |

Tabelul 2.6. Proprietățile mecanice garantate pentru metalul depus

| Tipul sârmei | Limita de curgere [N/mm ²] | Rezistența la tracțiune [N/mm ²] | Energia de rupere KV,[J] la temperatura T | | |
|--------------|---|---|---|-----|-------|
| | | | +20°C | 0°C | -20°C |
| L-60 | >400 | | 80 | 60 | 40 |
| L-61 | 450 | | 80 | 60 | 40 |

Materialele care pot fi sudate cu acest flux sunt:

- oțeluri cu destinație generală;
- oțeluri pentru construcții navale și platforme marine;
- oțeluri turnate în piese;
- oțeluri pentru conducte;
- oțeluri pentru aparate și recipiente sub presiune;
- oțeluri pentru temperaturi ridicate (termorezistente);
- oțeluri cu granulație fină.

Aplicații și recomandări de utilizare a fluxului selectat [77]:

- cu sârma L-60 preț de cost scăzut pentru utilizări generale;
- cu sârma L-61 cuplul recomandat;
- cu sârma L-50 și L-50M la table foarte murdare;
- în special pentru o singură trecere sau un număr limitat de treceri;
- viteză de sudare mare pe table murdare;
- bun la suduri circulare;
- cel mai bun flux la suduri în colț orizontale;
- bun pentru sudarea mecanizată.

Poate fi utilizat la treceri multiple în situațiile următoare:

- cu sârme având un conținut redus în siliciu;
- cu table având grosime mai mică de 25 mm;
- cu tensiunea arcului scăzută.

Caracterizarea fluxului:

- curent maxim pentru o sârmă: 1000 A;
- felul curentului: curent continuu și curent alternativ polaritate inversă;
- bazicitate (Boniszewski): 0,8;
- viteza de solidificare: rapidă;
- densitatea [kg/dm³]: 1,2.

2.20. SÂRMA ELECTROD

Sârma aleasă este o sârmă Lincoln L-61 (LSN 129). Simbolizarea sârmei electrod este arătată în tabelul 2.7., iar compoziția chimică a sârmei este prezentată în tabelul 2.8.

Tabelul 2.7. Simbolizarea sârmei electrod

| Sârma | Codul după AWS A.517/5,23 | Codul după DIN 8557 |
|----------------|------------------------------|------------------------|
| L-61 (LSN 129) | EM 12K | S2Si |

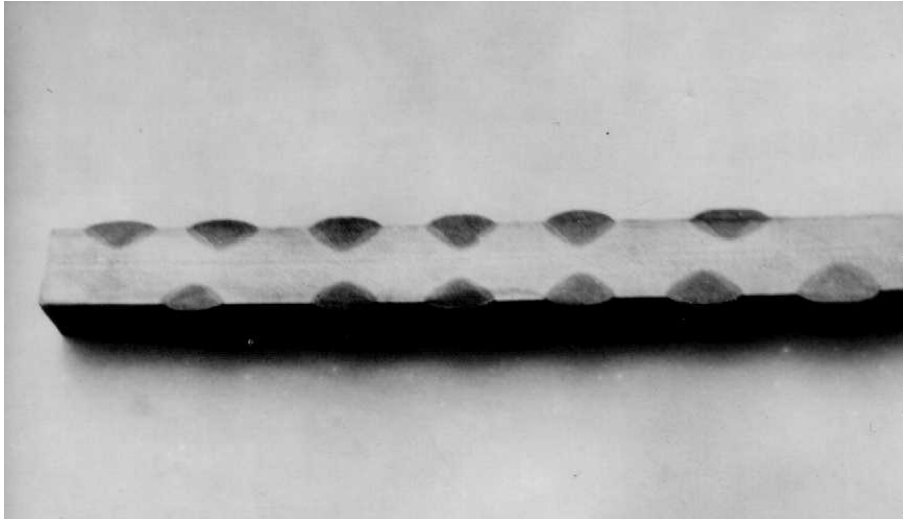
Compoziția chimică a sârmei este prezentată în tabelul 2.10.

Tabelul 2.8. Prescripții de compoziție chimică pentru sârma electrod

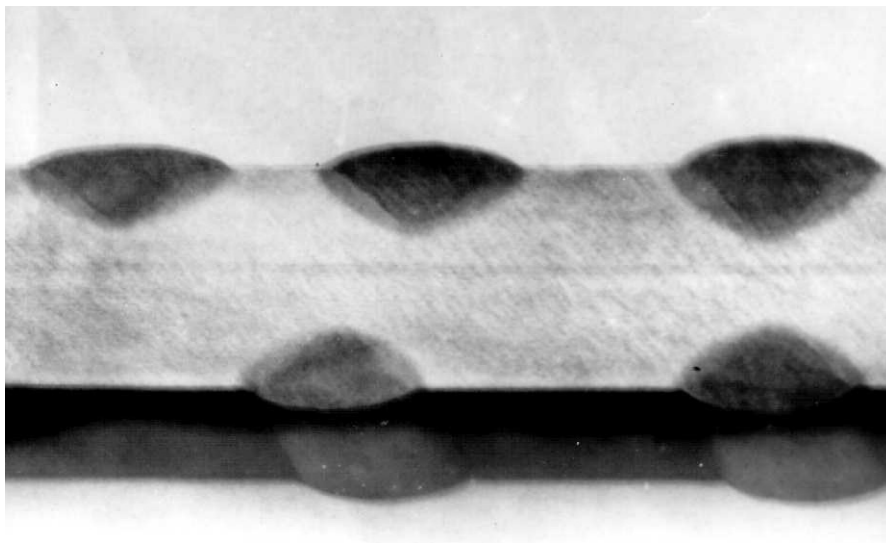
| Tipul sârmei | C [%] | Mn [%] | Si [%] | P [%] | S [%] |
|-------------------|-------|--------|--------|--------|--------|
| L-61 (LSN 129) | 0,1 | 1,0 | 0,25 | <0,025 | <0,025 |

2.21. OPTIMIZAREA PROCESULUI DE SUDARE SUB STRAT DE FLUX TWIN-ARC

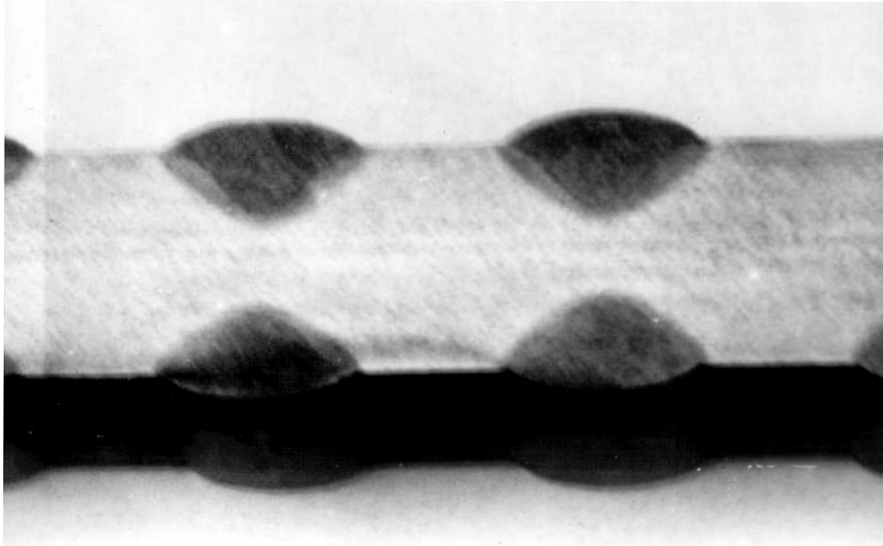
Depunerile preliminare au fost realizate pe table cu grosimea de 20 mm (figura 2.12.). Aceste depuneri au avut ca scop determinarea unor parametri reali de sudare care să poată fi folosiți în continuare la realizarea îmbinărilor sudate.



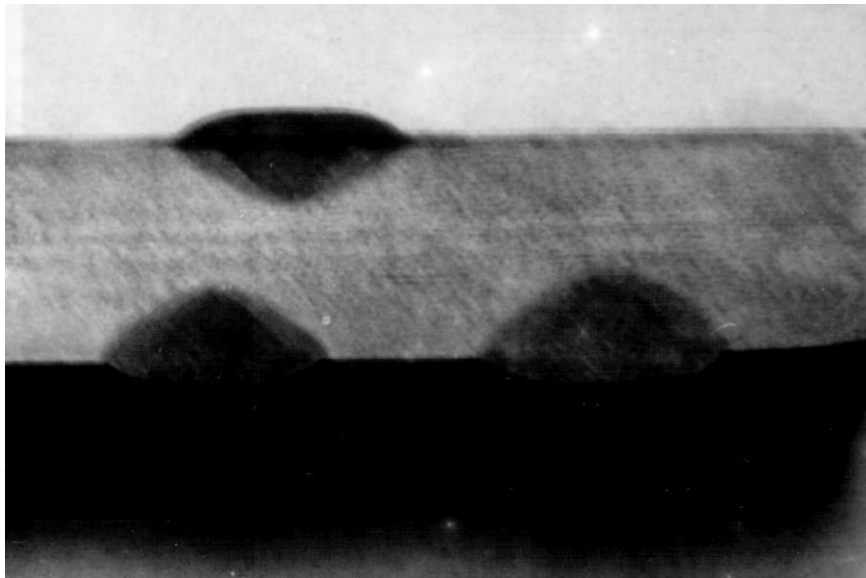
- a -



- b -



- C -



- d -

Figura 2.12. Imaginea macrografică a depunerilor

Regimurile tehnologice folosite sunt redată în tabelul 2.9.

Tabelul 2.9. Regimuri tehnologice

| Număr depunere | Is [A] | | Ua [V] | | Vs | Icl | Observații |
|----------------|--------|------|--------|------|----------|------|---|
| | Reglat | Real | Reglat | Real | [cm/min] | [mm] | |
| 1 | 600 | 600 | 34 | 33,7 | 80 | 22 | Flux 780, Sârmă L-61 Øe=1,6mm LINCOLN |
| | | 605 | | 34,1 | | | |
| 2 | 700 | 700 | 34,5 | 34,5 | 80 | 22 | |
| | | 705 | | 34,6 | | | |
| 3 | 800 | 797 | 35 | 34,8 | 80 | 22 | |
| | | 804 | | 35,2 | | | |
| 4 | 850 | 846 | 35,5 | 35,5 | 80 | 22 | |
| | | 852 | | 35,7 | | | |
| 5 | 700 | 692 | 34,5 | 34,3 | 100 | 22 | |
| | | 710 | | 34,6 | | | |

În tabelul 2.10. sunt prezentate rezultatele experimentale obținute în vederea stabilirii parametrilor geometrici ai depunerilor.

Tabelul 2.10. Parametrii de proces și geometria depunerilor

| Depuneri pe tablă cu s=20 mm, flux 780, sârmă L-61, Øe=1,6mm | | | | | | | | | | | |
|--|--------|------|--------|------|----------|------|------------|--------|----------|------------------|------------------|
| Nr | Is [A] | | Ua[V] | | Vs | Icl | Pătrundere | Lățime | Înălțime | Obs. | |
| | Reglat | Real | Reglat | Real | [cm/min] | [mm] | p [mm] | l [mm] | h [mm] | | |
| 1 | 700 | 700 | 33,5 | 33,4 | 100 | 20 | 4,8 | 16,5 | 2,0 | Is Var (1) | |
| | | 708 | | 33,6 | | | | | | | |
| 2 | 750 | 749 | 33,5 | 33,4 | 100 | 20 | 5,5 | 15,8 | 2,0 | | |
| | | 755 | | 33,7 | | | | | | | |
| 3 | 800 | 799 | 33,5 | 33,4 | 100 | 20 | 6,5 | 16,0 | 2,0 | | |
| | | 803 | | 33,6 | | | | | | | |
| 4 | 800 | 799 | 32,5 | 32,4 | 100 | 20 | 6,5 | 15,5 | 2,0 | | Ua Var (2) |
| | | 802 | | 32,6 | | | | | | | |
| 5 | 800 | 799 | 31,5 | 31,4 | 100 | 20 | 6,1 | 15,5 | 2,5 | | |
| | | 803 | | 31,7 | | | | | | | |
| 6 | 800 | 799 | 34,5 | 34,4 | 100 | 20 | 5,5 | 17,5 | 2,2 | | |
| | | 803 | | 34,7 | | | | | | | |
| 7 | 800 | 800 | 33,5 | 33,4 | 80 | 20 | 7,5 | 18,2 | 2,5 | | |
| | | 805 | | 33,7 | | | | | | | |
| 8 | 800 | 800 | 33,5 | 33,6 | 100 | 20 | 6,5 | 16,0 | 2,2 | | |
| | | 805 | | 33,6 | | | | | | | |
| 9 | 800 | 800 | 33,5 | 33,4 | 110 | 20 | 6,5 | 14,8 | 2,0 | Vs Var (3) | |
| | | 805 | | 33,6 | | | | | | | |
| 10 | 800 | 800 | 33,5 | 33,4 | 120 | 20 | 5,5 | 14,8 | 2,0 | | |
| | | 805 | | 33,6 | | | | | | | |
| 11 | 800 | 800 | 33,5 | 33,4 | 130 | 20 | 5,0 | 14,0 | 1,9 | | |
| | | 805 | | 33,6 | | | | | | | |
| | 800 | 800 | 33,5 | 33,4 | 140 | 20 | 4,9 | 13,5 | 1,7 | | |
| | | 805 | | 33,6 | | | | | | | |

Notă:

Var (1) se modifică curentul de sudare Is;

Var (2) se modifică tensiunea arcului Ua;

Var (3) se modifică viteza de sudare Vs.

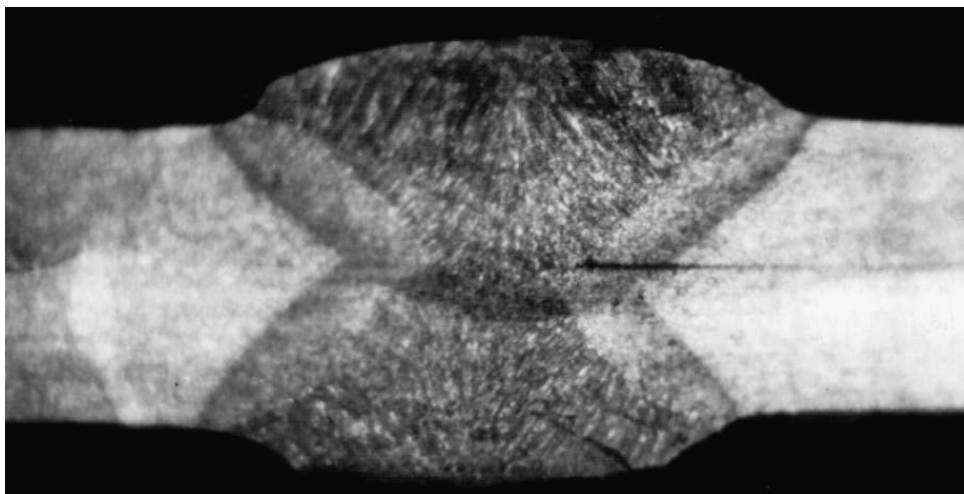
Din analiza acestor date se desprind următoarele observații:

a. creșterea curentului de sudare de la Is=700 A la Is=800 A, provoacă o mărire a adâncimii de pătrundere de la 4,8 mm la 6,5 mm;

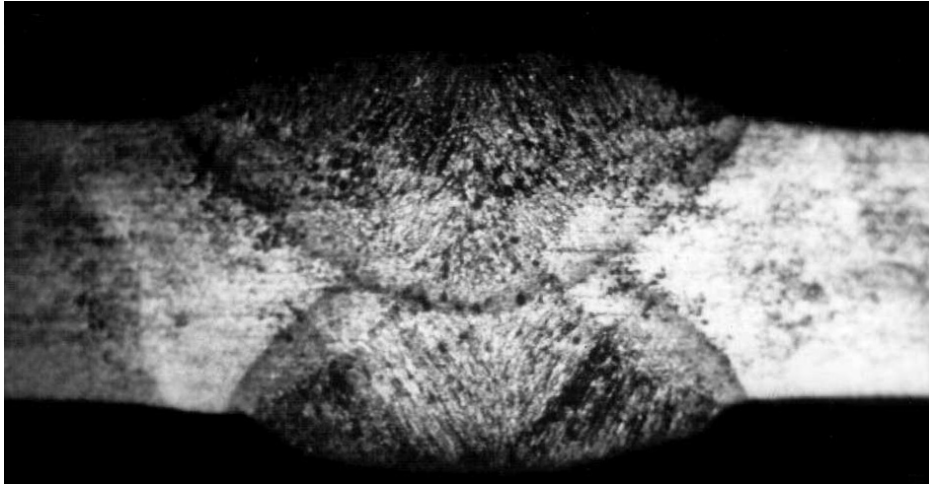
b. creșterea tensiunii arcului de la Ua=31,5 V la Ua=34,5 V, are ca urmare o micșorare a pătrunderii de la 6,1 mm la 5,5 mm (având o pătrundere maximă la o tensiune a arcului Ua=33,5 V de aproximativ 6,5 mm), cât și o creștere a lățimii îmbinării de la 15,5 mm la 17,5 mm;

c. creșterea vitezei de sudare de la $v_s = 80$ cm/min la $v_s = 140$ cm/min provoacă o scădere a pătrunderii de la 7,5 mm la 4,9 mm, cât și o scădere semnificativă a supraînălțării de la 2,5 mm la 1,7 mm.

În figurile 2.13. și 2,14, se exemplifică aspectele macrografice ale îmbinărilor sudate cap la cap, respectiv în colț.



- a -

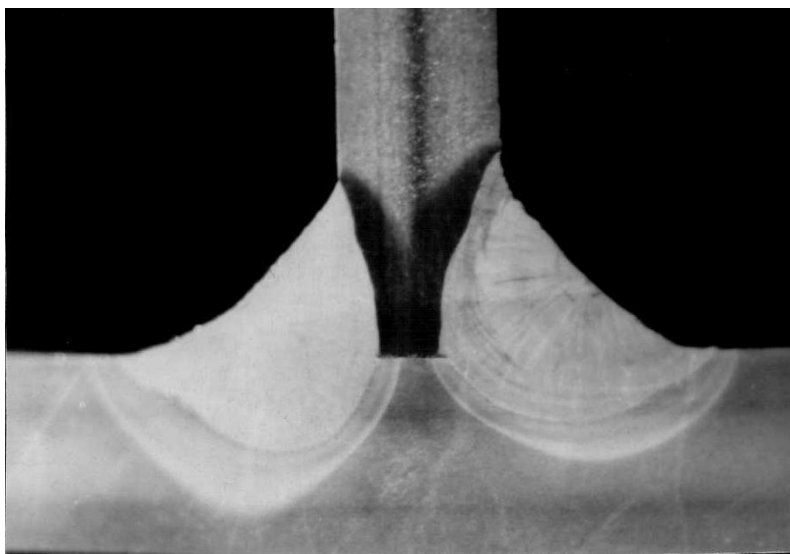


- b -

Figura 2.13. Imaginea macrografică a îmbinărilor cap la cap, rostul I, deschidere zero, $s=10,5$ mm



- a -



- b -

Figura 2.14. Imaginea macrografică a îmbinărilor în colț: talpa $s=10$ mm, inima $s=8$ mm, poziția: jgheab, 45° , simetric, rost **I**, deschidere zero.

Se constată absența defectelor de continuitate metalică de tipul porozităților, suflurilor, fisurilor, etc., precum și un aspect corespunzător al geometriei sudurilor executate.

Parametrii optimi ai procesului de sudare TWIN-ARC determinați prin experiment la realizarea celor două tipuri de îmbinări sudate sunt centralizați în tabelele 2.11. și 2.12.

Tabelul 2.11. Valorile parametrilor de proces pentru sudurile cap la cap.

| Nr. probei | Suduri cap la cap, rost I, deschidere zero, $s=10,5$ mm | | | | | | Pătrundere | Obs. |
|-----------------|---|------------|-----------|--------------|----------------|---------------|--|------|
| | I_s [A] | | U_a [V] | | V_s [cm/min] | L_{cl} [mm] | | |
| | Reglat | Real | Reglat | Real | | | | |
| 1/ trecere 1 | 700 | 702 712 | 34,5 | 34,2 34,8 | 100 | 22 | Suduri decalate | |
| 1/ trecere 2 | 800 | 798 806 | 35 | 34,9 35,2 | 100 | 22 | | |
| 2/ trecere 1 | 725 | 723 729 | 34 | 33,7 34,2 | 100 | 18 | | |
| 2/ trecere 2 | 800 | 797 805 | 34,5 | 34,3 34,7 | 100 | 18 | | |
| 3/ trecere 1 | 750 | 749 752 | 33 | 32,9 33,2 | 100 | | | |
| 3/ trecere 2 | 800 | 801 807 | 33,5 | 33,4 33,7 | 100 | | | |
| 4/ trecere 1 | 750 | 748 753 | 33 | 32,9 33,2 | 100 | 20 | Suduri în sens invers sudură simetrică | |
| 4/ trecere 2 | 800 | 798 803 | 33,5 | 33,3 33,7 | 100 | 20 | | |

Tabelul 2.12. Valorile parametrilor de proces pentru sudurile de colț

| Nr. probei | Is [A] | | Ua [V] | | Vs [cm/min] | L _{cl} [mm] | Pătrundere | Obs. |
|-----------------|--------|------|--------|------|-------------|----------------------|------------|--------------------------|
| | Reglat | Real | Reglat | Real | | | | |
| 5/ trecere 1 | 800 | 798 | 35,5 | 35,3 | 100 | 22 | 50% | Fisură în crater concavă |
| | | 803 | | 35,7 | | | | |
| 5/ trecere 2 | 800 | 798 | 35,5 | 35,3 | 100 | 22 | 50% | Fără fisură concavă |
| | | 804 | | 35,8 | | | | |
| 6/ trecere 1 | 800 | 803 | 35,5 | 35,3 | 100 | 22 | 90% | Fisură în crater concavă |
| | | 807 | | 35,9 | | | | |
| 6/ trecere 2 | 800 | 803 | 35,5 | 35,4 | 100 | 22 | 90% | Fără fisură concavă |
| | | 807 | | 35,9 | | | | |

2.22. RATA DE DEPUNERE ȘI APRECIEREA PRODUCTIVITĂȚII

În graficul din figura 2.15. se arată rata de depunere la sudarea sub strat de flux TWIN-ARC comparativ cu sudarea sub strat de flux cu o sârmă.

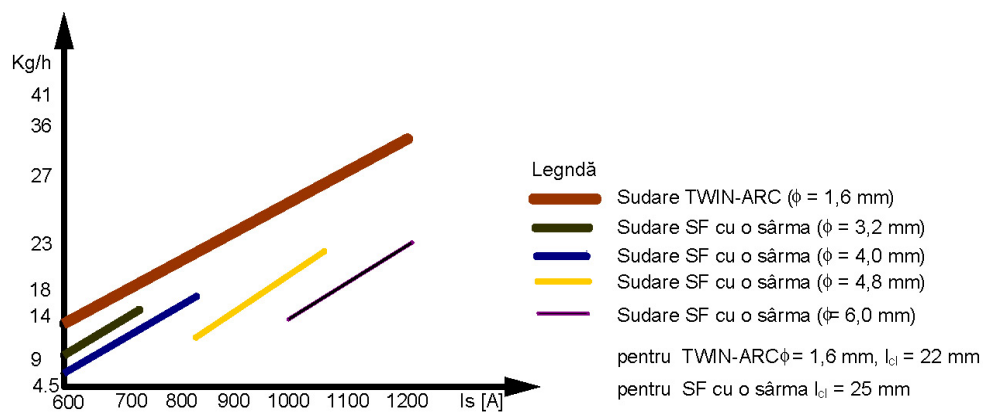


Figura 2.15. Rata depunerii în CC+ a sudării sub strat de flux TWIN-ARC comparativ cu sudarea sub strat de flux cu o sârmă

2.22.1. Rata de depunere determinată experimental

În tabelele 2.13. și 2.14. se prezintă rata de depunere determinată experimental pentru valorile parametrilor stabiliți pentru sârma electrod cu diametrul de 1,6 mm și rata de depunere prescrisă.

Tabelul 2.13. Valorile ratei de depunere pentru $I_s=800$ A

| I_s [A] | U_a [V] | v_s [cm/min] | l_{cl} [mm] | Rata de depunere determinată experimental | Rata de depunere prescrisă |
|--------------|--------------|-------------------|------------------|---|-------------------------------|
| 800 | 33,5 | 80 | 20 | 11,492 kg/h (83g/26s) | 10,9 kg/h |

Tabelul 2.14. Valorile ratei de depunere pentru $I_s=750$ A

| I_s [A] | U_a [V] | v_s [cm/min] | l_{cl} [mm] | Rata de depunere determinată experimental | Rata de depunere prescrisă |
|--------------|--------------|-------------------|------------------|---|-------------------------------|
| 750 | 33 | 80 | 20 | 11,492 kg/h (83g/26s) | 9,88 kg/h |

2.22.2. Aprecierea productivității

Pentru aprecierea productivității s-a făcut o comparație între sudurile realizate prin procedeul de sudare sub strat de flux TWIN-ARC și cele realizate prin procedeul de sudare sub strat de flux cu o sârmă. Valorile obținute sunt redată în tabelele 2.15. și 2.16.

Tabelul 2.15. Analiza comparativă a sudurilor cap la cap

| Sudarea sub strat de flux cu o sârmă, cap la cap, rost I, deschidere zero, diametrul sârmei $\varnothing=4,8$ mm, $s=11$ mm | | Sudarea sub strat de flux TWIN-ARC, cap la cap, rost I, deschidere zero, diametrul sârmei $\varnothing=1,6$ mm, $s=10,5$ mm, CC+ | |
|---|------------------|--|------------------|
| Trecere I | $I_s=700$ A | trecere I | $I_s=750$ A |
| | $U_a=34$ V | | $U_a=33$ V |
| | $v_s=100$ cm/min | | $v_s=100$ cm/min |
| Trecere II | $I_s=825$ A | trecere II | $I_s=800$ A |
| | $U_a=33,5$ V | | $U_a=33$ V |
| | $v_s=100$ cm/min | | $v_s=100$ cm/min |

Tabelul 2.16. Analiza comparativă a sudurilor de colț

| Sudură de colț, în jgheab la 45°, sub strat de flux cu o sârmă, rost I, deschidere zero, diametrul sârmei $\varnothing=4,8$ mm | | Sudură de colț, în jgheab la 45°, sub strat de flux TWIN-ARC, rost I, deschidere zero, diametrul sârmei $\varnothing=1,6$ mm | |
|--|---------------------|--|--------------------|
| Proba I, s=15,8 mm Proba II, s=12,5 mm CC+ | | Proba I, s=10+8 mm Proba II, s=10+8 mm CC+ | |
| Proba I Trecere I,II | z=7,9 mm | Proba I Trecere I,II | z=8,5 mm |
| | Is=775 A | | Is=800 A |
| | Ua=34 A | | Ua=35,5 A |
| | $v_s = 58,4$ cm/min | | $v_s = 80$ cm/min |
| Proba II Trecere I,II | z=6,35 mm | Proba II Trecere I,II | z=7 mm |
| | Is=675 A | | Is=800 A |
| | Ua=31 A | | Ua=35,5 A |
| | $v_s = 76,2$ cm/min | | $v_s = 100$ cm/min |

Din analiza datelor prezentate în tabelul 2.16. rezultă o creștere a productivității de aproximativ 36% la primul grup de probe, iar la cel de-al doilea grup apare o mărire a productivității de aproximativ 31%. Rezultă deci că utilizarea procedeului de sudare sub strat de flux TWIN-ARC este mai avantajos decât utilizarea procedeului de sudare sub strat de flux cu o sârmă

2.23. CONCLUZII

1. Imaginile macrografice ale depunerilor realizate pe table cu grosimea de 20 mm din oțel slab aliat cu mangan, OL52.3k, în condițiile selecției fluxului Lincolnweld 780 și a sârmelor Lincoln L-61, $\varnothing=1,6$ mm au reliefat următoarele:

1.1. creșterea curentului de sudare de la 700 A la 800 A provoacă o mărire a adâncimii de pătrundere de la 4,8 mm la 6,5 mm;

1.2. mărire tensiunii arcului de la 31,5 V la 34,5 V conduce la o micșorarea a pătrunderii de la 6,1 mm la 5,5 mm și la o mărire a lățimii îmbinării de la 15,5 mm la 17,5 mm;

1.3. modificarea vitezei de sudare de la 80 cm/min la 140 cm/min se manifestă printr-o scădere a pătrunderii de la 7,5 mm la 4,9 mm și o reducere a supraînălțării de la 2,5 mm la 1,7 mm.

2. Analiza macrografică a îmbinărilor cap la cap și în colț realizate la valorile optime ale parametrilor de proces, pune în evidență o geometrie corespunzătoare a sudurilor precum și lipsa defectelor de continuitate de tipul fisurilor, porozităților și suflurilor.

3. Valoarea ratei de depunere determinată experimental în condițiile unui

regim optim de sudare este de 11,49 kg/h.

4. Comparativ cu sudarea sub strat de flux cu o sârmă, la realizarea sudurilor cap la cap cu două sârme TWIN-ARC se obține o creștere a productivității cu circa 36%, iar la sudurile în colț cu circa 31%.

3. OPTIMIZAREA MICROSTRUCTURII ȘI A PROPRIETĂȚILOR MECANICE ALE ÎMBINĂRILOR SUDATE SUB STRAT DE FLUX CU DOUĂ SÂRME TWIN-ARC

3.1. INTRODUCERE

Principalii factori care influențează caracteristicile mecanice și structurale ale metalelor depuse prin procedeul de sudare sub strat de flux sunt:

- compoziția chimică a materialului de bază;
- selecția judicioasă a cuplului flux-sârmă;
- numărul de treceri realizate;
- parametrii regimului termic de sudare;
- cantitatea și distribuția incluziunilor nemetalice.

3.2. INFLUENȚA PROCESULUI DE TOPIRE ȘI A COMBINAȚIEI SÂRMĂ-FLUX

La sudarea într-o singură trecere, compoziția chimică a metalului depus este determinată în principal de participarea metalului de bază la formarea băii topite, care se ridică la circa 2/3. Combinația flux-sârmă trebuie să asigure de fiecare dată o creștere a conținutului în mangan, element care leagă sulfurul sub formă de sulfură de mangan, MnS, împiedicând fisurarea la cald a îmbinării sudate [6]. Totodată, un conținut în mangan de până la aproximativ 1,7 % acționează pozitiv asupra

tenacității metalului depus cu toate că datorită unei viteze de răcire relativ mici, la sudarea într-o singură trecere se formează o microstructură bainitică cu granulație fină. Esențial pentru proprietățile metalului depus este și raportul Mn/Si care trebuie să fie mai mare decât 2:1 pentru a se asigura evitarea fenomenelor de fisurare și valori ridicate ale tenacității [18]. Soluția unor fluxuri bazice sau a fluxurilor ceramice cu adaosuri de dezoxidare acționează favorabil asupra cantității și distribuției incluziunilor nemetalice contribuind astfel la obținerea unor caracteristici ridicate de tenacitate.

La sudarea în mai multe treceri, pe măsura creșterii numărului acestora se micșorează influența pe care o are materialul de bază asupra proprietăților îmbinării sudate. În mod practic, după cel de-al patrulea strat depus această influență devine neglijabilă. În consecință, compoziția chimică și proprietățile îmbinării sudate depind aproape în exclusivitate de combinația flux-sârmă și de parametrii de proces. La sudarea multistrat, reacțiile declanșate la nivelul fluxului capătă o importanță mai mare comparativ cu sudarea într-o singură trecere, fapt care face ca și concentrația în mangan să atingă rapid valoarea specifică de echilibru a cuplului flux-sârmă selectat.

3.3. EFECTUL STĂRII STRUCTURALE

Alături de compoziția chimică, proprietățile cusăturilor sudate sunt determinate de starea microstructurală a acestora. La metalele depuse, netratate termic, microstructura depinde de condițiile în care se produce răcirea, acestea fiind la rândul lor definite de geometria rostului, de parametrii de proces și de grosimea și temperatura componentelor.

În general, este de dorit ca solidificarea băii de sudură să se facă într-un timp scurt, deoarece pe măsura creșterii vitezei de răcire, respectiv a măririi gradului de subrăcire are loc o reducere a razei critice a germenilor, o mărire a numărului acestora și deci o finisare a granulației și microstructurii de cristalizare primară. Ca urmare, se produce o distribuție mai fină a incluziunilor nemetalice menținute în baie și o suprimare a segregățiilor mari.

Răcirea cu viteze mari a cusăturilor sudate poate avea urmări favorabile și asupra proceselor de cristalizare secundară, în sensul că până la anumite valori ale gradului de subrăcire, microstructura rezultată va fi mai fină iar caracteristicile de rezistență mecanică și de tenacitate vor fi mai ridicate.

Este firesc ca la depășirea vitezei critice de călire, caracteristică metalului depus rezultat, să apară o microstructură nefavorabilă din punctul de vedere al caracteristicilor de plasticitate și a stării de tensiuni remanente. De aceea, se impune ca la fiecare construcție sudată să fie stabilite condițiile optime de răcire care să nu afecteze rezistența față de ruperea fragilă.

Sudurile realizate într-o singură trecere din oțeluri nealiate vor prezenta o microstructură ferito-perlitică în condițiile folosirii unor sârme obișnuite slab aliate cu mangan și a unor viteze mai mici de sudare. La o susținere mare a metalului depus se obține de regulă o microstructură grosolană. Întrucât spre mijlocul cusăturii apar cele mai mari segregatii, rezistența la rupere a zonei centrale este întotdeauna mai ridicată. Asemenea îmbinări sudate cu gradient ridicat de rezistență mecanică și la care cusăturile sudate nu au mai suferit prelucrări prin așchiere prezintă bune caracteristici de rezistență la solicitări alternante. Principalul dezavantaj al acestora este legat de valorile scăzute ale tenacității în mijlocul cusăturilor sudate.

Prezența structurii dendritice grosolane, obișnuite în metalul depus într-o singură trecere, se manifestă pregnant deoarece ea provine în principal din metalul de bază, care în mod frecvent are concentrații mai înalte de fosfor și sulf și deci este mai sensibilă la segregatii. Prin reducerea secțiunii transversale a cusăturii și printr-o participare mai mare a materialului de adaos la formarea băii topite se poate optimiza microstructura și proprietățile mecanice ale îmbinărilor sudate.

Procesul de sudare în mai multe treceri se manifestă printr-o finisare a structurii dendritice de turnare din metalul depus și, parțial, chiar a structurii din subzona de supraîncălzire a zonei influențate termic. La fiecare depunere de strat se provoacă o încălzire peste punctul critic Ac3 a unei părți importante din stratul depus anterior și în urma răcirii în aer se va forma o structură de normalizare. O altă porțiune de material va fi încălzită la temperaturi cuprinse între Ac1 și Ac3 iar ca urmare, ea nu va suferi o recristalizare fazică totală și deci finisarea granulației și structurii va fi doar parțială. Cu cât grosimea straturilor depuse este mai mică, cu atât porțiunile de material recristalizat vor fi mai mari. În consecință, prin alegerea corectă a parametrilor care definesc grosimea depunerii și prin reglarea temperaturii

între două treceri succesive, se pot atinge valori favorabile ale caracteristicilor de tenacitate la îmbinările sudate multistrat.

Este de așteptat ca la sudarea cu mai multe sârme-electrod să se obțină o îmbunătățire a calității îmbinărilor sudate comparativ cu sudarea într-o singură trecere, îndeosebi din următoarele puncte de vedere:

a. prin selecția judicioasă a parametrilor de proces în cazul sudării cu mai multe sârme, pentru un factor de formă a cusăturii (lățime:pătrundere) egal cu 1 și mai mic decât 1 va apare o altă orientare în creșterea dimensională a grăunților cristalini [20]. Astfel, la sudarea cu o singură sârmă evoluția grăunților se face în direcție orizontală către mijlocul cusăturii, dând naștere unor zone cu segregării importante; în cazul sudării cu mai multe sârme grăunții cristalini se dezvoltă perpendicular față de linia de fuziune spre mijlocul cusăturii în sus, către suprafața exterioară a acesteia și astfel zonele de segregării vor putea fi evitate;

b. întrucât acest proces permite atingerea unor viteze mari de sudare, valorile energiei liniare introduse în piesă se vor micșora. Scăderea energiei liniare conduce la o microstructură mai fină realizată în urma cristalizării primare a metalului depus și la o creștere mai puțin intensă a granulației în subzona de supraîncălzire adiacentă acestuia cu consecințe favorabile asupra îmbunătățirii caracteristicilor de tenacitate.

3.4. PARTICULARITĂȚILE PROCESULUI TEHNOLOGIC DE SUDARE SUB STRAT DE FLUX CU MAI MULTE SÂRME

Procesul de sudare sub strat de flux (S.F.), asigură obținerea unor îmbinări sudate de calitate în condiții de economicitate, fiind aplicat în construcția recipientelor, a structurilor portante din oțel, construcția de autovehicule, de țevi și platforme marine. Urmare a gradului înalt de mecanizare și a randamentului ridicat, el s-a dezvoltat într-o multitudine de variante care să conducă la creșterea productivității [28].

Deoarece cantitatea de metal depus pe unitatea de timp (rata depunerii)

crește aproape liniar cu valoarea curentului de sudare, într-o primă etapă s-a încercat obținerea de randamente mai mari tocmai prin mărirea curentului de sudare. Prin această metodă (cu o sârmă) au putut fi sudate (în două treceri), cu mult timp în urmă, table cu grosimea de 80 mm. Cerințele de calitate, îndeosebi cele referitoare la tenacitatea materialului depus fac imposibilă utilizarea în momentul actual a unor asemenea tehnici de sudare. De aceea, în ultimul timp au apărut alte modalități de creștere a productivității bazate pe topirea simultană a mai multor sârme. Printre acestea, cele mai interesante pentru a fi dezvoltate par a fi următoarele:

- sudarea cu două sârme TWIN-ARC;
- sudare sub strat de flux cu adaos de sârmă caldă;
- sudarea cu două sârme în TANDEM;
- sudarea cu trei, patru sau mai multe sârme.

În figura 3.1. sunt redată valorile ratelor de depunere și ale curenților de sudare necesari pentru diferite variante de proces [15].

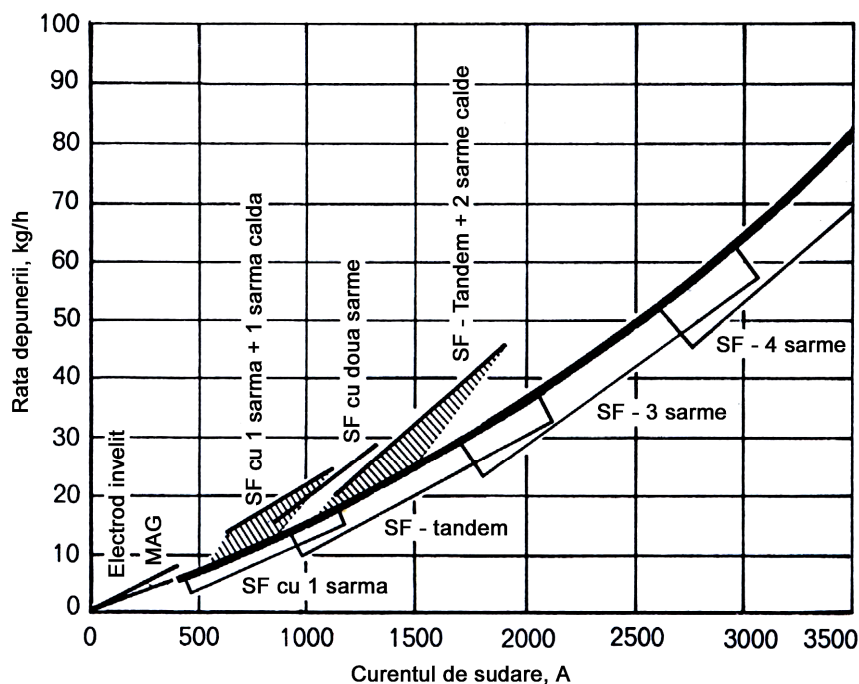


Figura 3.1. Ratele depunerilor și curenții de sudare la unele variante de sudare sub strat de flux

Conducerea procesului de sudare sub strat de flux cu două sârme este asemănătoare celei a procesului cu o singură sârmă din care în mod practic s-a dezvoltat. Cele două sârme sunt așezate paralel (la circa 10 mm distanță) și sunt conduse în baia de sudură prin intermediul aceluiași sistem de avans. Sursa de putere este comună iar operația propriu-zisă se realizează în curent continuu cu polaritate inversă.

Efectele previzibile și modalitățile de exploatare favorabilă ale acestora sunt:

a. la aceeași secțiune transversală a cusăturii sudate, pătrunderea obținută va fi mai redusă. Partea de metal de bază care participă la formarea metalului depus va fi mai mică decât la sudarea cu o singură sârmă. Aceste două particularități prezintă avantaj îndeosebi la încărcarea prin sudare a unor metale de bază cu conținut ridicat în carbon folosind o sârmă înalt aliată. De aceea, acest procedeu se utilizează, de exemplu, la sudarea șinelor și la încărcarea prin sudare a valțurilor. Gradul de diluție poate atinge valori de 50 %;

b. repartizarea arcului electric pe două sârme forțează o descărcare a acestuia pe lățime și astfel se micșorează curentul de sudare, respectiv activitatea electrică a fluxului de sudare va crește. Acest procedeu se pretează la realizarea sudurilor de umplere, beneficiind de o valoare ridicată a ratei de depunere;

c. prin divizarea electrodului în două sârme are loc o distorsiune a câmpului magnetic inelar din jurul sârmei. Această distorsiune va mai crește până la un anumit grad prin depărtarea sârmelor una față de cealaltă;

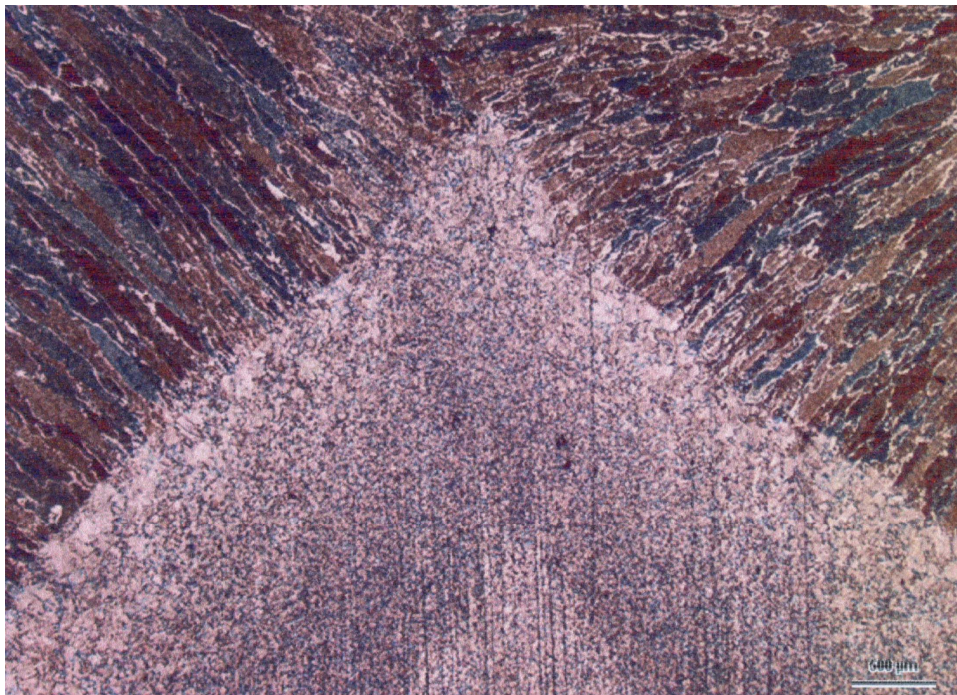
d. dacă cele două sârme vor fi așezate una în spatele celeilalte, se va produce o micșorare a sensibilității la formarea porozităților cauzate de umiditate și murdărie.

3.5. MORFOLOGIA TRANSFORMĂRILOR STRUCTURALE ÎN ÎMBINĂRILE SUDATE CU DOUĂ SÂRME TWIN-ARC

Odată determinate valorile parametrilor TWIN-ARC pentru îmbinări cap la cap și în colț executate din oțel OL52.3k (S 355J2 G3) sub formă de table cu grosimea de 18 mm s-a trecut la analiza macro- și micrografică a acestora. În vederea cercetării au fost prelevate probe cu fețe transversale, adică secționate

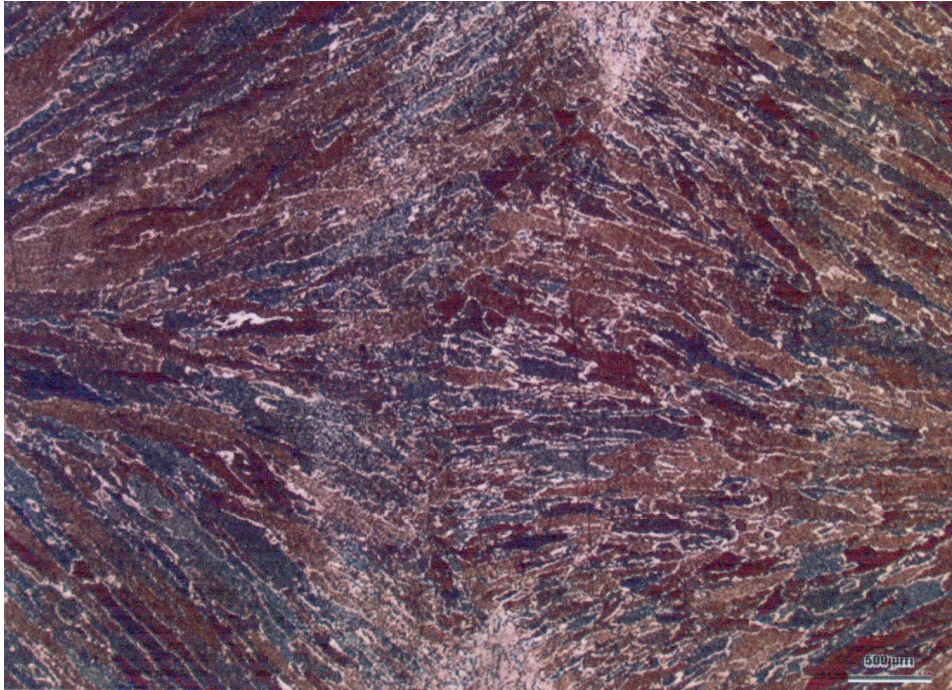
perpendicular pe axa longitudinală a sudurii, deoarece acestea permit obținerea de informații privind forma cusăturii, dimensiunile pătrunderii, extinderea zonei influențate termic, zonele de segregare și eventualele defecte de sudare care apar pe direcția lungimii. A urmat operația de șlefuire sub jet de apă utilizând o mașină specializată, după care s-a efectuat o finisare cu pastă de diamant. În final, probele au fost atacate cu reactivul chimic NITAL 3 % și examinate la microscopul optic în lumină reflectată.

Rezultatele investigației domeniilor structurale prezente în metalul depus și în zona influențată termic a materialului de bază sunt prezentate în figurile 3.2.÷3.14.



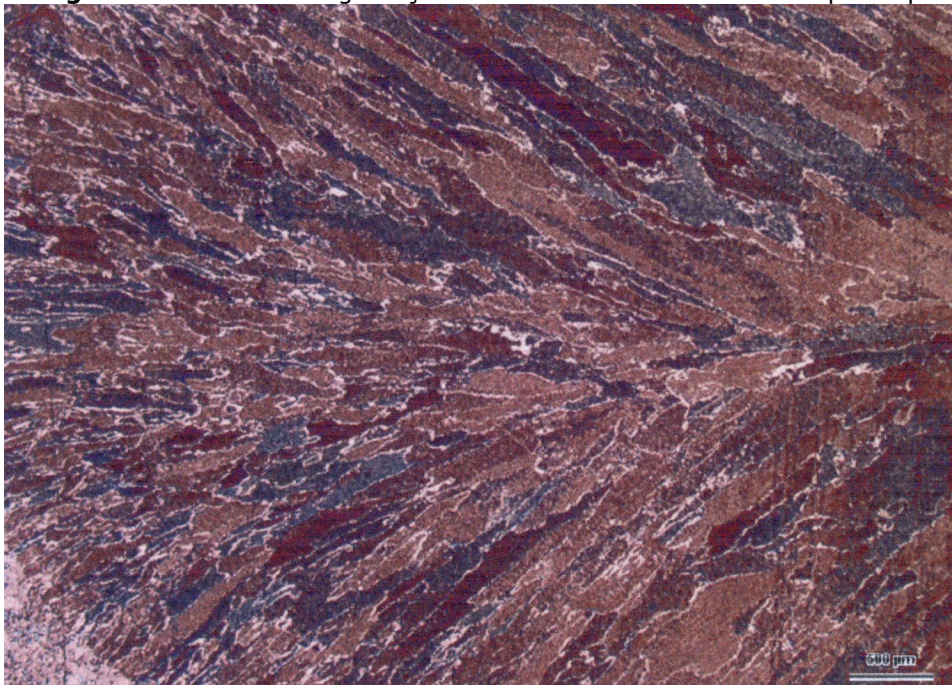
M.D. - Z.I.T. 50X

Figura 3.2. Imaginea macrografică a interfeței M.D.-Z.I.T. la îmbinarea sudată cap la cap



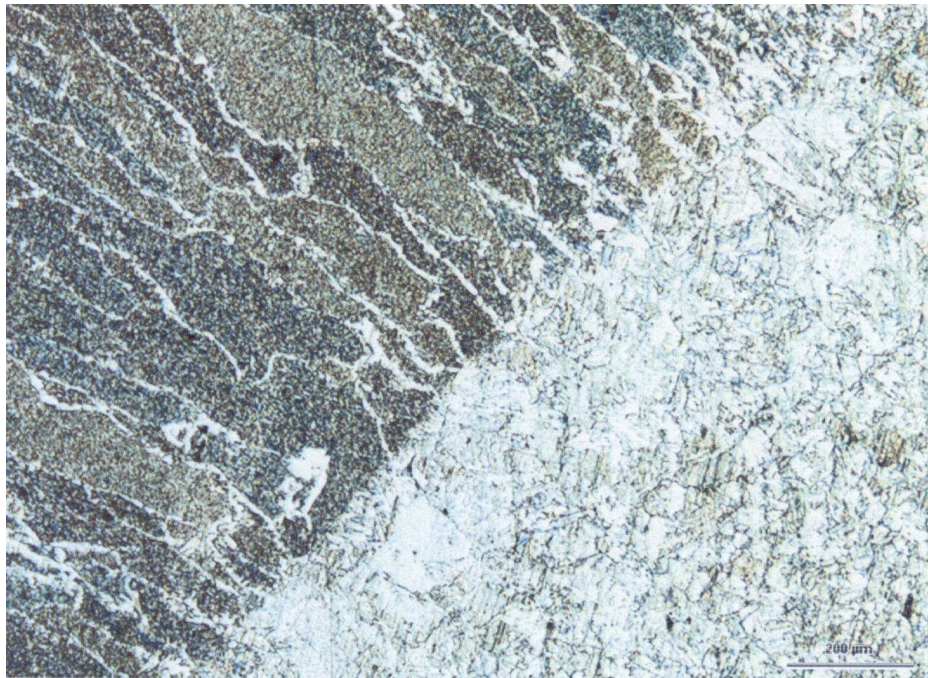
M.D. 50X

Figura 3.3. Arhitectura grăunților în zona centrală a îmbinării cap la cap



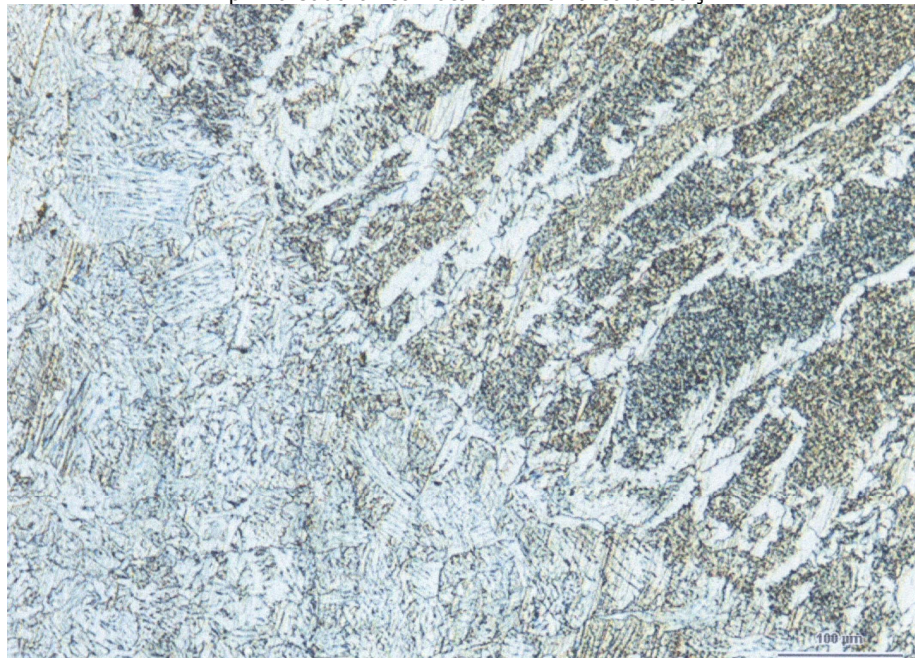
M.D. 50X

Figura 3.4. Orientarea grăunților de metal deșus la îmbinarea sudată în colț



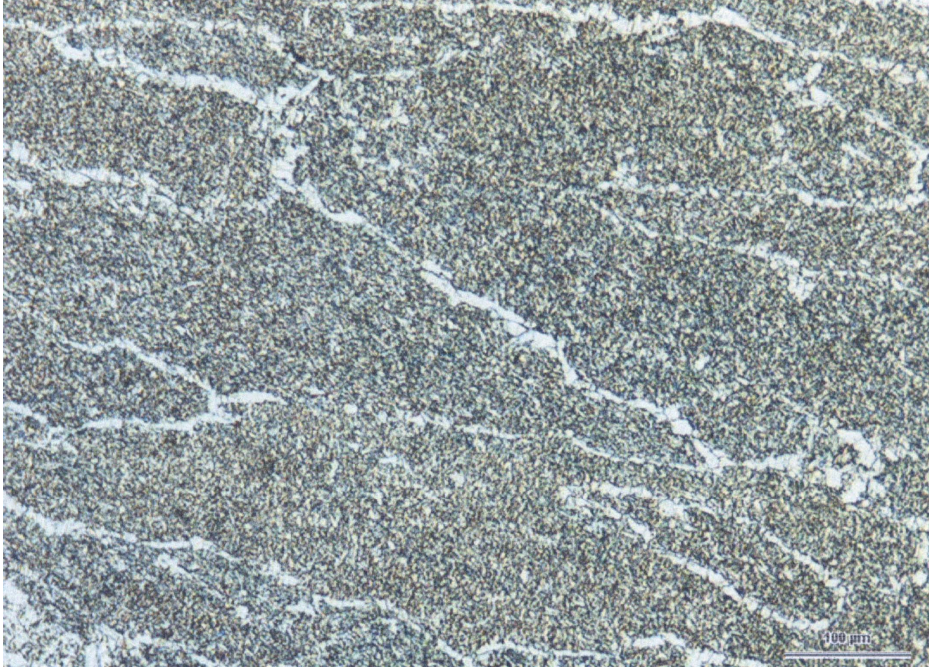
M.D. – Z.I.T. 400X

Figura 3.5. Imaginea micrografică a interfeței M.D.-Z.I.T. la prima sudură realizată din îmbinarea de colț



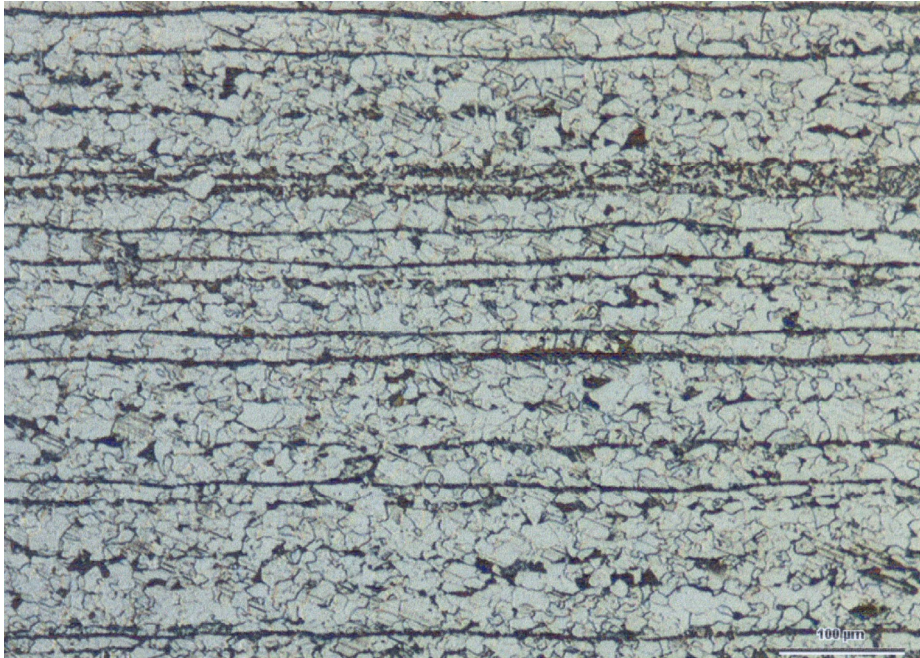
M.D. – Z.I.T. 400X

Figura 3.6. Imaginea micrografică a interfeței M.D.-Z.I.T. la cea de-a doua sudură realizată din îmbinarea de colț



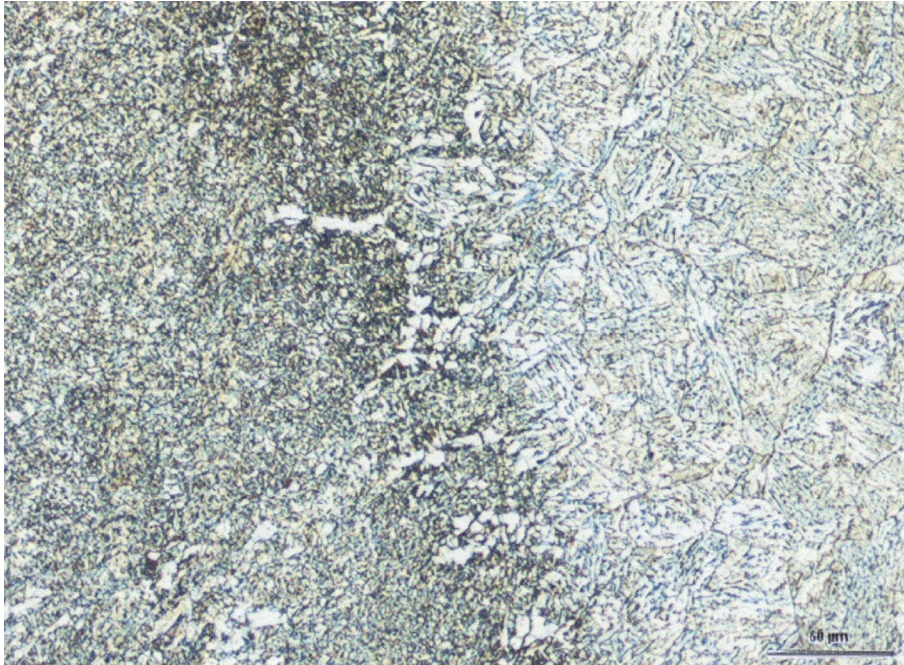
M.D. 400X

Figura 3.7. Imaginea micrografică a metalului depus, M.D., la îmbinarea sudată de colț



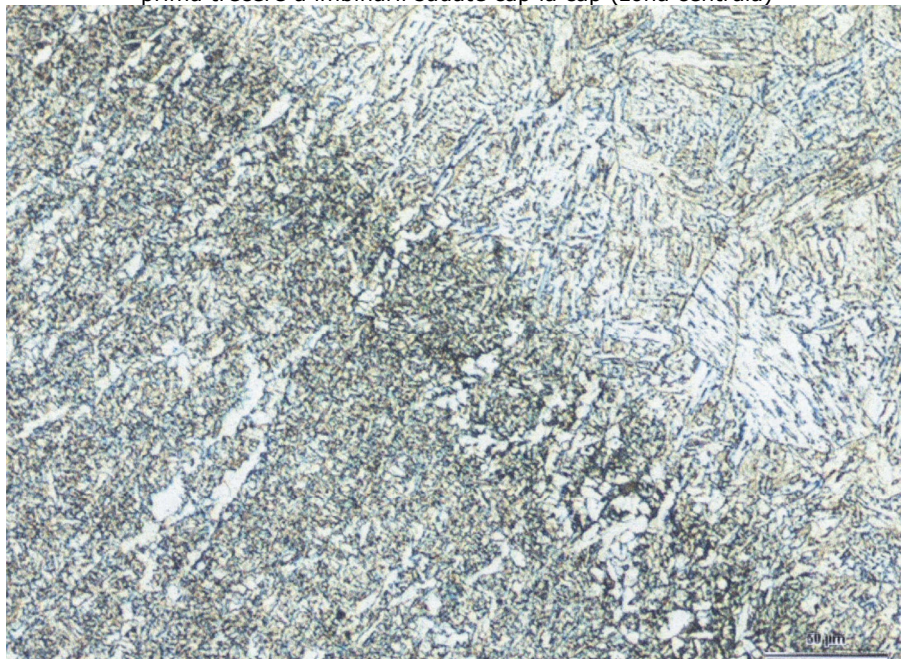
M.B. 400X

Figura 3.8. Imaginea micrografică a metalului de bază, M.B., la îmbinarea sudată în colț



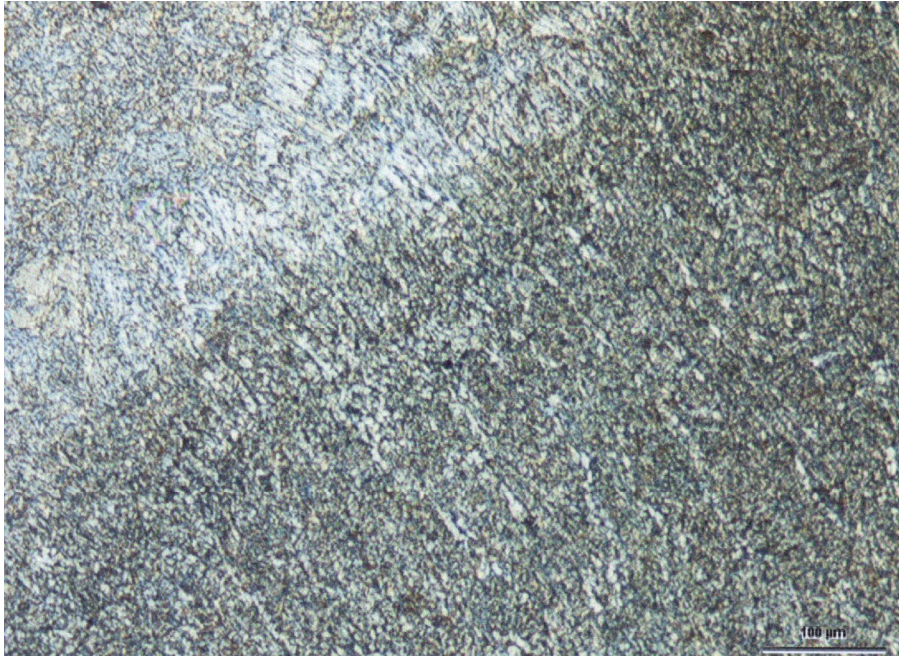
M.D. – Z.I.T. 800X

Figura 3.9. Imaginea micrografică a interfeței M.D.-Z.I.T. la prima trecere a îmbinării sudate cap la cap (zona centrală)



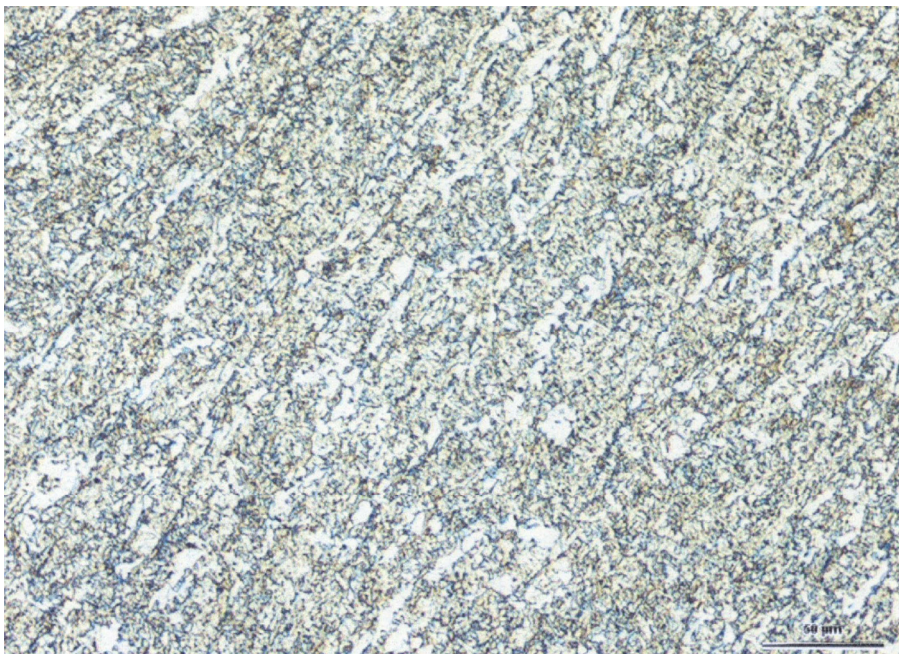
M.D. – Z.I.T. 800X

Figura 3.10. Imaginea micrografică a interfeței M.D.-Z.I.T. la a doua trecere a îmbinării sudate cap la cap (zona centrală)



M.D. – Z.I.T. 400X

Figura 3.11. Imaginea micrografică a interfeței M.D.-Z.I.T. la îmbinarea sudată cap la cap (zona exterioară)



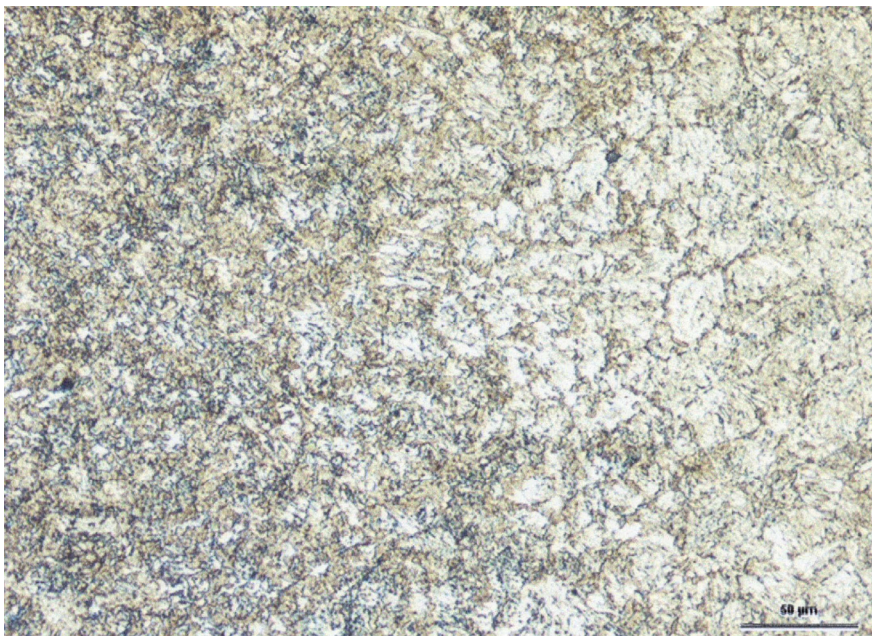
M.D. 800X

Figura 3.12. Imaginea micrografică a M.D. la îmbinarea cap la cap



Z.I.T. 500X

Figura 3.13. Imaginea micrografică a Z.I.T. la îmbinarea sudată cap la cap (zona exterioară)



Z.I.T. 800X

Figura 3.14. Imaginea micrografică a Z.I.T. la îmbinarea sudată cap la cap (zona centrală)

Procesul de solidificare a băii de metal topit se derulează din aproape în aproape și este reglat de valoarea vitezei de sudare. Pe suprafața lichid-solid există un gradient puternic de temperatură care favorizează amorsarea solidificării. Așa cum reiese din figurile 3.2. ÷ 3.6 creșterea grăunților este epitaxială, adică împachetarea atomilor se orientează de-a lungul vechilor grăunți din metalul de bază care se prelungesc în structura de solidificare, traversând zona de trecere în care viteza de solidificare este foarte scăzută și fenomenul de segregare este puțin pronunțat. Datorită acestui fapt, în realitate zona de trecere nu există din punctul de vedere al orientării cristaline, ea marcând doar limita exterioară a parcursului zonei topite.

O consecință importantă a epitaxiei rezidă în faptul că dimensiunile grăunților de solidificare sunt determinate de cele ale grăunților metalului de bază.

Odată cu mărirea vitezei de solidificare, vor fi îndeplinite condițiile unei creșteri dendritice, iar drept consecință va apare o competitivitate în creștere (figura 3.4, 3.5, 3.6). Caracterul orientat al dezvoltării dendritice împiedică grăunții să se curbeze pentru a se plasa perpendicular pe izotermă.

Imaginile macrografice din figurile 3.3. și 3.4. arată că în partea centrală a sudurii către care converg grăunții de solidificare și deci unde tendința către fenomenele de segregare la scara dendritelor este maximă, nu se semnalează defecte de continuitate metalică de tipul fisurilor transversale sau longitudinale față de axa îmbinării, a porilor și incluziunilor continue de zgură.

În conformitate cu legile solidificării, pornind de la zona de legătură metal depus – metal de bază unde se determină orientarea cristalină a fiecărui grăunte, cristalizarea primară progresează în funcție de avansul băii de topire, grăunții tinzând să se dezvolte de-a lungul traiectoriilor ortogonale ale izotermelor.

Pentru pozițiile succesive ale suprafeței izotermei care limitează sfârșitul băii de topire, se va putea defini o traiectorie de solidificare ce se amorsează pe linia de legătură metal depus – metal de bază și se curbează în sensul deplasării băii de topire până se reunește cu axa sudurii.

Trebuie să mai avem în vedere faptul că viteza de solidificare a metalului topit este variabilă de-a lungul acestei traiectorii, între o valoare foarte scăzută sau nulă în zona de pornire, până la o valoare maximă în axa sudurii, unde ea devine egală cu viteza de sudare. Întrucât solidificarea tinde să progreseze perpendicular pe izoterme, viteza acestui proces va fi determinată în fiecare punct de proiecția vectorului vitezei de sudare pe normala izotermei.

Alături de această variație continuă a vitezei de solidificare datorată formei și avansului băii de topire, imaginile micrografice din figurile 3.5.÷3.7., caracteristice sudurilor în colț, respectiv din figurile 3.9.÷3.12., specifice sudurilor cap la cap, permit evidențierea variațiilor periodice, sau pseudo-periodice asociate sursei de căldură (înțelegând aici periodicitatea curentului de alimentare), modului de transfer al materialului de adaos și avansului neregulat al băii de topire, respectiv subrăcirii din fața frontului de solidificare. Aceste variații se manifestă prin caracterul bazaltic al microstructurii ferito-perlitice formată în urma cristalizării primare și secundare a băii de sudură.

Din aceleași imagini micrografice se poate remarca o creștere selectivă a grăunților, în sensul că anumiți grăunți de ferită s-au dezvoltat în detrimentul altora. Explicația are la bază faptul că cristalele de solidificare sunt caracterizate de o direcție privilegiată de creștere [15], după care viteza de creștere este maximă. Rezultă că grăunții a căror direcție privilegiată de creștere coincide cu traiectoria de solidificare vor prezenta o dezvoltare favorabilă comparativ cu grăunții vecini ale căror șanse de dezvoltare sunt mai scăzute datorită orientării lor diferite. Această creștere, denumită selectivă, se traduce prin dispariția grăunților cu orientare mai puțin favorabilă și deci printr-o scădere a numărului de grăunți, respectiv o creștere a diametrului acestora comparativ cu dimensiunile lor inițiale.

Procesele care se desfășoară la încălzire în zona influențată termic a materialului de bază sunt determinate de viteza de încălzire, de temperatura maximă atinsă și de durata de menținere deasupra punctelor critice Ac3 și Ac1.

Înainte de sudare, materialul de bază este constituit dintr-o matrice feritică și din mici cantități de perlită dispusă în șiruri (figura 3.8.) ca urmare a prelucrării tehnologice anterioare prin operația de laminare la cald. Prin aplicarea șocului termic specific operației de sudare, în succesiunea de creștere a temperaturii se produc următoarele transformări:

- de la atingerea pragului termic de recristalizare, T_r , se amorsează procesul de formare a grăunților fini, echiaxiali de ferită care înlocuiesc structura fibroasă a materialului deformat;
- de la temperatura Ac1 începe să apară structura austenitică prin dizolvarea cementitei din insulele de perlită;
- creșterea cantității de austenită între Ac1 și Ac3 și desăvârșirea procesului de austenitizare la depășirea punctului critic Ac3;

- dezvoltarea dimensională a grăunților de austenită ca urmare a supraîncălzirii materialului în porțiunea adiacentă liniei de fuziune; intensitatea acestui fenomen depinde de modul operator de sudare;
- topirea, care reprezintă ultimul stadiu al evoluției temperaturii (între temperatura solidus și temperatura lichidus de pe diagrama de echilibru).

Mai întâi se dezvoltă o fază lichidă pe marginile grăunților aflați la temperatură înaltă și pe măsura creșterii temperaturii proporția acestei faze crește până la obținerea unei stări complet lichide. Dacă ciclul termic de sudare este rapid, omogenizarea prin difuzie a compoziției chimice este incompletă și astfel se provoacă fenomenul de licuație intergranulară, numit și arsură, care este perceptibil după răcire deoarece antrenează o eterogenitate ireversibilă. O astfel de zonă, deși este foarte îngustă, poate provoca fisurarea la cald, coroziunea sau decarburarea zonei de legătură.

Caracterul modificărilor structurale intervenite în diversele porțiuni ale zonei influențate termic diferă în funcție de temperatura de încălzire, de tipul de menținere a austenitei la aceste temperaturi și de viteza de răcire. Astfel, în subzona de supraîncălzire s-a format o structură Widmannstätten (figura 3.9.÷3.11.), care poate afecta caracteristicile de tenacitate ale îmbinării sudate.

Domeniul cu temperaturi situate ușor peste Ac3 (subzona de normalizare) prezintă o granulație fină ca urmare a existenței condițiilor pentru recristalizarea fazică completă, adică specifice tratamentului termic de recoacere pentru normalizare. În această subzonă, microstructura oțelului cercetat este perlito-bainitică (figura 3.13. și 3.14.). Aspectul perlitei este globular, determinat de faptul că s-a format dintr-o austenită neomogenă din punctul de vedere al compoziției chimice. Desigur că aceste transformări intervenite în zona influențată termic conduc la o modificare a proprietăților mecanice în raport cu cele caracteristice metalului de bază. În mod deosebit, vor fi afectate caracteristicile de tenacitate ale îmbinării sudate, care ridică temperatura de tranziție ductil-fragil, respectiv diminuează rezistența la rupere fragilă. De aceea, pentru aplicații la care se impun anumite valori ale rezilienței sau energiei de rupere în subzona de supraîncălzire sau în sudură va fi recomandat un tratament termic ulterior sudurii, care să provoace o regenerare a structurii microscopice.

3.6. FENOMENE DE SEGREGARE LA CRISTALIZAREA BĂII DE METAL TOPIT

Se știe că fenomenele care intervin în timpul operației de sudare sunt extrem de complexe; ele se caracterizează printr-o evoluție asimetrică a proceselor însoțitoare de natură metalurgică și termomecanică.

Compoziția chimică a zonei topite variază în funcție de procedeul utilizat și de regimul tehnologic adoptat. Această evoluție este atât continuă cât și discontinuă.

Cauzele unei evoluții continue sunt:

- procese fizice: volatilizarea manganului, nichelului, cromului, aluminiului, etc;
- reacții între elemente cu formare de gaze în interiorul metalului topit (oxid de carbon efervescent, metan, etc);
- reacții între metalul topit și mediul înconjurător (gazul de protecție, zgura);
- variația regimului termic;
- fluctuația vitezei de solidificare;
- diluția – o anumită proporție din materialul de bază intră în compoziția băii topite. Diluția variază în limite largi în funcție de procedeul de sudare; astfel, participarea materialului de bază la formarea zonei topite este totală la sudarea cu fascicul de electroni și este redusă la sudarea cu arc electric cu electrod învelit.

Cauzele unei evoluții discontinui sunt:

- subrăcirea constituțională, segregația dendritică;
 - poluarea;
 - protecția neregulată a gazelor;
 - umiditatea absorbită de piese, de învelișul electrodului, de sârmă sau prezentă în gazul de protecție;
 - de o manieră generală, orice factor intern sau extern susceptibil de a provoca fluctuația cauzelor unei evoluții continue de compoziție chimică.
- Evoluția discontinuă a compoziției chimice a zonei topite conduce la formarea unei microstructuri de solidificare cu un aspect stratificat mai mult sau mai puțin periodic.

Neregularitățile care apar în creșterea dendritică a grăunților cristalini se manifestă prin striuri care jalonează pozițiile succesive ale interfeței lichid – solid.

Pentru evidențierea cantitativă a segregăției dendritice au fost realizate investigații prin tehnica dispersiei în energie a razelor X (EDX – energy dispersive X – Ray analysis). Asemenea experimentări au fost conduse în mai multe puncte din zona centrală a sudurii. Elementele chimice care au fost luate în considerare la întocmirea imaginilor de repartiție sunt: manganul, siliciul și fierul. Fasciculul de electroni a fost baleiat pe o suprafață de $60 \times 60 \mu\text{m}^2$, fiind detectate liniile Röntgen specifice celor trei elemente și anume: MnK_α , Si K_α și Fe K_α .

În figurile 3.15.÷3.20. se exemplifică câte două spectre de dispersie pentru fiecare tip de îmbinare sudată, care pun în lumină variații importante ale concentrației celor două elemente principale care sunt prezente în compoziția chimică a sudurii. Pe baza datelor experimentale s-a demonstrat că concentrația în mangan variază în limitele $0,71 \div 1,59$ % masă la sudurile în colț, respectiv între $0,96$ și $1,68$ % masă la sudurile cap la cap. De asemenea, concentrația în siliciu variază între $0,66 \div 0,86$ % masă la sudurile în colț și $1,08 \div 1,36$ % masă la sudurile cap la cap. Aceste eterogenități locale de compoziție chimică ce acompaniază procesul de solidificare a băii de metal topit se pot explica, pe de o parte, prin modul de creștere a grăunților, iar, pe de altă parte, prin fenomenul de subrăcire constituțională. Așa cum am arătat anterior, modul de creștere a grăunților este dendritic, respectiv aceștia tind să se dezvolte (pornind de la germeni) în direcții bine definite care sunt asociate structurii lor cristaline (perpendicular pe fețele cubului); acea direcție care se găsește aproape de traiectoria de solidificare va fi privilegiată pentru creșterea grăunților.

Apariția primilor germeni de solidificare provoacă o evoluție a compoziției chimice a lichidului care-i înconjoară, întârziind astfel solidificarea acestuia. În acest fel are loc fenomenul de subrăcire denumită constituțională. El se produce din aproape în aproape și se manifestă prin edificarea și creșterea dendritelor de compoziție variabilă începând cu partea lor centrală, mai puțin fuzibilă, până la partea exterioară, mai fuzibilă. Datorită răcirii cu viteză relativ mare, omogenizarea prin difuzie rămâne incompletă și eterogenitatea chimică se menține după răcire, ceea ce conduce la observarea dendritelor în cursul examinărilor metalografice, respectiv la variații cantitative ale elementelor chimice, evidențiată prin investigații la microsonda electronică.

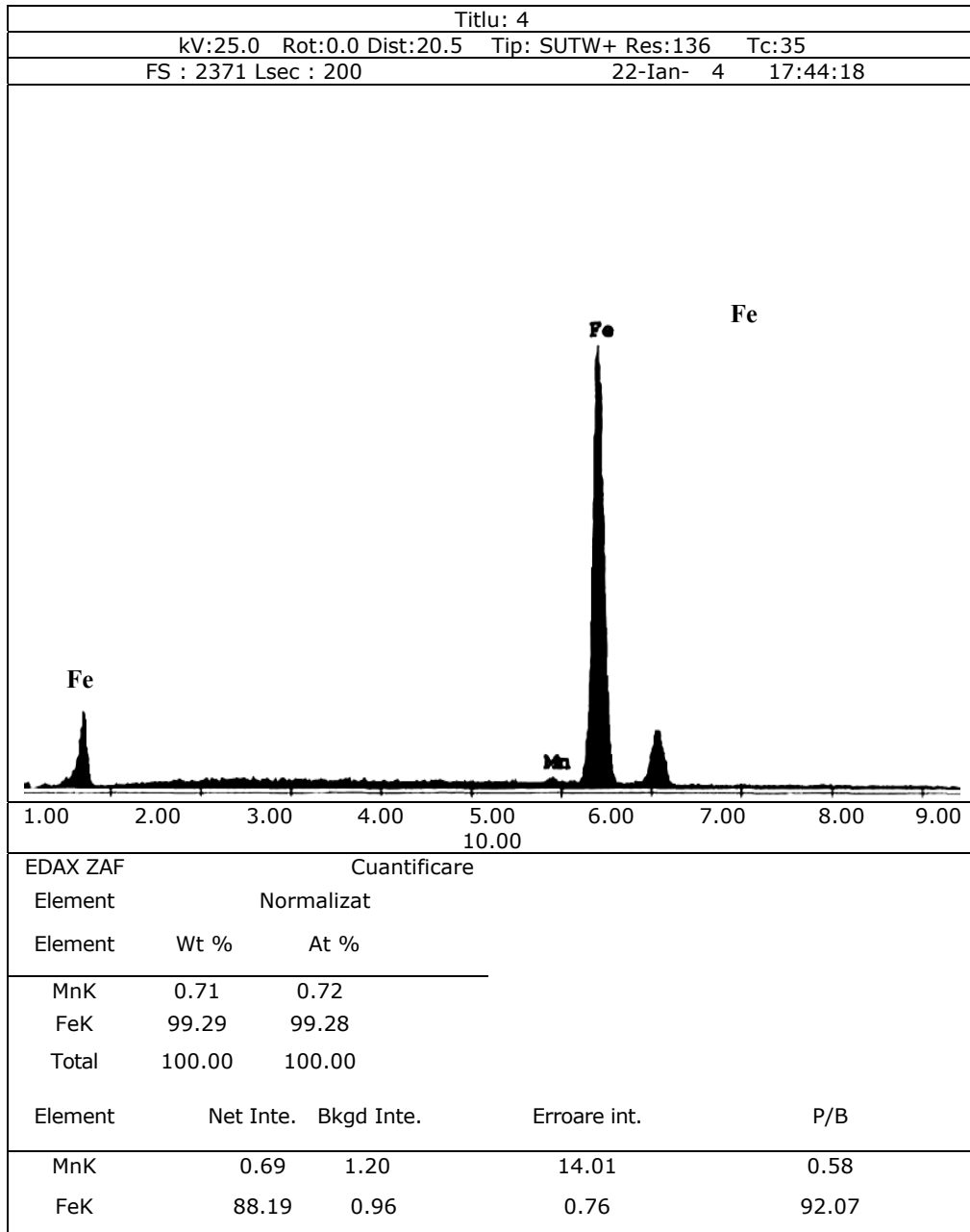


Figura 3.15. Spectrul dispersiei în energie a razelor X la analiza zonelor centrale ale cristalelor dendritice dintr-o sudură în colț

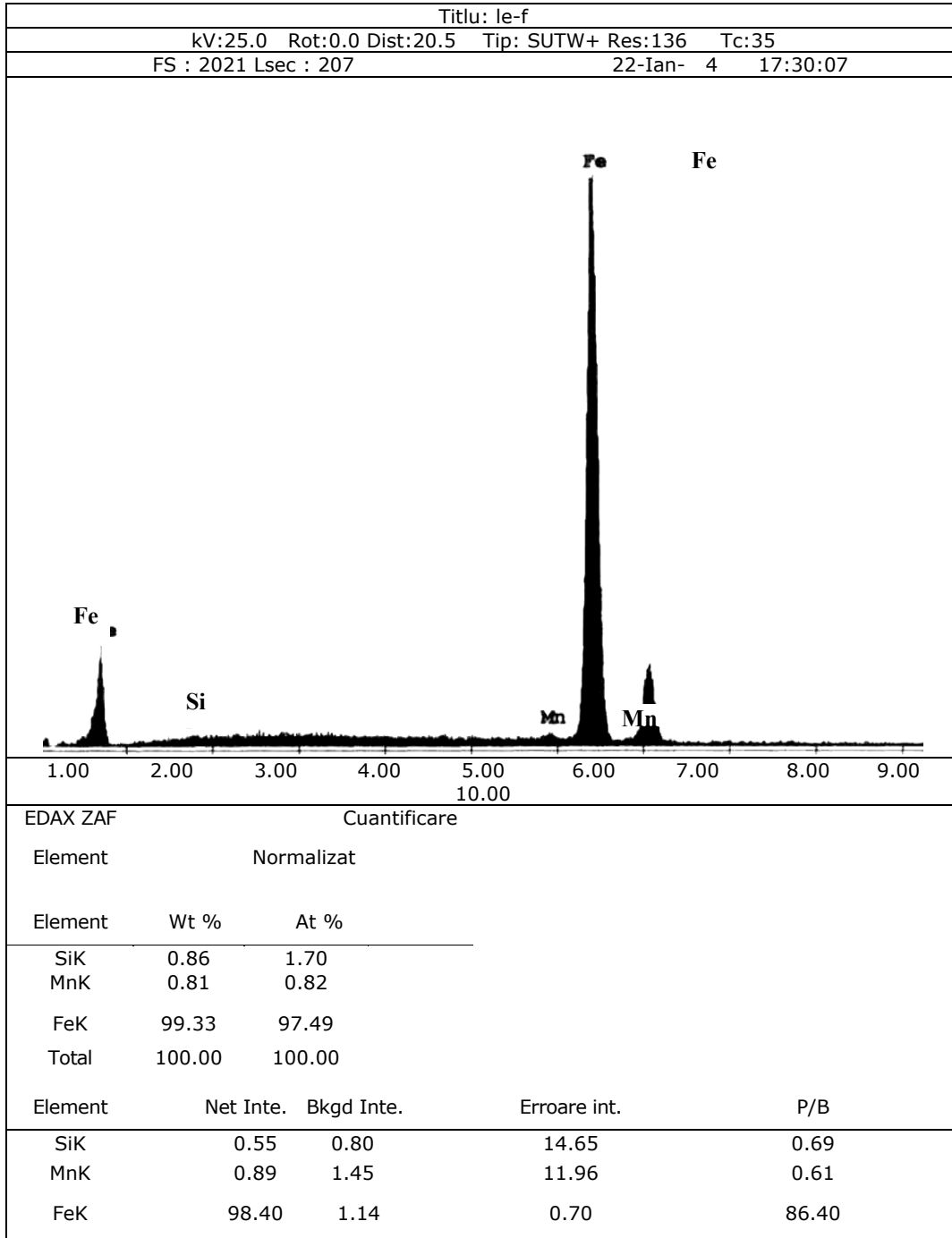


Figura 3.16. Spectrul dispersiei în energie a razelor X la analiza zonelor intermediare ale cristalelor dendritice dintr-o sudură în colț

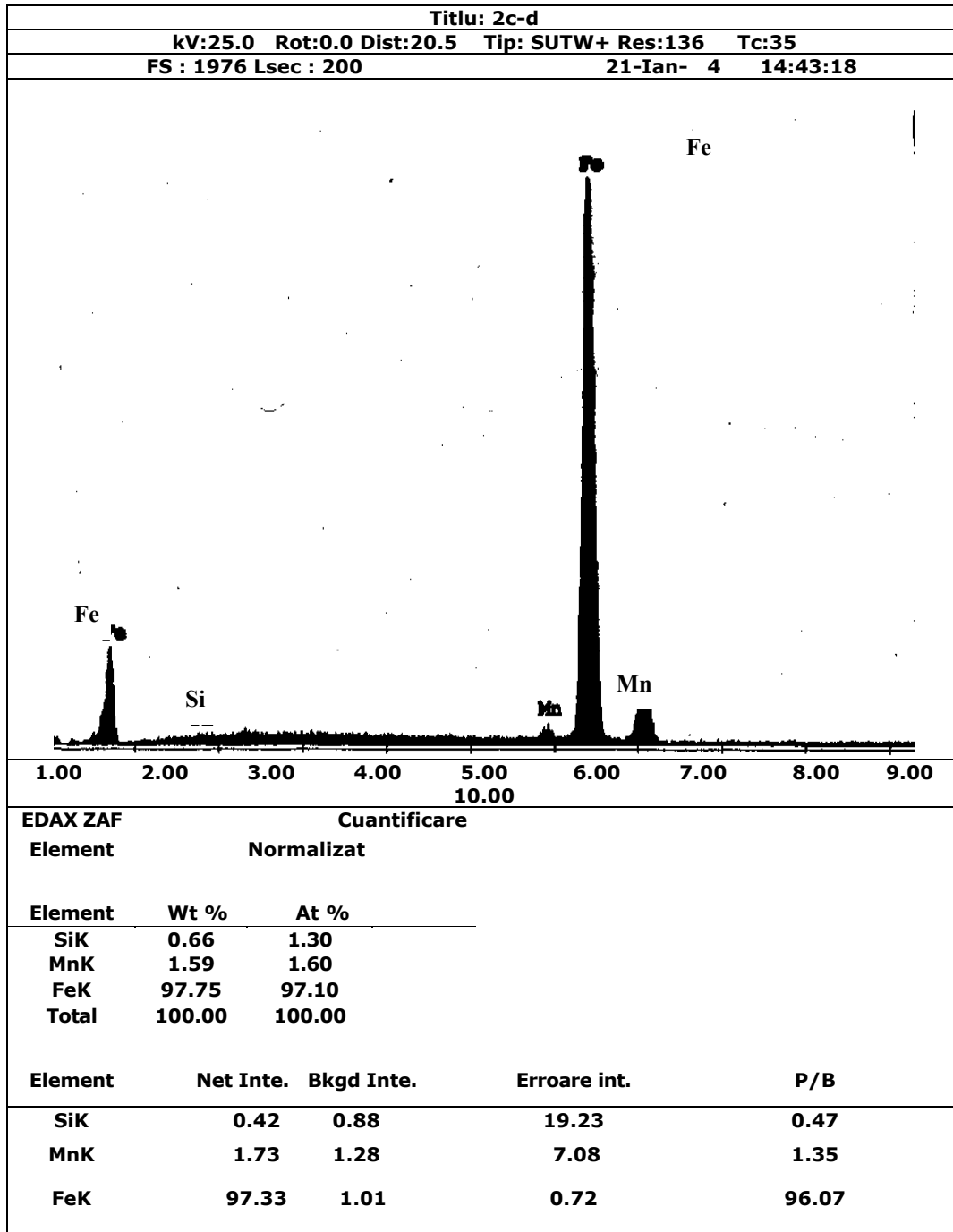


Figura 3.17. Spectrul dispersiei în energie a razelor X la analiza zonelor exterioare ale cristalelor dendritice dintr-o sudură în colț

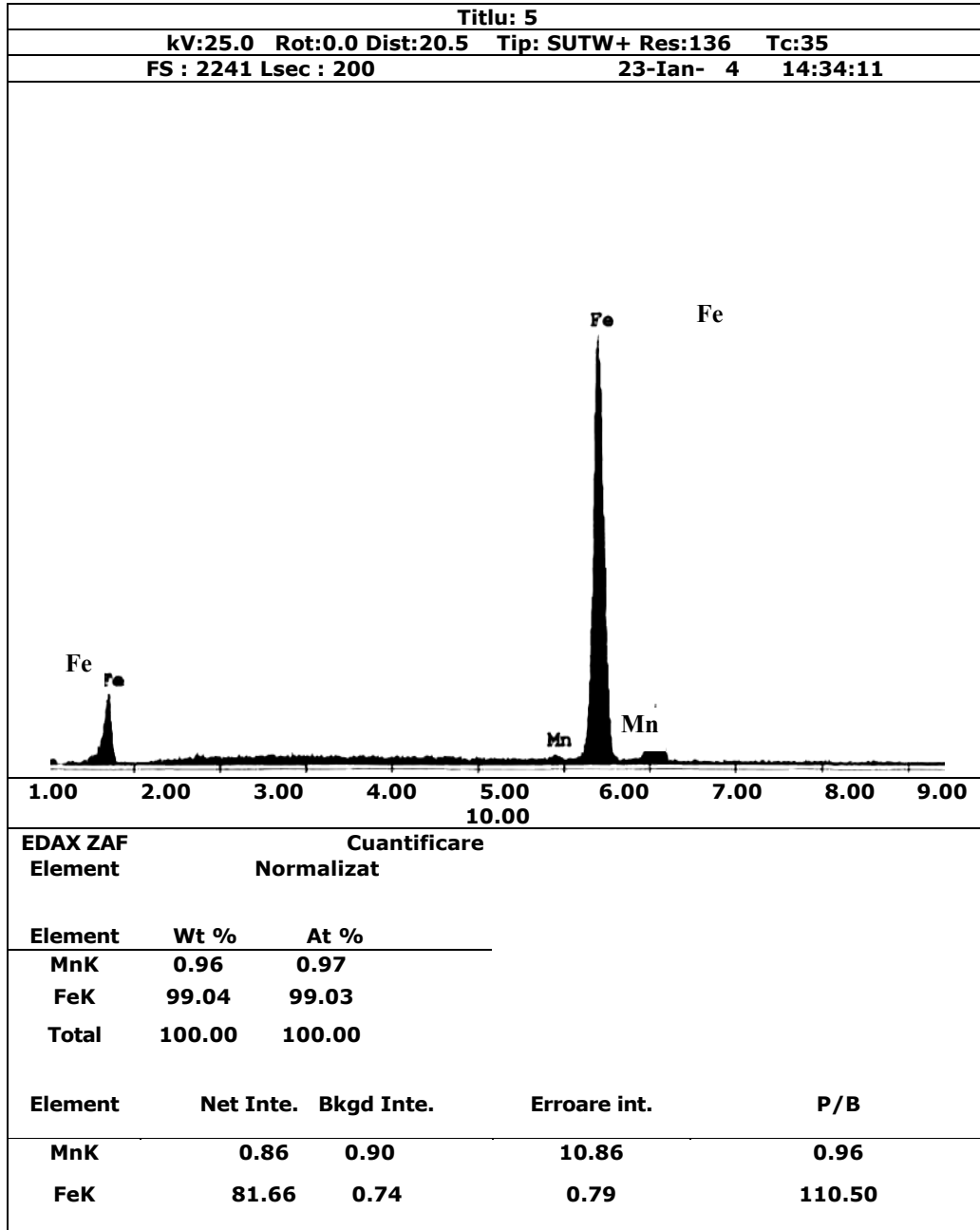


Figura 3.18. Spectrul dispersiei în energie a razelor X la analiza zonelor centrale ale cristalelor dendritice dintr-o sudură cap la cap

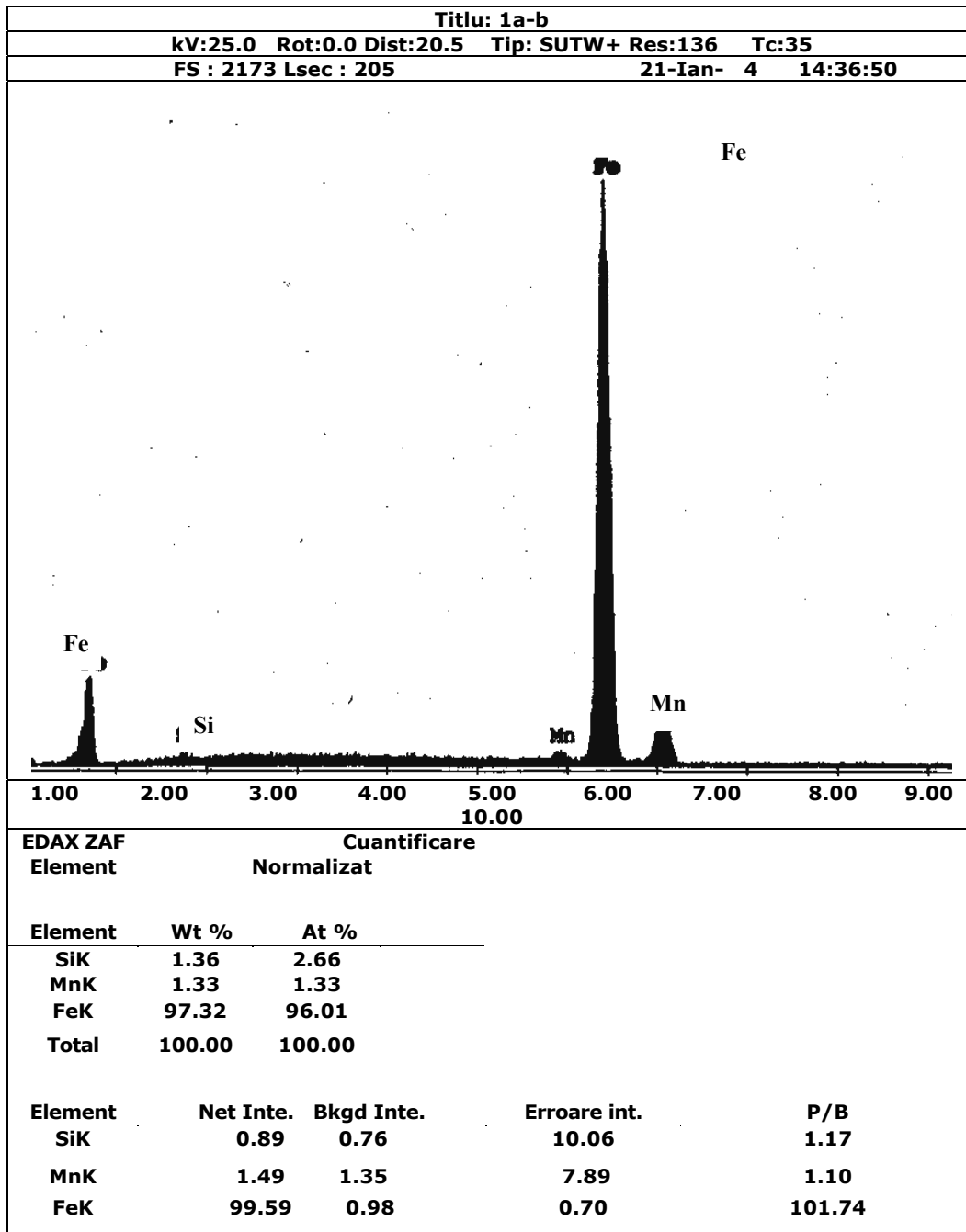


Figura 3.19. Spectrul dispersiei în energie a razelor X la analiza zonelor intermediare ale cristalelor dendritice dintr-o sudură cap la cap

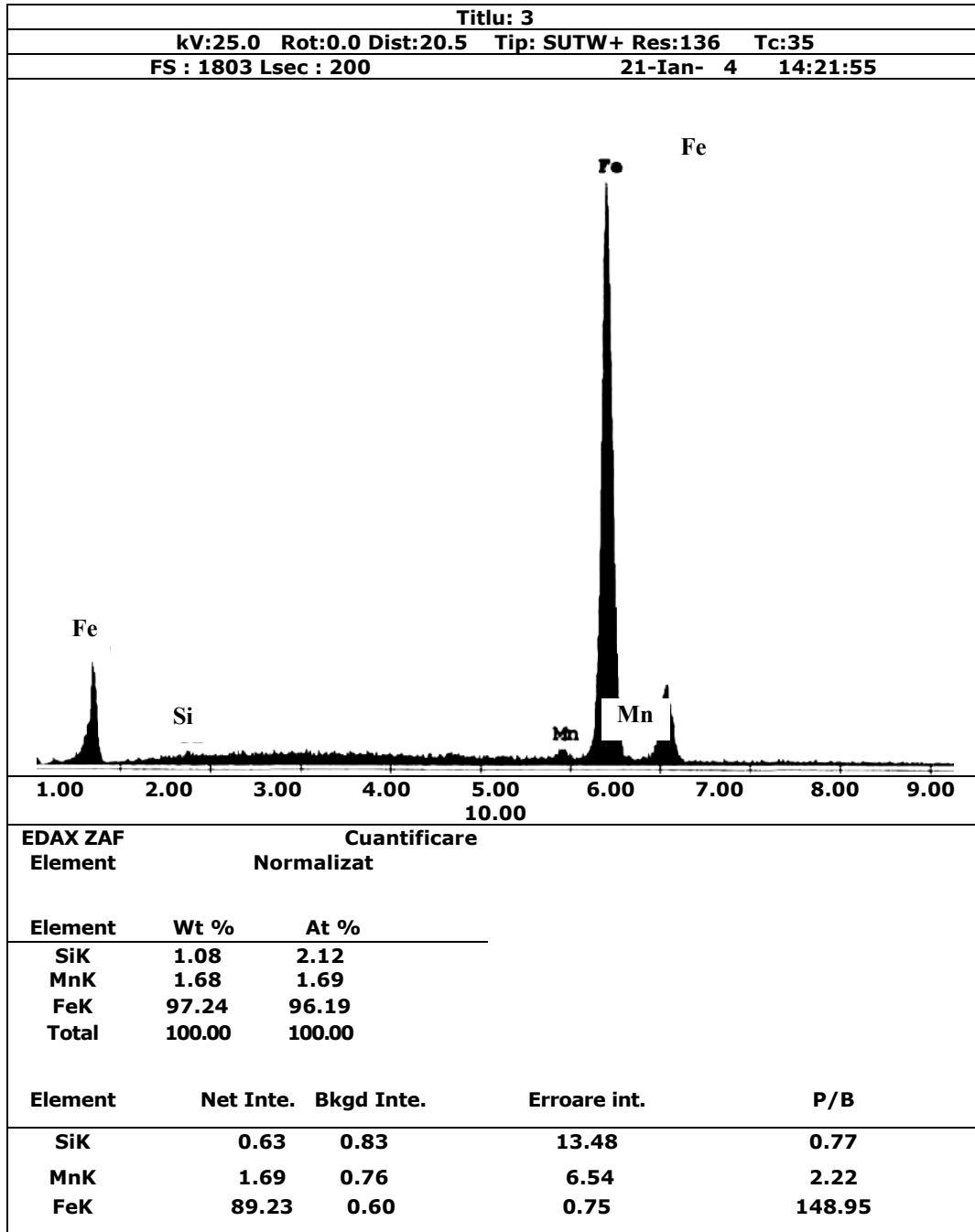


Figura 3.20. Spectrul dispersiei în energie a razelor X la analiza zonelor exterioare ale cristalelor dendritice dintr-o sudură cap la cap

3.7. NATURA FAZELOR PREZENTE ÎN MICROSTRUCTURA DE SOLIDIFICARE A BĂII TOPITE

Pentru identificarea naturii matricei de bază din microstructura sudurii au fost efectuate analize de difracție cu raze X.

Parametrii de scanare utilizați la difractometrul Röntgen tip Xpert MPD (firma Philips) au fost următorii:

- sursa: anticatod din Cu;
- apertura: Soller $1,5^{\circ}$, orizontal 2 mm, vertical 8 mm;
- filtrul: Ni 20 μm ;
- constanta de timp: 5 s;
- diapazon impuls: 10^3imp./s ;
- temperatura camerei: 25°C .

Pentru înregistrare s-au folosit următorii parametri:

- viteza de deplasare a hârtiei: 600 mm/h;
- începutul de măsurare: $2\theta = 20^{\circ}$, iar sfârșitul de măsurare $2\theta = 100^{\circ}$;
- unghiul de rotire al contorului: $1^{\circ}/\text{min}$.

În figurile 3.21.÷3.23. și tabelele 3.1.÷3.3. sunt prezentate câteva din înregistrările efectuate prin difracție cu raze X. Pentru identificarea naturii fazelor au fost utilizate tabelele existente în baza de date din J. C. POWDER DIFFRACTION – ICDD 1996. Rezultatele obținute sunt în concordanță deplină cu cele obținute prin investigațiile anterioare, demonstrând că structura matricei de bază este constituită din ferită. Evident că, alături de ferită mai apare o cantitate mică de fază cementitică, ce nu a putut fi decelată în totalitate cu aparatura folosită în experiment.

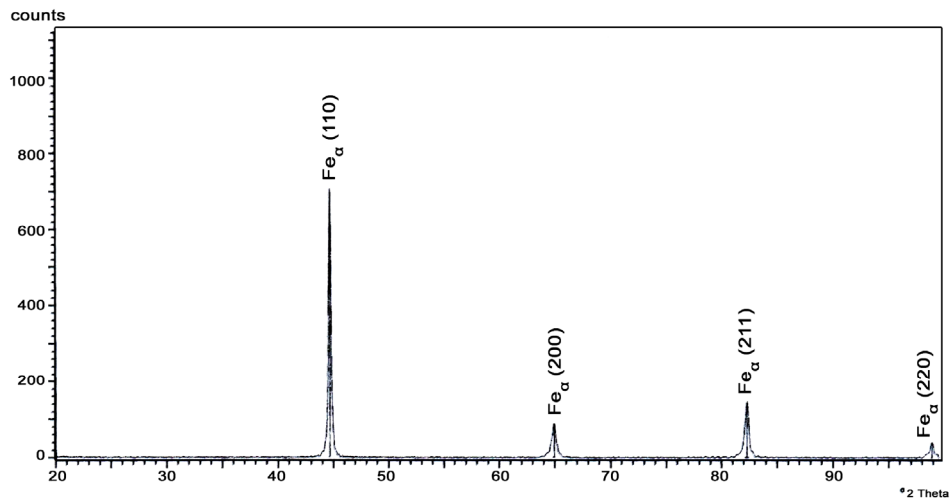


Figura 3.21. Spectrul de difracție caracteristic sudurii de îmbinare cap la cap

Tabelul 3.1. Listarea distanțelor dintre planele cristalografice și înălțimea picurilor de interferență la o sudură cap la cap

| | |
|---------------------------|-----------|
| Lungime de undă folosită | K- Alpha1 |
| K-Alpha1 (Å): | 1,54056 |
| K-Alpha2 (Å): | 1,54439 |
| K-Alpha2/K-Alpha1 ratio : | 0,50000 |
| K-Alpha (Å): | 1,54056 |
| K-Beta (Å): | 1,39222 |

| Distanța-d (Å) | Intensitat eRelativa (%) | Unghi (°2Theta) | Inălțime maximă (repetări) | Fundal (repetări) | Lățime vârf (°2Theta) | Semnificativ |
|-------------------|--------------------------------|--------------------|----------------------------------|----------------------|--------------------------|--------------|
| 2,02638 | 100,00 | 44,6830 | 697,37 | 3,62 | 0,20000 | 5,40 |
| 1,43497 | 12,46 | 64,9308 | 86,87 | 1,72 | 0,20000 | 1,05 |
| 1,17076 | 20,40 | 82,2846 | 142,23 | 1,42 | 0,40000 | 5,64 |
| 1,01378 | 5,68 | 98,8955 | 39,62 | 0,18 | 0,25000 | 1,49 |

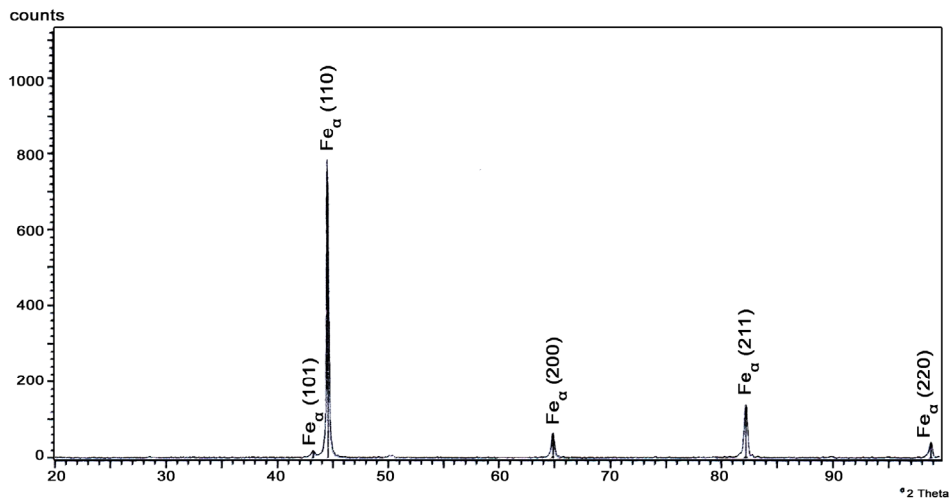


Figura 3.22. Spectrul de difracție caracteristic sudurii de îmbinare în colț (prima trecere)

Tabelul 3.2. Listarea distanțelor dintre planele cristalografice și înălțimea picurilor de interferență la o sudură în colț (prima trecere)

| | |
|---------------------------|-----------|
| Lungime de undă folosită | K- Alpha1 |
| K-Alpha1 (Å): | 1,54056 |
| K-Alpha2 (Å): | 1,54439 |
| K-Alpha2/K-Alpha1 ratio : | 0,50000 |
| K-Alpha (Å): | 1,54056 |
| K-Beta (Å): | 1,39222 |

| Distanța-d (Å) | Intensitat eRelativa (%) | Unghi (°2Theta) | Inălțime maximă (repetări) | Fundal (repetări) | Lățime vârf (°2Theta) | Semnificativ |
|----------------|--------------------------|-----------------|----------------------------|-------------------|-----------------------|--------------|
| 2,08476 | 2,32 | 43,36738 | 23,03 | 1,85 | 0,25000 | 0,83 |
| 2,02498 | 100,0 | 44,71545 | 994,39 | 1,66 | 0,20000 | 8,12 |
| 1,43451 | 8,34 | 64,95425 | 82,89 | 1,04 | 0,30000 | 4,01 |
| 1,17049 | 17,81 | 82,30770 | 177,08 | 1,13 | 0,40000 | 10,50 |
| 1,01364 | 5,31 | 98,91331 | 52,85 | 0,75 | 0,30000 | 2,90 |

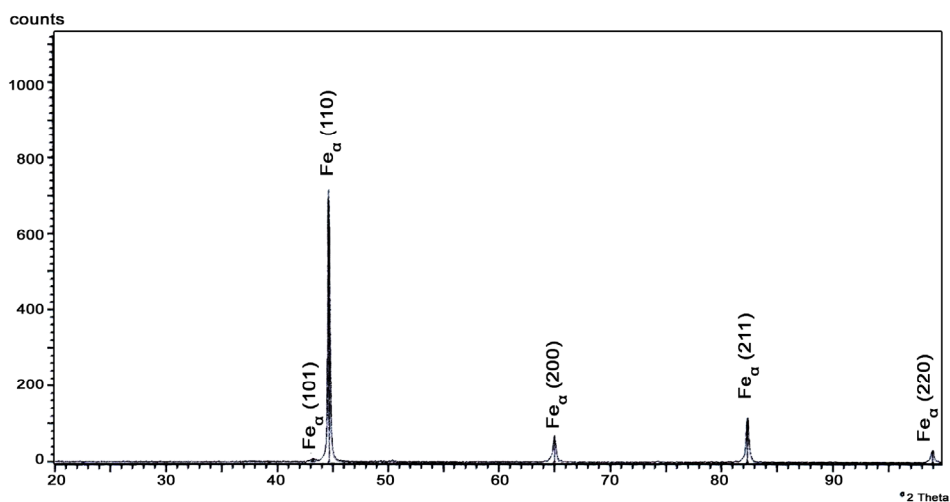


Figura 3.23. Spectrul de difracție caracteristic sudurii de îmbinare în colț (a doua trecere)

Tabelul 3.3. Listarea distanțelor dintre planele cristalografice și înălțimea picurilor de interferență la o sudură în colț (a doua trecere)

| | |
|---------------------------|-----------|
| Lungime de undă folosită | K- Alpha1 |
| K-Alpha1 (Å): | 1,54056 |
| K-Alpha2 (Å): | 1,54439 |
| K-Alpha2/K-Alpha1 ratio : | 0,50000 |
| K-Alpha (Å): | 1,54056 |
| K-Beta (Å): | 1,39222 |

| Distanța-d (Å) | Intensitate Relativă (%) | Unghi (°2Theta) | Inălțime maximă (repetări) | Fundal (repetări) | Lățime vârf (°2Theta) | Semnificativ |
|----------------|--------------------------|-----------------|----------------------------|-------------------|-----------------------|--------------|
| 2,09000 | 1,01 | 43,25313 | 10,76 | 2,01 | 0,50000 | 0,89 |
| 2,02519 | 100,0 | 44,71067 | 1068,98 | 2,56 | 0,20000 | 8,38 |
| 1,43445 | 9,74 | 64,95744 | 104,08 | 1,44 | 0,25000 | 2,74 |
| 1,17074 | 16,1 | 82,2X603 | 172,43 | 0,88 | 0,25000 | 4,16 |
| 1,01380 | 4,53 | 98,89191 | 48,45 | 1,29 | 0,25000 | 1,93 |

3.8. ÎNCERCĂRI STATICE DE TRACȚIUNE

Pentru determinarea rezistenței la rupere a îmbinărilor sudate cap la cap a fost utilizată o mașină universală de încercare, încadrată în clasa 1 de precizie. Condițiile de rigiditate ale sistemului epruvetă – mașină, precum și cele privitoare la

aplicarea sarcinii sunt în conformitate cu normele în vigoare. Locul de prelevare a epruvetelor destinate diferitelor tipuri de încercări este arătat în figura 3.24. și respectă în totalitate normele europene SR EN 288 – 3+A1.

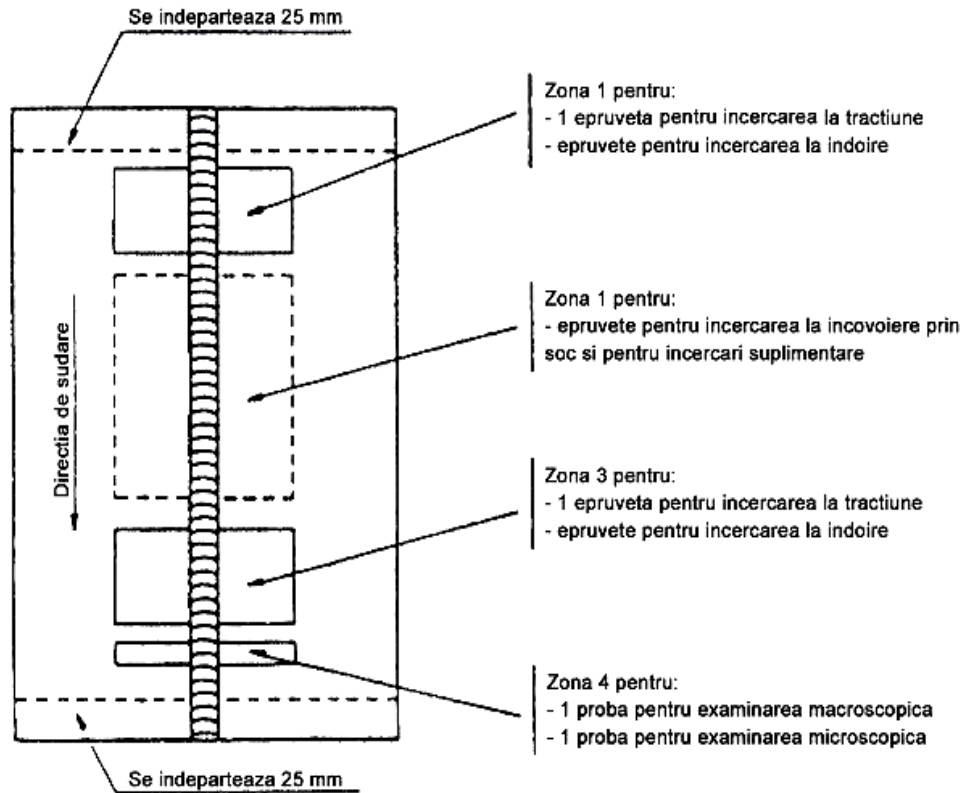


Figura 3.24. Localizarea epruvetelor pentru o sudură cap la cap la table

Forma și dimensiunile epruvetelor cu sudura plasată în porțiunea calibrată se prezintă în figura 3.25.

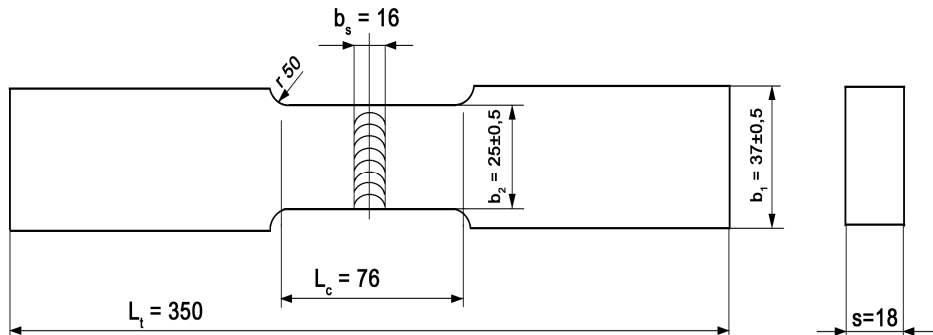


Figura 3.25. Forma și dimensiunile epruvetelor folosite la încercările de tracțiune statică

Suprafețele acestora nu au prezentat zgârieturi sau creștături transversale, iar supraînălțarea a rămas neprelucrată. În cursul operațiilor de prelucrare au fost luate măsuri de evitare a încălzirii materialului sau de durificare prin deformare la rece. O parte din epruvete au fost testate în stare brută sudată, iar o altă parte au fost supuse în prealabil unui tratament termic de recoacere pentru normalizare. Acest tratament termic a constat în încălzirea probelor la o temperatură de $860 \pm 10^\circ\text{C}$ urmată de o menținere de 30 min și apoi de o răcire în aer. Prin încălzire – menținere în domeniul austenitic s-a urmărit o recristalizare fazică completă însoțită de o finisare a granulației sudurii și de o înlăturare a structurii Widmannstätten din zonele îmbinării sudate. Răcirea ulterioară în aer până la temperatura camerei a vizat descompunerea austenitei în constituenți de treaptă perlitică.

Pentru comparație, au fost supuse încercării și epruvete prelevate din materialul de bază. Încercarea propriu-zisă a fost condusă la temperatura camerei, iar rezistența la rupere a fost determinată cu relația:

$$R_m = \frac{F_{\max}}{S_0} = \frac{F_{\max}}{s \cdot b_2}, \quad \text{N/mm}^2 \quad (3.1)$$

În care: F_{\max} este sarcina maximă înregistrată în cursul încercării, N;

S_0 este aria inițială a secțiunii transversale, mm^2 .

Rezultatele obținute sunt centralizate în tabelul 3.4. Analiza acestora permite următoarele observații:

- rezistența la rupere a îmbinării sudate este superioară rezistenței la tracțiune a materialului de bază;
- există asigurată o bună compatibilitate între materialul de bază (M.B.) și

cel depus (M.D.) și sunt evitate concentrările mari de tensiune în îmbinare deoarece este îndeplinită condiția $R_{m_{MD}} \leq (1,30 \div 1,35) R_{m_{MB}}$;

- tratamentul termic ulterior, de normalizare se manifestă printr-o creștere a rezistenței la rupere a îmbinării cu 7,67 % și a materialului de bază cu 9,79 %.

3.9. ÎNCERCĂRI DINAMICE DE ÎNCOVOIERE PRIN ȘOC

Aceste încercări evidențiază tendința unui material către rupere fragilă. Pentru experimentări au fost utilizate epruvete prismatice cu o creștătură la mijloc în formă de V. Ele au fost preferate celor cu creștătură în formă de U deoarece energia de rupere determinată este acreditată în cea mai mare parte propagării fisurii. Aparatul de încercare este un ciocan pendul Charpy care are o energie disponibilă de 300 J. Acesta este ridicat la o anumită înălțime de unde este lăsat să cadă pe fața opusă creștăturii epruvetei așezată liber pe două reazeme. În cădere are loc ruperea prin șoc a epruvetei după care ciocanul revine la o altă înălțime. Conform normativelor în vigoare, caracteristica de încovoiere a acestor epruvete se rezumă la energia consumată pentru rupere, notată cu KV și exprimată în J. Pentru aprecierea caracteristicilor de tenacitate ale metalului depus au fost efectuate încercări la temperaturi cuprinse între +20 și - 20⁰ C. Creștătura epruvetelor a fost dispusă pe direcția grosimii metalului depus.

O parte din epruvete au fost testate în stare sudată fără tratament termic ulterior, iar alte probe au fost supuse tratamentului termic de recoacere pentru normalizare, după un regim termic similar celui aplicat epruvetelor pentru încercări la tracțiune statică.

Pentru comparație au fost testate și epruvete cu creștătura practică în materialul de bază. Rezultatele furnizate de aceste încercări sunt redată în tabelul 3.5., iar pe baza acestora au fost trasate curbele de variație ale energiei de rupere în funcție de temperatura de încercare (figura 3.26.)

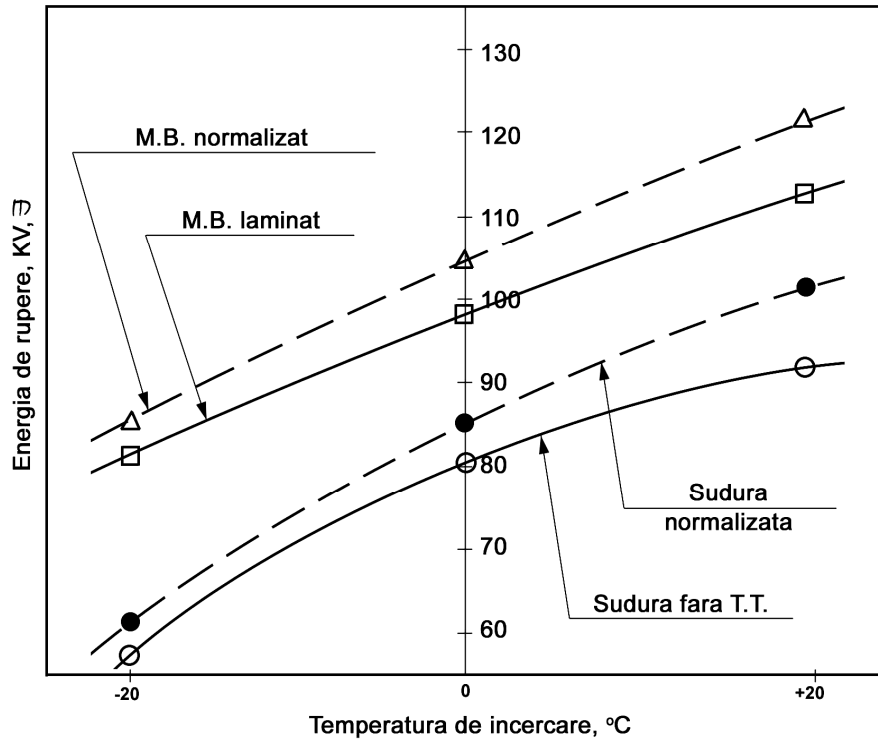


Figura 3.26. Variația energiei de rupere cu temperatura de încercare

Interpretarea acestor rezultate conduce la următoarele observații:

- parametrii regimului termic de sudare, folosit experimental, asigură valori de tenacitate superioare celor minime impuse metalului depus;
- aplicarea tratamentului termic de normalizare are o acțiune benefică asupra tenacității metalului depus și celui de bază, favorizând o creștere a energiei de rupere cu 7,92 % pentru metalul depus, respectiv cu 11,79% pentru metalul de bază.

Tabelul 3.4. Valorile rezistenței la rupere

| Nr. probă | Proveniență | Rm, N/mm ² | | | |
|-----------|------------------|-----------------------|--------|-------------------|--------|
| | | Stare sudată | | Stare normalizată | |
| 1.1 | Sudată 4/14/2 | 596,2 | 594,93 | 642,2 | 639,83 |
| 1.2 | | 600,7 | | 636,5 | |
| 1.3 | | 587,9 | | 640,8 | |
| 2.1 | Sudată | 598,4 | 594,36 | 648,4 | 641,93 |
| 2.2 | 725/800 | 588,8 | | 639,7 | |

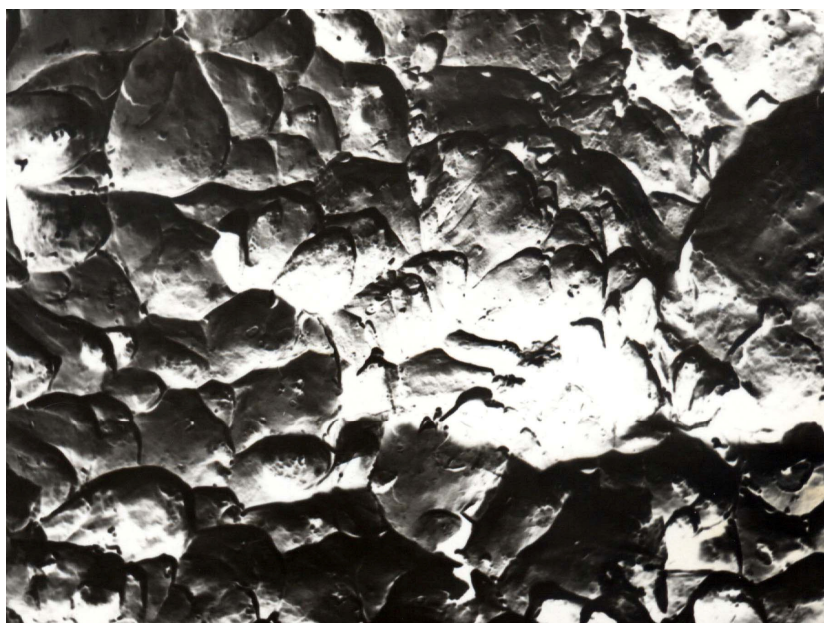
| | | | | | |
|-----|---------------------|-------|--------|-------|--------|
| 2.3 | 34/34,5 | 595,9 | | 637,7 | |
| 3.1 | Sudată | 608,7 | | 643,5 | |
| 3.2 | 700/800 | 599,1 | 603,03 | 651,3 | 948,13 |
| 3.3 | 34,5/35 | 601,3 | | 649,6 | |
| 4.1 | | 561,7 | | 617,8 | |
| 4.2 | Material de bază | 571,1 | 565,53 | 625,3 | 620,9 |
| 4.3 | | 563,8 | | 619,6 | |

Tabelul 3.5. Valorile energiei de rupere

| Nr probă | Proveniență | Temperatura de încercare, °C | KV, J | | | |
|----------|------------------------------|------------------------------|--------------|------|-------------------|-------|
| | | | Stare sudată | | Stare normalizată | |
| 1.1 | Sudată 4/14/2 | + 20 | 90 | 91 | 101 | 100,3 |
| 1.2 | | | 92 | | 104 | |
| 1.3 | | | 91 | | 96 | |
| 2.1 | | 0 | 70 | 73,3 | 76 | 79,3 |
| 2.2 | | | 74 | | 79 | |
| 2.3 | | | 76 | | 83 | |
| 3.1 | | - 20 | 52 | 52,6 | 58 | 57,3 |
| 3.2 | | | 54 | | 58 | |
| 3.3 | | | 52 | | 56 | |
| 4.1 | Sudată 725/800 34/34,5 | + 20 | 96 | 54,3 | 111 | 106,3 |
| 4.2 | | | 96 | | 106 | |
| 4.3 | | | 91 | | 102 | |
| 5.1 | | 0 | 82 | 82,3 | 88 | 83,6 |
| 5.2 | | | 79 | | 79 | |
| 5.3 | | | 86 | | 84 | |
| 6.1 | | - 20 | 61 | 59,3 | 66 | 64,3 |
| 6.2 | | | 58 | | 62 | |
| 6.3 | | | 59 | | 65 | |
| 7.1 | | + 20 | 94 | 93 | 104 | 104 |
| 7.2 | | | 92 | | 101 | |
| 7.3 | | | 93 | | 107 | |
| 8.1 | Sudată 700/800 34,5/35 | 0 | 84 | 85,3 | 90 | 87 |
| 8.2 | | | 89 | | 86 | |
| 8.3 | | | 83 | | 85 | |
| 9.1 | | - 20 | 57 | 58,3 | 61 | 62 |
| 9.2 | | | 59 | | 62 | |

| | | | | | | |
|------|---------------------|------|------|------|------|-------|
| 9.3 | | | 59 | | 63 | |
| 10.1 | Material de bază | + 20 | 113 | 113 | 138 | 137,3 |
| 10.2 | | | 108 | | 136 | |
| 10.3 | | | 118 | | 138 | |
| 11.1 | | 0 | 96 | 96,6 | 102 | 103,3 |
| 11.2 | | | 99 | | 104 | |
| 11.3 | | | 95 | | 104 | |
| 12.1 | - 20 | 81 | 81,3 | 86 | 84,6 | |
| 12.2 | | 79 | | 86 | | |
| 12.3 | | 84 | | 82 | | |

Examinarea microfractografică a suprafețelor de rupere ale epruvetelor testate la +20 și -20⁰ C (figura 3.27.și 3.28.) demonstrează că ruperea are un caracter ductil, fiind precedată de deformații plastice pronunțate. În consecință, sudurile realizate în condițiile tehnologice precizate, oferă o rezervă suficientă de plasticitate, respectiv o rezistență mare la rupere fragilă până la temperaturi de -20⁰ C.



x5000

Figura 3.27. Imaginea microfractografică a unei epruvete testate la +20⁰C, rupere ductilă



x5000

Figura 3.28. Imaginea microfractografică a unei epruvete testate la -20°C , rupere ductilă

3.10. CONCLUZII

1. La sudarea TWIN-ARC, procesul de solidificare a zonei topite se amorsează pe interfața lichid – solid și este puternic influențat de valoarea vitezei de sudare.

2. Creșterea grăunților cristalini este epitaxială și odată cu mărirea vitezei de solidificare se creează condițiile unei dezvoltări dendritice și competitive a acestora de-a lungul traiectoriilor ortogonale ale izotermelor.

3. Viteza de solidificare a băii de metal topit variază continuu între o valoare foarte redusă în zona de inițiere a procesului și o valoare maximă în axa sudurii, unde devine egală cu viteza de sudare. Totodată, caracterul bazaltic al microstructurii formate în urma cristalizării primare și secundare este o consecință a variației periodice și pseudo-periodice a vitezei de solidificare.

4. Modificările structurale intervenite la răcire în zona influențată termic sunt dependente de particularitățile ciclului termic de sudare și caracterizate de apariția unei microstructuri Widmannstätten în porțiunea adiacentă liniei de fuziune și a unei microstructuri perlito – bainitice în subzona de normalizare.

5. Investigațiile efectuate la microsonda electronică au pus în evidență prezența unor eterogenități locale de compoziție chimică ce însoțesc procesul de solidificare a zonei topite; ele se justifică atât prin modul de creștere dendritică a grăunților, cât și prin fenomenul de subrăcire constituțională.

6. Încercările de tracțiune statică efectuate asupra îmbinărilor sudate cap la cap au demonstrat că rezistența la rupere a acestora este superioară celei a materialului de bază, iar procesul de sudare TWIN-ARC asigură o bună compatibilitate între metalul de bază și metalul depus, cu evitarea concentrărilor mari de tensiune în îmbinare.

7. Pe intervalul temperaturilor de exploatare de $+20 \div -20^{\circ} \text{C}$, valorile tenacității metalului depus sunt superioare celor minime impuse, iar ruperea este în totalitate fibroasă, având un caracter ductil.

8. Tratamentul termic de normalizare aplicat îmbinărilor sudate provoacă finisarea granulației și înlăturarea structurii Widmannstätten, cu implicații în creșterea tuturor caracteristicilor mecanice.

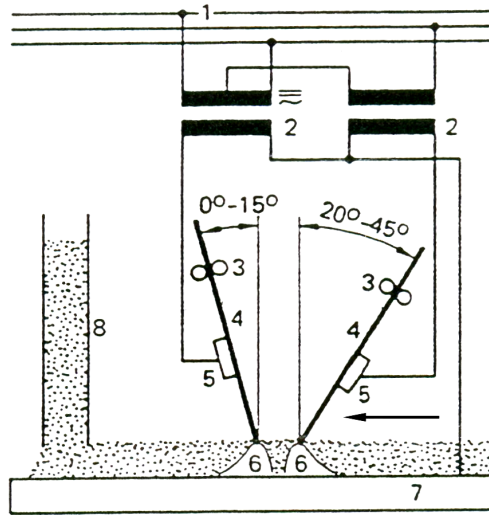
4. OPORTUNITĂȚI ALE SUDĂRII SUB STRAT DE FLUX CU DOUĂ SÂRME ÎN TANDEM

4.1. BAZELE PROCESULUI DE SUDARE

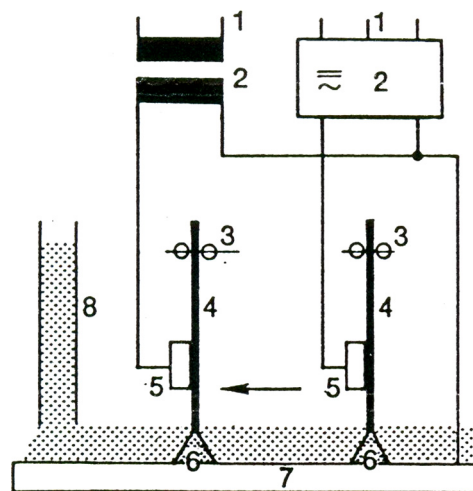
Sudarea sub strat de flux în tandem (fig. 4.1.) este condusă prin intermediul a două capete de sudare, două blocuri de comandă și dispozitive de avans, două surse de sudare și cu două arcuri electrice separate unul de celălalt. Arcurile pot arde într-o baie comună (fig. 4.1. a) sau în băi separate (fig. 4.1. b). Procedul a fost folosit la început pentru sudarea tablelor cu grosime mare (peste 100 mm).

La sudarea cu o singură sârmă electrod și curenți mari se formează o sudură cu proprietăți mecanice nefavorabile, determinate de o cristalizare grobă, de segregații, o suprapunere nefavorabilă a fronturilor de solidificare și posibile retasuri, toate acestea mărind susceptibilitatea la fisurare a sudurii și micșorând tenacitatea acesteia [4].

Prin introducerea celei de-a doua sârme electrod care se topește la o distanță definită de prima, se va evita formarea de fisuri, deoarece cel de-al doilea arc electric va retopi porțiunea din sudură în care poate lua naștere fisura. În cazul sudării cu o singură sârmă electrod, viteza de sudare este limitată de concentratorii de pătrundere. Pentru viteze mai mari de sudare, de la circa 70 cm/min la 800 A, pătrunderea se micșorează, apărând defecte de legătură cum se observă în fig. 4.2.



4.1. a



4.1. b

Figura 4.1. Sudarea în tandem cu una sau două băi de metal topit
 1-rețea de alimentare; 2-surse de sudare; 3-dispozitive de avans sârme; 4-electrozi; 5-
 contacte curent de sudare; 6-arcuri electrice; 7-piesă; 8-alimentare cu flux

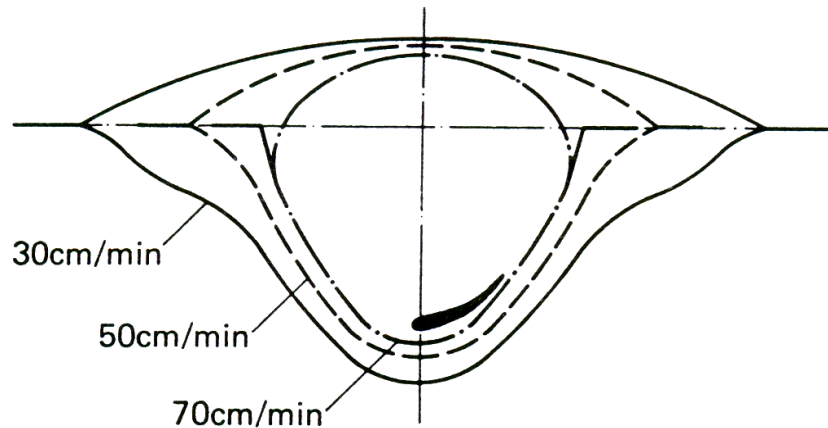


Figura 4.2. Forma cusăturii și pătrunderea la sudarea sub strat de flux pentru diferite valori ale vitezei de sudare

La sudarea în tandem, fiecare arc electric îndeplinește sarcini diferite (fig. 4.3.). Cu primul arc electric se obține cea mai mare parte a pătrunderii. Curentul continuu cu plus la sârma electrod care are o poziționare „trasă”, obișnuit de 9° - 12° , conduce la o pătrundere maximă. Cel de-al doilea arc electric are ca sarcină obținerea unei treceri de umplere cât mai netede. Legarea sârmei electrod la curent alternativ diminuează acțiunea de suflaj datorată atracției magnetice a ambelor arcuri electrice, iar poziționarea la un unghi de 20° - 45° , „înțepând” perpendicularele la suprafața tablei, face ca lățimea sudurii să crească și forma ei să devină favorabilă. Se pot folosi curenți mai mari care vor conduce la o rată a depunerii dublă ca valoare față de cazul sudării cu o sârmă. Procesul de sudare sub strat de flux cu două sârme în tandem permite micșorarea raportului dintre lățimea și pătrunderea sudurii până la 0,8:1, comparativ cu cel puțin 1,2:1 în cazul sudării cu o sârmă, așa cum se arată în fig. 4.4

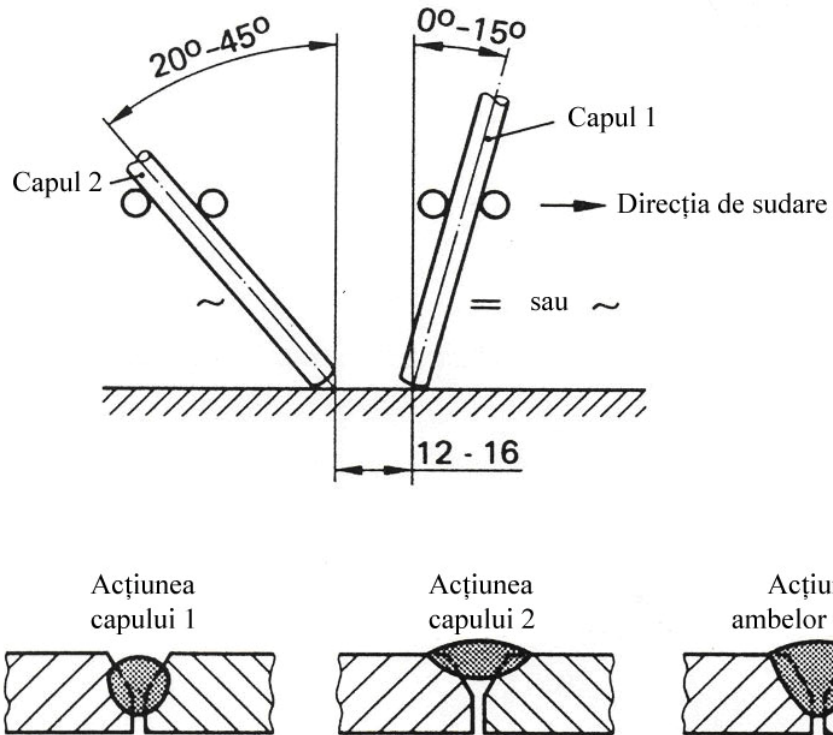


Figura 4.3. Poziționarea capetelor de sudare și acțiunea arcului electric la sudarea în tandem



Figura 4.4. Imaginea macrografică a unei sudurii sub strat de flux în tandem; grosimea tablei 110 mm [5]

Metalul depus, fiind mai îngust, se solidifică mai repede și, urmare a gradului mai ridicat de subrăcire, structura primară va avea o granulație mai fină, în plus, metalul depus va fi constituit dintr-o porțiune mai mare de sârmă electrod neamestecată cu metalul de bază și implicit va avea un conținut mai mic de fosfor și de sulf. Un alt avantaj este legat de o mai bună degazare a băii mai lungi de metal topit și deci de o sensibilitate mai redusă la formarea porilor. La aceasta se adaugă capacitatea de solicitare la curent mai înaltă a fluxului cu circa 1/3 comparativ cu sudarea cu o singură sârmă. Îndeosebi fluxul cu un grad de bazicitate mai înalt, care asigură caracteristici de deformabilitate mai bune pentru sudură, la curenți relativ mari permite obținerea unor valori favorabile ale tenacității la temperaturi joase. Totuși, datorită vitezei mari de sudare este necesară folosirea de fluxuri înalt solicitabile la curent. Fluxurile trebuie să fie bazice și insensibile la urmele de oxizi de pe suprafața componentelor de sudat. Aceste caracteristici nu se pot reuni într-un flux și de aceea se impune găsirea unui compromis. Fluxurile de sudare rapidă trebuie să posede o stabilitate înaltă a arcului electric (de exemplu prin adaos de dioxid de titan - TiO_2) și o caracteristică potrivită de vâscozitate – temperatură. Cele pentru curenți mari sunt de cele mai multe ori acide, cu conținut ridicat de siliciu, dar îmbinările sudate prezintă o tenacitate mai scăzută decât cele realizate cu fluxuri bazice. Curenții mai mari de sudare necesită fluxuri cu granulație mai fină, care sunt mai sensibile la umezeală decât cele grobe și care se vor utiliza în stare uscată.

4.2. CONEXIUNILE CURENTULUI DE SUDARE, PRESCRIPȚIILE DE ÎMBUNĂȚĂȚIRE A CALITĂȚII SUDĂRII ȘI DE CREȘTERE A RATEI DEPUNERII

Sudarea sub strat de flux în tandem se poate realiza în curent alternativ la ambele sârme electrod, în curent continuu la o sârmă electrod și curent alternativ la cealaltă sârmă electrod sau numai în curent continuu. În ultimul caz, polul plus va fi legat la primul cap de sudare și polul minus se va conecta la cel de-al doilea cap

de sudare. Distanța dintre sârme va fi de 8 mm. În cazul combinației curent continuu – curent alternativ, se poate conecta la curentul continuu oricare dintre cele două sârme electrod. De regulă primul cap de sudare se leagă la curent continuu.

Conectarea Scott a fost dezvoltată pentru o viteză mare de sudare și va fi utilizată îndeosebi la sudarea cusăturilor lungi și grele în una sau mai multe poziții, în construcții de nave și pentru sudarea în poziții diferite la obținerea țevilor. Conectarea în V deschis, fig. 4.5., a fost utilizată la sudarea conductelor și la câteva variante de sudare dintr-o singură parte. La conexiunea în triunghi, fig. 4.6., la care diagramele fazoriale ale curentului formează un triunghi închis, prin adăugarea unei impedanțe suplimentare în circuitul de masă, unghiul de defazare dintre curentul arcului conducător și arcul următor, de 60° - 140° , obișnuit 80° - 110° , va putea fi modificat. La această conexiune se pot realiza forme optimale de cusături sudate.

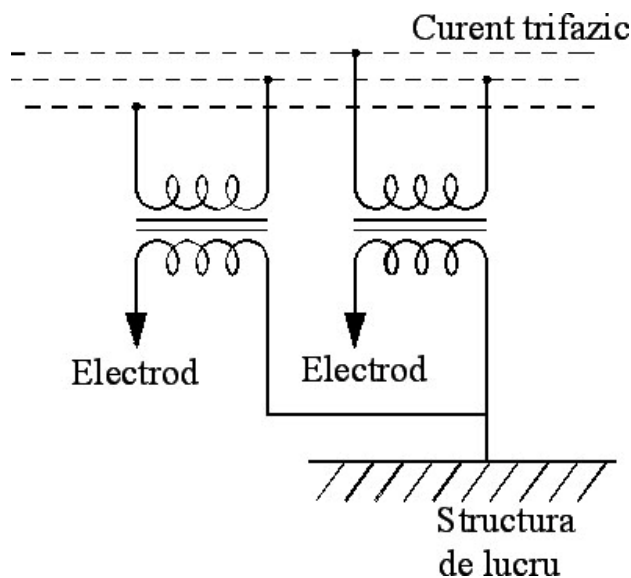


Figura 4.5. Conexiunea în V deschis

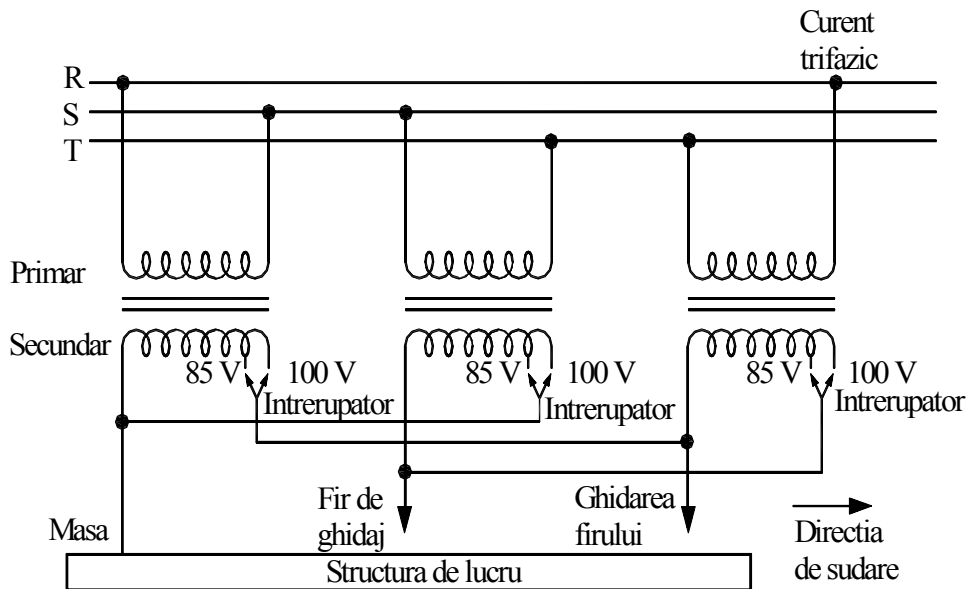


Figura 4.6. Conexiunea în triunghi închis (delta)

Pentru conectările solitare se recomandă:

la triunghi deschis

- direcția de sudare pornește de la masă; succesiunea fazelor: masă, a doua sârmă-electrod, prima sârmă-electrod (conducătoare); unghiul dintre faze: 120° ;

la triunghi închis (îmbinare delta)

- drosel la conductorul de masă; succesiunea fazelor: sârmă-electrod conducătoare; sârma următoare, masă;

la conectare Scott

- succesiunea normală a fazelor: sârmă-electrod conducătoare; sârma următoare, masă;

De regulă, trebuie să se pornească cu sudarea de la masă. La curent continuu asta înseamnă obținerea unei cusături cu circa 20% mai lată și cu circa 50% mai netedă decât la sudarea la masă, deoarece arcul electric va fi împins în față [5].

Pendularea arcului electric, stabilizarea arcului electric prin bobinele de curent continuu și alternativ, utilizarea benzilor înguste în locul sârmelor, a surselor

de sudare cu curent pulsant au fost și vor mai fi cercetate, pentru obținerea de cusături performante și viteze de sudare crescute.

Prin orientarea ciclică a arcului electric în direcția axei lungi, depunerea metalului lichid și a zgurei prin câmpurile magnetice alergătoare în lungul băii de sudură se va încerca o creștere a vitezei de sudare până la 50 cm/min. Cu electrozi conducători pendulanți, îndeosebi la viteze mari de sudare se va obține o cusătură uniformă. Lungimea băii de sudare și, cu aceasta, pericolul de fisurare la cald, sensibilitatea față de o granulație diferită a fluxului și tendința la concentratori marginali vor fi mai reduse. De asemenea, interferența pulsurilor de curent permite viteze mai mari de sudare, conduce la cusături mai late și la o structură mai fină. Ambele variante sunt mai puțin aplicate în practică.

Prin înclinarea sârmelor-electrod și schimbarea succesiunii fazelor și a unghiului dintre ele s-a încercat o deviere mai puternică a arcului la o viteză mai mare de sudare și prin aceasta o evitare a găturii cusăturii. Succesul a fost însă redus.

4.3. MODALITĂȚI DE OPERARE

La sudarea în mai multe treceri, pentru cusături rotunde și lungi s-a reușit introducerea procedurii în tandem la fel ca sudarea într-o trecere și sudarea poziție-contra poziție.

Sudurile de colț vor fi realizate cu o dispunere a sîrmelor-electrod conform figurii 4.7.

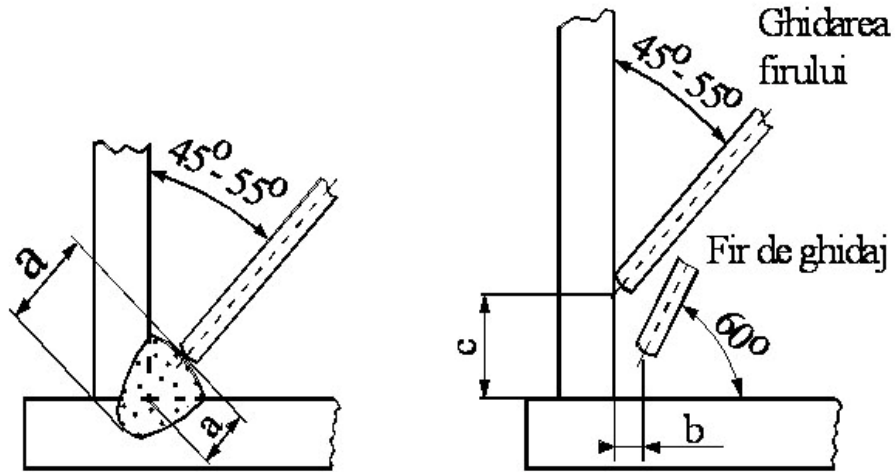


Figura 4.7. Dispunerea sârmelor-electrod la realizarea sudurilor în colț prin sudarea în tandem în curent alternativ, conexiunea Scott

La sudarea în tandem cu două băi se impune determinarea exactă a distanței dintre arcurile electrice. În figura 4.8., se arată influența acesteia asupra formei cusăturii.

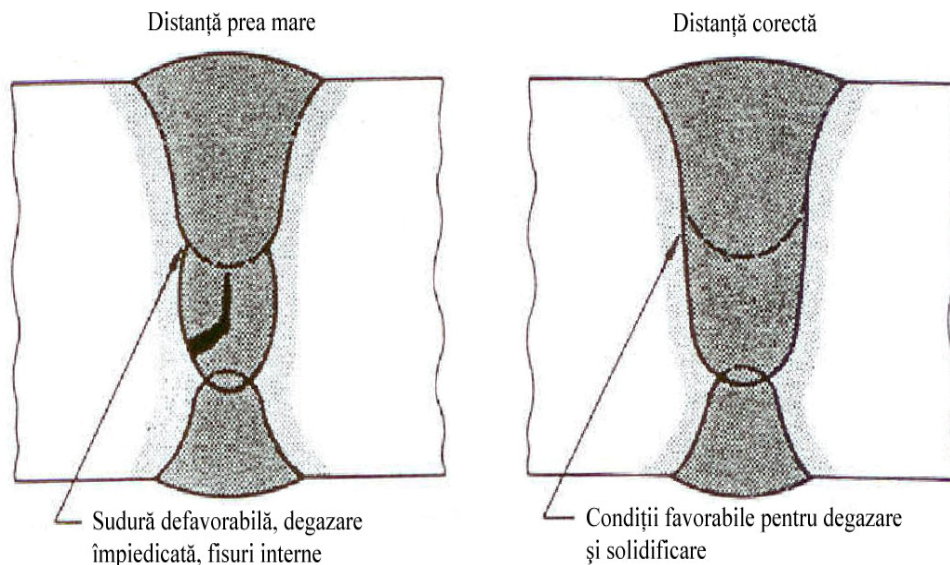


Figura 4.8. Influența distanței dintre arcele electrice la sudarea sub strat de flux în tandem asupra geometriei sudurii

Pentru găsirea distanței corecte ar trebui făcute încercări preliminare numai cu o sârmă. Din lungimea craterului final se poate apoi determina distanța optimă. A doua sârmă se va introduce acolo unde prima cusătură deja se solidifică, iar zgura este încă lichidă. Cu distanța găsită se formează arce solidare, care nu se influențează reciproc.

La sudarea în tandem este posibilă și o dispunere paralelă a sârmelor. De cele mai multe ori însă aceasta se aplică numai la cel de-al doilea cap de sudare în poziție transversală pentru ca lățimea dorită a cusăturii și umplerea rapidă, îndeosebi la îmbinări în **Y** să poată fi atinse. Printr-o densitate mare de curent la această dispunere a electrozilor se topește adânc baza rădăcinii.

La varianta cu sârmă dublă la primul și dispunerea paralelă la al doilea cap de sudare și la viteze mari de sudare, din considerente de siguranță, împotriva porilor și a creștăturilor, se recomandă curent alternativ pentru capul premergător și curent continuu pentru capul alergător. Prin sârmă dublă se înțeleg două sârme-electrod de aceeași grosime așezate transversal sau longitudinal fără distanță între ele, care ies dintr-o duză și sunt conduse în baia topită.

4.4. PROCEDURA EXPERIMENTALĂ. EVALUAREA REZULTATELOR

În cadrul programului experimental au fost realizate îmbinări cap la cap ale unor table din oțel S 355J2 G3 având grosimea de 20 mm. Primul arc electric a operat la un curent de 800-850 A (în curent continuu, polaritate inversă) și o tensiune de 31 ± 1 V, iar diametrul sârmei conducătoare a fost de 4 mm. Cel de-al doilea arc electric (în curent alternativ) a lucrat la un curent de 700-750 A și o tensiune de 36 ± 1 V, diametrul celei de-a doua sârme fiind de 4,8 mm. Viteza de sudare atinsă a avut valori de 89-90 cm/min. Aprecierea calității îmbinărilor sudate s-a făcut prin investigații macro- și micrografice, examinări sclerometrice și analize de difracție cu raze X. În figura 4.9. se arată imaginea macrografică a îmbinării sudate.

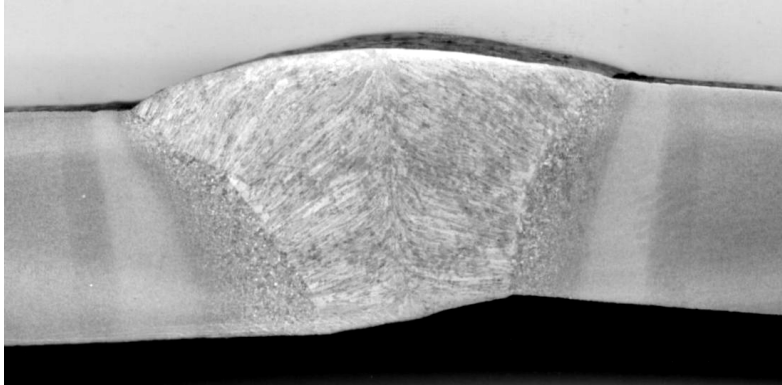


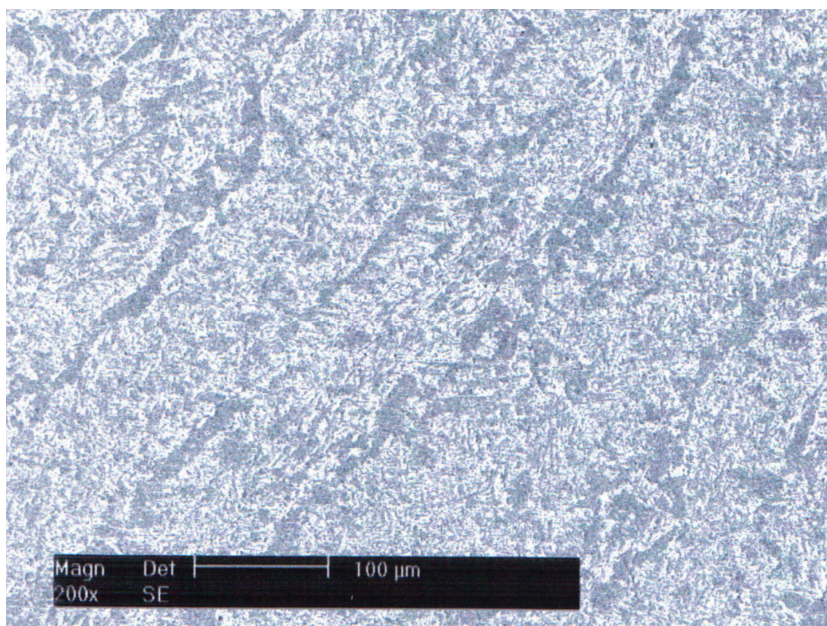
Figura 4.9. Macrografia îmbinării sudate

Așa cum s-a precizat anterior, primul arc electric asigură o mare pătrundere și produce o cusătură îngustă (cu lățime redusă), sensibilă la fisurare. Urmare a solidificării orizontale în mijlocul băii de metal topit, fenomenul de ciocnire între ele a cristalelor formate va fi evitat prin cel de-al doilea arc electric care retopește până la 2/3 din pătrundere și ca urmare în acest domeniu periculos s-a obținut o lățime suplimentară a sudurii.

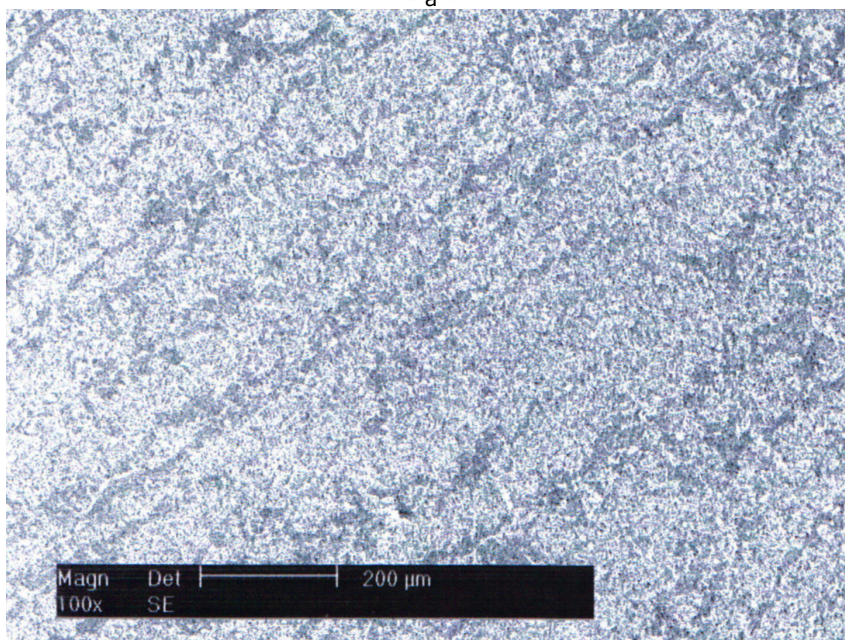
Se observă că direcția de cristalizare se modifică și devine simetrică la mijlocul cusăturii, fiind orientată în sus. În acest fel formarea fisurii de retasură a fost împiedicată. Imaginile micrografice din figurile 4.10. – 4.12., justifică efectele favorabile ale acestui proces de sudare în privința calității îmbinărilor sudate.

La viteze mari de sudare se micșorează valorile energiei liniare și crește viteza de răcire. În plus, forma cusăturii face posibilă o solidificare mai favorabilă a băii de metal topit și o diminuare ușoară a susceptibilității la fisurare la cald. Structura columnară a sudurii conține mai puține impurități provenite din metalul de bază deoarece diluția este mai mică.

Totodată, ca urmare a unei băi mai lungi de metal topit, apare posibilitatea unei degazări favorabile, iar germeii porozităților vor fi distruși de către cel de-al doilea arc electric. Zona influențată termic prezintă o microstructură mai fină comparativ cu sudarea cu o singură sârmă, fapt explicabil prin căldura mai mică introdusă în piese și viteza de răcire mai mare. O asemenea microstructură este avantajoasă pentru obținerea unor caracteristici ridicate de tenacitate.

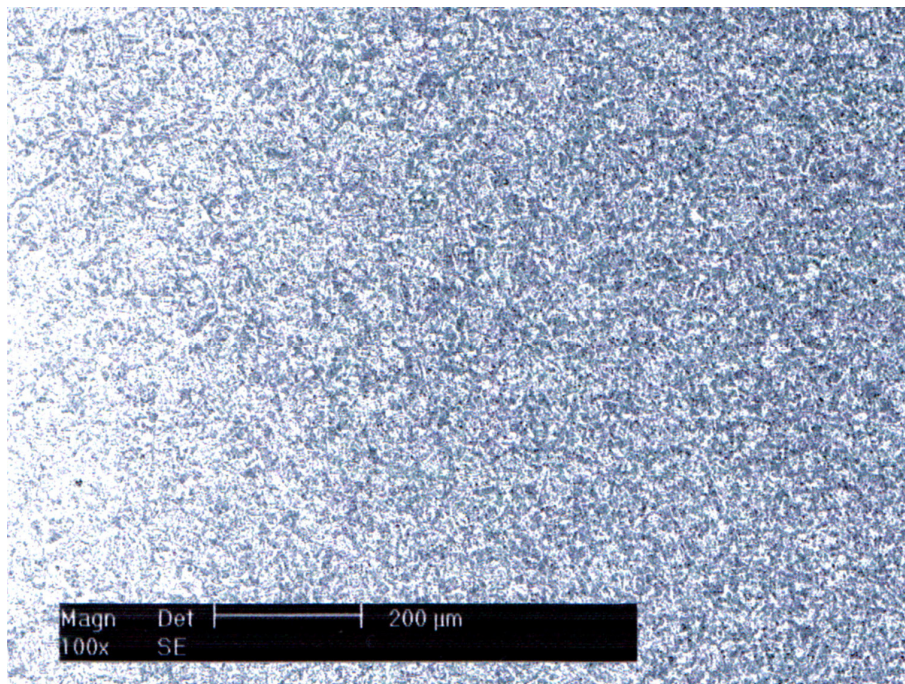


- a -

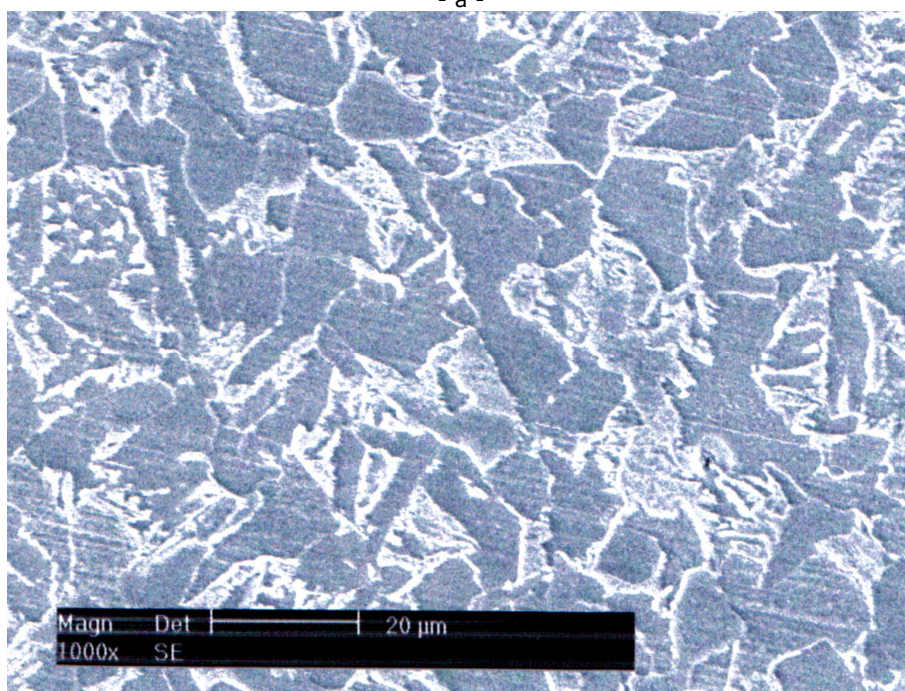


- b -

Figura 4.10. Micrografia sudurii

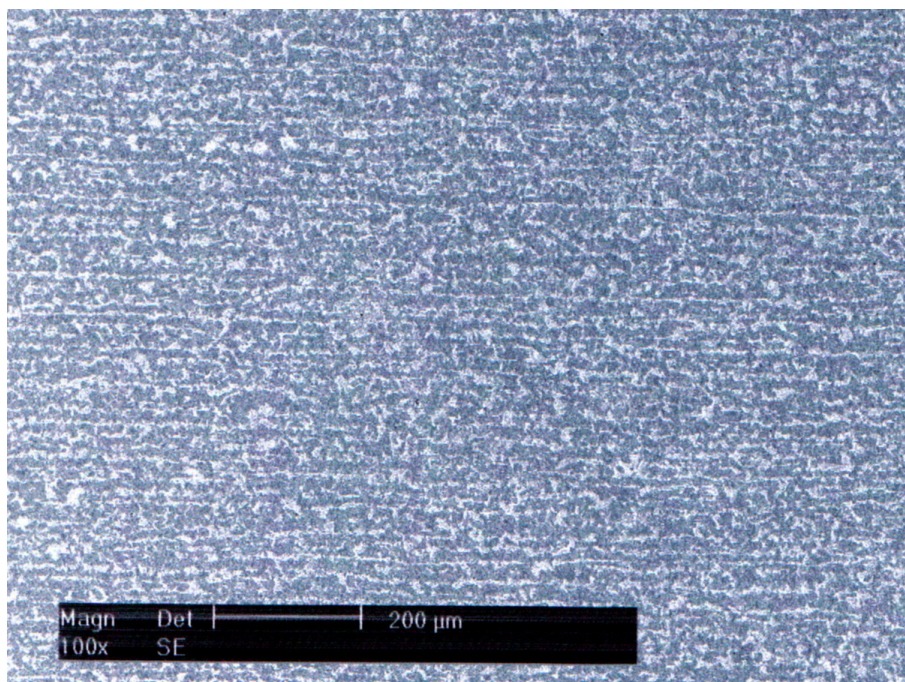


- a -

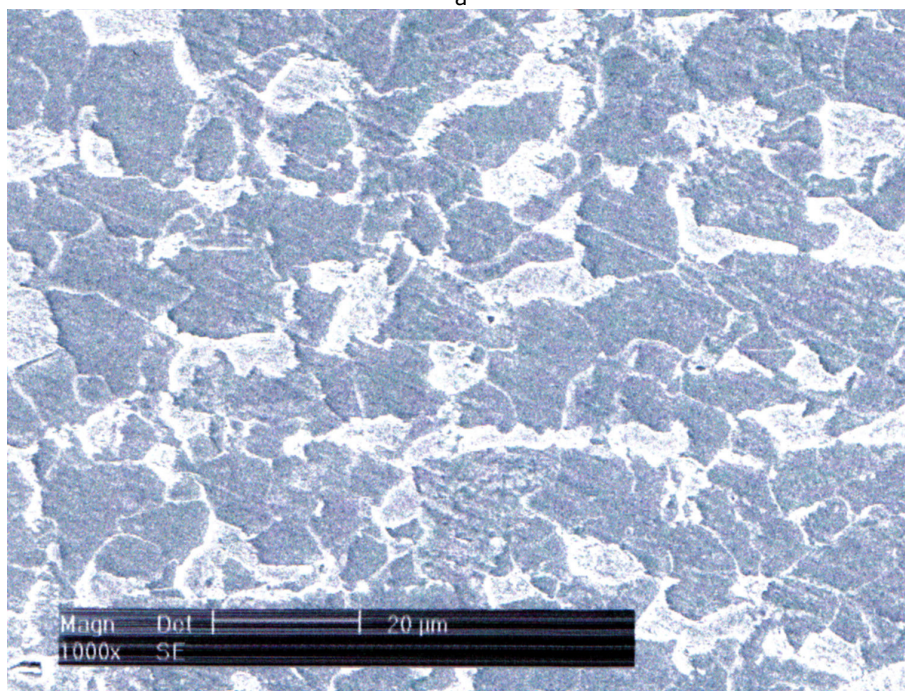


- b -

Figura 4.11. Micrografia Z.I.T. – subzona de supraîncălzire



- a -



- b -

Figura 4.12. Micrografia M.B.

Curba gradient de duritate pe secțiunea transversală a îmbinării sudate, fig. 4.13., demonstrează că durificarea zonei influențate termic și a cusăturii ca urmare a acțiunii de șoc termic a procesului nu este semnificativă și deci la această gamă de oțeluri nu este necesară aplicarea unui tratament termic ulterior sudării. Așa cum era de așteptat cele mai mari valori de duritate (280 – 300 HV5) se obțin în zona influențată termic, ele nefiind periculoase pentru ruperea fragilă a structurii sudate.

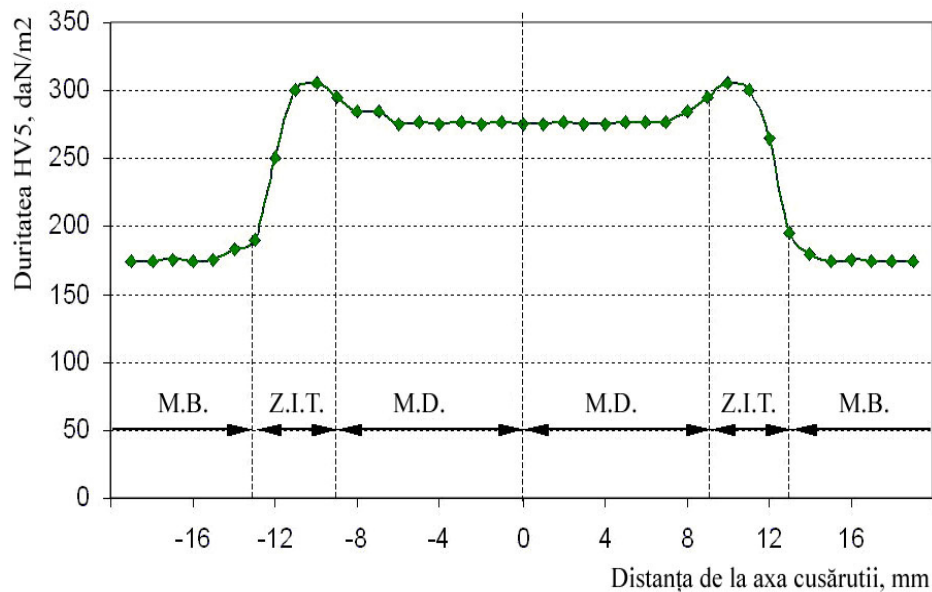


Figura 4.13. Evoluția durității Vickers pe secțiunea transversală a îmbinării sudate

Rezultatele încercărilor de tracțiune statică la temperatura camerei asupra epruvetelor prelevate din îmbinările sudate sunt centralizate în tabelul 4.1. De fiecare dată ruperea s-a produs în metalul de bază, iar valorile caracteristicilor mecanice se încadrează în normele prescrise pentru acest oțel.

Tabelul 4.1. Caracteristicile mecanice ale îmbinărilor sudate din oțel S 355J2 G3

| Nr. probă | Caracteristici mecanice | | | | | | | | Obs. |
|-----------|-------------------------|-----|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| | R _m | | R _{eH} | | A | | Z | | |
| | N/mm ² | | | | % | | | | |
| 1 | 567 | | 431 | | 23,70 | | 58,92 | | |
| 2 | 558 | | 418 | | 24,86 | | 62,60 | | |
| 3 | 572 | 565 | 433 | 428,6 | 22,80 | 23,72 | 58,42 | 59,79 | |

| | | | | | | | | | |
|---|---------|--|----------|--|---------|--|-------|--|-------------------------|
| 4 | 563 | | 430 | | 23,64 | | 59,74 | | |
| 5 | 565 | | 431 | | 23,60 | | 59,28 | | |
| - | 490-630 | | min. 355 | | min. 22 | | - | | Valori presc rise |

Încercările de tenacitate au fost conduse pe epruvete cu creștătură în V. Creștătura a fost plasată fie în zona centrală a sudurii, fie în zona influențată termic la o distanță de 0,5 mm de linia de fuziune. Temperaturile de testare au fost cuprinse între + 20° C și - 20° C. Variația energiei de rupere în funcție de temperatura de încercare pentru cele două stări structurale ale oțelului sudat este arătată în fig. 4.14.

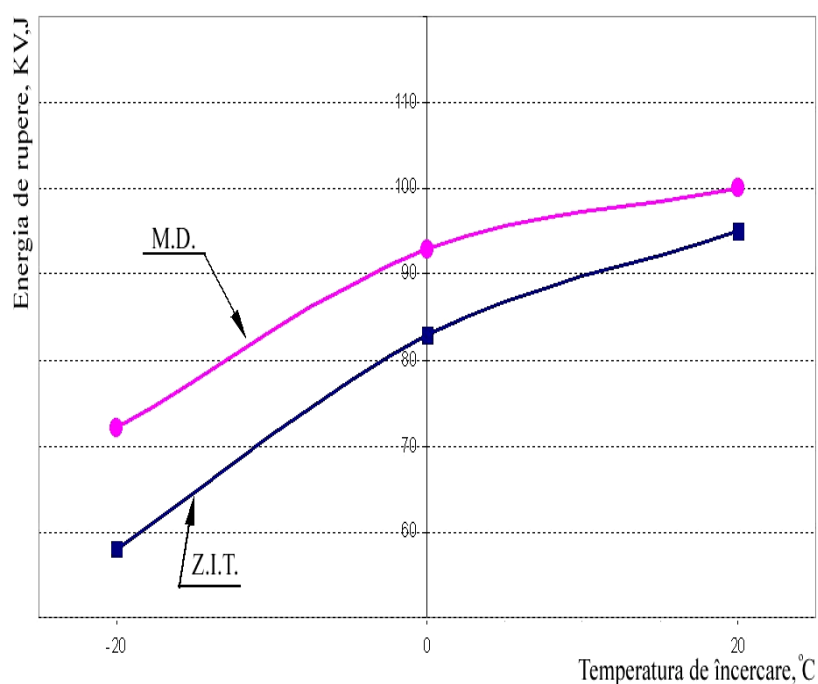


Figura 4.14. Efectul temperaturii de încercare asupra energiei de rupere a Z.I.T. și a sudurii

Datele obținute sunt în concordanță deplină cu informațiile reliefate de investigațiile metalografice și dovedesc o bună rezistență la rupere fragilă a îmbinărilor sudate. La temperaturi de exploatare de - 20° C, energia de rupere are valori de peste 40 J, iar suprafața de rupere are un caracter ductil.

Analizele de difracție cu raze X efectuate pe secțiunea cusăturii sudate (fig. 4.15.) au arătat că structura masei metalice de bază este constituită din ferită. În microstructura dendritică a cusăturii, pe lângă ferită mai apare o cantitate redusă de cementită perlitică și cementită terțiară a cărei prezență nu a putut fi decelată prin acest experiment.

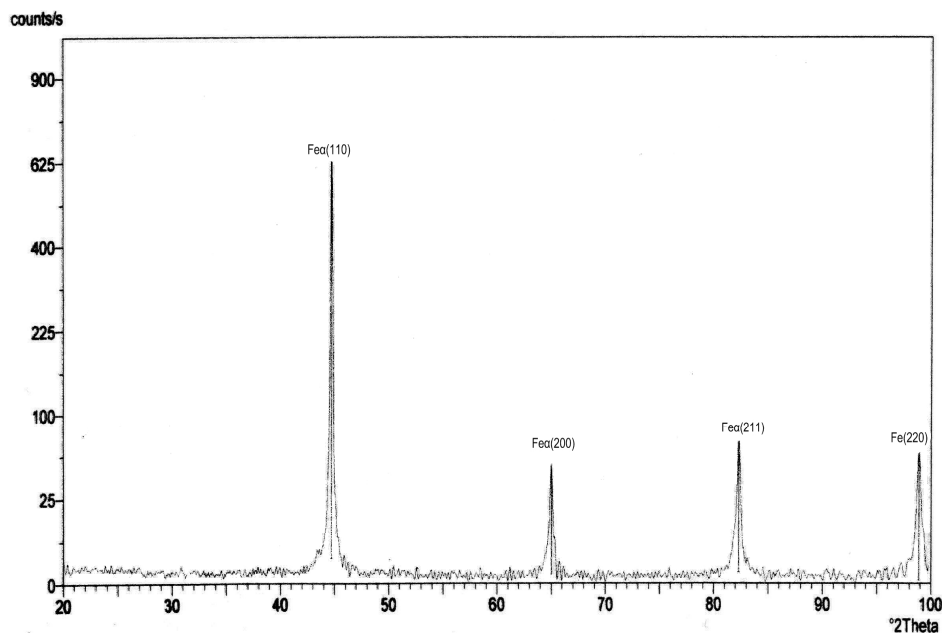


Figura 4.15. Spectrul de difracție caracteristic sudurii cap la cap

4.5. CONCLUZII

1. Procesul de sudare sub strat de flux în tandem asigură o geometrie favorabilă a îmbinării sudate, o structură microscopică mai fină comparativ cu sudarea cu o singură sârmă, o degazare mai bună a băii alungite de metal topit și o micșorare a sensibilității față de fisurarea la cald.

2. Reducerea gradului de diluție cu metalul de bază conduce la diminuarea cantității de impurități prezente în baia topită, iar vitezele mari de sudare se

manifestă prin micșorarea energiei liniare, a pierderilor de energie și prin creșterea vitezei de răcire.

3. Modificările intervenite în macro- și microstructura acestor îmbinări sudate permit obținerea unui ansamblu optim al caracteristicilor de rezistență mecanică și de tenacitate.

5. MODELAREA PROCESULUI DE SUDARE SUB STRAT DE FLUX CU DOUĂ SÂRME

5.1. INTERACȚIUNEA ELECTROMAGNETICĂ LA SUDAREA CU DOUĂ SÂRME

Conform teoriei electromagnetismului, în jurul unui conductor străbătut de un curent electric, materia capătă anumite proprietăți specifice, reunite în conceptul de câmp electromagnetic. Existența într-o vecinătate relativ restrânsă a doi astfel de conductori conduce la intersectarea în spațiu a câmpurilor electromagnetice. Datorită intersectării, cele două câmpuri vor interacționa.

Un astfel de conductor străbătut de un curent, având valori de ordinul sutelor de amperi este și sârma de sudare. Alăturarea a două sârme de sudare conduce la dezvoltarea, în spațiul ocupat de cele două arce și de capetele libere ale sârmelor, a unei interacțiuni electromagnetice. Cercetările experimentale au evidențiat faptul că această interacțiune electromagnetică își pune amprenta sensibil pe stabilitatea procesului de ardere a arcului și de transfer de metal de la capătul sârmei către baie.

5.2. MODELAREA MATEMATICĂ A DEZVOLTĂRII FORȚELOR ELECTRODINAMICE CA EFECT AL INTERACȚIUNII ELECTROMAGNETICE DIN ZONA DE SUDARE

La sudarea cu două sârme, sistemul fizic din zona de sudare constă în existența într-un spațiu relativ redus dimensional a doi conductori străbătuți de curenți, între capetele cărora și piesele de sudat existând arce electrice.

Cele două arce pot fi privite, la rândul lor, ca doi conductori având rezistențe variabile atât în spațiu cât și în timp, de ordinul ohmilor și la capetele cărora se poate măsura o diferență de potențial cuprinsă între 10-50 V.

Din acest motiv se poate accepta modelul fizic constând din doi conductori neomogeni din punct de vedere dimensional și al rezistenței electrice, prin care circulă curenți de ordinul zecilor și sutelor de amperi. Fiind situați la distanțe cuprinse între 3-12 mm unul de celălalt, câmpurile electromagnetice generate de cei doi curenți se vor intersecta și vor interacționa reciproc.

Interacțiunea electromagnetică propriu-zisă constă în dezvoltarea a două forțe electrodinamice cu care fiecare dintre cei doi conductori acționează asupra celuilalt, conform figurii 5.1.

Apariția acestor forțe în zona de sudare va conduce la modificarea procesului de ardere a arcelor și la modificarea modului de transfer al picăturilor de la capetele sârmelor către baie. Modificările în cauză au o influență negativă sau pozitivă asupra conducerii procesului, motiv pentru care este necesară controlarea evoluției acestor forțe în vederea stabilizării procesului de sudare.

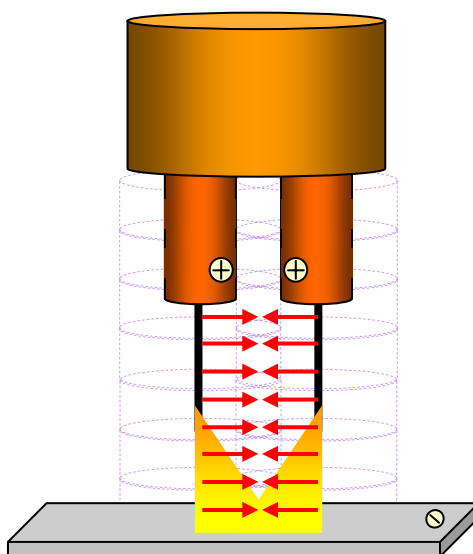


Figura 5.1. Intersectarea câmpurilor electromagnetice din jurul celor două sârme de sudare și dezvoltarea forței electrodinamice

În vederea controlării dezvoltării, ca sens și modul, a forțelor electrodinamice este necesară crearea unui model matematic bazat pe modelul fizic

prezentat anterior. Acest model fizic este asemănător modelului care definește noțiunea de amper, deci modelarea matematică a forțelor electrodinamice va avea la bază teorema Biot-Savart-Laplace.

Pentru aplicarea acestei teoreme este necesară discretizarea conductorilor în segmente cu dimensiuni elementare: dl_1 și dl_2 . În vederea realizării unui model matematic cu aplicabilitate generală, se consideră că poziționarea relativă a celor doi conductori este oarecare în spațiu. Se particularizează numai sensurile celor doi curenți. În cazul general al sudării sub strat de flux polaritatea curentului este inversă (polul "+" la sârma electrod). Situațiile excepție sunt rare și sunt specifice sudării cu sârme care prezintă un înalt caracter bazic. Pentru unele din aceste sârme producătorii recomandă utilizarea polarității directe (polul "-" la sârma electrod).

Noul model fizic astfel creat este prezentat în figura 5.2. În baza legilor electromagnetismului, cunoscându-se direcția și sensul curenților, în modelul fizic poate fi introdus vectorul inducție magnetică, \vec{B} , iar cu ajutorul regulii mâinii stângi, vectorul forță electrodinamică, \vec{F}_{ed} .

Pentru fiecare conductor în parte, vectorii inducție magnetică, forță electrodinamică și vectorul unității de lungime a conductorului sunt perpendiculari. Între vectorul inducție magnetică care acționează asupra unui conductor și vectorul unității de lungime al celuilalt conductor există însă un unghi α dat de poziționarea relativă, în spațiu, a celor doi conductori.

Direcția vectorului inducție magnetică, \vec{B} , într-un punct al câmpului este tangentă la linia de câmp magnetic în acel punct, iar sensul este același cu cel al liniei de câmp. Forța electromagnetică, \vec{F} , este perpendiculară pe direcția conductorului și pe liniile câmpului magnetic, deci și pe vectorul \vec{B} , iar sensul ei depinde de sensul curentului și de sensul liniilor de câmp, deci și de sensul vectorului \vec{B} .

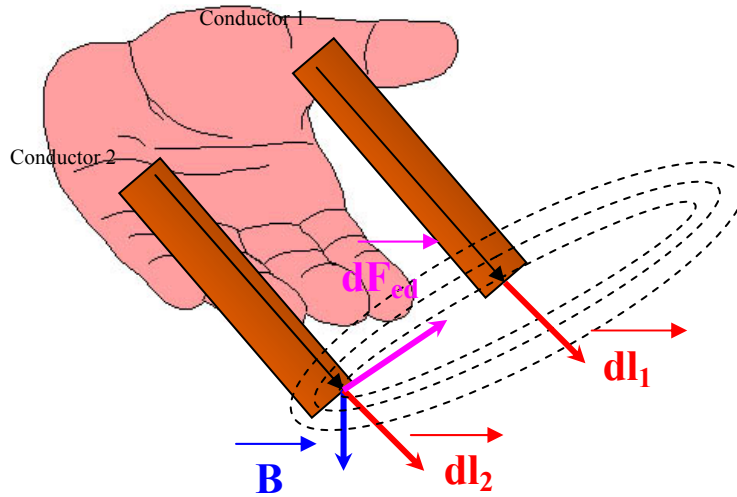


Figura 5.2. Modelul fizic considerat pentru aplicarea teoremei Biot-Savart-Laplace

Forța electromagnetică este dependentă de curentul prin conductor și de produsul vectorial dintre inducția magnetică și lungimea conductorului, dată de expresia (5.1).

$$\vec{F} = I \cdot (\vec{B} \times \vec{l}) \quad (5.1)$$

Aplicând acestei relații teorema Biot-Savart-Laplace este posibilă exprimarea matematică a modului forței electrodinamice. Aplicarea teoremei Biot-Savart-Laplace presupune două etape. Prima etapă constă în determinarea intensității câmpului magnetic la o distanță oarecare r . În baza definiției intensității câmpului magnetic, \vec{H} , se poate scrie:

$$d\vec{H} = \frac{I_2 \cdot (d\vec{l}_2 \times \vec{r})}{4 \cdot \pi \cdot r^3} \quad (5.2)$$

Conform figurii 5.3, produsul vectorial $(d\vec{l}_2 \times \vec{r})$ se poate exprima scalar prin relația (x.3).

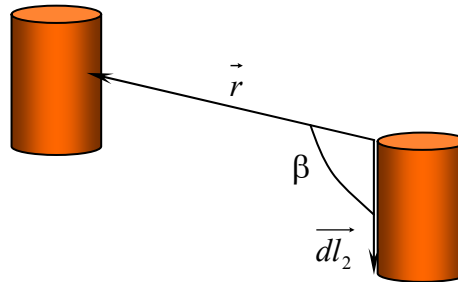


Figura 5.3. Reprezentarea fizică a produsului vectorial $(\vec{dl}_2 \times \vec{r})$

$$(\vec{dl}_2 \times \vec{r}) = dl_2 \cdot r \cdot \sin \beta \quad (5.3)$$

unde β este unghiul dintre cei doi vectori ai produsului. În acest caz, expresia intensității câmpului magnetic devine succesiv:

$$|d\vec{H}| = \frac{I_2 \cdot dl_2 \cdot r \cdot \sin \beta}{4 \cdot \pi \cdot r^3} \quad (5.4)$$

$$|d\vec{H}| = \frac{I_2 \cdot dl_2 \cdot \sin \beta}{4 \cdot \pi \cdot r^2} \quad (5.5)$$

Datorită relației dintre inducția câmpului magnetic, \vec{B} și intensitatea câmpului magnetic, \vec{H} :

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} \quad (5.6)$$

se poate scrie:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{I_2 \cdot dl_2 \cdot \sin \beta}{r^2} \quad (5.7)$$

Cea de-a doua etapă a aplicării teoremei Biot-Savart-Laplace constă în determinarea forței electrodinamice elementare care acționează asupra elementului de conductor electric din ecuațiile (5.1) și (5.7). Înlocuind expresia inducției magnetice (5.7) în expresia forței electromagnetice (5.1), rezultă succesiv:

$$|d^2\vec{F}| = \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{I_2 \cdot dl_2 \cdot \sin \beta}{r^2} \cdot I_1 \cdot dl_1 \cdot \sin \alpha \quad (5.8)$$

$$|d^2\vec{F}| = \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot \frac{dl_1 \cdot dl_2 \cdot \sin \alpha \cdot \sin \beta}{r^2} \quad (5.9)$$

unde α este unghiul dintre vectorii inducție magnetică, \vec{B} și primul conductor \vec{l}_1 .

Acesta este un model general al forței electrodinamice. Modelul specific sudării cu două sârme este prezentat în figura 5.4.

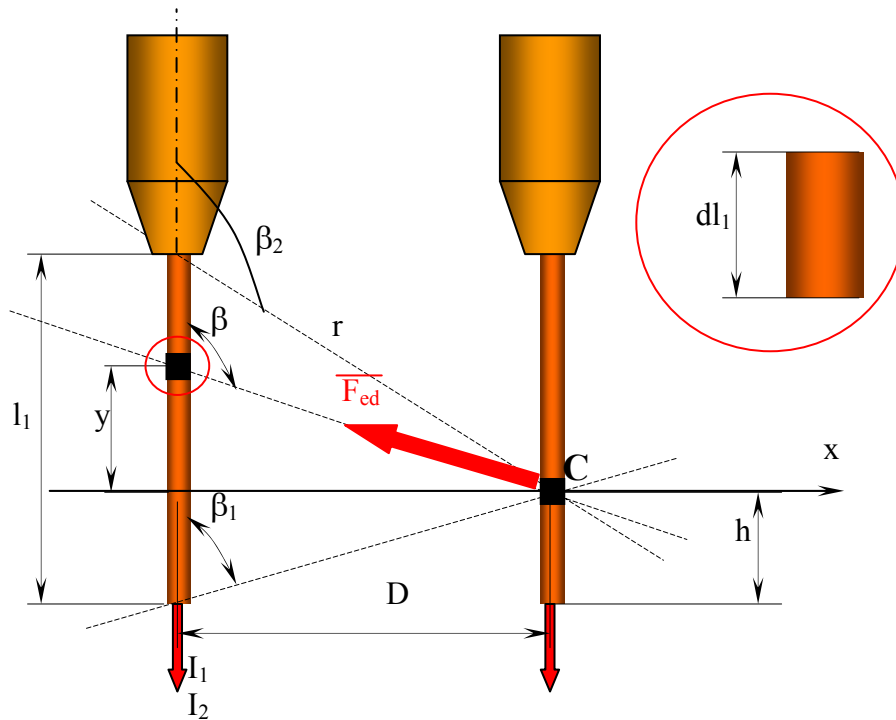


Figura 5.4. Modelul fizic specific sudării cu două sârme, necesar aplicării teoremei Biot-Savart-Laplace

Conform relației (5.7) inducția câmpului magnetic creat de curentul I_1 în punctul C (centrul elementului dl_2), după axa x , de către elementul dy este dată de relația (5.10):

$$|d\vec{B}_C| = \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{I_1 \cdot dy \cdot \sin \beta}{r^2} \quad (5.10)$$

Conform relației (5.1) elementul de curent $I_1 \cdot dy$ acționează asupra elementului $I_2 \cdot dl_2$ cu o forță elementară de forma:

$$\left| d^2 \vec{F}_{edC} \right| = I_2 \cdot dl_2 \cdot \left| d\vec{B}_C \right| \quad (5.11)$$

sau preluând expresia inducției câmpului magnetic din relația (5.10):

$$\left| d^2 \vec{F}_{edC} \right| = I_2 \cdot dl_2 \cdot \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{I_1 \cdot dy \cdot \sin \beta}{r^2} \quad (5.12)$$

Din rațiuni geometrice, conform figurii 5.5, se poate scrie:

$$dy = \frac{D}{\sin^2 \beta} \cdot d\beta \quad (5.13)$$

astfel încât forța elementară, (5.12), care acționează devine succesiv:

$$d^2 F_{ed} = I_2 \cdot dl_2 \cdot \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{I_1 \cdot \frac{D}{\sin^2 \beta} \cdot d\beta \cdot \sin \beta}{r^2} \quad (5.14)$$

$$d^2 F_{ed} = I_1 \cdot I_2 \cdot dl_2 \cdot \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{\frac{D}{\sin^2 \beta} \cdot d\beta \cdot \sin \beta}{\left(\frac{D}{\sin \beta} \right)^2} \quad (5.15)$$

$$d^2 F_{ed} = I_1 \cdot I_2 \cdot dl_2 \cdot d\beta \cdot \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{\sin \beta}{D} \quad (5.16)$$

$$d^2 F_{ed} = I_1 \cdot I_2 \cdot dl_2 \cdot \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{\sin \beta \cdot d\beta}{D} \quad (5.17)$$

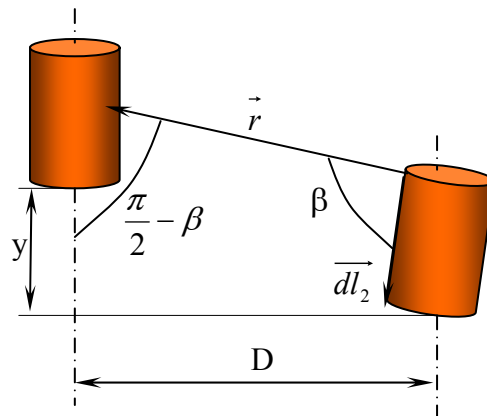


Figura 5.5. Modelul geometric pentru exprimarea elementului de curent $I dy$

Întreaga forță dezvoltată de către elementele sârmei dl_1 asupra dl_2 care există în C, poate fi determinată cu relația (5.18):

$$d^2 F_{ed} = I_1 \cdot I_2 \cdot dl_2 \cdot \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{\cos \beta_1 - \cos \beta_2}{D} \quad (5.18)$$

Direcția forței este perpendiculară pe sârmă, sensul ei depinzând de polaritățile celor doi curenți.

Deoarece în cazul sudării sub strat de flux este utilizată, de regulă, polaritatea inversă ("+" la electrod), direcția forței electrodinamice este de la o sârmă către cealaltă. Efectul acestei orientări este devierea celor două arce de sudare unul către celălalt (figura 5.6).

Picăturile, de asemenea, sunt deviate către centrul băii de metal. Când este utilizată polaritatea directă ("- la electrod), cazul sudării cu o sârmă cu caracter înalt bazic iar cealaltă sârmă de alt tip (deci polaritate inversă), cele două arce sunt îndepărtate unul de celălalt.

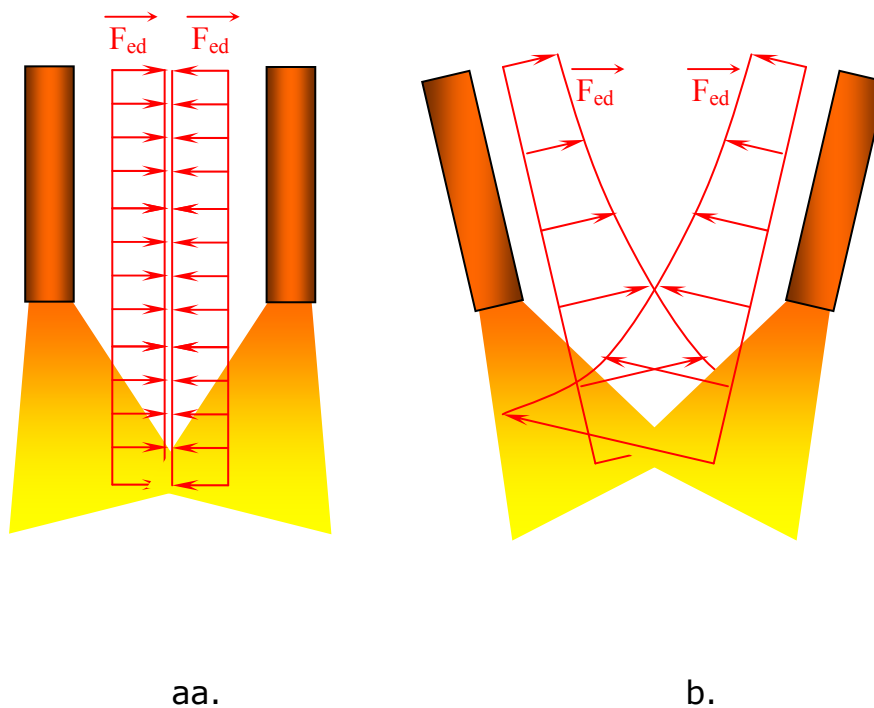


Figura 5.6. Direcția și sensul forțelor electrodinamice când conductorii sunt paraleli (a.) și când conductorii nu sunt paraleli (b.)

În cazul în care cele două sârme de sudare sunt paralele, expresia (5.18) are o formă redusă, simplificată din rațiuni geometrice. Este chiar situația clasică de definire a amperului ca și unitate de măsură. Dacă cele două sârme sunt paralele unghiurile β_1 și β_2 capătă valorile:

$$\beta_1 = 0 \quad (5.19)$$

$$\beta_2 = \pi \quad (5.20)$$

Introducând aceste valori în expresia (5.18) aceasta devine:

$$F_{ed} = I_1 \cdot I_2 \cdot l \cdot \frac{\mu_0}{2 \cdot \pi \cdot D} \quad (5.21)$$

În figura 5.7 este prezentată grafic variația forței electrodinamice pentru o serie de perechi de curenți de sudare, distanța dintre sârme fiind de 10 mm.

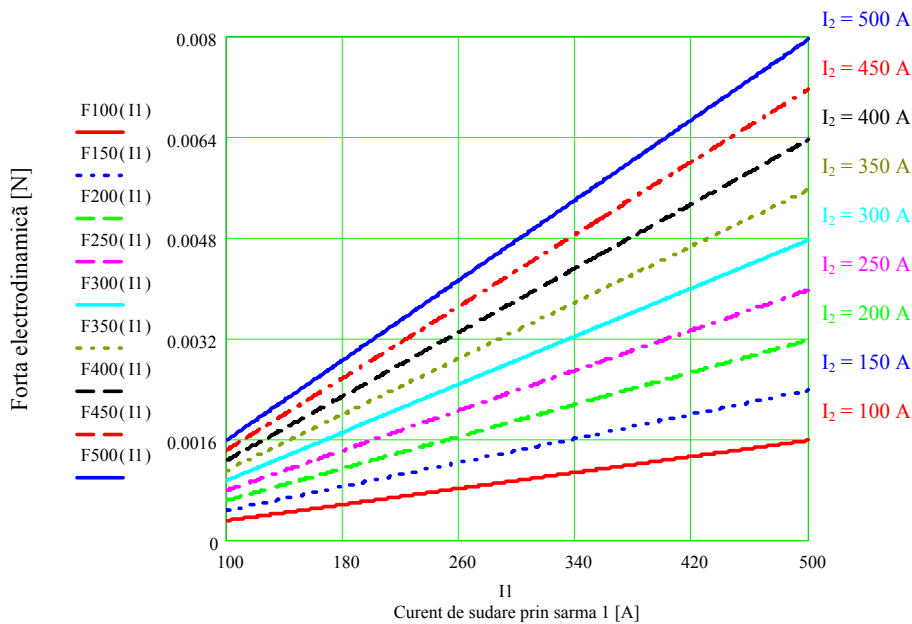


Figura 5.7. Forța electrodinamică în cazul a două sârme paralele

Atât expresia (5.18) cât și expresia (5.21) sunt valabile în cazul conductorilor filiformi. Renunțând la această ipoteză și considerând situația reală a două sârme de sudare solide cu secțiunile circulare având razele R_1 și R_2 (figura 5.8 a) se poate scrie inducția magnetică în interiorul conductorului la distanța x față de centrul conductorului (figura 5.8 b):

$$B = I S_2 \cdot \frac{\mu_0}{R_1^2 \cdot \pi} \cdot \frac{l_1}{2 \cdot \pi \cdot x} \cdot \pi^2 \cdot x^2 \quad (5.22)$$

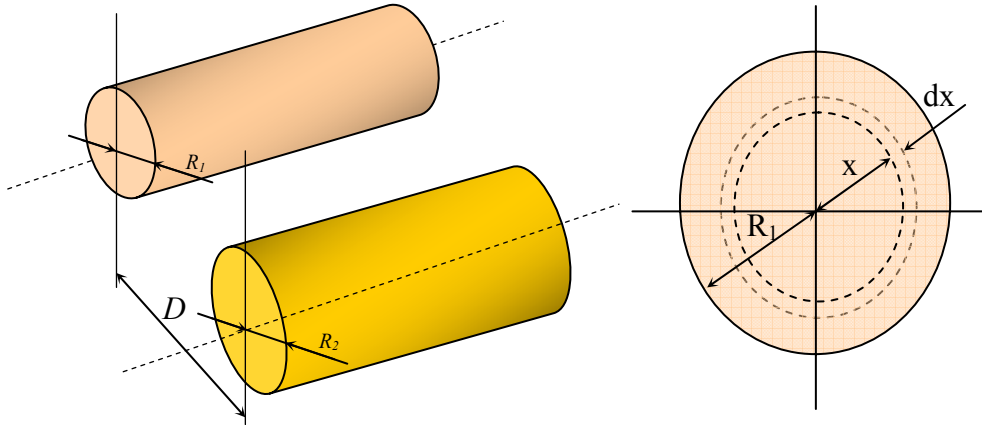


Figura 5.8. Modelul nesimplificat considerat în calcul

Continuând pe raționamentul anterior, expresia forței electrodinamice dezvoltate în cazul a doi conductori paraleli cu lungimea l , având secțiunea circulară și aflați la distanța D unul de celălalt este:

$$F_1 = \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot l \cdot \frac{2}{D - R_2} \cdot \left[\sqrt{1 + \left(\frac{D - R_2}{l} \right)^2} - \frac{D - R_2}{l} \right] \quad (5.23)$$

$$F_2 = \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot l \cdot \frac{2}{D - R_1} \cdot \left[\sqrt{1 + \left(\frac{D - R_1}{l} \right)^2} - \frac{D - R_1}{l} \right] \quad (5.24)$$

sau în cazul în care cele două sârme de sudare au aceeași secțiune:

$$R_1 = R_2 = R \quad (5.25)$$

$$F = \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot l \cdot \frac{2}{D - R} \cdot \left[\sqrt{1 + \left(\frac{D - R}{l} \right)^2} - \frac{D - R}{l} \right] \quad (5.26)$$

Utilizând o foaie de calcul dintr-un program de calcul tabelar de tip EXCEL se pot determina valorile forței electrodinamice pentru orice situație concretă de interacțiune electromagnetică ce poate apare la sudarea cu mai multe sârme.

Este evidentă influența puternică a valorilor curenților de sudare și lungimilor capetelor libere ale sârmelor asupra modulului forței electrodinamice. Existența simultană a doi curenți de ordinul sutelor de amperi conduce la obținerea unor forțe de ordinul mili-newton-ilor, ceea ce înseamnă relativ mult pentru un arc a cărui rigiditate este în general doar puțin mai mare decât rigiditatea vânei de fluid de protecție care îl înconjoară.

Interpretând fizic relația (5.17), cu cât analiza modulului forței electrodinamice se apropie de baia de metal, cu atât valoarea locală este mai mare, în cazul în care capetele dinspre arce ale sârmelor se apropie.

Modelele matematice prezentate sunt destinate corectării modificărilor introduse de forțele electrodinamice în sistemul senzor-arc.

Pentru o mai bună imagine a ceea ce înseamnă valoarea forței electrodinamice și efectul ei asupra arcului de sudare, în figura 5.9 s-au prezentat valorile calculate ale forței electrodinamice pentru un caz concret de sudare.

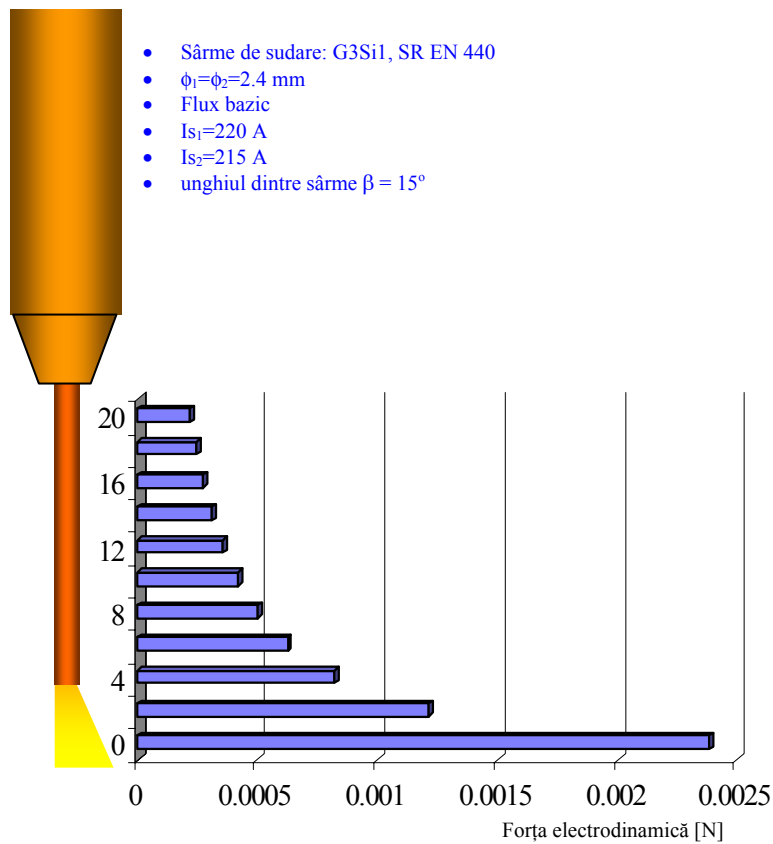


Figura 5.9. Vizualizarea evoluției valorilor calculate ale forței electrodinamice

Aplicând modelul prezentat anterior au putut fi determinate valorile modului forței electrodinamice pentru o serie cuprinzătoare de perechi de curenți de sudare. Astfel, în figurile 5.10 și 5.11 sunt prezentate grafic rezultatele calculului forțelor electrodinamice conform modelului matematic construit pe baza ecuației Biot-Savart-Laplace, în cazul sudării standard.

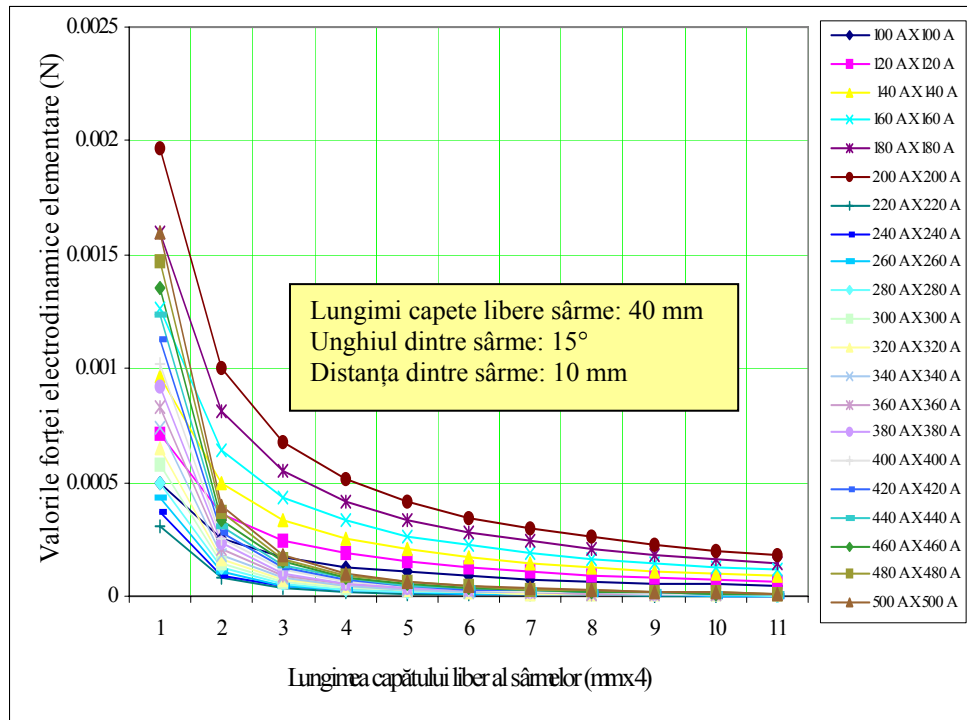


Figura 5.10. Valorile calculate ale forței electrodinamice elementare

5.3. INFLUENȚA INTERACȚIUNII ELECTROMAGNETICE ASUPRA CURENTULUI DE SUDARE EFECTIV

Cercetările experimentale efectuate au evidențiat existența unei influențe importante a interacțiunii electromagnetice asupra valorilor efective ale curenților prin arcele de sudare. Influența respectivă se datorează a două fenomene fizice a căror dezvoltare este strâns legată de existența forțelor electrodinamice în spațiul celor două arce:

- modificarea modului de transfer de metal către baia de sudură sub influența forțelor electrodinamice;

- modificarea cantității de căldură care participă la topirea celei de-a doua sârme în sensul de avans, în cazul sudării în tandem.

Existența forțelor electrodinamice în spațiul ocupat de cele două arce înseamnă modificarea sistemului de forțe care acționează asupra picăturii care urmează a fi transferate. După cum se va prezenta în subcapitolul următor, forțele electrodinamice, prin direcția, sensul și modulul lor, sunt forțe care ajută la desprinderea picăturilor de metal de la capetele sârmelor. În acest caz cantitatea de metal transferat crește comparativ cu situația specifică sudării cu o singură sârmă.

Cum sistemul sursă de putere – arc de sudare funcționează după legea “viteza de topire și transfer a metalului sârmei trebuie să fie tot timpul egală cu viteza de avans al sârmei”, atunci sursa de putere va modifica parametrii electrici astfel încât să restabilească echilibrul.

Cu alte cuvinte, procesul prezentat decurge în felul următor:

- forțele electrodinamice dezvoltate în spațiul celor două arce de sudare măresc rata de transfer a metalului de la capetele sârmelor către baie

Fed ⇒ ↑ cantității de metal transferat ⇒ $V_{topire} \neq V_{avans}$ al sârmei

- efectul acestei mărimi va consta, în primă fază, în dezechilibrarea sistemului de sudare în sensul că arcul va fi alimentat în acest caz cu o cantitate insuficientă de sârmă pentru a putea menține echilibrul dintre viteza de topire și viteza de avans al sârmei electrod

$V_{topire} \neq V_{avans}$ al sârmei ⇒ dezechilibrarea sistemului de sudare: $P_{emisă} > P_{necesară}$

- pentru reechilibrarea sistemului sursa va fi nevoită să modifice puterea de topire pe care o emite, acțiune care va consta fizic în reducerea curentului de sudare

Sursa de putere: ↓ curentul prin arc ⇒ $P_{emisă}$ ↓ ⇒ echilibrarea sistemului

Această reacție în lanț a fost evidențiată experimental prin trecerea forțată de la sudarea cu o singură sârmă la sudarea cu două sârme și invers, parametrii electrici de sudare fiind înregistrați de-a lungul întregului proces.

A doua modificare introdusă de interacțiunea electromagnetică constă în modificarea cantității de căldură care participă la topirea celei de-a doua sârme în direcția de avans a capului de sudare, la sudarea în tandem. Această situație este specifică sudării cu viteze mai mari de 50 cm/min. Ținând cont că viteze de 50-200 cm/min sunt uzuale pentru acest procedeu de sudare, se poate considera că această modificare introdusă de interacțiunea electromagnetică caracterizează, în general, procesul de sudare cu două sârme.

Imaginând un sistem fizic de sudare cu două sârme evoluând în tandem față de direcția de sudare (figura 5.11.) se poate observa că devierea primului arc este, în general, mai accentuată decât devierea celui de-al doilea. Acest fenomen este datorat frecării dintre arcul cald și aerul rece la deplasarea cu viteze de sudare relativ mari, arcul având o rigiditate redusă, dată de valorile parametrilor electrici și de existența metalului topit care se transferă.

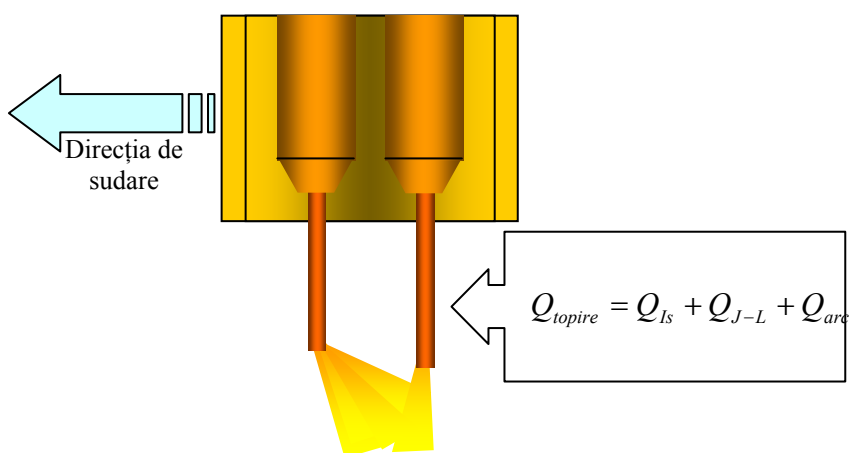


Figura 5.11. Devierea primului arc către cea de-a doua sârmă și constituirea sa într-o sursă suplimentară de căldură

În acest caz, conform figurii 5.11, căldura care va participa la topirea sârmei a doua în sensul de avans al sudării este constituită din însumarea a trei surse termice: arcul electric propriu, efectul Joule-Lenz dezvoltat pe lungimea capătului liber al sârmei și căldura provenită de la primul arc deviat.

Transferul termic de la unul din arce către cealaltă sârmă se face preponderent prin radiație. O oarecare cantitate de căldură este, însă, transmisă și prin conducție datorită contactului direct dintre arc, flux și sârma vecină. Deși acest contact direct este, în general, variabil și temporar, pentru simplificarea modelului

matematic se va considera că acest contact este constant și continuu, cantitatea de căldură transferată prin conducție fiind în acest caz invariabilă.

Modelul fizic considerat este prezentat în figura 5.12. Arcul electric este acceptat în formă tronconică stratificată, fiecare strat fiind caracterizat printr-o distribuție proprie a temperaturilor (figura 5.13).

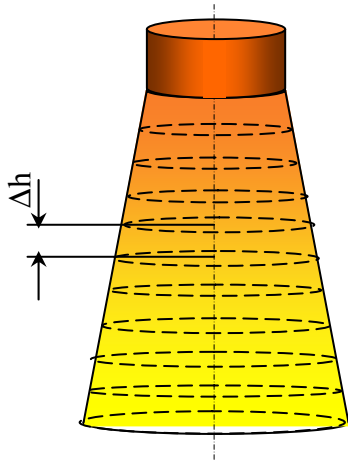


Figura 5.12. Modelul fizic al arcului considerat

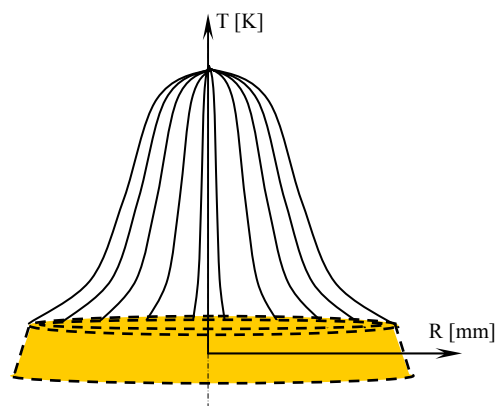


Figura 5.13. Distribuția temperaturilor în arc pentru studiul transferului termic

Acceptând distribuția termică propusă de Ushio și Matsuda în 1982 și acceptată de către Institutul Internațional de Sudură (IIW-IIS) în același an (figura 5.14), se propune acceptarea valorii de 6000 K drept temperatura constantă a învelitoarei tronconului, considerat drept sursă de radiație termică. Se consideră o valoare minimă pentru a se simplifica modelul prin neglijarea dispersiei termice datorită curentului de aer.

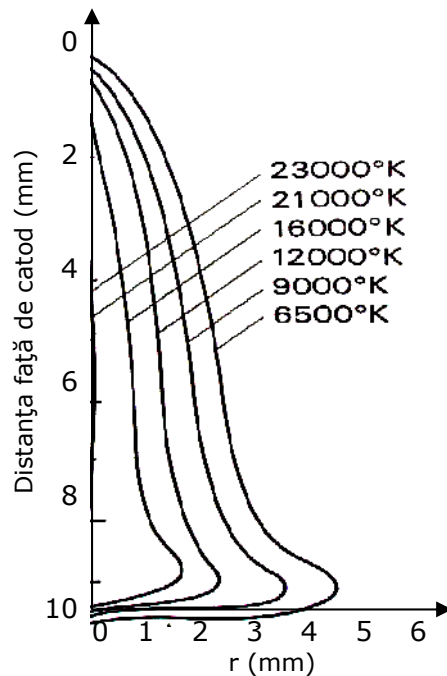


Figura 5.14 Distribuția termică în arcul MAG pentru un curent de 200 A și o lungime a arcului de 10 mm, după Ushio și Matsuda, 1982

Fiecare strat considerat componentă a arcului va emite o cantitate de energie termică, fluxul acesteia putând fi cuantificat cu relația:

$$q = \sigma \cdot T^4 \quad (5.27)$$

unde:

σ - coeficientul Stephan-Boltzmann pentru radiația termică, $\left[\frac{W}{m^2 \cdot K^4} \right]$

T - temperatura medie a sursei termice [K].

Acest flux termic este creat de către sursa termică având emisia $Q_{sursă}$ printr-o suprafață tronconică elementară, $A_{sursă,r}$ adică:

$$Q_{sursă} = q \cdot A_{sursă} \quad (5.28)$$

Din relațiile (5.27) și (5.28) se poate determina cantitatea de căldură emisă de sursă:

$$Q_{sursă} = \sigma \cdot T^4 \cdot A_{sursă} \quad (5.29)$$

sau:

$$Q_{sursă} = \sigma \cdot T^4 \cdot 2 \cdot \pi \cdot R_m \cdot \Delta h \quad (5.30)$$

unde:

R_m – raza medie a elementului tronconic (fiind vorba de un troncon cu înălțime elementară, cele două raze ale bazelor elementului tronconic pot fi considerate egale), [m]

Δh – înălțimea elementului tronconic [m].

Această cantitate de căldură este emisă, însă, în toate direcțiile. Doar o parte a acestei emisii este recepționată de sârma vecină. Determinarea procentuală a cantității de căldură recepționată de sârma vecină este posibilă, acceptând faptul că fiecare element emisiv din componența elementului tronconic emite spațial. Această ipoteză este prezentată în figura 5.15.

Din rațiuni geometrice se pot scrie 4 ecuații cu 4 necunoscute, conform sistemului:

$$\begin{cases} x = D - y \\ z^2 = D^2 - x^2 \\ (D + w)^2 = D^2 + l_{cl}^2 \\ \frac{w}{w + D} = \frac{y}{D} \end{cases} \quad (5.31-5.34)$$

Din acest sistem rezultă succesiv dimensiunea z necesară în calculul procentului de energie primită de sârma de sudare.

Din ecuația (5.34) rezultă expresia lui y :

$$y = \frac{D \cdot w}{D + w} \quad (5.35)$$

În această expresie se introduce expresia lui w rezultată din ecuația (5.33):

$$w = \sqrt{D^2 + l_{cl}^2} - D \quad (5.36)$$

Rezultă succesiv:

$$y = \frac{D \cdot (\sqrt{D^2 + l_{cl}^2} - D)}{\sqrt{D^2 + l_{cl}^2}} \quad (5.37)$$

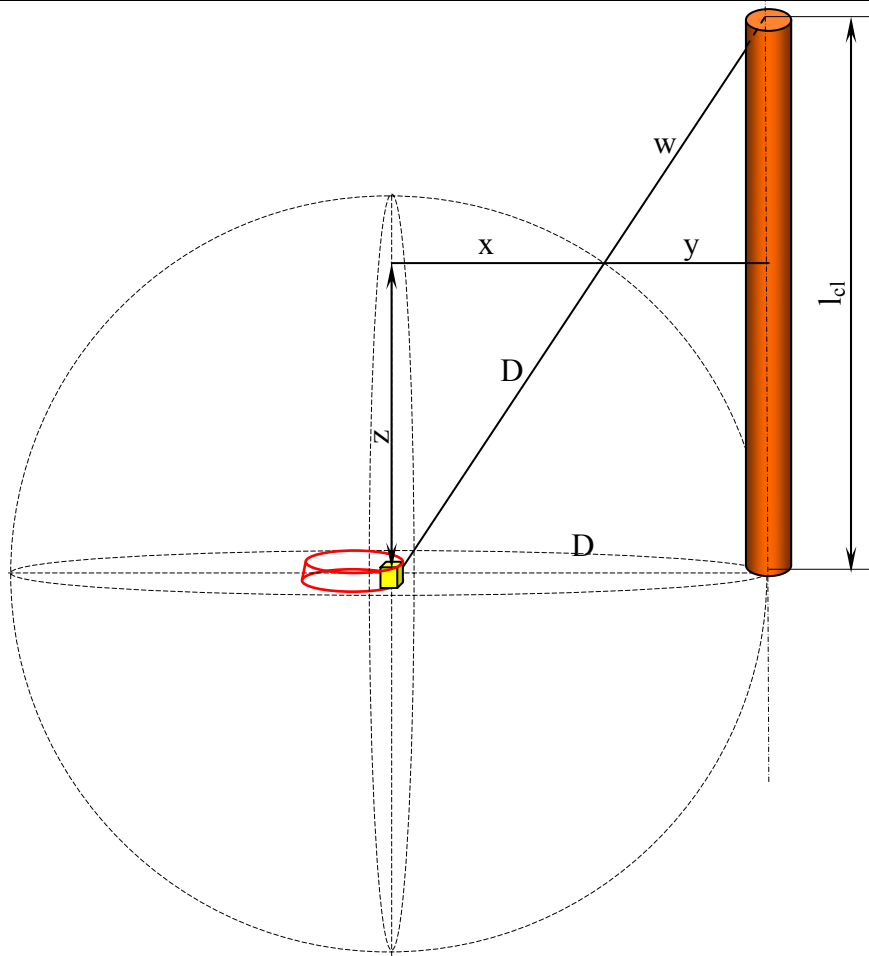


Figura 5.15. Modelul fizic considerat pentru emisie de energie termică și transfer prin radiație

$$y = D - \frac{D^2}{\sqrt{D^2 + l_{cl}^2}} \quad (5.38)$$

Introducând pe y în prima ecuație a sistemului rezultă expresia lui x în funcție de distanța dintre sârme D și lungimea capătului liber l_{cl} .

$$x = \frac{D^2}{\sqrt{D^2 + l_{cl}^2}} \quad (5.39)$$

Din ecuația (5.32) rezultă astfel expresia lui z :

$$z = \sqrt{\frac{D^2 \cdot l_{cl}^2}{D^2 + l_{cl}^2}} \quad (5.40)$$

Procentul de căldură receptat de sârma de sudare, prin radiație, de la un element al arcului vecin este dată de relația:

$$X_{1,2} = \frac{z \cdot \phi_s}{A_{\text{sup } r\text{-radiante}}} \quad (5.41)$$

Din relațiile (5.40) și (5.41) rezultă prin înlocuirea expresiei lui z :

$$X_{1,2} = \frac{\sqrt{\frac{D^2 \cdot l_{cl}^2}{D^2 + l_{cl}^2}}}{\pi \cdot D^2} \cdot \phi_s \quad (5.42)$$

Acest procent depinde de viteza cu care se deplasează sistemul arc-sârmă. Acceptând distribuția termică a lui Ushio și Matsuda, se poate determina o relație între timpul necesar sârmei pentru a ajunge într-unul din punctele A, B, C, D sau O (figura 5.16) și temperatura punctului respectiv considerat drept sursă de radiație termică.

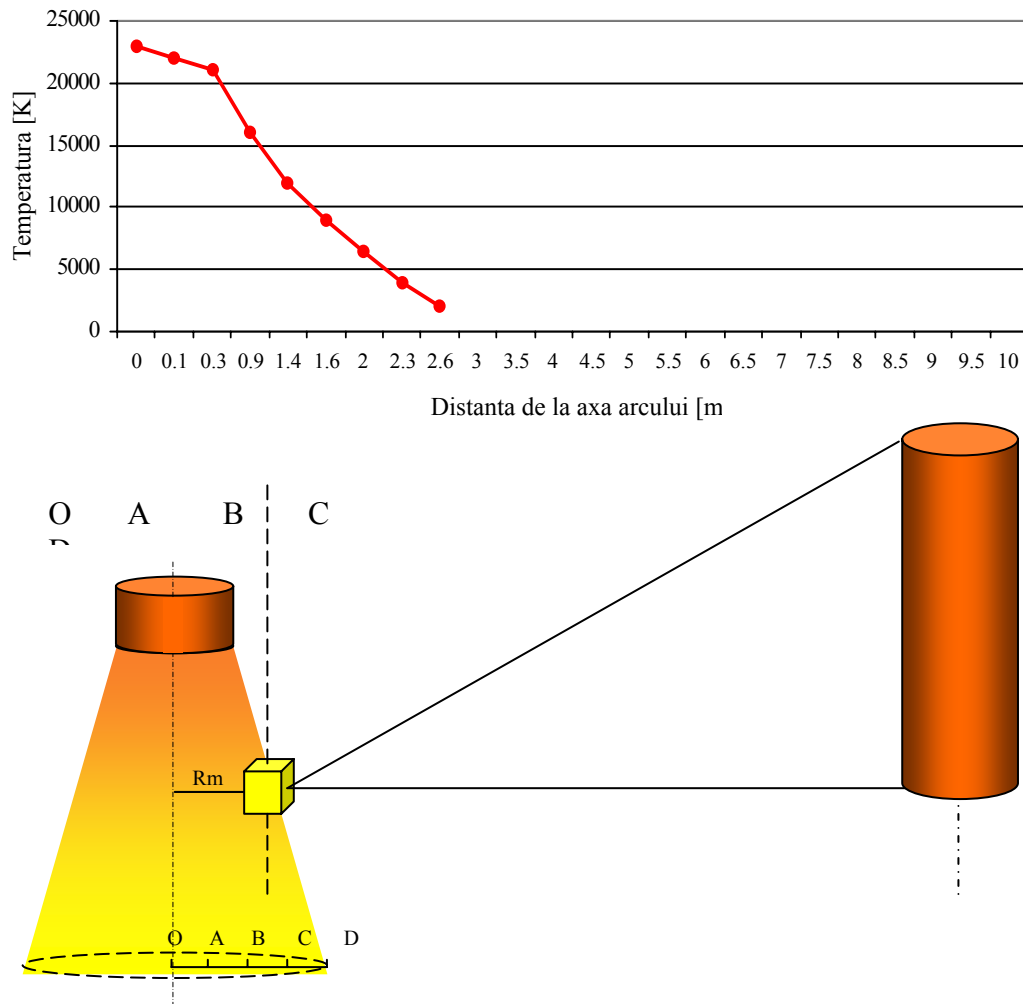


Figura 5.16. Distribuția temperaturii de la axa arcului spre sârma de sudare vecină

Rezultă astfel o relație polinomială de gradul al treilea în timp. Considerând relația dintre viteza de sudare și timpul necesar străbaterii distanței D dintre cele două sârme:

$$t = \frac{D \cdot 60}{v_s} \quad (5.43)$$

rezultă o relație între temperatura punctului țintă și viteza cu care se deplasează sârma către punctul țintă:

$$T_i = f\left(\frac{1}{v_s}\right) \quad (5.44)$$

Din relațiile (5.30), (5.44) și (5.45) rezultă cantitatea de căldură recepționată de sârmă, de la arcul de sudare vecin:

$$Q_{receptat} = Q_{sursa} \cdot X_{1,2} \quad (5.45)$$

$$Q_{receptat} = \sigma \cdot T \left(\frac{1}{v_s}\right)^4 \cdot 2 \cdot \pi \cdot R_m \cdot \Delta h \cdot X_{1,2} \quad (5.46)$$

Punând această relație într-o foaie de calcul Excel se pot determina cantitățile de căldură primite de sârma a doua de la primul arc, pentru diferite situații: diverse devieri ale arcului 1 spre arcul 2, diverse viteze de sudare, diverse forme de arc.

În figura 5.17 sunt prezentate valorile calculate ale energiei termice primite de sârmă pentru diverse devieri ale arcului (asimilate cu modificarea distanței D) și diverse viteze de avans al sârmei (50 cm/min, 60 cm/min, 70 cm/min, 80 cm/min, 90 cm/min, 100 cm/min).

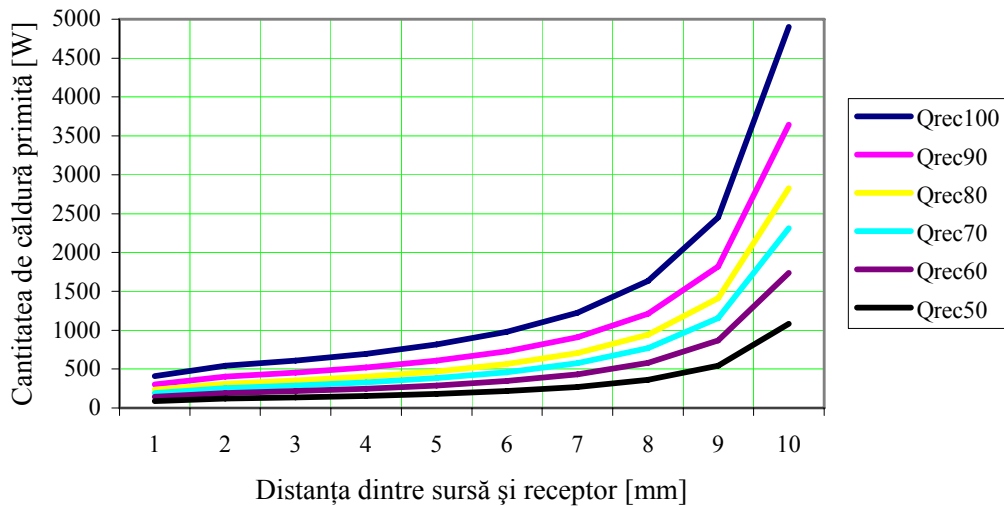


Figura 5.17. Cantitatea de căldură primită de sârmă prin radiație de la arcul vecin

Această căldură suplimentară conduce la scăderea curentului de sudare emis de sursă prin sârma respectivă. Verificarea acestui model s-a făcut prin simulare într-un program de analiză cu elemente finite, ANSYS 5.7.

Pentru aceasta, a fost conceput în ANSYS un model fizic conform celui prezentat în figura 5.15. Condițiile impuse programului au fost aceleași cu cele considerate anterior. Concret, parametrii simulării sunt prezentați în figura 5.18. În figura 5.19 este prezentată evoluția iterativă a simulării. Analiza a fost neliniară, datorită ecuațiilor matriceale relativ complexe.

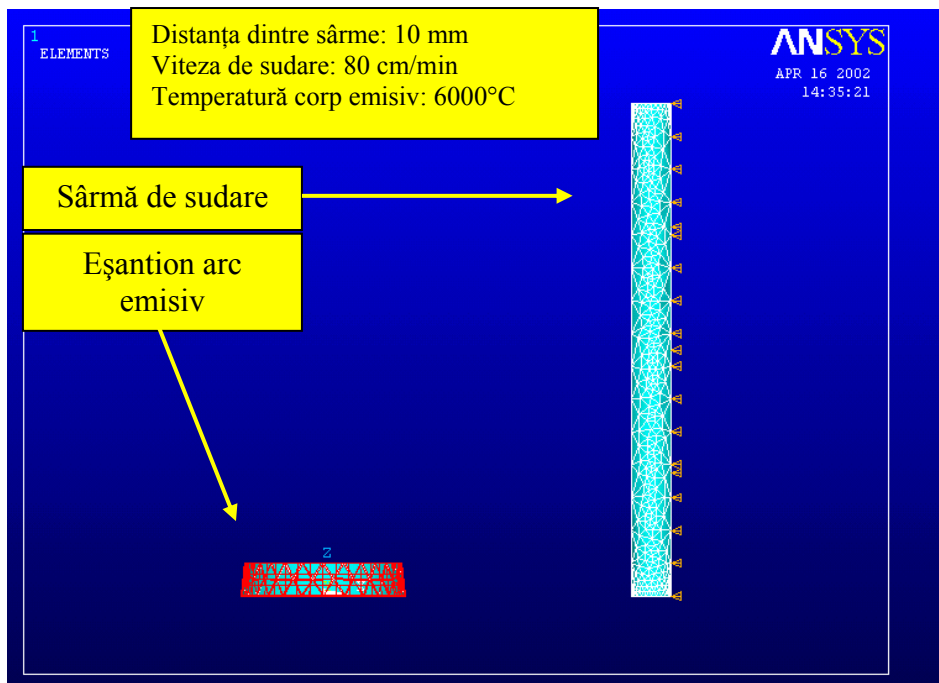


Figura 5.18. Sistemul fizic utilizat în simulare

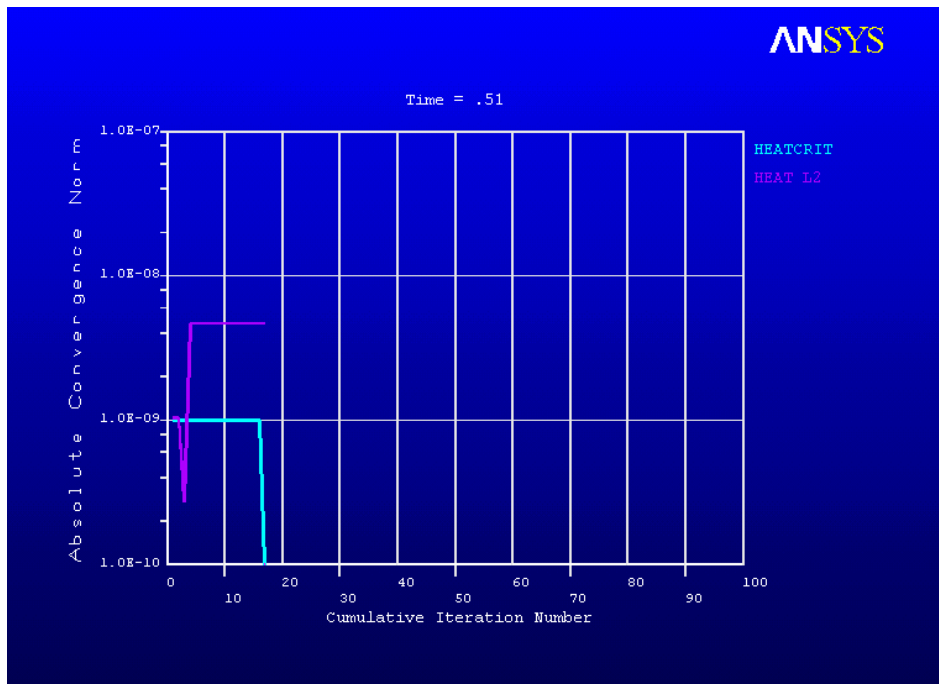


Figura 5.19. Evoluția iterativă a analizei neliniare

Rezultatul a fost conform predicției oferite de modelul matematic propus: sursa suplimentară, introdusă de transferul termic prin radiație, are o putere, la nivelul suprafeței conductorului, de aproximativ 255 W.

În simulare s-a ținut cont de faptul că sârma de sudare are o temperatură de aproximativ 800°C în urma dezvoltării fenomenului Joule-Lenz la trecerea curentului de sudare considerat a fi de 200 A. Rezultatul este prezentat din punct de vedere energetic în figura 5.20.

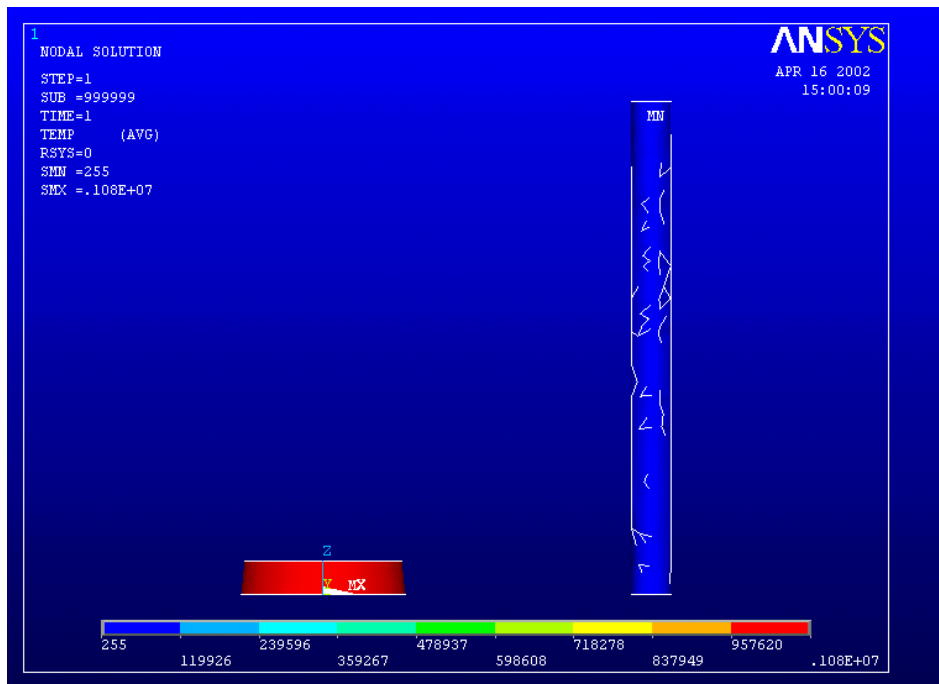


Figura 5.20. Puterea calorică primită de sârma de sudare

Cuantificarea acestei scăderi este necesară în procesul de corecție a interpretării poziției momentane a capului de sudare.

Cele două fenomene descrise anterior au fost evidențiate experimental.

Pentru evidențierea separată a celor două fenomene s-a considerat un sistem de sudare cu două sârme utilizat în prima fază în modul paralel, pentru a se evita dezvoltarea transferului termic prin convecție și radiație de la prima sârmă la cea de-a doua sârmă. Pornind procesul de sudare cu un singur arc amorsat, după 10 secunde s-a amorsat și cel de-al doilea arc, iar după alte 10 secunde s-a revenit la un singur arc. Înregistrarea curentului de sudare a evidențiat pentru cele trei situații valori diferite, ceea ce a permis acceptarea teoriei privind modificarea modului de transfer datorită existenței forțelor electrodinamice.

În figurile 5.21 sunt prezentate valorile curentului de sudare.

Astfel, limitele diferențelor între curentul de sudare la sudarea cu o singură sârmă și curentul de sudare la sudarea cu două sârme au fost $\Delta I = 28 - 31A$.

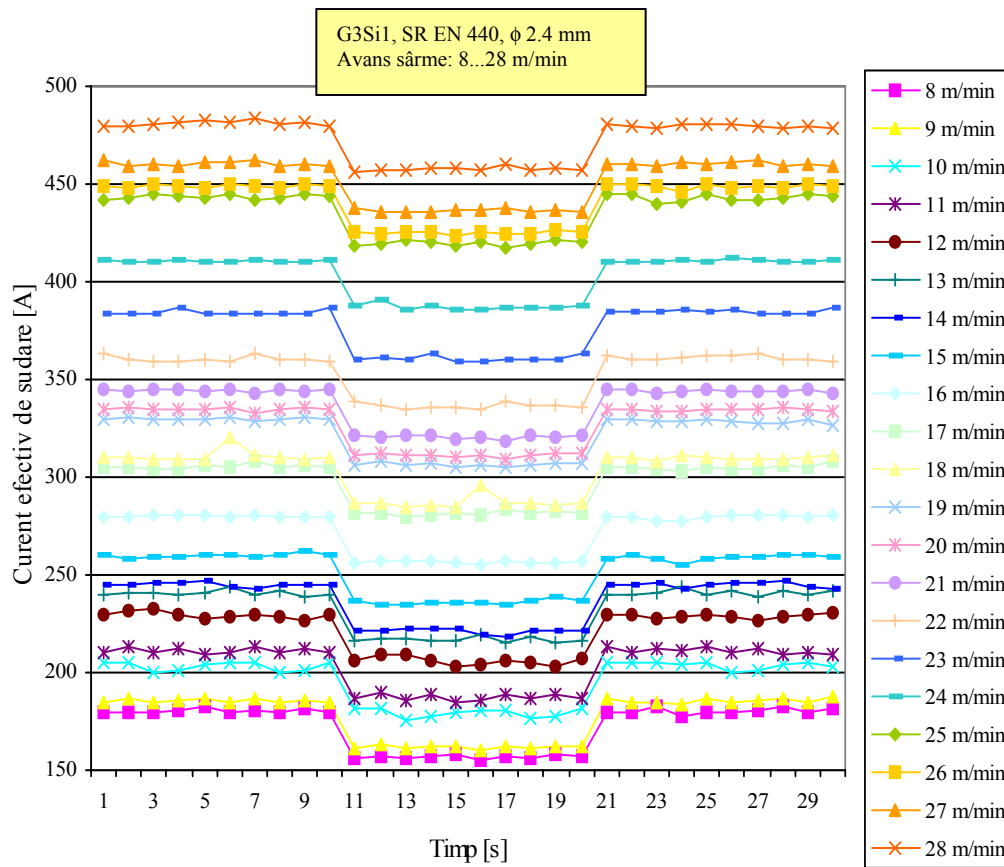


Figura 5.21. Valorile înregistrate ale curentului de sudare la trecerea de la sudarea cu o sârme la sudarea cu două sârme și invers

Evidențierea directă a celui de-al doilea fenomen prezentat anterior nu a fost posibilă. Repetând însă experimentul, dar în modul tandem și având o viteză de sudare de 120 cm/min s-a observat că modificarea curentului de sudare a fost mai accentuată.

5.4. CONCLUZII

1. Valoarea forței electrodinamice este influențată sensibil de mărimea curenților de sudare și de lungimea capetelor libere ale celor două sârme.

2. Ca efect al interacțiunii electromagnetice la sudare se dezvoltă forțe electrodinamice care modifică atât procesul de ardere al celor două arce cât și modul de transfer al picăturilor în baia de metal topit.

3. Căldura primită de sârmă prin radiație de la arcul electric vecin, provoacă scăderea curentului de sudare emis de sursă prin sârma respectivă.

4. Modalitatea de desprindere a picăturilor de metal de la capetele sârmelor, depinde de direcția, sensul și modulul forțelor electrodinamice dezvoltate în spațiul celor două arcuri.

5. La viteze de sudare de peste 50 cm/min. se produce o modificare a cantității de căldură care participă la topirea celei de-a doua sârme în direcția de avans a capului de sudare.

6. CONCLUZII FINALE ȘI CONTRIBUȚII ORIGINALE

Lucrarea de doctorat " **Studii și cercetări asupra proceselor de sudare sub strat de flux de mare productivitate**" se înscrie în tendința actuală a cercetărilor, de a găsi noi soluții care să permită valorificarea la maximum a potențialului oferit de configurațiile multiarc la controlul profilului sudurilor și la creșterea ratei de depunere față de arcul singular în condițiile unor viteze mari de sudare.

Principalele concluzii și contribuții originale ale lucrării pot fi sintetizate astfel:

1. Studiarea particularităților procesului de sudare TWIN-ARC cu optimizarea parametrilor de regim termic pentru îmbinările cap la cap și în colț executate din oțeluri slab aliate pentru structuri sudate. Examinările macrografice ale probelor de metal depus pe table din oțel S-355J2 G3, au demonstrat că la o combinație a fluxului Linconweld 780 cu o sârmă Lincoln L-61, \varnothing 1,6mm apar următoarele influențe:

1.1. creșterea curentului de sudare de la 700 A la 800 A provoacă o mărire a adâncimii de pătrundere de la 4,8 mm la 6,5 mm;

1.2. mărirea tensiunii arcului de la 31,5 V la 34,5 V conduce la o micșorare a pătrunderii de la 6,1 mm la 5,5 mm și la o mărire a lățimii îmbinării de la 15,5 mm la 17,5 mm;

1.3. modificarea vitezei de sudare de la 80 cm/min la 140 cm/min se manifestă printr-o scădere a pătrunderii de la 7,5 mm la 4,9 mm și o reducere a supraînălțării de la 2,5 mm la 1,7 mm;

1.4. valoarea ratei de depunere, determinată experimental în condițiile unui regim optim de sudare, este de 11,49 kg/h;

1.5. comparativ cu sudarea sub strat de flux cu o sârmă, la realizarea sudurilor cap la cap cu două sârme TWIN-ARC se obține o creștere a productivității

cu circa 36%, iar la sudurile în colț cu circa 31%.

2. Procesul de sudare cu mai multe sârme permite o îmbunătățire a calității îmbinărilor sudate, fenomen care se justifică prin:

2.1 dezvoltarea grăunților cristalini în direcție perpendiculară față de linia de fuziune, spre mijlocul cusăturii în sus către suprafața exterioară a acesteia și în consecință zonele de segregării pot fi evitate;

2.2. mărirea vitezelor de sudare contribuie la scăderea energiei liniare, cu consecințe asupra finisării granulației și microstructurii de cristalizare primară a metalului depus și implicit asupra creșterii tenacității.

3. Aplicând tehnica dispersiei în energie a razelor X (EDX-energy dispersive X-Ray analysis) au fost evaluate cantitativ fenomenele de eterogenitate chimică ce însoțesc procesul de solidificare a zonei topite și care sunt datorate creșterii dendritice și fenomenului de subrăcire constituțională; totodată, prin analize difractometrice au fost decelate fazele constitutive ale metalului depus și metalului de bază.

4. Încercările de tracțiune statică efectuate asupra îmbinărilor sudate cap la cap au demonstrat că rezistența la rupere a acestora este superioară celei a materialului de bază, iar procesul de sudare TWIN-ARC asigură o bună compatibilitate între metalul de bază și metalul depus, cu evitarea concentrărilor mari de tensiune în îmbinare, fiind îndeplinită condiția $R_{m_{MD}} \leq (1,30 \div 1,35) R_{m_{MB}}$;

5. Tratamentul termic de normalizare aplicat îmbinărilor sudate provoacă finisarea granulației și înlăturarea structurii Widmannstätten, cu implicații în creșterea tuturor caracteristicilor mecanice:

5.1. rezistența la rupere a îmbinării sudate se mărește cu cca.7,67%, iar cea a materialului de bază cu cca. 9,79 %;

5.2. tenacitatea metalului depus, caracterizată prin valorile energiei de rupere, crește cu cca. 7,92 % și a celui de bază, cu cca. 11, 79%.

6. Pe intervalul temperaturilor de exploatare de $+20 \div -20^{\circ}$ C, valorile tenacității metalului depus sunt superioare celor minime impuse, iar ruperea este în totalitate fibroasă, având un caracter ductil.

7. Procesul de sudare sub strat de flux în tandem asigură o geometrie favorabilă a îmbinării sudate, o structură microscopică mai fină comparativ cu sudarea cu o singură sârmă, o degazare mai bună a băii alungite de metal topit și o micșorare a sensibilității față de fisurarea la cald.

8. Modificările intervenite în macro- și microstructura îmbinărilor sudate sub strat de flux în tandem permit obținerea unui ansamblu optim al caracteristicilor de rezistență mecanică și de tenacitate.

9. Interacțiunea electromagnetică apărută la sudarea sub strat de flux cu două sârme se manifestă prin dezvoltarea unor forțe electrodinamice a căror valoare este influențată sensibil de mărimea curenților de sudare și de lungimea capetelor libere ale celor două sârme.

10. Modalitatea de desprindere a picăturilor de metal de la capetele sârmelor, depinde de direcția, sensul și modulul forțelor electrodinamice dezvoltate în spațiul celor două arcuri electrice.

11. La viteze de sudare de peste 50 cm/min. se produce o modificare a cantității de căldură care participă la topirea celei de-a doua sârme în direcția de avans a capului de sudare.

În încheiere, se poate arăta că abordarea și rezolvarea, în limitele propuse pentru tema de cercetare ce face obiectul tezei de doctorat, prin urmărirea sistematică, punerea în evidență și fundamentarea științifică a transformărilor care intervin în îmbinările sudate sub strat de flux cu două sârme reprezintă o contribuție originală.

Îmbinarea cercetării laturii aplicative a acestor investigații, din punctul de vedere al nivelului proprietăților mecanice obținute, cu latura fenomenologică, a determinării și explicării științifice a particularităților care definesc natura și succesiunea transformărilor intervenite în metalul depus și care justifică îmbunătățirea calității, îmbinărilor sudate, face ca lucrarea să se înscrie în tendințele și metodologia modernă utilizată în cercetarea științifică.

LUCRĂRI PUBLICATE

Reviste de specialitate din străinătate sau publicații (asimilabile revistelor) sub egida unor organizații profesionale internaționale

| Nr. Crt. | Titlul lucrării | Autorii | Publicația |
|----------|--|-------------------------------------|---|
| 1 | Researches on Normalizing Heat Treatment Applied to SAW Joints with TWIN - ARC | I.Mitelea Gh.Găvănescu B.Radu | Advanced Materials Research Vol. 23 (2007) pp.205-208, Trans.Tech. Publications Ltd, Zürich, Switzerland |

Reviste de specialitate din țară (reviste centrale și ale universităților din Timișoara, București, Iași, Cluj)

| Nr. Crt. | Titlul lucrării | Autorii | Publicația |
|----------|---|---|---|
| 1 | Opportunities of the submerged arc welding with two wires . | I. Mitelea Gh. Găvănescu I. D. Uțu | Scientific Bulletin of the „Politehnica” University of Timișoara, Tom 51 (65), Fasc. 4, 2006, p.95 - 100, ISSN 1224 - 6077 |
| 2 | Studies on the productivity performances by TWIN – ARC submerged welding | I. Mitelea Gh. Găvănescu I. D. Uțu | Scientific Bulletin of the „Politehnica” University of Timișoara, Tom 52 (66), Fasc. 1, 2007, p.35 - 38, ISSN 1224 - 6077 |
| 3 | Studies on electromagnetic interaction to submerged welding with two-wires (part I: development of the electrodynamic forces) | I. Mitelea Gh. Găvănescu D. Savu I.D.Utu | Scientific Bulletin of the „Politehnica” University of Timișoara, Tom 53 (67), Fasc. 1, 2008, p.91 - 96 , ISSN 1224 - 6077 |
| 4 | Studies on electromagnetic interaction to submerged welding with two-wires (part II: modification of the effective welding current) | I. Mitelea Gh. Găvănescu D. Savu R. Roșu | Scientific Bulletin of the „Politehnica” University of Timișoara, Tom 53 (67), Fasc. 1, 2008, p.97 - 106 , ISSN 1224 - 6077 |

Volumele unor manifestări științifice internaționale organizate în România (cu referenți științifici) și redactate integral într-o limbă de circulație internațională

| Nr. crt. | Titlul lucrării | Autorii | Publicația |
|-----------------|--|---|--|
| 1 | EDX and X – Ray diffraction investigations on deposited metal with SAW 2 wires TWIN - ARC | I.Mitelea Gh. Găvănescu | Annals of the Oradea University. Fascicle of Management and Technological Engineering, 2006, p. 1057 – 1066, ISSN 1583 - 0691 |
| 2 | Structural transformations morphology of two wires twin arc submerged arc welding of welded joints | I.Mitelea Gh. Găvănescu | International Conference "Welding of Engineering Materials" 20 – 22 sept. 2006 Brașov, Editura Sudura Timișoara, 2006, p. 191 – 201, ISBN (10) 973 – 8359 – 44 - 9 |
| 3 | The effect of the process parameters on the deposited metal geometry by TWIN – ARC submerged arc welding | I. Mitelea Gh. Găvănescu I. D. Uțu | BRAMAT 2007 Proceeding, International Conference on Material Science and Engineering, p. 36 – 40, ISSN 1223 - 9631 |

Bibliografie

1. Allen L. J. a.o. : The formation of chevron cracks in submerged arc weld metal. *Welding Journal* 61 (7), p. 212-221, July 1981
2. Almqvist G. u.a. : Unterpulverengspaltschweißen von Grossbauteilen an Bohrplattformen. DVS-Berichtsband, Düsseldorf, 1985
3. Bailey N., Jones S. B. : The solidification mechanics of ferritic steel during submerged arc welding. *Welding Journal* 57 (8), p. 217-231, August 1978
4. Baumgardt H., u.a. : Thermomechanisch gewalzte bainitische Stähle mit Streckgrenzen von 500 bis 700 N/mm² für Grobbleche und Warmbreitband. *Stahl u. Eisen* 105 (1985) nr 13, S. 709-716
5. Böhme D., Bültmann F. : Optimierung der geometrischen Anordnung von Drahtelektrode und Heissdraht beim Unterpulverschweißen. DVS-Berichtsband 100, Düsseldorf, 1985
6. Böhme D., Heuser H. : Einfluß der Schweißparameter auf die Erstarrungsrißneigung von unlegiertem Unterpulvertandemschweißen. *Schweißen und Schneiden* 1984 nr 3, S. 109-112
7. Braun J., ş. a. : Sudarea sub strat de flux în construcția de nave. *Revista Sudura-ASR*, 2002, nr. 4, p. 11-13
8. Bunker T. : Multi-Electrodes in SAW with Square Wave AC Power- *Welding Journal* N.Y. 1982, nr 7, p. 36-40
9. Burcă M., Negoitescu S. : Sudarea în medii de gaze protectoare. Editura Sudura, Timișoara, 2004
10. Butler C. A., Jackson C. E. : Submerged arc welding characteristics of the CaO-TiO₂-SiO₂ system. *Welding Journal* 46 (10), p. 448-456, October 1967
11. Cahn W. R., a.o. : *Materials Science and Technology – Characterization of materials*, vol. 2, 1992

12. Chandel R. S. : Mathematical modeling of melting rates for submerged arc welding. *Welding Journal* 66 (5), p. 135-139, May 1987
13. Crane A. A. F., Charles A. J. : Selection and use of engineering materials. Butterworths. London, Boston, Toronto, 1989
14. Dallam C. B., Liu S., Olson D. L. : Flux composition dependence of microstructure and toughness of submerged arc HSLA weldments. *Welding Journal* 64 (5), p. 1405-1515, May 1985
15. Dilthey U. ș. a. : Two-wire processes for higher deposition rate and higher welding speed. Doc. IIW XII-1549-98, Hamburg, 1998
16. Dorn L., Ripple P. : Prozessanalyse beim Unterpulverschweißen. *Schweißen und Schneiden* 37 (1985) Nr. 2, S. 68-73
17. Eckstein H. J. u.a. : Korrosionsbeständige Stähle. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1990
18. Fleck N., a.o. : The Role of Filler Metal Wire and Flux Composition in Submerged Arc Weld Metal Transformation Kinetics. *Welding res suppl* 1986 nr 5 p. 113-121
19. Folkhard E. : Metallurgie der Schweißung nichtrostender Stähle. Springer – Verlag Wien, New York, 1984
20. Georgescu V., Constantun E. : Instalație de recondiționare a pieselor conice uzate, folosind sudarea automată sub strat de flux. *Revista Sudura-ASR*, 2001, nr. 1, p. 23-26
21. Gramberg U. : Kleine Stahlkunde für den Chemieapparatebau. Verlag Stahleisen Düsseldorf, 1993
22. Grigorenko G. M., ș. A. : Effect of metallurgical characteristics of flux on structure and phase composition of low-alloy weld metal. *Avtomaticeskaia Svarka*, 2004, nr. 3, p. 8-15
23. Gumpel P. : Rostfreie Stähle. Expert Verlag GmbH Kontakt und Studium, Germania, 1996
24. Gunaray V., Murugan N. : Prediction and optimization of weld bead volume for the submerged arc process-Part 1. *Welding Journal*, 2000, vol. 79, nr. 10, p. 286s-294s
25. Gunaray V., Murugan N. : Prediction and optimization of weld bead volume for the submerged arc process-Part 2. *Welding Journal*, 2000, vol. 79, nr. 11, p. 331s-338s
26. Haasen P. : Physikalische Metallkunde. Springer Verlag, Berlin, 1994

27. Hadamik P., ș. a. : Praxis der Unterpulverschweissens. Tehnica, 2004, vol. 53, nr. 8, p. 48-54
28. Hadamik P., ș. a. : Praxis der Unterpulverschweissens Teil 12. Tehnica, 2004, vol. 53, nr. 10, p. 46-53
29. Haferkamp H., Liers-Klüber J., Osterlitz H. : Neue Technologien zum Schweißen kugelförmiger Reaktorsicherheitsbehälter. Schweißen und Schneiden 35 (1983) nr 4, S. 157-161
30. Heinemann J, ș. a. : Soldadura con alambres tubulares de basa niquel. Campos de aplicación, características mecánicas y desarrollos de sus aplicaciones. Soldadura y technologies de union, 2004, nr. 87, p 20-23
31. Heintze G., Mc Pherson R. : Solidification Control of Submerged Arc Welds in Steels by Inoculation with Ti. Welding res suppl 1986 nr 3 p. 78-81
32. Hochreiter G. : Unterpulverschweissen in der Praxis. Expert Verlag, 71272 Renningen-Malmsheim, 2005
33. Honeycombe R. W. : Steels – microstructure and properties. Edward Arnold, London, 1995
34. Hornbogen E., Warlimont H. : Metallkunde – Aufbau und Eigenschaften von Metallen und Legierungen. Springer Verlag, Berlin, 1996
35. Indacochea J. E., a.o. : Submerged arc welding. Evidence for electrochemical effects on the weld pool. Welding Journal 68 (3), p. 77-81, March 1989
36. Ishchenko A. Ya, ș. a. : Increase in strength of welds in arc welding of alloy 1420 using the Sc-containing fillers. The Paton Welding Journal, 2002, nr. 1, p. 10-14
37. Ishchenko A. Ya., ș. a. : Technological features of twin-arc consumable electrode pulsed welding of aluminum alloys. The Paton Welding Journal, 2005, nr. 1, p. 10-14, Ucraina
38. Kaulich G., Kaißer P. : Welding in the chemical industry. Svetsaren, no. 2-3, p. 68-72, Finland, 2001
39. Killing R., Killing U. : Entscheidend ist die Wärmeführung – Schmelzschweißen von Duplexstahl. Metallbau Heft 6/1999, S. 66-69
40. Killing R., Their H. : Metallurgie für den Praktiker-Wasserstoff im Schweißgut. Praktiker (1984) nr 3, S. 125-128
41. Killing R., u.a. : Beitrag zur Kristallisation der Raupen beim Unterpulvertandemschweißen. Schweißen und Schneiden 1983 nr 4, S. 169-173

42. Koch F., Kügler J. : Rissverhalten von geschweissten Gasfernleitungsrohren. Stahl u. Eisen 105 (1985) Nr. 10, S. 563-570
43. Köchling H. : Stahlguss – und Gusseisenlegierungen. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1992
44. Kohtz D. : Wärmebehandlung metallischer Werkstoffe. VDI – Verlag, Düsseldorf, 1994
45. Kononenko V. Ya., ş. a. : Structure and mechanical properties of welded joints made under water using flux-cored wires. Automaticeskaia Svarka, 2004, nr. 5, p. 25-29
46. Krauss G. : Steels – heat treating and processing principles. ASM International Copyright, 1990
47. Landsberger G. J. : Werkstofftechnik – Aufbau, Eigenschaften und Verwendung der Metalle. Gela – Verlag für Luftfahrttechnik, 1994
48. Le Bourgeois B. : Soudage a l`arc. Notions d`electricité à l`usage du généralités sur le soudage électrique à l`arc. Soud. Tecn., 2003, vol. 57, nr. 11/12, p. 3-13
49. Liscic B. : Theory and technology of quenching. Springer Verlag, Berlin, 1992
50. Liu S., Olson D. : The Role of Inclusions in Controlling HSLA Steel Weld Microstructures. Welding res. suppl. 1986 nr 6, p. 139-148
51. Lukkari J. : Look at deposition rates in SAW now. Svetsaren, no. 2-3, p. 51-57, Finland, 2001
52. Lutz W : Aluminiumschweissen für den schnellen ICE 3. Praktiker, 1999, nr. 4, p. 138-142
53. Mc Enerney J. W. : Pratiques recommandées pour le traitement thermique local après soudage. Soudage et techniques connexes, 1999, vol. 53, nr. 3/4, p. 13-22
54. Miloş L. : Bazele prelucrării prin sudare. Editura Politehnica, Timișoara, 2004
55. Mitelea I. ş.a. : Ştiinţa materialelor în construcţia de maşini. Editura Sudura, Timișoara, 1999
56. Mitelea I., Budău V. : Materiale și tratamente termice pentru structuri sudate. Editura de Vest, Timișoara, 1992
57. Mitelea I., Găvănescu Gh. : EDX and X-Ray diffraction investigation on deposited metal with SAW 2 wires TWIN – ARC. Annals of the Oradea University. Fascicle of Management and

- Technological Engineering 2006, p. 1057 – 1066, ISSN-1583-0391
58. Mitelea I., Găvănescu Gh. : Morfologia transformărilor structurale în îmbinările sudate sub strat de flux cu două sârme twin – arc. Lucrările Conferinței Internaționale „Managementul calității în domeniul sudării”, Brașov, 20-22 septembrie 2006
59. Mitelea I., Radu B. : Selecția și utilizarea materialelor ingineresti. Editura Politehnica, Timișoara, 2004
60. Müller P. : Einige Gedanken zur Wirtschaftlichkeit der Schweissverfahren, insbesondere des Unterpulverschweissens Schweissen u. Schneiden 31 (1979) nr. 5, S.198-201
61. Müller P., Wolff L. : Handbuch des Unterpulverschweissen. Deutscher Verlag für Schweisstechnik GmbH Düsseldorf, 1983
62. Paschold R., Dirksen D. : Submerged arc welding of steels for offshore wind rowers. Svetsaren, 2005, nr. 1, p. 13-17
63. Pekkari B. : Tendințe în sudarea și îmbinarea metalelor. Buletinul Institutului Național ISIM Timișoara, 2004, nr. 2, p. 2-7
64. Pitrun M., ș.a. : Correlation of welding parameters and diffusible hydrogen content in rutile flux-cored arc welds. Australian WELDING, 2004, vol. 49, nr. 1, p. 33-46
65. Sălăgean T., Mitelea I. : Metalurgia și sudarea oțelurilor inoxidabile. SID 104, București, 1990
66. Schofer E., Kaulich G. : WIG Orbitalschweißen – Prozessvarianten, Ausrüstungen und Anwendungen in der Praxis. 7th International Aachen Welding Colloquium 2001, p. 419-430
67. Scholz E., Wiyland F. : Bauteile für Behälter und Rohrleitungen, die nach dem Schweissen normalisiert oder vergütet wurden. DVS-Berichtsband 100, Düsseldorf, 1985
68. Sisl V., Kovaceric B. : Heat treatment in welding. Zavarivanje, 2002, vol. 45, nr. 3/4, p. 97-104
69. Sisl V., Kovaceric B. : Heat treatment in welding. Zavarivanje, 2002, vol. 45, nr. 3/4, p. 155/164
70. Studholme S. : Submerged arc solution for efficient trailer beamfabrication. Welding and Joining, 2001, vol. 69, nr. 3, p. 19-20

-
71. Thaulow C., a.o. : Heat Affected Zone Toughness of a Low Carbon Microalloyed Steel. Metal Construction 1985 nr 2, p. 94R-99R
72. Their H. : Wärmeführung beim Schweißen niedriglegierter Stähle. DVS-Fachbuchreihe Band 107, Düsseldorf, 1987
73. Zentner H. : Unterpulver-Schweißen von Schwarz-Weiß-Verbindungen Deutscher Verlag für Schweisstechnik GmbH Düsseldorf, 2003
74. Zentner H. : Einflüsse von Schweißdaten und Schweißzusatzwerkstoffen auf die Nahtgeometrie beim UP-Schweißen
75. Zhudra A. P., ș. A. : About selection of baron-containig charga materials for flux-cored wirw. Avtomaticeskaia Svarka, 2004, nr. 4, p. 55-56
76. xxx : UP-Rohrschweisstechnik LE 18-System. Messer-Griesheim GbmH Frankfurt, Druckschrift, 2004
77. xxx : Handbuch Schweißzusätze und Hilfsstoffe. Lincoln Smitweld GmbH 1992
78. xxx : DVS-Merkblatt 0917, Unterpulverschweißen austenitischer Stähle, 1986
79. xxx : Arbeitsmappe Zusatzwerkstoffe für UP-Schweißen. Messer Griesheim GmbH, 2003
80. xxx : Handbuch für das Unterpulver-Schweißen. Messer Griesheim GmbH, 2005
81. xxx : Schweißpulver und Drahtelektroden. Oerlicon Elektrodenfabrik eisenberg GmbH, 2005
82. xxx : DVS-Merkblatt 0914, Verarbeitung und Lagerung von Schweißpulvern für das Unterpulver-und das Elektroschlagschweißen, 1995
83. xxx : DVS-Merkblatt 0918, Unterpulverschweißen von Feinkornbaustählen, 1998
84. xxx : Le soudage électrique à l`arc. Soud. Tecn., 2003, vol. 57, nr. 11/12, p. 14-20
85. xxx : Fachgruppe für die schweisstechnische Ingenieurausbildung : Fügetechnik Schweisstechnik. DVS Verlag, 6. überarb. Auflage 2004, ISBN 3-87155-786-2

**Titluri recent publicate în colecția „TEZE DE DOCTORAT”
seria 11: Știința și Ingineria materialelor**

1. **Bartis Tihamér** – *Noi pigmenți termorezistenți și comportarea lor în glazuri și coloranți ceramici*, ISBN 978-973-625-424-6, 2007;
2. **Radu-Ioan Lazău** – *Studii asupra parametrilor care influențează culoarea glazurilor ceramice cu ioni tranziționali*, ISBN 978-973-625-520-5, 2007;
3. **Ioan Pernevan** – *cercetări teoretice și experimentale privind deformarea plastică hidraulică a pieselor cu pereți subțiri*, ISBN 978-973-625-430-7, 2007;
4. **Robert Gabriel Ianoș** – *Sinteza unor oxizi, compuși oxidici și soluții solide oxidice prin metoda combustiei*, ISBN 978-973-625-693-6, 2008;
5. **Daniela Cătălina Stoia** – *Contribuții privind matrițarea semisolidă a oțelurilor de construcții*, ISBN 978-973-625-702-5, 2008;
6. **Mihaela Corina Floarea** – *Studii și cercetări privind comportamentul oțelurilor de îmbunătățire tratate termochimic prin nitrurare*, ISBN 978-973-625-703-2, 2008;
7. **Zoltán Ecsedi** – *Utilizarea metodelor neconvenționale în sinteza unor materiale cu proprietăți dirijate*, ISBN 978-973-625-704-9, (2008);
8. **Adrian Iulian Moșilă** – *Aptitudinea la sudare prin frecare a oțelurilor tratate termic și termochimic*. ISBN 978-973-625-722-3, (2008).



EDITURA POLITEHNICA

