



Universitatea “Dunărea de Jos”

TEHNOLOGII DE SUDARE

Daniel VIȘAN

Galați - 2008



Departamentul pentru Învățământ la Distanță și cu Frecvență Redusă

Facultatea de Mecanica
Specializarea Inginerie Economica si Industriala
Anul de studii / Forma de învățământ IV/IFR

CUPRINS

CAP.1. PROCESE ȘI PROCEDEE DE SUDARE	3
1.1. Energetica procesului de sudare	3
1.2. Sudarea prin topire și prin presiune	4
1.3. Clasificarea procedeelor de sudare prin topire	5
CAP.2. SUDAREA CU ARC ELECTRIC	7
2.1. Principii de bază	7
2.2. Polaritatea curentului electric	18
2.3. Recomandări la realizarea sudurilor	19
2.4. Transferul short-arc și transferul spray-arc	20
2.5. Clasificarea procedeelor de sudare cu arc electric	22
CAP. 3. ALGORITMUL DE CALCUL AL TEHNOLOGIEI DE SUDARE CU ARC ELECTRIC	23
3.1. Parametrii tehnologici la sudarea cu arc electric	23
3.2. Aria rostului, a cordonului și a trecerilor	27
3.3. Etapele calculului tehnologiei de sudare cu arc electric	30
3.4. Coeficientul de depunere și randamentul depunerii	30
3.5. Consumul de materiale la sudare	32
3.6. Timpul de sudare. Factorul operator	33
CAP.4. PREÎNCĂLZIREA	35
4.1. Scopul preîncălzirii	35
4.2. Calculul temperaturii de preîncălzire	36
4.2.1. Metoda I.I.S.	37
4.2.2. Metoda Seferian	38
4.3. Corelația statistică între temperatura de preîncălzire și proprietățile zonei influențate termic	39
CAP.5. SUDAREA CU ARC ELECTRIC CU ELECTROZI ÎNVELIȚI	42
5.1. Clasificarea procedeelor de sudare manuala cu electrozi	42
5.2. Performanțele sudării cu electrozi înveliți	43
5.3. Funcțiile învelișului electrodului	44
5.4. Caracterizarea electrozilor după înveliș	45
5.5. Algoritm de calcul al tehnologiei de sudare cu electrozi înveliți	47
5.6. Tehnica operatorie la sudarea cu electrozi înveliți	50
5.7. Defecte tehnologice și măsuri pentru evitarea lor	51

CAP.6. SUDAREA SUB STRAT DE FLUX (SF)	52
6.1. Clasificarea procedeelor de sudare sub strat de flux	52
6.2. Performanțele sudării sub flux	56
6.3. Materiale de adaos la sudarea sub flux	57
6.3.1. Fluxuri de sudare	57
6.3.2. Sârme de sudare	58
6.4. Algoritmul de calcul a tehnologiei de sudare sub flux	59
6.5. Defecte tehnologice și măsuri pentru evitarea lor	61
CAP.7. SUDAREA ÎN MEDIU DE GAZE (SG)	63
7.1. Clasificarea procedeelor de sudare în mediu de gaze	63
7.2. Gazele folosite la sudare	65
7.3. Electrozi nefuzibili	69
7.4. Sârme de sudură. Transferul materialului de adaos prin arc	70
7.5. Sudarea WIG (TIG)	70
7.5.1. Performanțele procedurii WIG	70
7.5.2. Parametrii tehnologici de sudare	71
7.5.3. Tehnica sudării WIG	72
7.6. Sudarea cu plasmă	73
7.6.1. Performanțele sudării cu plasmă	73
7.6.2. Tehnica sudării cu plasmă	75
7.6.3. Regimul de sudare cu plasmă	76
7.7. Sudarea MIG și MAG	77
7.7.1. Performanțele procedeelor MIG și MAG	77
7.7.2. Materiale de sudare	78
7.7.3. Algoritmul de calcul al tehnologiei de sudare MIG și MAG	79
CAP.8. ALTE PROCEDEE DE SUDARE CU ARC ELECTRIC	81
8.1. Sudarea în puncte (electronitua)	81
8.2. Sudarea cu electrod învelit culcat	82
8.3. Sudarea gravitațională	83
8.4. Sudarea în rost îngust	84
8.5. Sudarea antigravitațională	84
8.5.1. Sudarea mecanizată pe verticală	85
8.5.2. Sudarea mecanizată de cornișă	86
8.6. Sudarea sub apă	87

CAP.1. PROCESE ȘI PROCEDEE DE SUDARE

1.1. Energetica procesului de sudare

Sudarea este procedeul tehnologic de realizare a îmbinărilor nedemontabile a unor componente metalice sau nemetalice prin interacțiunea atomilor mărginași ai acestora. Îmbinarea ce rezultă în urma procesului de sudare poartă denumirea de sudură. Totalitatea operațiilor care concurează la realizarea sudurii poartă denumirea, așa cum s-a mai arătat, de proces tehnologic de sudare. Unui proces tehnologic de sudare îi este caracteristic un anumit procedeu de sudare.

Coeziunea locală în vederea obținerii sudurii se realizează cu un aport de energie termică sau mecanică sau și termică și mecanică. Prin aceasta atomii mărginași ai componentelor de sudat primesc energia necesară scoaterii lor din starea de echilibru stabil corespunzătoare unui nivel energetic minim. După aceea, componentele își aduc atomii marginali la distanțe egale sau mai mici decât parametrul rețelei cristaline. În această situație ei se rearanjează în cristale comune celor două componente astfel ca să atingă din nou un minim energetic. Ca atare, procesul de sudare constă în introducerea localizată, prin concentrare în timp și spațiu, a unei cantități de energie în zona sudurii pentru a scoate atomii din starea lor de echilibru stabil și apropierea atomilor mărginași la distanțe egale sau mai mici decât parametrul rețelei cristaline pentru ca ei să recrystalizeze într-o rețea comună corespunzătoare unei noi stări stabile. Acest mecanism energetic este prezentat în figura 1.1.

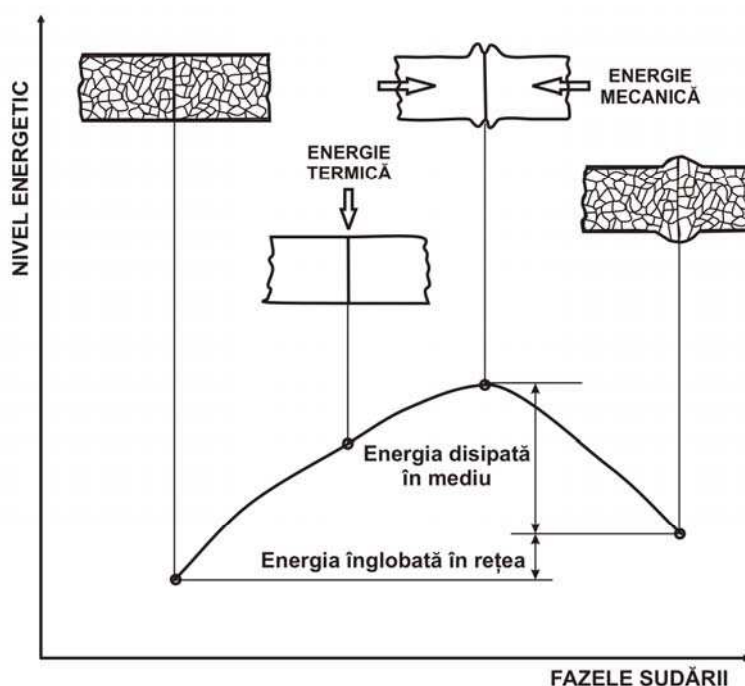


Fig. 1.1.

Deci, prin sudare se realizează saturarea legăturilor dintre atomii de la marginile componentelor de sudat. Sudarea în Cosmos a confirmat concluzia potrivit căreia vidul înaintat din acest spațiu creează componentelor metalice posibilitatea de a se suda prin simpla aducere a lor în contact intim. Acest fapt arată că atomii mărginași, neavând toate legăturile cu ceilalți atomi (sunt nesaturați), se află la un nivel energetic deasupra minimului. Apropiindu-i ei vor forma rețele cristaline comune componentelor, saturându-și legăturile.

În atmosfera terestră acest procedeu folosit în Cosmos nu este posibil fiindcă atomii mărginași nesaturați își completează legăturile cu atomi de aer. Suprafețele metalelor conțin straturi puternic aderente ale moleculelor de gaze, impurități, grăsimi etc. Ele se interpun între atomii metalici și fac imposibilă orice interacțiune între atomii mărginași a două metale puse în contact.

2.2. Sudarea prin topire și prin presiune

Pentru realizarea activării termice sau mecanice fiecare metal și aliaj are nevoie de o anumită cantitate de energie și de o anumită apropiere a atomilor marginali pentru a se suda. Dacă energia termică se măsoară prin temperatura la locul îmbinării T , iar energia mecanică prin presiunea p pe suprafețele în contact, atunci, pentru fiecare material se poate trasa o curbă în coordonate $T - p$ (fig. 1.2).

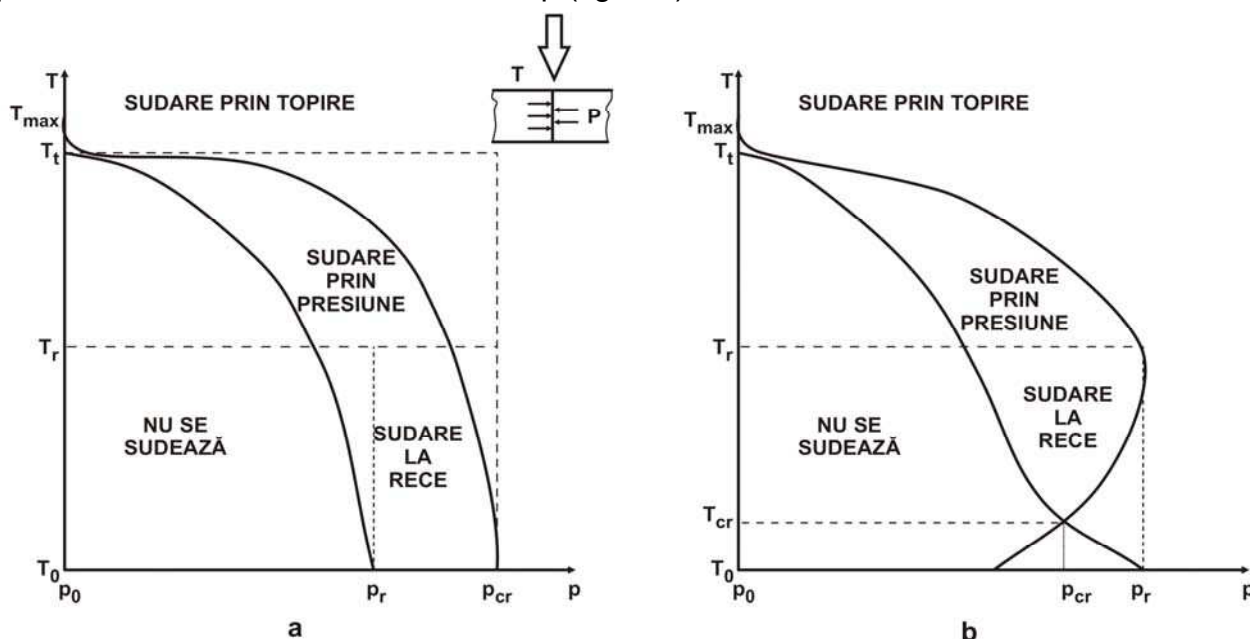


Fig. 1.2.

Această curbă separă planul temperatură - presiune în două regiuni. Punctele de deasupra curbei reprezintă regimurile cu care se realizează sudarea iar cele de sub curbă reprezintă regimurile de temperatură și presiune care nu pot realiza îmbinarea sudată. În cazul când în zona îmbinării temperatura este superioară temperaturii de topire a componentelor T_t , iar presiunea de contact este egală cu p_0 - presiunea atmosferică - atunci ce realizează îmbinarea prin sudare prin topire. Producându-se topirea

componentelor atomii se amestecă într-o baie metalică comună, numită baie de sudură. Nu este nevoie de o presiune pentru a-i aduce într-un contact intim. Sudura care se obține prin solidificarea respectivei băi se numește sudură prin topire, iar procedeul de sudare folosind acest mecanism energetic se numește procedeul de sudare prin topire.

Zona de deasupra curbei, cuprinsă între temperatura de topire T_t și temperatura de recristalizare T_r la care, pentru realizarea îmbinării, se folosește un aport de energie termică precum și un aport de energie mecanică, prin presiunea realizată între componente, poartă denumirea de zona sudării prin presiune. Punctul de coordonate p_r și T_0 , în care T_0 este temperatura mediului ambiant, este punctul în care sudarea se realizează fără încălzire, numită sudare la rece. Este cazul materialelor cu plasticitate ridicată: aluminiu, cupru etc. (fig. 1.2a)

Nu toate metalele și aliajele suportă regimul de sudare la rece corespunzător presiunii p_r (fig. 1.2b). O presiune mai mare decât presiunea critică p_{cr} - determină fisurarea componentelor. La aceste materiale (în general oțelurile) nu se poate realiza îmbinarea sudată decât dacă presiunea este mai mică decât presiunea critică p_{cr} și temperatura în zona îmbinării este mai mare decât temperatura critică T_{cr} . În această zonă din planul T-p, cu presiunea mai mică decât p_{cr} , se realizează sudarea la rece.

Ca atare, mecanismul energetic fundamental al sudării determină două grupe de procedee de sudare și anume:

- procedee de sudare prin topire la care $p = p_0$ și $T \geq T_t$;
- procedee de sudare prin presiune la care $0 < p \leq p_r$ (p_{cr}) și $T < T_t$.

În cadrul fiecărei grupe de procedee de sudare se disting procedee clasificate după sursa care furnizează energia de activare a atomilor mărginași. În cazul majorității procedeele se folosește energie electrică care se transformă în căldură fie printr-un arc electric, fie prin efect Joule. Se folosește, de asemenea, pentru obținerea energiei termice și flacăra oxigaz, reacțiile termochimice, jeturile de electroni și jeturile de fotoni precum și ultrasunetele și frecarea mecanică.

1.3. Clasificarea procedeelelor de sudare prin topire

Procedeele de sudare se clasifică după sursele de energie cu care se realizează încălzirea locală. Astfel sudarea prin topire poate fi realizată cu energie electro-termică, cu energie termochimică și cu energie corpusculară.

Sudarea cu energie electro-termică se obține folosindu-se ca sursă de energie arcul electric sau efectul Joule. Sudarea cu arc electric poate fi realizată prin procedeele: cu electrod învelit, cu protecție de gaz, sub flux sau prin alte procedee. Sudarea prin efect Joule este realizată în condițiile sudării prin topire (exceptând procedeele de sudare prin presiune) în varianta sudării în baie de zgură.

Sudarea cu energie termochimică ce realizează folosind energia flăcării oxigaz sau cea degajată în urma reacțiilor termitului.

Sudarea cu energie corpusculară se practică în varianta sudării cu fascicol de electroni și a sudării cu LASER.

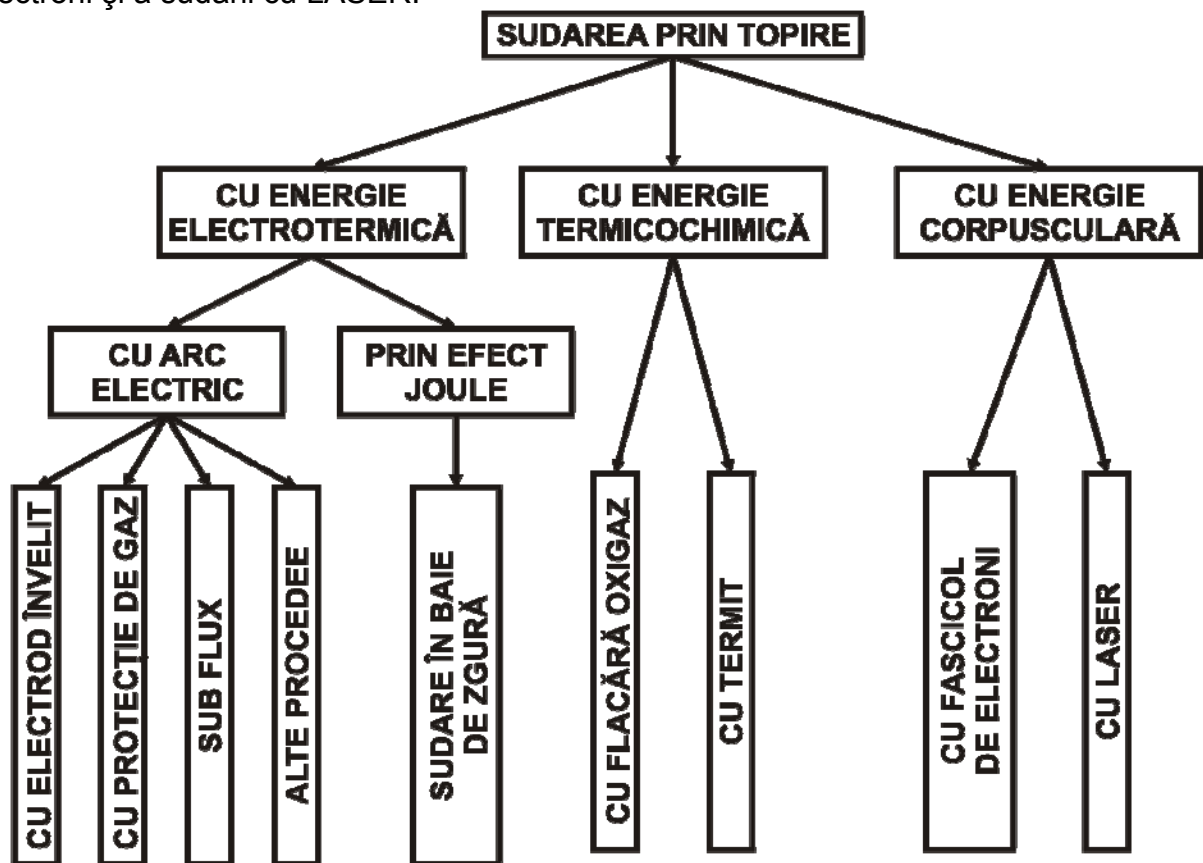


Fig. 1.3.

CAP.2. SUDAREA CU ARC ELECTRIC

2.1. Principii de bază

Principiul sudării cu arc electric are la bază respectarea următoarelor condiții:

- menținerea arcului electric într-o stare staționară astfel încât intensitatea curentului I_s și tensiunea arcului U_a (fig. 2.1) să aibă valori cât mai constante;
- aportul continuu cu viteza v_e a materialului de adaos 1 în arc electric, arc care arde între vergea electrod și componentele de sudat 2;
- deplasarea arcului electric în lungul rostului între componentele de sudat, cu viteză constantă - numită viteză de sudare, v_s . În acest fel se realizează topirea marginilor formând împreună cu materialul de adaos o baie de sudura 3;

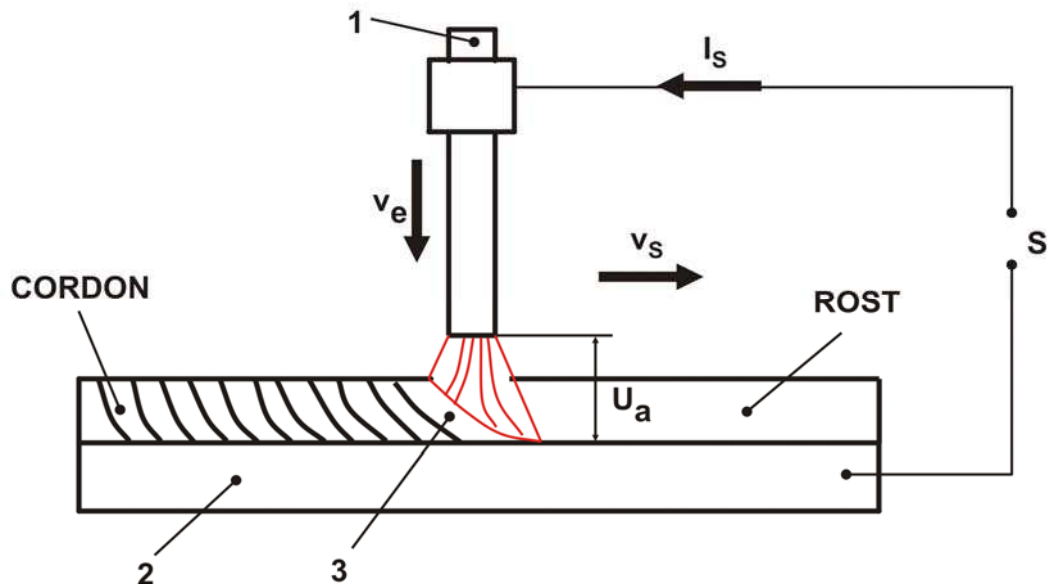


Fig. 2.1.

- urmărirea rostului și umplerea lui uniformă astfel ca după solidificarea băii să se realizeze un cordon continuu și cu dimensiuni geometrice impuse.

Se poate face o clasificare a procedeelelor de sudare cu arc în funcție de gradul în care sudorul participă la realizarea acestor operații:

- sudare manuală - când sudorul execută toate operațiile manual;
- sudare semimecanizată - când sudura se execută manual cu excepția alimentării cu sârmă electrod a procesului de sudare;
- sudare mecanizată - când toate operațiile de sudare se execută mecanizat, însă nu există circuit de reacție (feed back), sudorul trebuind să supravegheze continuu procesul, intervenind și reglând parametrii de lucru, funcție de modul de desfășurare al acestuia;
- sudare automată în care instalația este prevăzută cu circuit de reacție, astfel încât ea

autoreglează parametrii regimului de sudare și poziția relativă a elementelor metal de adaos și metal de bază, asigurând stabilitatea procesului. Sudorul intervine doar atunci când se defectează elementele instalației de sudare, sau se impune realimentarea cu materiale de sudare.

Clasificarea procedeelor de sudare cu arc electric poate fi făcută și în funcție de modul de protecție a băii de sudură. Baia de sudură trebuie protejată față de aerul din mediul înconjurător. Oxigenul din aer are ca efect modificarea compoziției chimice a aliajelor metalice, oxidând elementele de aliere în ordinea afinității lor față de acest element. Oxizii rezultați au ca efect reducerea rezistenței și a plasticității îmbinării sudate. Azotul din aer formează nitruri dure și casante producând tendințe de rupere fragilă, precum și de apariție a porilor. Influențe defavorabile au și alte gaze conținute în aer, dintre care și hidrogenul, care contribuie la fragilizarea oțelului.

Protecția băii de sudură precum și a cordonului de sudură se realizează fie cu ajutorul unui înveliș aplicat pe sârma electrod, fie cu un flux ce acoperă arcul electric, fie cu gaz sau amestec de gaze insuflate continuu în jurul arcului electric și a băii de sudură.

Un alt punct de vedere al clasificării procedeelor de sudare cu arc electric îl constituie modul de participare al electrodului la formarea băii. Arcul electric arde între un electrod de secțiune circulară și componentele de sudat. Electrocul poate fi fuzibil în condițiile în care se topește în procesul de sudare, furnizând materialul de adaos, material ce participă ca material depus în formarea cordonului. Electrocul poate fi nefuzibil când el nu participă la formarea cusăturii, el servind ca element între care se realizează arcul electric. Electrozii nefuzibili sunt cei de wolfram (tungsten) sau de cărbune. Electrozii de cărbune au o pondere tot mai mică în realizarea procedeelor de sudare cu arc electric datorită durabilității lor reduse.

Elementele geometrice ale unei îmbinări sudate sunt cordonul de sudură și zona influențată termic (termomecanic).

Cordonul de sudură (fig. 2.2) este partea îmbinării care leagă componentele de sudat și care se formează prin solidificarea băii de sudură.

Zona influențată termic (ZIT) este zona de trecere dintre cordonul de sudură și materialul de bază.

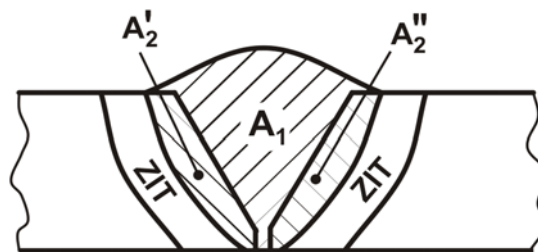


Fig. 2.2.

Cordonul de sudură este format de obicei din două straturi: stratul de rădăcină 1 și stratul de completare 2 – (fig. 2.3). Atât stratul de rădăcină cât și cel de completare pot fi realizat din mai multe treceri. În figura 2.3. stratul de completare 2 este realizat din trecerile

a, b, c, d etc.

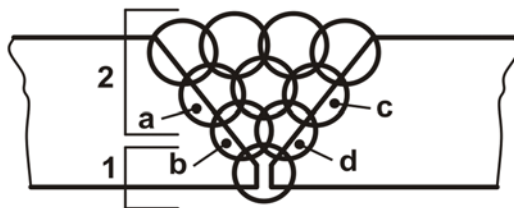


Fig. 2.3.

Dimensiunile cordonului și ale zonei influențate termic sunt date prin următoarele mărimi geometrice (fig.2.4).

- b - lățimea cusăturii;
- B - lățimea ZIT;
- p - pătrunderea cusăturii;
- P - pătrunderea ZIT.

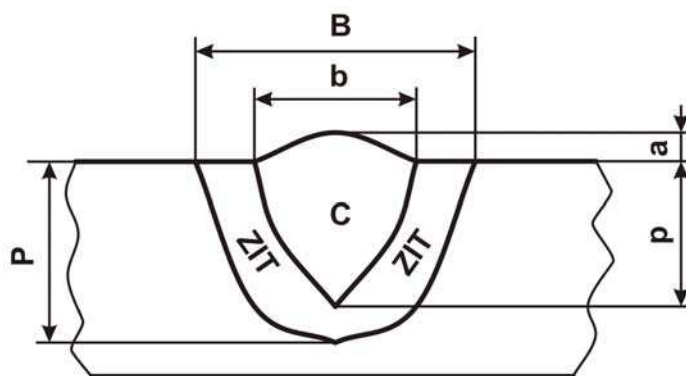


Fig. 2.4.

La formarea cordonului de sudură participă materialul de bază al componentelor de sudat, precum și materialul depus. Materialul depus provine din materialul de adaos, materialul sârmei electrod, suferind transformările de natură chimică, mecano-metalurgică ca urmare a trecerii prin arcul electric.

Referindu-ne la figura 3.2 aria cordonului se poate scrie ca o sumă dintre aria rostului și ariile A_2' și A_2'' provenite din topirea marginilor materialului de bază.

$$A = A_1 + A_2' + A_2''; \quad A_2 = A_2' + A_2'' \quad (2.1)$$

Participația materialului de bază și a materialului de adaos la realizarea cordonului de sudură este dată de expresiile:

$$p_{MB} = \frac{A_2}{A}; \quad p_{MA} = \frac{A_1}{A} \quad (2.2)$$

Participația p_{MB} mai poartă denumirea și de diluția materialului de bază în cordon.

Între cele două participații există relația:

$$p_{MB} + p_{MA} = 1 \quad (2.3)$$

Cunoașterea acestor participații are ca rezultat determinarea compoziției chimice a materialului cordonului de sudură precum și stabilirea eficienței procesului de sudare. Dacă se cunosc compozițiile chimice ale metalului de bază și ale metalului de adaos

precum și randamentul de trecere a elementelor de aliere din materialul de bază în baia de metal topit η_{MB} și a materialului de adaos prin arcul electric în baia de metal topit η_{MA} , atunci în cordon un element de aliere X_C va avea concentrația:

$$X_C = (\rho_{MB} \cdot \eta_{MB} \cdot X_{MB} + \rho_{MA} \cdot \eta_{MA} \cdot X_{MA}) \cdot \eta_p \quad (2.4)$$

în care X_{MB} și X_{MA} sunt concentrațiile respectivului element de aliere în materialul de bază, respectiv în materialul de adaos. Randamentul η_p este randamentul aferent materialului de protecție al arcului electric. Uneori $\eta_p > 1$ când din învelișul electrodului sau din stratul de flux se introduc în baia de metal topit elemente de formare sau aliere (pulbere de fier sau elemente de aliere) care măresc cantitatea de metal depus. Procedând astfel pentru toate elementele de aliere se poate estima aproximativ compoziția chimică a cordonului.

Al doilea obiectiv al cunoașterii participațiilor materialului de bază și materialului de adaos îl constituie stabilirea eficienței procesului de sudare.

În cazul în care prin sudare se realizează o îmbinare între două sau mai multe elemente, atunci este rațional ca participația materialului de bază să fie cât mai mare în dauna participației materialului de adaos. Prin aceasta se asigură o omogenitate a îmbinării și de asemenea se economisește o cantitate importantă de material de adaos și energie. În consecință în cazul cordoanelor de îmbinare între elementele unor structuri sudate se tinde spre inegalitatea:

$$\rho_{MB} \gg \rho_{MA} \quad (2.5)$$

Forma rostului îmbinării influențează esențial participațiile (tabel 2.1).

Tabel 2.1

Rost	ρ_{MA}	ρ_{MB}
I	0,5	0,5
V	0,7	0,3
U	0,8...0,9	0,2...0,1
X	0,6	0,4
K	0,55	0,45

Când prin sudare se realizează încărcarea unor suprafețe sau acoperirea acestora, în scopul asigurării rezistenței la uzură, coroziune, șoc a respectivei structuri, atunci este rațional ca participarea materialului de adaos să fie mai mare decât a materialului de bază. Participarea materialului de bază fiind atât cât este necesar pentru realizarea legăturii mecano-metalurgice dintre suprafețele structurii și a materialului depus.

În consecință la sudurile de încărcare sau de acoperire este rațional să se îndeplinească inegalitatea:

$$\rho_{MA} \gg \rho_{MB} \quad (2.6)$$

După cum se cunoaște de la „Bazele proceselor de sudare” zona influențată termic ZIT (zona influențată termomecanică) este zona din îmbinarea sudată cuprinsă între izotermele $T=T_t$ corespunzătoare marginii cordonului și $T=T_s$, corespunzătoare izotermei la care sau mai produs încă transformări structurale. Zona influențată termic este o zonă în

care compoziția chimică nu s-a modificat față de cea a materialului de bază, însă structura ei este diferită și variabilă. Această structură se datorește faptului că temperatura în urma procesului de sudare din această zonă variază după curba 1-2 (fig. 2.5).

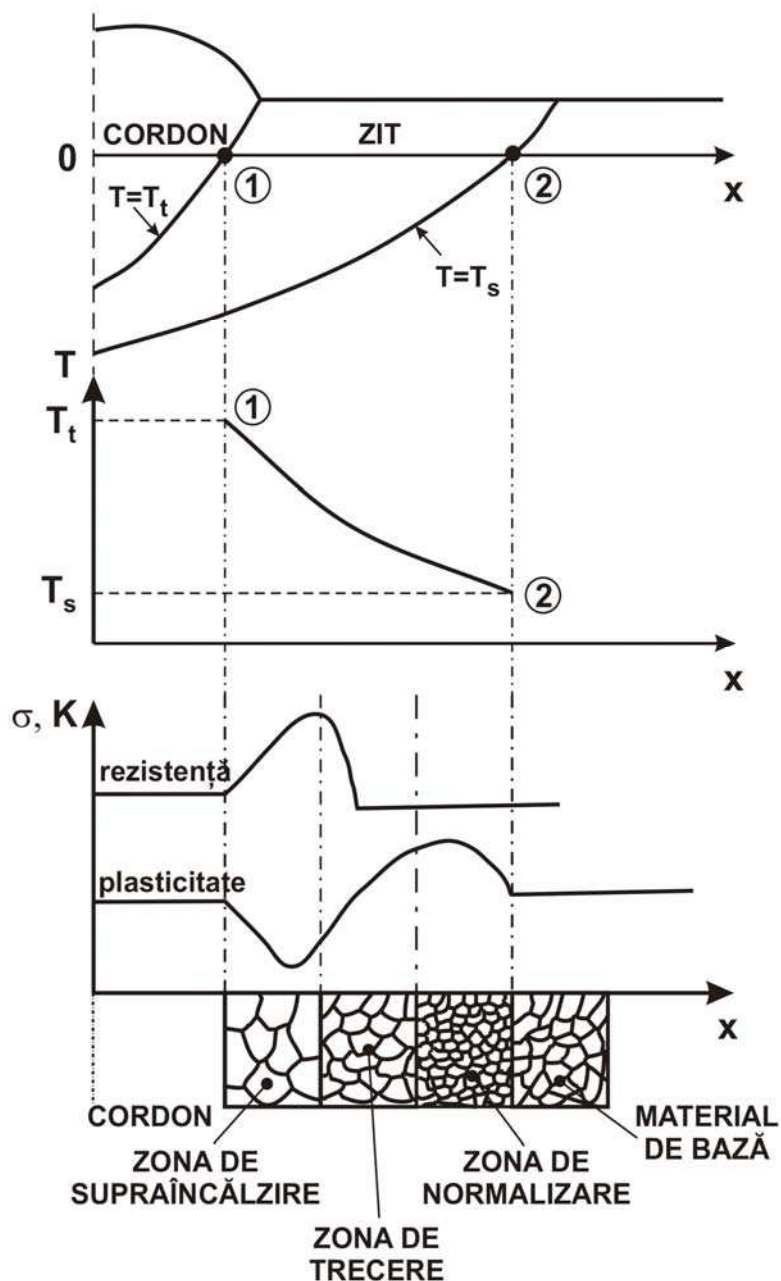


Fig. 2.5.

Lățimea zonei influențate termic depinde de procedeul de sudare precum și de parametrii regimului de sudare, aceștia intervenind prin cantitatea de căldură generată și administrată acestei zone din îmbinare. Structurile diferite pe lățimea zonei se datoresc și vitezelor diferite de răcire. Viteza de răcire a punctului 1 este mult mai mare decât viteza de răcire a punctului 2. Neomogenitatea termică pe lățimea ZIT, respectiv temperaturile diferite de încălzire precum și vitezele diferite de răcire, atrag după sine neomogenități de natură structurală și ale caracteristicilor mecanice. Astfel pentru oțelurile carbon și slab aliate:

- pornind de la $T=T_i$ până la $T=T_s$ vor apare transformări structurale diferite. Zona ZIT este structural eterogenă;
- lângă cordonul de sudură grăunții cristalini vor avea dimensiuni mai mari ca urmare a temperaturilor ridicate ce le-au dat posibilitatea de a se dezvolta. La temperaturile mai scăzute ale ZIT dimensiunile grăunților vor fi mai reduse, specifice structurii de normalizare;
- structurile din apropierea cordonului de sudură vor fi structuri îndepărtate de cele de echilibru, iar structurile din vecinătatea materialului de bază, neafectat termic, vor fi structural apropiate de cele de echilibru;
- structurile depărtate de cele de echilibru cu grăunți mari, au rezistență mecanică mare și plasticitate redusă, iar grăunții fini, specifici structurilor de echilibru au rezistență mică și plasticitate mare (fig. 2.5).

Ca atare, cordonul de sudură și ZIT sunt nu numai zone de neomogenitate chimică și structurală ci și de neomogenitate a caracteristicilor mecanice. Datorită acestor particularități ale ZIT, ea constituie zona cea mai sensibilă a îmbinării sudate.

Pozițiile de sudare la sudarea cu arc electric sunt prezentate în figura 2.6. Considerând pentru un cordon axa Y - axa în lungul cordonului și axa X perpendiculară pe suprafața liberă a cordonului (fig. 2.6) distingem următoarele poziții de sudare:

1. poziție orizontală în plan orizontal;
2. poziție orizontală în plan înclinat;
3. poziție orizontală în plan vertical (de cornișă);
4. poziție orizontală de plafon;
5. poziție înclinată;
6. poziție înclinată în plan înclinat;
7. poziție înclinată în plan vertical;
8. poziție înclinată de plafon;
9. poziție verticală.

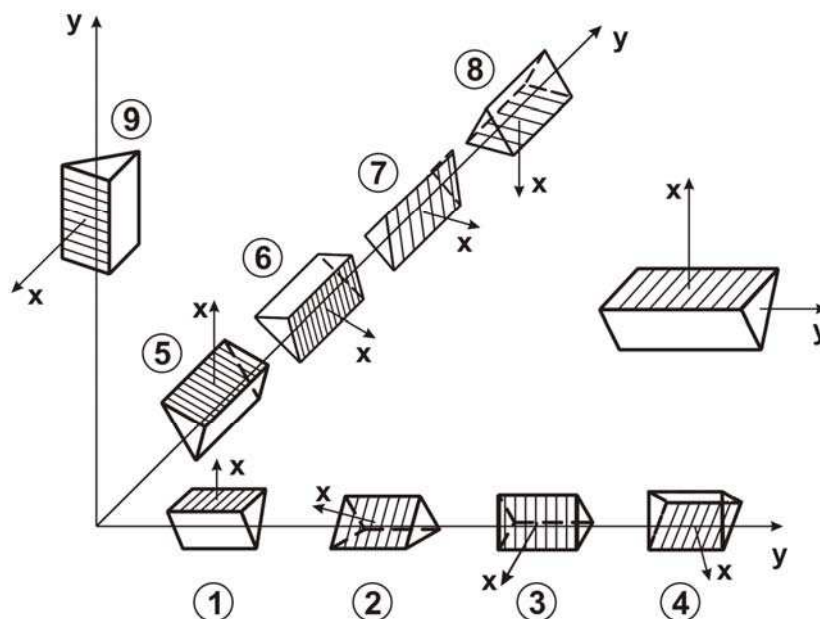


Fig. 2.6.

Ordinea preferențială a pozițiilor de sudare din punct de vedere tehnic și ergonomic este: 1, 2, 5, 6, 7, 9, 8, 4.

Rolul dispozitivelor și instalațiilor de mecanizare ale sudării constă și în aceea de a aduce rosturile de sudură într-o poziție cât mai apropiată de a primelor poziții din ordinea preferențială asigurându-se astfel calitatea corespunzătoare îmbinării precum și un efort minim din partea operatorului.

Stabilitatea mecanică a arcului electric este de fapt denumirea care se dă interacțiunii dintre forța electrodinamică (F_{ed}) și forța electrostatică (F_{es}) – forța lui Coulomb (fig. 2.7).

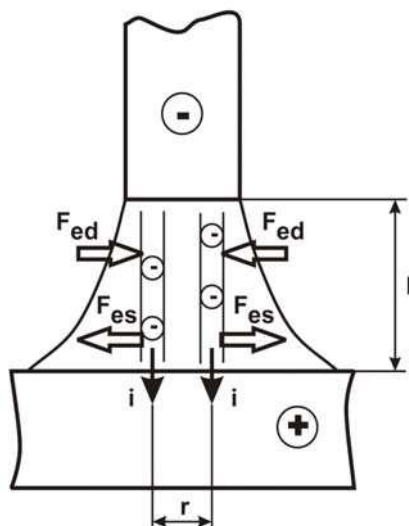


Fig. 2.7.

Electronii ce parcurg coloana arcului materializează conductori străbătuți de curent electric. Între doi conductori, aflați într-un mediu cu permeabilitatea magnetică μ , străbătuți de curentul i , în același sens, aflați la distanța r și având lungimea l se exercită forța de atracție electrodinamică:

$$F_{ed} = \mu \cdot \sum \frac{i^2 \cdot l}{2 \cdot \pi \cdot r} \quad (2.7)$$

Totodată, între sarcinile de același semn, adică între electronii negativi aflați în mediu cu permitivitatea electrică ϵ , apar forțe electrostatice de respingere de tip coulombian:

$$F_{es} = \frac{1}{4 \cdot \pi} \sum \frac{e^2}{\epsilon \cdot r^2} \quad (2.8)$$

Forma arcului electric este dată de echilibrul dintre cele două forțe. Dacă în arcul electric electronii sunt mulți (datorită intensității mari a curentului electric) și au viteză mică (datorită tensiunii mici a arcului electric) atunci $F_{ed} > F_{es}$, arcul electric devine constrâns, concentrând magnetic sarcina electrică și asigurând o pătrundere mai mare în materialul de bază legat la polul pozitiv. (fig. 2.8a).

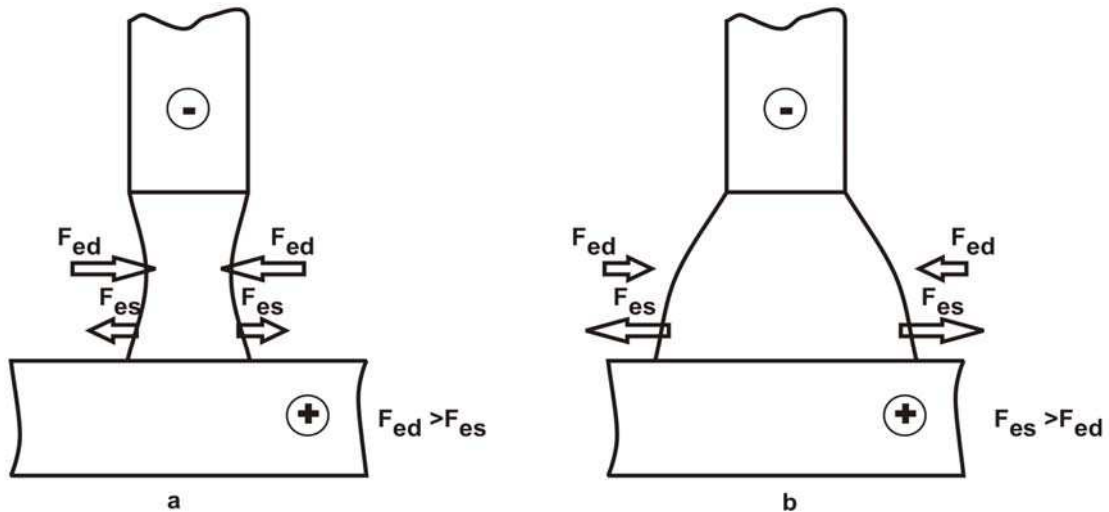


Fig. 2.8.

Dacă în arcul electric electronii sunt puțini (datorită intensității mici a curentului electric) și au viteză mare (datorită tensiunii mari a arcului electric) atunci $F_{es} > F_{ed}$, arcul electric devine disipat, (arc „butoi”), diametrul arcului crește, lățimea cordonului crește iar pătrunderea în materialul de bază, legat la polul pozitiv, scade (fig. 2.8b).

Suflajul magnetic al arcului electric (suflul arcului) este fenomenul electromagnetic de deviere a coloanei arcului sub acțiunea forțelor electromagnetice din zona procesului de sudare. Arcul electric materializează un conductor străbătut de curent electric. Acest conductor, aflat în câmp magnetic staționar, la sudarea în curent continuu, este supus forței electromagnetice. În jurul componentelor de sudat și a electrodului apar linii de câmp magnetic care se pot aduna sau scădea, exercitând presiune magnetică asupra arcului electric.

Astfel (fig. 2.9a) dacă se sudează cu polul pozitiv legat la piesa de masă, plasată în partea stângă a componentelor de sudat, atunci în jurul pieselor apare inducția magnetică B_1 și în jurul electrodului inducția magnetică B_2 . Cele două câmpuri magnetice se vor compune. Sub acțiunea însumată a inducțiilor B_1 și B_2 arcul va fi deviat spre dreapta.

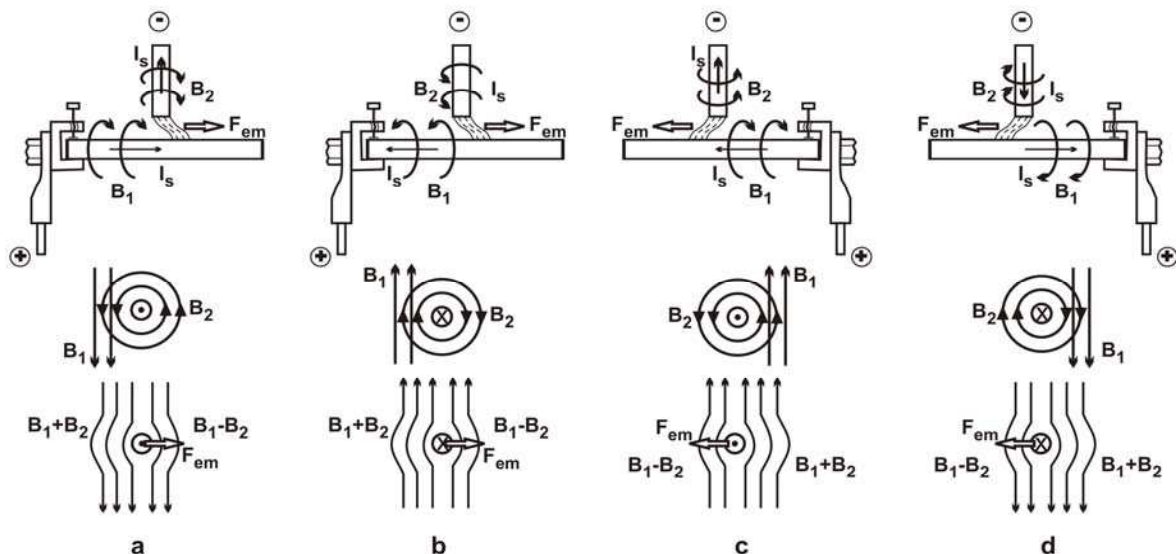


Fig. 2.9.

Folosind aceeași interpretare, dar schimbând polaritatea curentului și poziția piesei de masă se constată că arcul electric va fi deviat în sens contrar piesei de masă. Schimbarea sensului intensității curentului electric nu modifică sensul forței electromagnetice de suflaj al arcului (fig. 2.9 b, c, d).

Suflajul magnetic al arcului electric este un fenomen fizic de obicei nedorit datorită orientării mai pregnante a arcului electric asupra unei componente de sudat, realizând abateri ale cordonului de la forma rostului.

Suflajul magnetic se elimină prin folosirea curentului alternativ la sudare, la care inducțiile magnetice nu-și mai păstrează sensul. Suflajul poate fi redus substanțial prin folosirea a două piese de masă plasate în planul sârmei electrod de o parte și de alta a acestuia. Prin simetrizarea alimentării curentului de sudare dispăre fenomenul de suflaj magnetic (fig. 2.10).

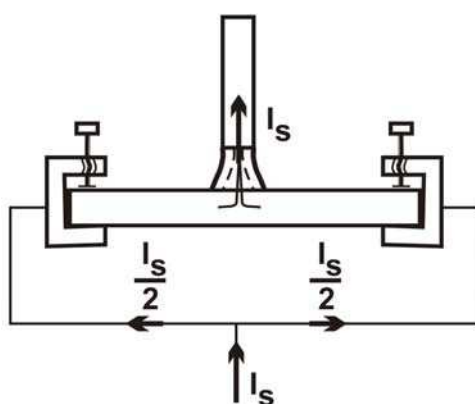


Fig. 2.10.

Craterul este un fenomen particular care degradează forma îmbinării și care se produce la întreruperea curentului de sudare (accidentală sau voită). Datorită fenomenului de autoinducție, metalul lichid din baia de metal topit este aspirat formându-se la întreruperea curentului un crater la capătul cordonului de sudură.

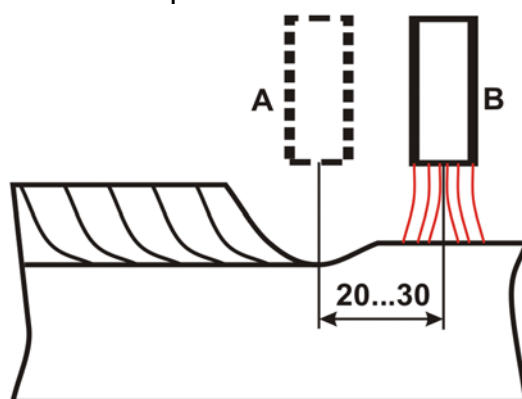


Fig. 2.11.

Acest crater are dezavantajul major al reducerii rezistenței la oboseală a îmbinării sudate. Pentru evitarea craterului arcul electric nu se va stinge la capătul cordonului (în poziția A) ci la o distanță de 20...30 mm de capătul cordonului (în poziția B) – (fig. 2.11). Aprinderea arcului electric, pentru continuarea cordonului de sudură, se va face în poziția B

a electrodului, arcul va fi adus apoi în poziția A și procesul va fi continuat. Se evită astfel creșterea pătrunderii în zona craterului și coeficientul de concentrare a tensiunilor se micșorează.

Forma rostului la sudarea componentelor cu arcul electric este dictată de următorii factori.

1. Cel mai important factor îl constituie capacitatea portantă a îmbinării, respectiv transmiterea fluxului de forță prin îmbinarea sudată de la o componentă la alta. Dacă fluxul de forță este transmis static îmbinarea poate fi realizată cu pătrundere mai redusă, uneori chiar incompletă astfel încât, sub aspectul calibrului îmbinării, ea să reziste solicitărilor exterioare. În cazul în care îmbinarea este solicitată dinamic, cu șocuri sau funcționează la temperaturi scăzute, este necesară o pătrundere completă pentru a se evita concentratorii de tensiune în zona cordonului de sudură sau a se diminua aceștia;

2. Rostul este impus și de procedeul de sudare. Cu cât procedeul de sudare conferă cusăturii o pătrundere mai mare cu atât rostul trebuie să fie mai îngust și mai puțin deschis;

3. Poziția de sudare influențează forma rostului. În condițiile unor tendințe de curgere gravitațională a băii de sudură este posibil să se aleagă rosturi cât mai mici pentru ca baia de sudură să fie mai puțin bogată, iar arcul electric prin efectul presiunii dinamice și prin constrângerea lui în câmpul de forțe proprii să evite tendința de curgere a băii;

4. Rostul trebuie ales și în funcție de accesibilitatea arcului electric în rost pentru a avea posibilitatea topirii marginilor componentelor și de a asigura o baie comună, deci o bună legătură între elementele asamblate prin cordon;

5. La alegerea rostului trebuie avută în vedere și posibilitatea de susținere a băii la rădăcina cusăturii în timpul sudării pentru evitarea curgerii gravitaționale a băii. Susținerea rădăcinii cusăturii se poate face:

- cu benzi de metal de același fel cu materialul de bază sudate la rădăcină;
- cu plăci de cupru, cu sau fără răcire forțată, plasate la rădăcina rostului;
- cu pernă de flux presată asupra rădăcinii rostului;
- cu benzi lipite din componente adezive, în interiorul benzilor aflându-se un flux într-un liant;
- cu patină de cupru răcită în prealabil și care urmărește arcul de sudare în condițiile sudării stratului de rădăcină;
- cu patină ceramică care, de obicei, nu se răcește asigurând formarea și reținerea materialului depus la rădăcina rostului îmbinării;

6. Sub aspect economic este necesar ca secțiunea rostului să fie cât mai mică reducându-se consumul de material de adaos și de material de bază. Se reduce și volumul prelucrărilor ce au contribuit la formarea rostului.

Realizarea rostului se face prin mai multe procedee:

- a) debitare mecanică prin forfecare (cel mai ieftin procedeu);
- b) tăiere termică (cel mai răspândit procedeu dar limitat din punct de vedere al geometriei

rostului). Se poate face cu flacăra oxigaz sau cu jet de plasmă;

c) prelucrare mecanică prin aşchiere (cel mai scump procedeu dar permite formarea oricărei geometrii a rostului);

7. La alegerea rostului se are în vedere şi deformaţia pieselor sudate. Deformaţia este redusă atunci când secţiunea rostului este mică, când baia de metal topit este redusă volumic şi când se sudează cu pendulare, deci cu balansarea arcului electric în raport cu componentele de sudat;

8. Factorul determinant în alegerea rostului este grosimea componentelor.

Principalele tipuri de rosturi sunt rosturi cap la cap şi de colţ. Rosturile cap la cap pot fi: rosturi simple şi rosturi duble. În figura 2.12 se prezintă şi limitele de grosimi la care se aplică uzual aceste tipuri de rosturi. Rosturile la îmbinările de colţ sunt rosturi corespunzătoare îmbinărilor în T, prin suprapunere sau în găuri.








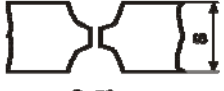


Tip	Rosturi simple	Tip	Rosturi duble
I	 S<S mm	I	 S<16 mm
V	 5<S<16 mm	X	 10<S<50 mm
V	 8<S<16 mm	K	 10<S<25 mm
U	 12<S<80 mm	H	 S>50 mm
U	 12<S<80 mm	K	 S>40 mm

Fig. 2.12.

Rosturile la îmbinările de colţ în T (fig. 2.13) pot fi cu prelucrare unilaterală (a) şi bilaterală (b), sau fără prelucrarea rostului (c). În figura 2.13 (d, e, f) se prezintă şi alte variante ale sudării de colţ în T.

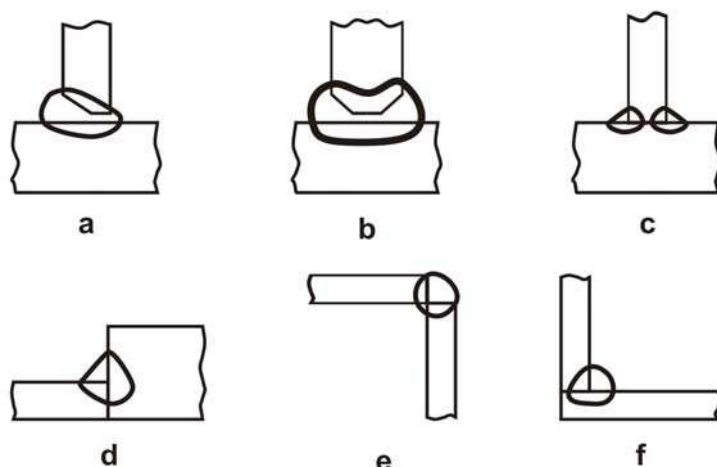


Fig. 2.13.

Cordoanele de sudură la îmbinările sudate de colț prin suprapunere pot fi cordoane frontale (fig.2.14a) sau cordoane laterale (fig.2.14b).

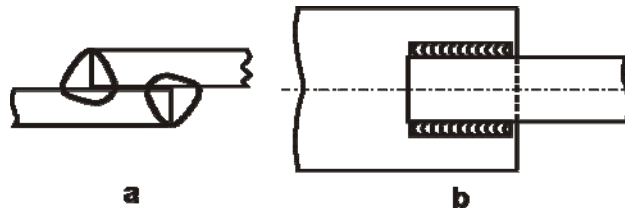


Fig. 2.14.

În cazul în care capacitatea portantă a cordoanelor exterioare îmbinării este insuficientă, în una din componente se pot practica găuri, urmând să se realizeze îmbinarea sudată în găuri (fig.2.15).

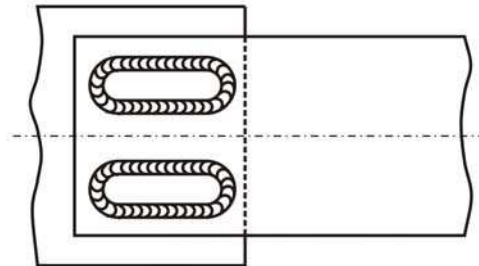


Fig. 2.15.

2.2. Polaritatea curentului electric

La sudarea cu arc electric polaritatea curentului este de mare importanță privind cantitatea de căldură administrată materialului de bază sau electrodului (fig. 2.16).

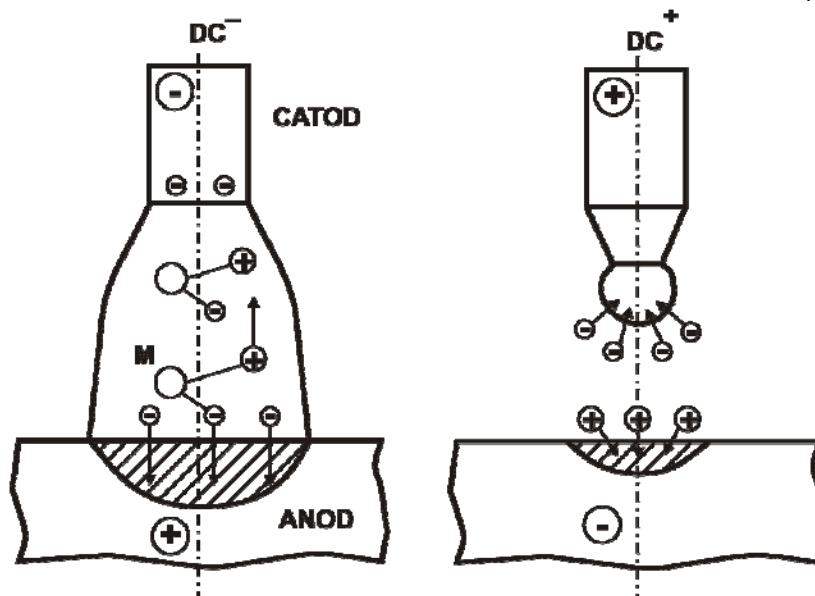


Fig. 2.16.

Electronii proveniți din cele trei tipuri de emisie electronică sunt mai ușori decât ionii pozitivi, dar viteza lor de deplasare este foarte mare, aproximativ 100 m/s. Ca atare, aceștia bombardează anodul, creând impactul loviturii, energetic cauzând în felul acesta

temperaturi ridicate la polul pozitiv. Deci, atunci când se sudează în varianta DC^- , adică electrodul este legat la polul negativ iar materialul de bază la polul pozitiv (polaritate directă), datorită impactului materialului de bază cu electronii, baia de metal topit va fi mai bogată iar temperatura electrodului va fi mai redusă.

În cazul în care electrodul se leagă la polul pozitiv, se sudează în varianta DC^+ (polaritate inversă), atunci electronii cu viteză mare bombardează electrodul realizând o topire mai pronunțată a acestuia; baia de metal topit din materialul de bază este mai redusă dimensional iar temperatura acesteia mai scăzută. Ca atare, când electrodul este confecționat din material refractar, practic nefuzibil, este preferabil ca acesta să fie legat la polul negativ astfel încât bombardamentul electronic să fie evitat, iar consumul de material refractar pentru realizarea electrodului să fie mai mic. Este cazul sudării cu electrozi de wolfram (tungsten) La sudarea cu electrod ce constituie material de adaos se preferă ca acesta să fie legat la polaritatea pozitivă, când dorim un exces de material depus, fie la polaritatea negativă atunci când dorim o topire mai pronunțată a materialului de bază (o pătrundere mai bună).

În cazul polarității DC^+ rolul ionilor pozitivi ce se deplasează cu viteza de aproximativ 1 ... 2 m/s este deosebit de important în ceea ce privește curățirea de oxizi a băii metalice de pe materialul de bază. Dacă ionii pozitivi sunt grei (ioni de argon) atunci ei realizează un efect de impact asupra oxizilor de la suprafața băii, fenomen ce se numește „microsablare”, asigurând astfel obținerea unei băi de sudură curate. Dacă ionii pozitivi sunt ușori (ioni de heliu) atunci fenomenul de rupere a peliculei de oxid este îngreunat. Un fenomen important de microsablare se obține atunci când se sudează în curent alternativ. Ca urmare a schimbării frecvențe a polarității are loc fenomenul de rupere a peliculei de oxid și realizării unui cordon de sudură în condiții bune de calitate.

2.3. Recomandări la realizarea sudurilor [3]

În baza experienței de proiectare și tehnologică la realizarea construcțiilor sudate se pot stabili următoarele recomandări:

1. La realizarea unei structuri sudate se va folosi un număr cât mai mic de cordoane de sudură. Ori de câte ori este posibil se va reduce numărul sudurilor unei structuri;

2. Sudurile întrerupte se vor evita în raport cu sudurile continue, îmbinările de rezistență necesitând suduri continue. Sudurile întrerupte se realizează de obicei pentru rigidizări (punctări), prindere provizorie etc. Transformarea mai multor suduri scurte în una lungă este binevenită fiindcă realizează posibilitatea mecanizării operației de sudare și reduce concentratorii de tensiune. La sudurile întrerupte există pericolul coroziunii între elementele îmbinate. Ca atare, este mai bine a se realiza un cordon de calibru redus și lungime mai mare decât un cordon de calibru mare și lungime redusă.

3. Se vor evita sudurile în cruce pentru că ele sunt mari concentratoare de

tensiuni interne și creează stări de solicitare bi și triaxială, deci au o tendință pronunțată spre fisurare și fragilizare.

4. La realizarea cusăturii cap la cap sau de colț supraînălțarea acestora va fi cât mai mică posibil pentru că odată cu creșterea supraînălțării crește coeficientul de concentrare al tensiunilor, scade deci rezistența la solicitări variabile. La aceasta se mai adaugă și creșterea costului sudării provocate de surplusul de material de adaos precum și deformațiile suplimentare ale îmbinării sudate.

5. Acolo unde este posibil se va înlocui rostul în formă de V cu rost în formă de I apelând la procedee de sudare cu pătrundere adâncă. De asemenea, se vor înlocui, când este posibil, rosturile duble prin rosturi simple, în forma jumătăților de rost. În felul acesta se reduce cantitatea de prelucrări mecanice sau termice pentru confecționarea rostului precum și cantitatea de metal depus.

6. Componentele de grosime mare ($S > 20 \dots 50$ mm) este preferabil să se realizeze cu rosturi duble, acestea asigurând o economie de material depus în raport cu rosturile simple la aceiași grosime.

7. La stabilirea procesului tehnologic de asamblare prin sudare, precum și la proiectarea unor structuri sudate se va avea în vedere ca realizarea acestora să se execute pe subansamble. Prin aceasta se obțin următoarele avantaje:

- mai mulți lucrători pot lucra simultan;
- se obține un acces mai confortabil la regiunile unde se sudează;
- deformațiile și tensiunile reziduale scad;
- se pot aplica detensionări pe subansamble;
- controlul îmbinării sudate este mult ușurat.

8. La realizarea rigidizărilor prin gusee și diafragme nu este nevoie de multe suduri. Pot fi realizate cusături scurte și de secțiune mică.

9. La realizarea unor îmbinări sudate componentele trebuie pregătite în prealabil, uscate, periate sau polizate de rugină, degresate de uleiuri, îndepărtate impuritățile, toate acestea ducând la o calitate bună a sudurii. Se va avea în vedere faptul că „lucrul bine făcut de la început este cel mai ieftin” [3].

2.4. Transferul short-arc și transferul spray-arc.

După modul cum se produce transferul masic în arcul electric de sudare distingem:

- transfer cu arc scurt sau short-arc;
- transfer cu arc lung sau spray-arc.

La sudarea short-arc dimensiunile picăturilor sunt comparabile cu diametrul electrodului. Sudarea short-arc este de două categorii:

- sudare cu arc înecat;
- sudare cu arc globular.

La sudarea cu arc înecat (fig. 2.17) periodic tensiunea arcului se anulează ca urmare a scurtcircuitării coloanei arcului de masa de metal lichid provenită din materialul

topit al electrodului. Arcul înecat prezintă fazele de formare a picăturii, scurtcircuitarea coloanei arcului și desprinderea picăturii. Transferul prin arc înecat se produce atunci când viteza de avans a sârmei electrod depășește viteza de topire a acesteia.

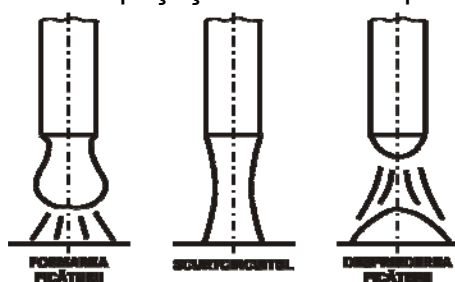


Fig. 2.17.

La acest transfer arcul electric se reaprinde și se stinge (se înecă) cu frecvența producerii scurtcircuitării lui prin materialul topit al electrodului. Transferul short-arc cu arc înecat se produce la valorile cele mai mici posibile ale intensității curentului de sudare.

Transferul short-arc globular, se caracterizează prin aceea că arcul electric nu se mai scurtcircuitează, picăturile de material topit din electrod se insularizează, dimensiunile picăturilor fiind comparabile cu diametrul electrodului (fig.2.18). Transferul globular are trei faze, constând în formarea picăturii, insularizarea picăturii sau fracționarea coloanei arcului și depunerea picăturii.

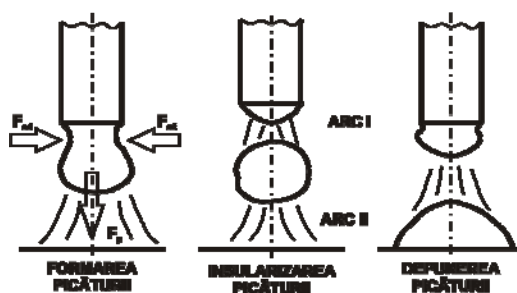


Fig. 2.18.

Trecerea de la transferul prin arc înecat la transferul globular se realizează prin mărirea intensității curentului electric de sudare. Acest lucru conduce la creșterea forței electrodinamice F_{ed} , (fig.2.18), a efectului Pinch și desprinderea mai ușoară a picăturii. Totodată crește și forța coulombiană F_p care atrage mai energic metalul topit din vârful electrodului.

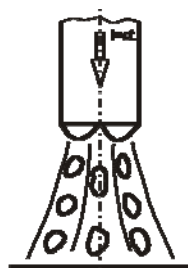


Fig. 2.19.

Transferul spray-arc are loc la intensitățile cele mai mari ale curentului de sudare. Ca atare, forțele electrodinamice și coulombiene au valori foarte mari conducând la formarea și insularizarea simultană a mai multor picături (fig.2.19). Micșorarea picăturilor se datorește și exploziei gazelor provenite sub forma de bule, în metalul lichid, din reacții chimice la nivelul picăturii sau ca urmare a vaporizării metalelor și aliajelor picăturii.

Un alt tip de transfer masic este transferul prin arc pulsant (fig.2.20). La acest transfer intensitatea curentului de sudare pulsează între o intensitate minimă, de bază,

care să mențină arcul electric și o intensitate maximă, de vârf, care să asigure o astfel de cantitate de căldură și asemenea forțe în metalul topit astfel ca să producă desprinderea picăturii. Are loc deci o deplasare ordonată (organizată) a picăturilor prin arcul electric cu frecvența dictată de variația intensității curentului de sudare produsă de sursa de sudare. Se asigura totodată și un control al dimensiunii picăturilor și al temperaturii acestora. Aceste motive au făcut ca transferul cu arc pulsant să fie din ce în ce mai răspândit în construcția surselor de sudare și mult cerut de tehnologiile de sudare.

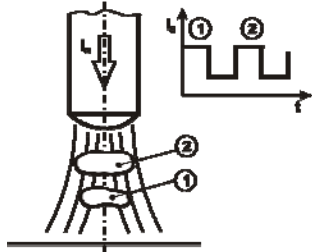


Fig. 2.20.

2.5. Clasificarea procedeelor de sudare cu arc electric

În schema alăturată se prezintă procedeele posibile (nu însă toate aplicate) de sudare cu arc electric.

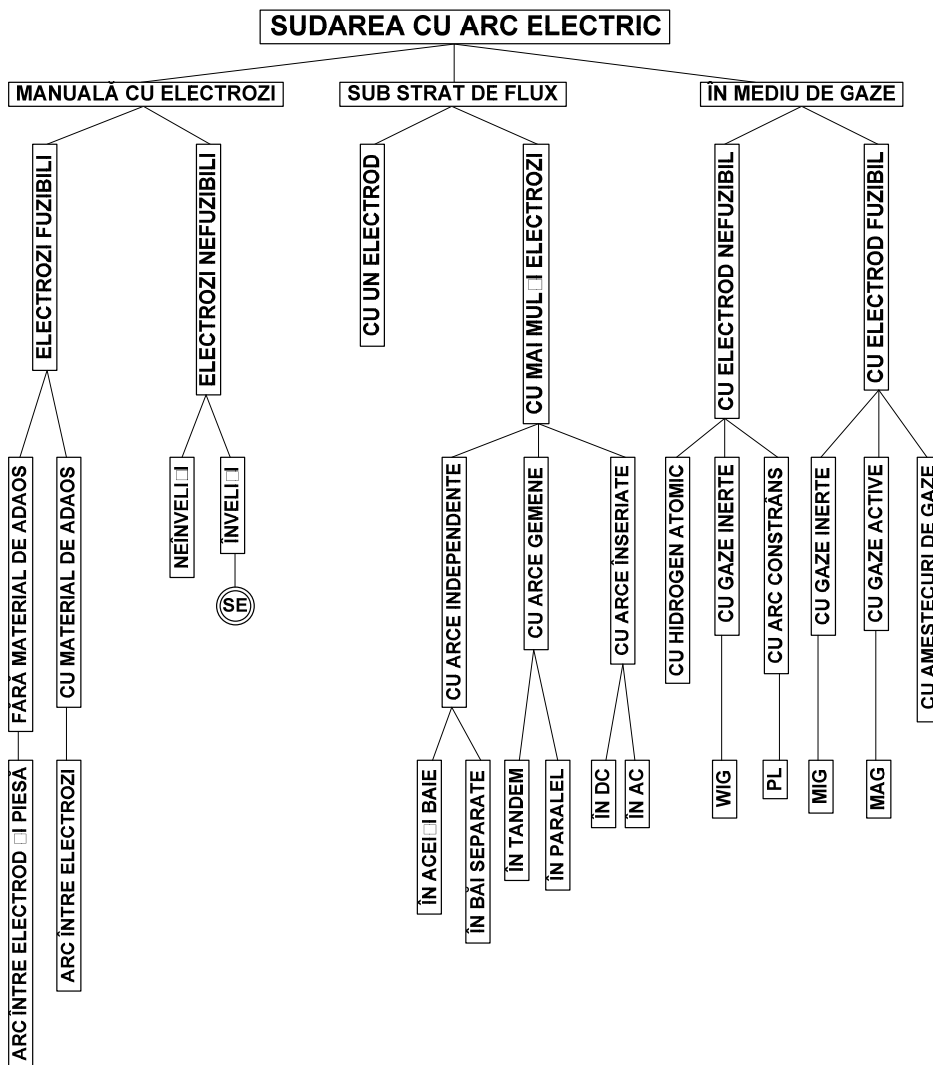


Fig. 2.21

CAP. 3. ALGORITMUL DE CALCUL AL TEHNOLOGIEI DE SUDARE CU ARC ELECTRIC

3.1. Parametrii tehnologici la sudarea cu arc electric

Tehnologia este factorul principal al oricărei activități umane Tehnologia reprezintă un ansamblu de informații necesare pentru realizarea unei anumite categorii de construcții.

În cazul construcțiilor (structurilor) sudate, tehnologia prezintă modul cum trebuie să se acționeze pentru a satisface cerințele funcționale și de exploatare ale respectivei structuri. Acest capitol primar al tehnologiei de sudare prin topire se va referi în special la tehnologia sudării cu arcul electric, aceasta fiind tehnologia cu cea mai răspândită în realizarea structurilor sudate.

În capitolele care vor urma se vor prezenta tehnologii de sudare specifice diferitelor procedee, atât din categoria celor cu arcul electric cât și din categoria celorlalte. Deci, în cazul sudării cu arcul electric, tehnologia de sudare este determinată de o serie de mărimi, numite parametri tehnologici de sudare.

Ca atare, a elabora tehnologia de sudare, înseamnă a determina valorile parametrilor tehnologici de sudare astfel încât să se obțină o structură sudată în condiții de calitate, precizie dimensională, productivitate ridicată și cost de producție minim.

La elaborarea tehnologiei de sudare cu arcul electric se are în vedere trei categorii de parametri tehnologici de sudare: primari, secundari și terțiari.

a. Parametrii tehnologici primari

Acești parametri sunt următorii:

- Intensitatea curentului de sudare este definită drept intensitatea curentului electric ce trece prin arcul electric între electrod și materialul de bază în timpul sudării (I_s);
- Tensiunea arcului, este definită drept tensiunea electrică între electrod și materialul de bază, respectiv tensiunea coloanei arcului (U_a);
- Viteza de sudare, reprezintă viteza de deplasare a arcului electric în lungul rostului dintre elementele de sudat (v_s);
- Energia liniară, reprezintă energia electrică administrată procesului de sudare pe unitatea de lungime a cordonului (E_L), ea fiind stabilită prin relația:

$$E_L = \frac{I_s \cdot U_a}{v_s} \quad (3.1)$$

Parametrii tehnologici primari influențează dimensiunile cordonului și ale zonei influențate termomecanic, precum și stabilitatea arcului și rata depunerii.

Pătrunderea crește liniar cu creșterea curentului de sudare, crește cu un maxim funcție de tensiunea arcului și scade odată cu creșterea vitezei de sudare (fig. 3.1).

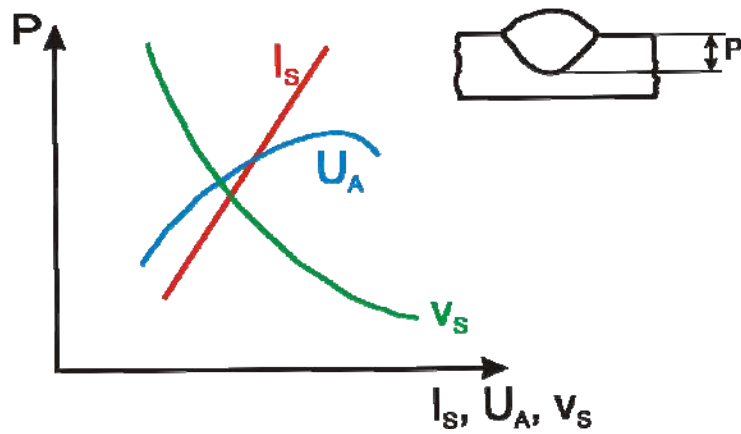


Fig. 3.1.

Lățimea cordonului b crește linear cu tensiunea arcului crește cu un maxim în raport cu intensitatea curentului și scade în raport cu viteza de sudare (fig. 3.2.).

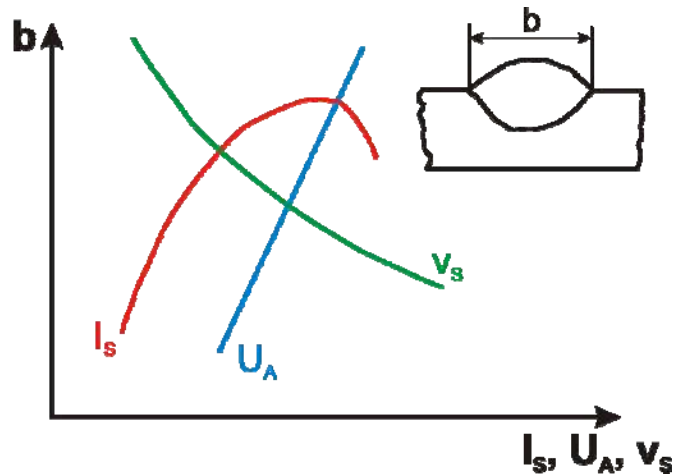


Fig. 3.2.

Supraînălțarea cordonului a scade odată cu creșterea vitezei de sudare și crește cu creșterea curentului de sudare (fig. 3.3).

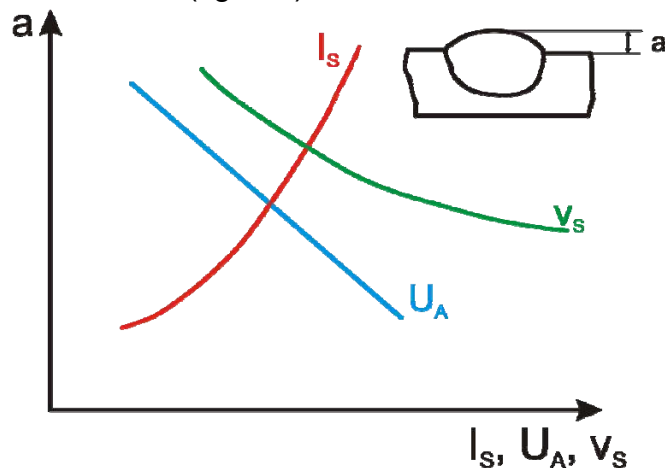


Fig. 3.3.

Analizând principal lucrurile, în anumite limite valorice, observăm că intensitatea curentului influențează în sensul creșterii tuturor dimensiunilor cordonului. În schimb, viteza de sudare influențează în sensul scăderii tuturor dimensiunilor cordonului de sudură.

b. Parametri tehnologici secundari

Acești parametri sunt următorii (fig.3.4):

- Lungimea arcului (L_a) este distanța de la capătul electrodului până la baia de sudură;

- Lungimea liberă (L_l) este distanța de la contactul electric al electrodului (sârmei) până la capătul electrodului ce poartă arcul electric, sau, altfel spus, este distanța de la piesa de contact a sârmei electrod până la arcul electric;
- Viteza materialului de adaos (V_a) este viteza cu care avansează electrodul în baia de sudură;
- Poziția electrodului este poziția definită prin unghiurile de poziție ale electrodului în raport cu componentele de sudat.

Parametrii tehnologici secundari nu influențează direct dimensiunile cusăturii. Dimensiunile cusăturii pot fi însă influențate de aceștia doar prin intermediul parametrilor tehnologici primari. Lungimea arcului, L_a , influențează în primul rând asupra transferului de material prin arcul electric. Dacă lungimea arcului este mică, apropiată de zero, transferul este short-arc (sha). Dacă lungimea arcului crește, atunci transferul este spray-arc (spa). Transferul short și spray este în funcție evident și de mărimea curentului de sudare.

Se spune că dacă:

- $L_a < d_e$ - se sudează cu arc scurt;
- $L_a = d_e$ - se sudează cu arc normal;
- $L_a > d_e$ - se sudează cu arc lung.

Lungimea liberă (L_l) influențează prin rezistența electrică a electrodului pe care o introduce în circuitul electric, între piesa de contact a sârmei electrod și arcul electric.

Rezistența electrică a lungimii libere:

$$R_L = \rho_e \cdot \frac{L_l}{\pi \cdot d_e^2} \quad (3.2)$$

în care ρ_e este rezistivitatea materialului electrodului la temperatura de funcționare, influențează în primul rând curentul de sudare, cu creșterea lungimii libere, crește rezistența R_L , în felul acesta, considerând U_L constant, scade intensitatea curentului de sudare

$$I_s = \frac{U_L}{R_L} \quad (3.3)$$

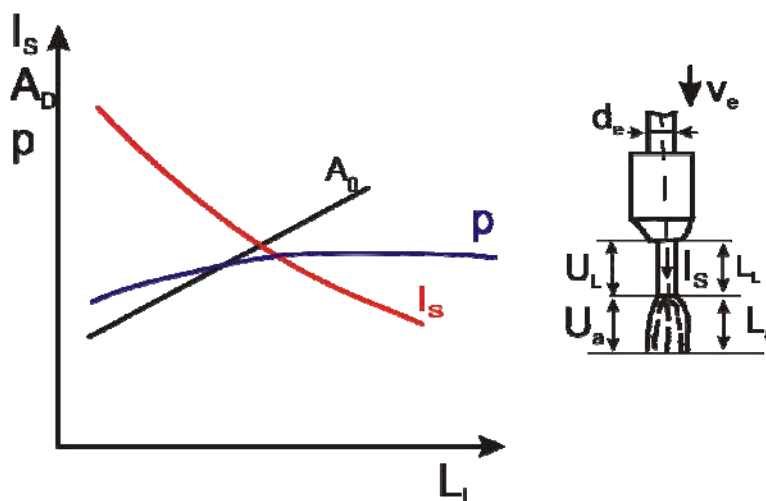


Fig. 3.4.

Odată cu creșterea lungimii libere, crește cantitatea de căldură administrată procesului de sudare. Cantitatea de căldură administrată suplimentar față de arcul electric procesului de sudare prin efect Joule, în timpul t corespunzător trecerii sârmei cu viteza v prin zona lungimii libere este dată de:

$$Q = R_L \cdot I_S \cdot t = R_L \cdot I_S^2 \cdot \frac{L_L}{v_e} = \rho_e \cdot \frac{L_L^2}{\pi \cdot d_e^2} \cdot \frac{I_S^2}{v_e} \quad (3.4)$$

Se observă că odată cu creșterea lungimii libere crește cantitatea de căldură, administrată procesului, sârma pătrunde în arcul electric mai cald și, ca atare, crește rata depunerii A_D (fig. 3.4). Pătrunderea p are o ușoară creștere nesemnificativă cu lungimea liberă. Poziția electrodului în raport cu piesele de sudat poate fi definită față de un sistem de referință plan orizontal - plan vertical sau în raport cu un sistem de referință solidar cu piesele de sudat. În raport cu un sistem de referință plan vertical (fig.3.5) electrodul este poziționat la unghiul β .

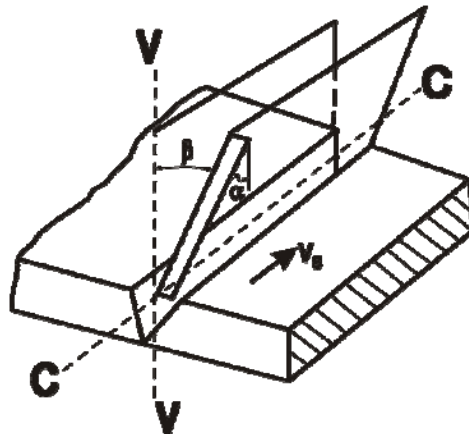


Fig. 3.5.

Unghiul β se ia în funcție de poziția de sudare astfel încât să se asigure autosustinererea băii de metal topit în condițiile în care aceasta nu este susținută artificial. Poziția electrodului în raport cu axa longitudinală c - c a rostului este definită de unghiul α , unghiul axei electrodului în raport cu normala la rost, măsurată în planul de deplasare a electrodului corespunzător vitezei de sudare v_s .

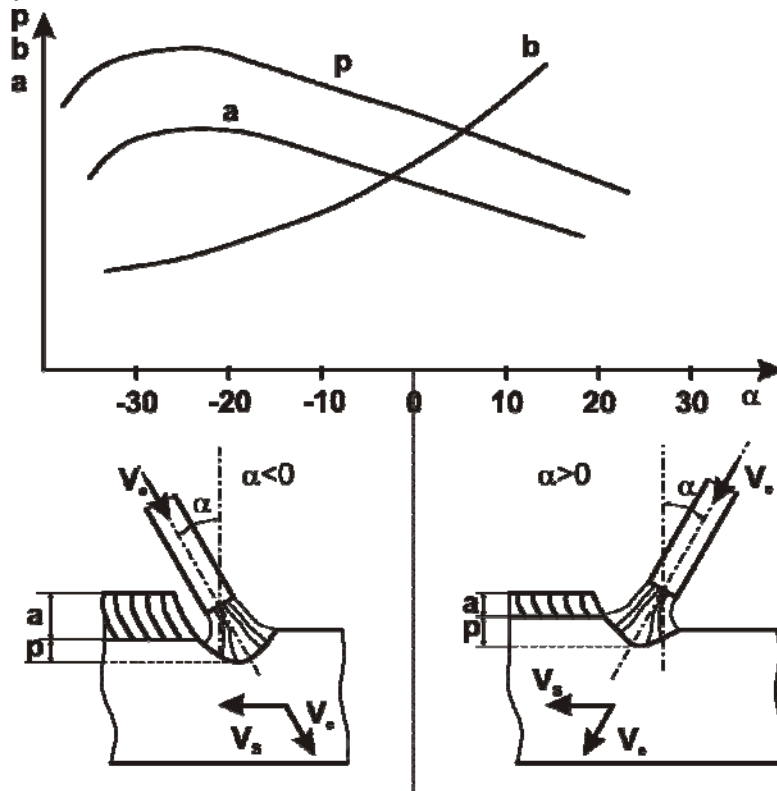


Fig. 3.6.

Unghiul este negativ atunci când, vectorul v_e face în raport cu vectorul v_s un unghi mai mare decât 90° . Unghiul este pozitiv atunci când vectorul v_e face în raport cu vectorul v_s , având ca origine centrul arcului electric, un unghi mai mic decât 90° . Se consideră, în această convenție, că viteza v_s este administrată pieselor de sudat. Semnul unghiului este deosebit de important în ceea ce privește dimensiunile cordonului de sudură. Dacă α este negativ (fig. 3.6) atunci arcul electric preîncălzește anterior materialul de bază. Ca atare, pătrunderea crește, supraînălțarea cordonului crește, în schimb lățimea acestuia este mai redusă.

Dacă unghiul α este pozitiv, atunci la deplasarea relativă electrod - metal de bază, arcul electric găsește zone reci ale metalului de bază, ca atare, cantitatea de căldură administrată de arcul electric nu poate asigura o pătrundere prea mare, și deci lățimea cordonului este crescută.

Aceiași cantitate de material ce provine din sârma electrod, deplasându-se cu viteză constantă nemaiputând în continuare să supraînălțe cordonul îl lățește.

c. Parametrii tehnologici terțiari

Acești parametri sunt următorii:

- Diametrul electrodului (d_e);
- Tipul electrodului (electrod învelit, sârmă electrod, electrod nefuzibil etc);
- Genul protecției arcului electric (prin învelișul electrodului, prin flux sau prin gaz de protecție) și tipul protecției în cadrul genului ales;
- Nivelul protecției (grosimea învelișului, debitul de gaz de protecție). Cu cât lungimea arcului L_a este mai mică, protecția este mai bună;
- Natura și polaritatea curentului de sudare;
- Numărul de treceri (n_t);
- Așezarea trecerilor în rost.

Se observă că parametrii tehnologici terțiari variază în trepte, ei în general nu pot fi modificați în timpul procesului de sudare. Parametrii aceștia influențează atât procesul de sudare cât, mai ales rezultatul său, sudura.

Parametrii tehnologici terțiari sunt specifici diferitelor procedee de sudare, de aceea ei trebuie tratați în concordanță cu procedeul de sudare analizat.

3.2. Aria rostului, a cordonului și a trecerilor

Cordonul de sudură este efectul solidificării băii de sudură. Baia se formează prin topirea și amestecarea intimă a materialului de adaos care a trecut prin arcul electric și a materialului de bază. Ca atare, aria cordonului este mai mare decât aria rostului, relația dintre acestea este:

$$A_C = (1,1 \dots 1,4) \cdot A_r \quad (3.5)$$

Coeficientul este cu atât mai mare cu cât grosimea componentelor de sudat este mai redusă. Acest coeficient ține seama de supraînălțarea cordoanelor de sudură pe suprafața de sudare și la rădăcină, precum și de particularitățile metalului de bază la realizarea cordonului.

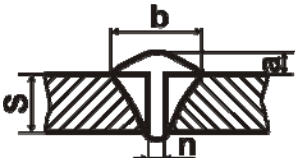
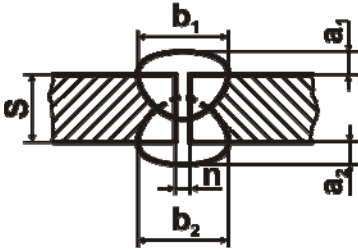
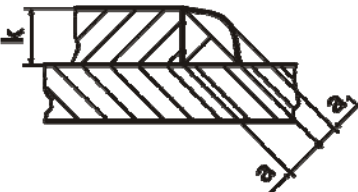
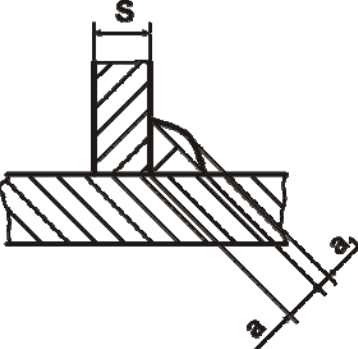
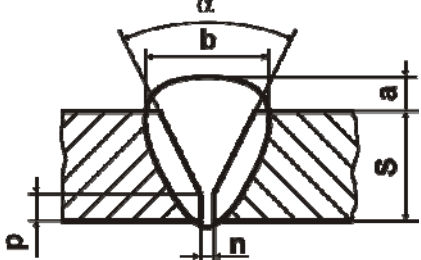
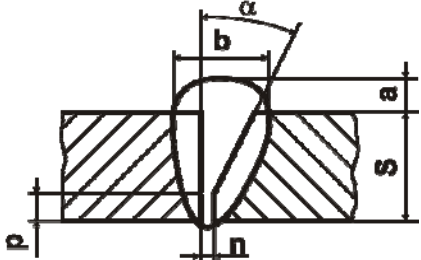
Rostul unei îmbinări sudate se stabilește conform standardului pentru procedeul de sudare ales sau se stabilește de proiectant în condițiile unor rosturi speciale în funcție de procedeul de sudare, de grosimea componentelor, de metalul de bază folosit la realizarea structurii sudate, de poziția în care se sudează și de forma îmbinării.

Un calcul mai exact al ariei cordonului de sudură poate fi realizat apelând la relațiile

din tabelul 3.1. Pentru alte tipuri de îmbinări, în afara celor din tabel pot fi calculate ariile corespunzătoare ale cordonului de sudură.

La grosimi mai mari ale elementelor de îmbinat sudurile se realizează din mai multe treceri succesive. Notând numărul trecerilor cu n_t și aria unei treceri cu

Tabel 3.1. Relațiile ariei cordonului în procesului de sudare cu arc electric

Rost	Grosimea componentelor [mm]	Aria de calcul a cordonului
	$S \leq 6(10)$	$A_C = S \cdot n + \frac{2}{3} b \cdot a$
	$S \leq 10(16)$	$A_C = S \cdot n + \frac{2}{3} b_1 \cdot a_1 + \frac{2}{3} b_2 \cdot a_2$
	$a \leq 0,7 \cdot S$	$A_C = \frac{k^2}{2} + a_1 \cdot k$
	$a \leq 0,7 \cdot S$	$A_C = a^2 + \frac{a \cdot a_1}{\sqrt{2}}$
	$5 \leq S \leq 20$	$A_C = S \cdot n + (S - p)^2 \cdot \text{tg} \frac{\alpha}{2} + \frac{2}{3} b \cdot a$
	$5 \leq S \leq 20$	$A_C = S \cdot n + \frac{(S - p)^2}{2} \cdot \text{tg} \frac{\alpha}{2} + \frac{2}{3} b \cdot a$

	$S \geq 20$	$A_c = S \cdot n + m_1^2 \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha_1}{2} + m_2^2 \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha_2}{2} + \frac{2}{3} b_1 \cdot a_1 + \frac{2}{3} b_2 \cdot a_2$
	$S \geq 15$	$A_c = S \cdot n + \frac{\pi \cdot r^2}{2} + (S - p - r)^2 \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} + 2 \cdot (S - p - r) \cdot r + \frac{2}{3} b \cdot a$

A_{ti} rezultă aria cordonului:

$$A_c = \sum_{i=1}^{n_t} A_{ti} \quad (3.6)$$

Este evident că sub aspect economic sudarea cu arc electric trebuie făcută cu un număr n_t minim, respectiv cu arii ale trecerilor cât mai mari posibile. Însă, sunt oțeluri și aliaje metalice la care încălzirea excesivă trebuie limitată, pentru a nu li se înrăutăți proprietățile fizice-mecano-metalurgice. Din acest punct de vedere va trebui ca să sporim numărul trecerilor și să micșorăm aria unei treceri.

La oțelurile tratate termic (normalizate, oțelurile călite și revenite) la oțelurile inoxidabile și la fonte sudarea se face printr-un număr de treceri cât mai mare (respectiv prin arii ale trecerilor cât mai mici, pentru a nu afecta structura metalului de bază în măsură prea mare).

În cazul în care componentele au grosime mică ($s < 10$ mm) sudura poate fi realizată dintr-o singură trecere, având în vedere posibilitatea și necesitatea susținerii rădăcinii. În cazul în care componentele au grosime mai mare, se va prevedea de regulă un strat de rădăcină și mai multe straturi de completare. Este preferabil ca straturile de completare să aibă arii egale. Trecerile cu arii egale dau și posibilitatea unui calcul mai ușor al ariei cordonului.

$$A_c = A_{ti} + (n_t - 1) \cdot A_t \quad (3.7)$$

Trecerea de rădăcină se realizează cu o arie mai mică iar trecerile de completare, dacă nu pot fi realizate cu arii egale, din condiții tehnologice, atunci ariile vor fi progresiv crescătoare dinspre rădăcina cordonului spre ultimul strat depus.

La îmbinările de rezistență, după realizarea stratului de rădăcină și completarea rostului, pe partea opusă sudării se realizează creșuirea și polizarea primului strat de rădăcină depus și depunerea altor straturi. Stratul de rădăcină este stratul cel mai susceptibil la defecte în urma procesului de sudare. De aceea, la sudarea bilaterală stratul de rădăcină de obicei se înlătură parțial sau total. Excepție face cazul când sudarea unilaterală s-a realizat prin procedee speciale și s-a asigurat susținerea corectă a băii de metal topit.

3.3. Etapele calculului tehnologiei de sudare cu arc electric

Reluând cele spuse în paragrafele anterioare algoritmul de calcul al tehnologiei de sudare a cuprins până în prezent următoarele etape:

a) S-a stabilit rostul componentelor de sudat în funcție de procedeul de sudare, de grosimea componentelor, de materialul de bază, de tipul îmbinării și de poziția de sudare;

b) Rosturile standardizate, sau stabilite de proiectant în condiții speciale, trebuie „umplute” cu material depus. Cunoscând rostul, se calculează aria rostului, conform celor arătate la paragraful 3.2 sau direct aria cordonului;

c) În funcție de aria cordonului și de materialul de bază se alege numărul de treceri. Secțiunea trecerilor A_{ti} rezultă din aria cordonului și numărul de treceri adoptate conform celor prezentate în paragraful 3.2;

d) În funcție de procedeul de sudare ales și grosimea componentelor se stabilește diametrul sârmei electrod d_e . Acest parametru este esențial în calculul tehnologiei de sudare. Se poate lucra cu mai multe valori ale lui d_e , limitându-se în final valorile obținute pentru parametrii procesului de sudare, în baza unor tehnologii extreme.

e) Cunoscând ariile pe fiecare trecere A_{ti} precum și diametrul d_e al sârmei electrod rezultă coeficientul k dat de relația:

$$k_i = \frac{A_{ti}}{\frac{\pi \cdot d_{ei}^2}{4}} \quad (3.8)$$

f) Totodată se calculează parametrii procesului de sudare, intensitatea curentului și tensiunea arcului în funcție de diametrul sârmei electrod;

Folosind acest algoritm de calcul rezultă mai multe tehnologii posibile, funcție de diverse procedee de sudare, diferite valori ale diametrului sârmei electrod, diferite moduri de repartiție a secțiunii cordonului de sudură, respectiv diferite numere de treceri. Optimizarea acestor tehnologii este posibilă datorită existenței unor relații pentru modelul matematic al procesului de sudare. Optimizarea trebuie avută în vedere prin prisma unor funcții obiectiv care să aleagă alternativele tehnologiilor de sudare care satisfac condițiile tehnologice, însă să fie optime sub aspectul productivității, costului, energiei consumate etc.

3.4. Coeficientul de depunere și randamentul depunerii

Se definește coeficientul de depunere ca fiind masa de metal depus raportată la intensitatea curentului și timpul de sudare:

$$\alpha_{di} = \frac{m_{di}}{I_{Si} \cdot t_i} \quad (3.9)$$

Coeficientul de depunere indică productivitatea unui procedeu de sudare în sensul că arată cantitatea de material depusă la trecerea unității de intensitate a curentului în unitatea de timp. Folosind noțiunea de coeficient de depunere se poate calcula viteza de sudare:

$$v_{Si} = \frac{L_i}{t_i} \quad (3.10)$$

Din coeficientul de depunere, relația (3.9) se găsește timpul necesar unei treceri:

$$t_i = \frac{m_{di}}{\alpha_{di} \cdot l_{Si}} \quad (3.11)$$

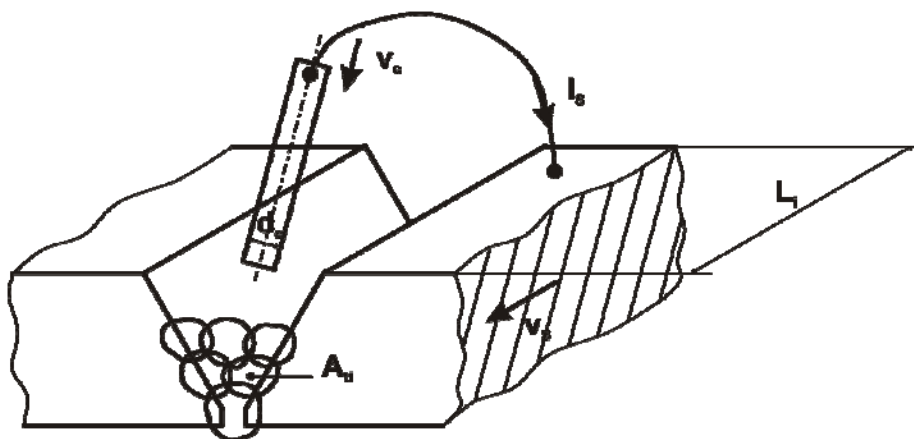


Fig. 3.7.

Masa materialului depus funcție de aria trecerii, lungimea trecerii și densitatea ρ a materialului se calculează cu relația:

$$m_{di} = A_{ti} \cdot L_i \cdot \rho \quad (3.12)$$

Ca atare, viteza de sudare, înlocuind expresiile (3.11) și (3.12) în expresia(3.9) rezultă:

$$v_{Si} = \frac{\alpha_{di} \cdot l_{Si}}{A_{ti} \cdot \rho} \quad (3.13)$$

Aceasta relație da posibilitatea calculului vitezei de sudare cunoscând coeficientul de depunere. Coeficienții de depunere, pentru sudarea oțelului cu arcul electric sunt dați în tabelul 3.2.

Tabel 3.2. Coeficienții de depunere α_{di} pentru sudarea oțelului cu arcul electric.

Procedeu	Condiții de lucru	$10^{-3} \cdot \alpha_{di}$ (Kg/A.h)
SE	fpf	5 ... 12
	cpf	10 ... 18
SF		16 ... 30
MG	sha	3 ... 8
	spa	9 ... 20
STG		3 ... 25
ST		3 ... 15

Randamentul depunerii (randamentul efectiv) este raportul dintre masa materialului depus și masa materialului topit, printr-un anumit procedeu, la o anumită trecere:

$$\eta_{ti} = \frac{m_{di}}{m_{ti}} \quad (3.14)$$

Aceasta are semnificația randamentului trecerii metalului prin arcul electric. O parte din metalul trecut prin arcul electric se pierde sub formă de stropi, prin oxidare, prin vaporizare etc, astfel încât se poate defini un coeficient de pierdere:

$$\psi_i = 1 - \eta_{ti} = \frac{m_{ti} - m_{di}}{m_{ti}} = \frac{m_{pi}}{m_{ti}} \quad (3.15)$$

în care m este masa materialului pierdut la trecerea „i”.

În baza relației (3.14) se poate calcula și viteza de avans a sârmei electrod:

$$m_{di} = \eta_{ti} \cdot m_{ti} \quad (3.16)$$

Considerând aceiași densitate a materialului depus cât și a materialului topit rezultă:

$$A_{ti} \cdot L_i = A_e \cdot L_e \cdot \eta_{ti} \quad (3.17)$$

în care L_e - este lungimea sârmei electrod care participă la realizarea lungimii L_i a cordonului de sudura la trecerea cu secțiunea A_{ti} .

Împărțind relația (3.17) la timpul de desfășurare al procesului rezultă:

$$A_{ti} \cdot v_{ei} = A_e \cdot v_{ei} \cdot \eta_{ti} \quad (3.18)$$

în care v_{ei} este viteza de deplasare a materialului sârmei electrod (MA), viteza de înaintare a sârmei electrod în baia de sudură.

Această viteză are expresia:

$$v_{ei} = \frac{1}{\eta_{ti}} \cdot \frac{A_{ti}}{A_e} \cdot v_{si} \quad (3.19)$$

Înlocuind relația (3.13) în relația (3.19) se determină viteza MA:

$$v_{ei} = \frac{\alpha_{di}}{\eta_{ti}} \cdot \frac{I_{Si}}{\rho \cdot A_e} = \frac{\alpha_{di}}{\eta_{ti}} \cdot \frac{I_{Si}}{\rho \cdot \frac{\pi \cdot d_{ei}^2}{4}} \quad (3.20)$$

Raportul dintre intensitatea curentului de sudare și aria sârmei electrod poartă denumirea de densitate de curent j_i , astfel încât relația (3.20) se va scrie:

$$v_{ei} = \frac{\alpha_{di}}{\eta_{ti}} \cdot \frac{j_i}{\rho} \quad (3.21)$$

Randamentul depunerii la sudarea cu arcul electric, la principalele procedee, este dat în tabelul 3.3.

Tabelul 3.3 Randamentul depunerii η_{ti} la sudarea cu arcul electric.

Procedeele	Condiții de lucru	η_{ti}
SE	fpf	0,91 ... 0,96
	cpf	1,1 ... 1,4
SF		0,98 ... 0,995
	sha	0,89 ... 0,93
	spa	0,81 ... 0,91
STG		0,3 ... 0,45
ST		0,4 ... 0,52

Observații: La η_{ti} pentru procedeele STG și ST s-au luat în calculul m_{ti} , masa tubului electrod și a miezului interior.

3.5. Consumul de materiale la sudare

Consumul de material de adaos, de sârma electrod, se estimează prin masa materialului ce urmează a fi topit.

$$m_t = \sum_{i=1}^{n_t} m_{ti} \quad (3.22)$$

Masa materialului topit la trecerea „i” se exprimă în baza celor de mai înainte:

$$m_{ti} = \frac{m_{di}}{\eta_{ti}} = \frac{A_{ti} \cdot L_i \cdot \rho}{\eta_{ti}} \quad (3.23)$$

Aceasta relație dă expresia masei de sârma electrod necesară pentru realizarea trecerii de secțiune A_{ti} și lungimea L_i a cordonului de sudură. Uneori, se folosește în calcule masa pe metru de trecere, în condițiile în care lungimea trecerii este egală cu un metru, $L_i=1m$:

$$m'_{ti} = \frac{A_{ti} \cdot \rho}{\eta_{ti}} \quad (3.24)$$

Masa totală de material de adaos provenită din vergeaua sârmei electrod, în baza relațiilor (3.22) și (3.23) se scrie:

$$m_t = \sum_{i=1}^{n_t} \frac{A_{ti} \cdot L_i \cdot \rho}{\eta_{ti}} \quad (3.25)$$

Considerând trecerile de aceeași lungime și randamentul depunerii identic la fiecare trecere rezultă:

$$m_t = \frac{L \cdot \rho}{\eta_t} \cdot \sum_{i=1}^{n_t} A_{ti} = \frac{L \cdot \rho \cdot A_c}{\eta_t} \quad (3.26)$$

Cu ajutorul acestei relații, cunoscând aria cordonului de sudură A_c , lungimea cordonului ce urmează a fi realizat L , precum și densitatea ρ și randamentul depunerii η_t , se determină consumul de material de adaos.

Pentru un metru de cordon de sudură cantitatea de material de adaos este:

$$m'_t = \frac{A_c \cdot \rho}{\eta_t} \quad (3.27)$$

Consumurile pentru celelalte materiale de sudare sunt specifice diferitelor procese de sudare. Ele vor fi analizate la capitolele în care vor fi tratate procesele de sudare cu arcul electric.

3.6. Timpul de sudare. Factorul operator

Timpul de sudare este timpul corespunzător trecerii arcului electric între componentele de sudat, în vederea realizării cordonului de sudură; este deci durata, „arderii” arcului electric. Considerând elementele din paragrafele anterioare rezultă pentru o trecere:

$$t_i = \frac{L_i}{v_{Si}} \quad (3.28)$$

Timpul de sudare pentru realizarea unui cordon din n_t treceri este:

$$t_s = \sum_{i=1}^{n_t} t_i = \sum_{i=1}^{n_t} \frac{L_i}{v_{Si}} \quad (3.29)$$

Definim factorul operator ca raportul dintre timpul de sudare și timpul total de execuție a cordonului de sudură, adică raportul dintre timpul „arderii” arcului electric și timpul de lucru al sudorului pentru efectuarea cordonului:

$$F.O. = \frac{t_s}{T_s} \quad (3.30)$$

Se evaluează timpul consumat la realizarea structurii sudate având în vedere următoarele obiective:

- cunoașterea factorului operator determină găsirea mijloacelor pentru mărirea productivității muncii și scăderea consumului de energie și a costului sudării;
- calculul manoperei pentru realizarea construcției sudate;
- calculul consumurilor de energie și materiale folosite la structurile sudate care urmează a fi executate.

Totodată, factorul operator dă imaginea nivelului de organizare a tehnologiei de producție, a gradului de mecanizare a proceselor de sudare, a modului de întreținere a utilajului și echipamentelor de sudare, a eficienței muncii sudorului.

Expresiile timpului total de lucru pentru realizarea unui cordon de sudura sunt date în tabelul 3.4 pentru diferite procedee de sudare.

Tabelul 3.4. Expresiile T_S la sudarea cu arcul electric[5].

Procedeu	T_S
SE	$t_S \cdot (1 + t_{se}) + n_t \cdot (t_{cu} + t_{ip}) + t_o - t_{ip}$
SF	$t_S + n_t \cdot (t_{cu} + t_{ip}) + t_o - t_{ip}$
STG, ST, MAG	$t_S + n_t \cdot (t_{cu} + t_{ip}) + t_o - t_{ip}$
MIG, WIG, PL	$t_S + (n_t - 1) \cdot t_{ip} + t_o$

în care:

t_{se} este timpul de schimbare a electrozilor; $t_{se} = 20 \dots 40$ s;

t_1 - timpul topirii unui electrod învelit de lungime normală în condițiile regimului de sudare din tabelul 4.2;

$t_1=55$ s pentru $d_e=2$ mm; $t_1=84$ s pentru $d_e=4$ mm; $t_1=71$ s pentru $d_e=3,2$ mm; $t_1=105$ s pentru $d_e=5$ mm;

t_{cu} - timpul curățirii suprafeței unei treceri;

$t_{cu}=30 \dots 200$ s cu atât mai mare cu cât diametrul electrodului este mai mare și învelișul este de natura bazică;

t_{ip} - timpul de răcire a unei treceri pentru a se respecta temperatura între treceri;

t_o - timpul operațiilor conexe sudării.

Mai este de menționat că factorul operator scade atunci când numărul trecerilor și viteza de sudare cresc și diametrul electrodului este mai redus.

Factorul operator crește odată cu creșterea lungimii cordoanelor de sudură.

Factorul operator la diferite procedee de sudare are valoarea: SE - 25%; SF - 60%; WIG - 28%; MIG - 65%; MAG - 60%; PL - 35%; ST - 68%; STG - 62%; SBZ - 65%.

CAP.4. PREÎNCĂLZIREA

În scopul asigurării unor proprietăți îmbunătățite cordonului de sudura, în special a evitării constituenților fragili, reducerea tensiunilor interne, precum și a defectelor ce pot apărea în urma procesului de sudare, fisuri, pori etc.), de o deosebită importanță este temperatura la care se afla componentele înaintea procesului de sudare. Dacă acestea sunt sudate fără aport termic suplimentar, atunci temperatura inițială a desfășurării procesului este temperatura mediului ambiant. Dacă înaintea operației de sudare componentele se încălzesc, atunci temperatura inițială de la care începe operația de sudare poartă denumirea de temperatura de preîncălzire.

Atât temperatura mediului ambiant cât și temperatura de preîncălzire influențează caracteristicile îmbinării sudate și construcției sudate.

4.1. Scopul preîncălzirii

În cazul în care componentele ce urmează a fi sudate au temperatura inițială egală cu temperatura mediului ambiant (T_0), atunci, ciclul termic la sudare, constând în încălzirea pieselor până la temperatura maximă și apoi răcirea acestora până la temperatura, din nou, a mediului ambiant, se prezintă ca în figura 4.1, curba a.

Dacă piesele ce urmează a fi sudate sunt mai întâi preîncălzite, administrându-li-se local sau integral o cantitate de căldură, atunci ciclul termic începe de la temperatura de preîncălzire (T_{pr}), ajunge la temperatura maximă ($T_{max\ pr}$) și apoi răcirea se desfășoară conform curbei b din figura 4.1.

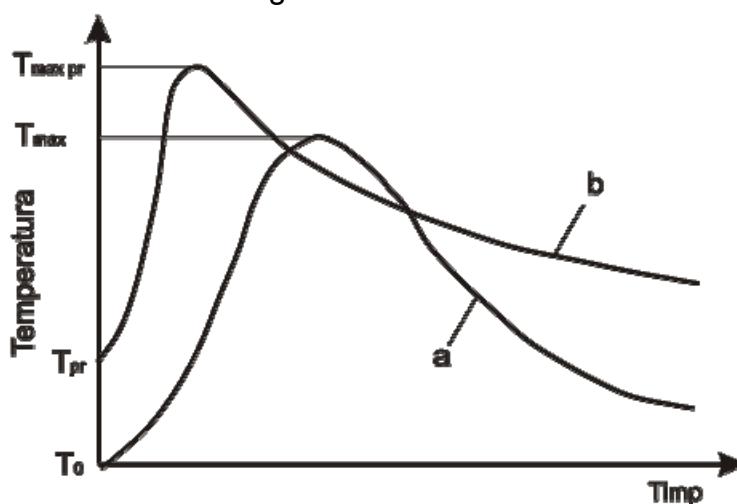


Fig. 4.1.

Comparând cele două cicluri termice, la sudarea fără preîncălzire (curba a) și la sudarea cu preîncălzire (curba b), se constată următoarele:

- la sudarea cu preîncălzire temperatura maxima este mai mare decât la sudarea fără preîncălzire ($T_{max\ pr} > T_{max}$);
- la sudarea cu preîncălzire crește viteza de încălzire față de sudarea fără preîncălzire;
- la sudarea cu preîncălzire vitezele de răcire sunt mult mai mici decât la sudarea fără preîncălzire;
- câmpul termic al diferitelor puncte din zona cordonului de sudura tinde să se uniformizeze, respectiv variațiile de temperatură ale punctelor învecinate, mai ales a celor din zona

influențată termic, sunt mai reduse.

De o deosebită importanță în analiza câmpurilor termice este faptul că viteza de răcire la preîncălzire este mai mică, ea putând fi situată sub viteza critică de răcire. Ca urmare, se reduce pericolul apariției constituenților fragili în zona cordonului de sudură, respectiv pericolul apariției fisurilor sau al altor defecte.

Principalele efecte fizico-mecano-metalurgice ale preîncălzirii în procesul sudării sunt:

- scăderea vitezei de răcire face ca modificările structurale din zona influențată termic să fie mai lente, deci mai apropiate de echilibru; ca urmare, structurile fragile din aceasta zona sunt mai diminuate cantitativ, zona influențată termic va avea duritate mai mică și o tendință de fisurare mai redusă;
- prin scăderea vitezei de răcire se creează totodată condiții favorabile ieșirii gazelor din metalul topit ca urmare a creșterii fluidității băii de sudură; se evită astfel defectele de tipul porilor ce apar în urma procesului de sudare, însă creșterea fluidității băii de sudură complică uneori sudarea de poziție;
- uniformizarea relativă a câmpului termic după procesul de sudare are ca efect micșorarea tensiunilor remanente și a deformațiilor îmbinărilor sudate cu asigurarea condițiilor de precizie dimensională a structurii;
- creșterea temperaturii maxime la sudarea cu preîncălzire poate conduce la mărirea grăunților cristalini din regiunea supraîncălzită a zonei influențate termic; aceasta tendință este oarecum frânată de creșterea vitezei de încălzire.

Aceste efecte, în majoritatea lor benefice, li se adaugă și o serie de efecte economice ale sudării cu preîncălzire și anume:

- prin administrarea unei cantități de căldură inițială componentelor de sudat cresc consumurile energetice la sudare și, ca atare, crește costul operației de sudare;
- ca urmare a preîncălzirii se consumă o perioadă de timp pentru aceasta operație cu efecte privind scăderea productivității muncii la sudarea cu preîncălzire;
- condițiile ergonomice de lucru ale sudorului sunt îngreunate fiindcă radiațiile termice produse de piesele preîncălzite influențează asupra operatorului uman.

Comparând efectele fizico-mecano-metalurgice cu cele economice ajungem la concluzia că preîncălzirea componentelor în vederea sudării se va face numai atunci când aceasta este impusă de asigurarea caracteristicilor îmbinării sudate, altfel preîncălzirea trebuie să fie eliminată. De asemenea, temperatura de preîncălzire trebuie aleasă la valoarea cea mai redusă posibilă, deci ea va fi determinată dintr-un algoritm în care valoarea acestei temperaturi trebuie minimizată.

Preîncălzirea poate fi realizată integral sau local. Ea se realizează integral când întreaga construcție sudată este încălzită la temperatura de preîncălzire în cuptoare speciale sau de tratament termic. În cazul în care nu este posibilă această variantă, sau pentru economii energetice, atunci preîncălzirea poate fi realizată și local. Preîncălzirea locală se face prin încălzirea și menținerea la temperatura de preîncălzire a unei fâșii de o parte și de alta a cordonului egală cu 6...12 ori mai mare decât grosimea componentelor, dar aceste fâșii nu trebuie să fie mai mici de 70...80 mm.

4.2. Calculul temperaturii de preîncălzire

În acest paragraf se prezintă mai multe metode pentru calculul temperaturii de preîncălzire. Toate metodele se referă la determinarea temperaturii de preîncălzire la sudarea cu electrozi înveliți a oțelurilor carbon și a oțelurilor slab aliate.

4.2.1. Metoda I.I.S.

La calculul temperaturii de preîncălzire prin metoda I.I.S. se pornește de la determinarea carbonului echivalent conform relației:

$$C_e = C + \frac{Mn}{20} + \frac{Ni}{15} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Si}{4} \quad (4.1)$$

În funcție de valoarea rezultată pentru carbonul echivalent, din tabelul 4.1, cunoscând și tipul electrodului învelit (tipul învelișului), se determină litera de sudabilitate L_s . Aceasta litera variază între A...G.

Se definește apoi severitatea termică S_t care se calculează în funcție de grosimea laminatelor S în mm și numărul căilor de transmitere a căldurii n_r . Severitatea termică se determină cu relația:

$$S_t = \frac{n_r \cdot S}{6} \quad (4.2)$$

Tabel 4.1.

L_s	C_e [%]	
	înveliș bazic	alte învelișuri
A	$\leq 0,25$	$< 0,20$
B	0,26...0,30	0,20...0,23
C	0,31...0,35	0,24...0,27
D	0,36...0,40	0,28...0,32
E	0,41...0,45	0,33...0,38
F	0,46...0,50	0,39...0,45
G	$> 0,50$	$> 0,45$

Numărul căilor de transmitere a căldurii (fig. 4.2) se stabilește în funcție de tipul cordonului având valorile între $n = 2$ pentru cordon cap la cap, $n_r = 3$ pentru cordon de colț în T și $n_r = 4$ pentru cordon în cruce.

Recomandările Institutului Internațional de Sudură dau valoarea temperaturii de preîncălzire în $^{\circ}C$ în funcție de litera de sudabilitate L_s și severitatea termică S_t , precum și de diametrul d_e al electrodului, conform tabelului 4.2.

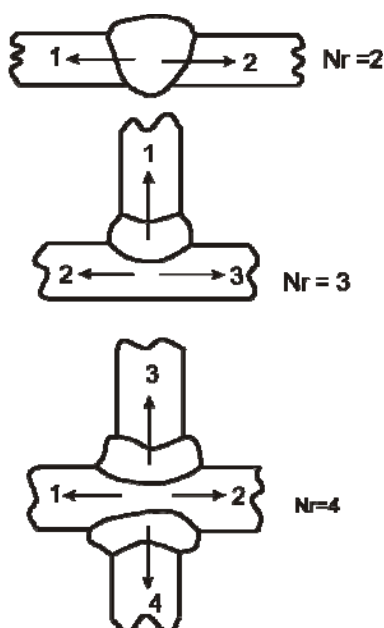


Fig. 4.2.

Analizând datele din tabelul 4.2 se pot face următoarele constatări:

- cu creșterea literei de sudabilitate, deci cu creșterea procentului carbonului echivalent, la același diametru al electrodului, crește temperatura de preîncălzire. Deci cu cât procentul elementelor de aliere dintr-un oțel este mai mare cu atât și temperatura de preîncălzire trebuie să fie mai ridicată;
- aceeași temperatură de preîncălzire este necesară dacă crește procentul carbonului echivalent și totodată dacă crește diametrul electrodului. Creșterea diametrului electrodului impune folosirea unei energii liniare mai mari pentru sudare. Ca atare, prin creșterea energiei liniare la sudare putem reduce temperatura de preîncălzire. Este o constatare care atrage după sine efecte economice importante după cum se va vedea în paragrafele următoare.

Tabelul 4.2. Temperatura de preîncălzire [°C]

L _s	S _t	d _e [mm]					L _s	S _t	d _e [mm]				
		3,25	4	5	6	8			3,25	4	5	6	8
E	2	50	-	-	-	-	A	12	75	25	-	-	-
F		125	25	-	-	-	B		125	75	25	-	-
D	3	75	-	-	-	-	C		150	125	75	-	-
E		100	25	-	-	-	D		200	175	125	75	-
F		150	100	25	-	-	E		225	200	175	100	50
C	4	50	-	-	-	-	F		250	225	200	150	125
D		100	25	-	-	-	A		75	25	-	-	-
E		125	75	-	-	-	B		125	75	50	-	-
F		175	125	75	-	-	C		175	150	125	50	25
B	6	50	-	-	-	-	D		200	175	175	125	100
C		100	25	-	-	-	E		225	200	200	150	150
D		150	100	25	-	-	F		250	250	225	200	200
E		175	125	75	-	-	A	75	25	-	-	-	
F		225	175	125	75	-	B	125	75	50	25	-	
A		8	25	-	-	-	-	C	175	150	125	75	25
B	75		-	-	-	-	D	200	175	175	125	100	
C	125		75	25	-	-	E	225	200	200	175	150	
D	175		125	75	-	-	F	250	250	225	200	200	
E	200		150	125	50	25							
F	225		200	175	125	50							

4.2.2. Metoda Seferian.

Calculul temperaturii de preîncălzire prin metoda Seferian se realizează conform relației:

$$T_{pr} = 350 \cdot \sqrt{C_e \cdot (1 + 0,005 \cdot S)} - 0,25 \quad (4.3)$$

În care carbonul echivalent C_e se calculează conform relației (4.1), iar S este grosimea componentelor de sudat în mm. Dacă radicalul din expresia (4.3) rezultă imaginar se interpretează rezultatul în sensul că nu este necesară preîncălzirea componentelor în vederea sudării.

4.3. Corelația statistică între temperatura de preîncălzire și proprietățile zonei influențate termic.

Notând carbonul echivalent C_e cu P_{cm} [5] atunci, în condițiile oțelurilor carbon și slab aliate, duritatea maximă din ZIT are expresia:

$$HM = 189 + 67 \cdot C + 507 \cdot P_{cm} - (101 + 711 \cdot C - 461 \cdot P_{cm}) \cdot \arctg x \quad (4.4)$$

în care s-a notat prin carbonul echivalent P_{cm} :

$$P_{cm} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn + Cu + Cr}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B \quad (4.5)$$

și expresia parametrului X are forma:

$$X = \frac{\lg t_{8/5} + 0,501 + 7,9 \cdot C - 11,01 \cdot P_{cm}}{0,543 + 0,55 \cdot C - 0,76 \cdot P_{cm}} \quad (4.6)$$

Din teoria câmpurilor termice la sudarea cu arcul electric se poate determina corelația statistică existentă între timpul de răcire $t_{8/5}$ și energia liniară de sudare, dată prin expresia:

$$t_{8/5} = \frac{900}{(600 - T_{pr})^{1,2}} \cdot E_L^{(7 \cdot 10^{-4} \cdot T_{pr} + 0,94)} \quad (4.7)$$

în care energia liniară la sudarea cu arc electric în unități de măsura practic folosite are expresia:

$$E_L = \frac{60 \cdot U_a \cdot I_S}{1000 \cdot v_S} \quad [KJ/cm] \quad (4.8)$$

în care tensiunea arcului U_a se exprima în [V], intensitatea curentului de sudare I_S în [A], viteza de sudare v_S în [cm/min], temperatura de preîncălzire T_{pr} în [°C] și timpul de răcire $t_{8/5}$ în [s].

Pentru corelarea durității maxime HM din ZIT cu energia liniară, implicit cu tehnologia de sudare, se înlocuiește timpul de răcire $t_{8/5}$ funcție de energia liniară E_L din relația (4.7) în relația (4.6), iar aceasta din urmă se introduce în expresia durității maxime HM dată de relația (4.4). Ca atare, logaritmând expresia (4.7), se obține:

$$\lg t_{8/5} = (7 \cdot 10^{-4} \cdot T_{pr} + 0,94) \cdot \lg E_L + \lg 900 - 1,2 \cdot \lg (600 - T_{pr}) \quad (4.9)$$

Introducând această relație în expresia (7.9) rezultă:

$$X = \frac{(7 \cdot 10^{-4} \cdot T_{pr} + 0,94) \cdot \lg E_L - 1,2 \cdot (600 - T_{pr}) + 3,455 + 7,9 \cdot C - 11,01 \cdot P_{cm}}{0,543 + 0,55 \cdot C - 0,76 \cdot P_{cm}} \quad (4.10)$$

Din relațiile (4.10) și (4.4) se obține o corelație foarte importantă între energia liniară E_L , tipul oțelului exprimat prin carbonul echivalent P_{cm} , temperatura de preîncălzire T_{pr} și duritatea maximă HM din ZIT. Această corelație de o deosebită importanță are ca efecte nu numai verificarea tehnologiei de sudare dar și determinarea temperaturii de preîncălzire în concordantă nu numai cu tehnologia de sudare dar și cu proprietățile impuse zonei influențate termic.

În accepțiunea determinării unei temperaturi de preîncălzire având la bază proprietățile zonei influențate termic, deci consecințele operației de sudare, este necesară stabilirea unei dependente între duritatea maximă din ZIT și temperatura de preîncălzire. Cum duritatea maximă este dată de relația (4.4), iar temperatura de preîncălzire este element component al relației (4.7), atunci va trebui să operăm cu aceste expresii pentru stabilirea dependenței între energia liniară și temperatura de preîncălzire. Limitând

duritatea din zona influențată termic (trebuie să nu depășească o valoare admisibilă) $HM = HM_a$, cunoscând carbonul echivalent al oțelului ce urmează a fi sudat, funcție de compoziția chimică, deci expresia P_{cm} , precum și parametrii regimului de sudare U_a , I_s , v_s , deci energia liniară, atunci se calculează din relația (4.4) valoarea parametrului X:

$$\arctg X = \frac{HM_a - 189 - 67 \cdot C - 507 \cdot P_{cm}}{461 \cdot P_{cm} - 101 - 711 \cdot C} \quad (4.11)$$

rezultând:

$$X = \operatorname{tg} \frac{189 + 67 \cdot C + 507 \cdot P_{cm} - HM_a}{101 + 711 \cdot C - 461 \cdot P_{cm}} \quad (4.12)$$

Această relație poate fi simplificată:

$$X = \operatorname{tg} \frac{a - HM_a}{b} \quad (4.13)$$

în care s-a notat cu:

$$a = 189 + 67 \cdot C + 507 \cdot P_{cm} \quad (4.14)$$

$$b = 101 + 701 \cdot C - 461 \cdot P_{cm}$$

Același parametru X poate fi determinat și din expresia (4.6) rezultând:

$$X = \frac{\lg t_{8/5} + c}{d} \quad (4.15)$$

cu notațiile:

$$c = 0,501 + 7,9 \cdot C - 11,01 \cdot P_{cm} \quad (4.16)$$

$$d = 0,543 + 0,55 \cdot C - 0,76 \cdot P_{cm}$$

Egalând expresiile (4.13) cu (4.15) obținem:

$$\operatorname{tg} \frac{a - HM_a}{b} = \frac{\lg t_{8/5} + c}{d}$$

și operând:

$$\lg t_{8/5} = d \cdot \operatorname{tg} \frac{a - HM_a}{b} - c \quad (4.17)$$

Timpu de răcire $t_{8/5}$ va rezulta:

$$t_{8/5} = 10^{d \cdot \operatorname{tg} \frac{a - HM_a}{b} - c} \quad (4.18)$$

Deci relația (4.18) limitează duritatea din zona influențată termic determinând timpul de răcire $t_{8/5}$. Expresia acestui timp de răcire o întâlnim și în relația (4.7) în funcție de temperatura de preîncălzire și energia liniară. Egalând deci expresia (4.7) cu (4.18) se găsește dependența:

$$\frac{900}{(600 - T_{pr})^{1,2}} \cdot E_L^{(7 \cdot 10^{-4} \cdot T_{pr} + 0,94)} = 10^{d \cdot \operatorname{tg} \frac{a - HM_a}{b} - c} \quad (4.19)$$

Care mai poate fi scrisă și sub forma:

$$E_L^{(7 \cdot 10^{-4} \cdot T_{pr} + 0,94)} = \frac{(600 - T_{pr})^{1,2}}{900} \cdot 10^{d \cdot \operatorname{tg} \frac{a - HM_a}{b} - c} \quad (4.20)$$

Temperatura de preîncălzire rezultă în baza relației (4.20). Logaritmând această relație se obține:

$$(7 \cdot 10^{-4} \cdot T_{pr} + 0,94) \cdot \lg E_L = 1,2 \cdot \lg (600 - T_{pr}) - \lg 900 + d \cdot \operatorname{tg} \frac{a - HM_a - c}{b}$$

sau:

$$7 \cdot 10^{-4} \cdot T_{pr} = \frac{1,2}{\lg E_L} \cdot \lg (600 - T_{pr}) - 0,94 - \frac{1}{\lg E_L} \cdot \left(2,95 + d \cdot \operatorname{tg} \frac{a - HM_a - c}{b} \right) \quad (4.21)$$

Aceasta relație se poate scrie simplificat:

$$A \cdot T_{pr} = B \cdot \lg (600 - T_{pr}) - C$$

cu notațiile:

$$A = 7 \cdot 10^{-4}$$

$$B = \frac{1,2}{\lg E_L} \quad (4.22)$$

$$C = 0,94 + \frac{1}{\lg E_L} \cdot \left(2,95 + d \cdot \operatorname{tg} \frac{a - HM_a - c}{b} \right)$$

Operând în continuare relația (4.21) obținem:

$$600 - T_{pr} = 10 \cdot \frac{A \cdot T_{pr} + C}{B} \quad (4.23)$$

Din această relație trebuie determinată temperatura de preîncălzire T_{pr} . Rezolvarea analitică a relației este mai dificilă motiv pentru care se apelează la rezolvarea ei grafică. Se notează părțile acestei relații cu funcțiile:

$$F_1 = 600 - T_{pr}$$

$$F_2 = 10 \cdot \frac{A \cdot T_{pr} + C}{B} \quad (4.24)$$

Reprezentând grafic cele două funcții F_1 și F_2 (fig.4.3), la intersecția celor două curbe se află temperatura de preîncălzire calculată T_{prc} .

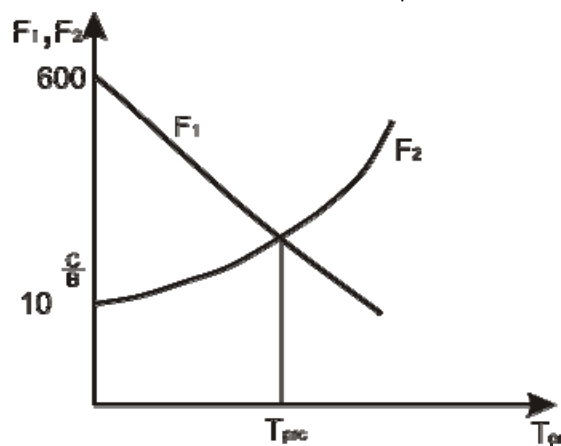


Fig. 4.3.

Cap.5. SUDAREA CU ARC ELECTRIC CU ELECTROZI ÎNVELIȚI (S.E.)

5.1. Clasificarea procedeelor de sudare manuala cu electrozi

Sudarea cu electrozi poate fi realizată în varianta cu electrozi nefuzibili sau cu electrozi fuzibili. Electrozii nefuzibili folosiți la sudare pot fi confecționați din cărbune, din grafit sau din wolfram. La rândul ei sudarea cu electrozi fuzibili poate fi realizată cu electrozi neînveliți sau cu electrozi înveliți. Sudarea cu electrozi nefuzibili se poate efectua fără aport de material de adaos, prin topirea locală a marginilor pieselor de sudat, sau cu aport de material de adaos. Sudarea cu electrozi nefuzibili din wolfram se practică de obicei în varianta cu protecție de gaze inerte.

Tabel 5.1.

Sudarea cu electrozi	→ nefuzibili	→ fără material de adaos	→ arc între electrozi
		→ cu material de adaos	→ arc între electrozi și piesă
	→ fuzibili	→ neînveliți	
		→ înveliți	

Sudarea cu electrozi nefuzibili din cărbune și grafit poate fi asigurată ținând seama că menținerea arcului se obține datorită degajării în procesul de sudare a oxidului și bioxidului de carbon provenit din oxidarea electrozilor de cărbune, gaze care asigura ionizarea mediului între componentele de sudat. Sudarea cu electrozi de cărbune sau grafit se poate realiza în doua variante, cu arcul electric amorsat între electrodul nefuzibil și componentele de sudat, sau cu arcul electric amorsat între cei doi electrozi. În ultimul caz arcul poate fi deplasat ușor, fără o amorsare de fiecare dată, la începutul sudării, efectuându-se operații de sudare sau lipire cu ajutorul lui. Electroductul din cărbune este confecționat de obicei din cărbune copt, din cărbune presat sau cocs. Electroductul din grafit este obținut prin sinterizare din pulbere de grafit. Electroductul din cărbune este ieftin, mai puțin fragil dar se uzează mai repede, circa 1-3 mm/min. Electroductul din grafit are o uzură mai redusă, circa 1 mm/min, asigurându-se astfel menținerea constantă a arcului electric în condițiile amorsării lui între doi electrozi de grafit. Uzura electroductului (consumul de electroduct în timpul procesului de sudare) fiind mai mică la electrozii din grafit, aceștia din urma pot suporta, ca atare, o intensitate mai mare a curentului electric. Diametrele uzuale ale electrozilor din cărbune și grafit sunt cuprinse între 3,2 - 20 mm, suportând o intensitate a curentului de sudare cuprins între 15 - 400 A la electrozii din cărbune și 15 - 500 A la electrozii din grafit. Vârful electroductului din cărbune sau grafit se prelucrează conic la dimensiunile din figura 5.1.

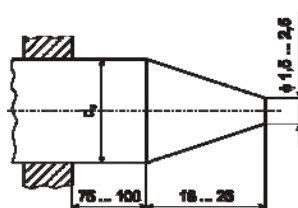


Fig. 5.1

Sudarea cu electrozi din cărbune sau grafit are o răspândire relativ redusă. Ea este încă folosită la sudarea tablelor galvanizate caz în care sudarea se realizează cu

material de adaos pe bază de bronz cu siliciu. Aceste procedee de sudare se mai folosesc și la sudarea tablelor din cupru, caz în care materialul de adaos este o vergea din cupru introdusă în arcul electric menținut între electrozii de cărbune sau grafit, sau între aceștia și materialul de bază. Sudarea fără material de adaos este folosită la table relativ subțiri, cu grosimi de maxim 2 mm marginile fiind răsfrânte ca în figura 5.2.



Fig. 5.2

Sudarea cu electrozi de cărbune sau grafit cu arcul amorsat între doi electrozi este utilizată uneori și pentru remedierea unor piese din bronz sau fontă sau pentru operații de lipire sau încărcare dură.

Sudarea cu electrozi fuzibili neînveliți este un procedeu foarte rar întâlnit. Sudarea se poate totuși utiliza numai în curent continuu, având marele dezavantaj că nu se asigura o ionizare bună a spațiului arcului electric, de aceea și stabilitatea arcului electric este scăzută. De asemenea, în zona arcului pătrund ușor oxigenul, azotul și hidrogenul din aerul înconjurător degradând caracteristicile mecanice ale sudurii.

Se poate utiliza un astfel de procedeu în condițiile unor suduri puțin pretențioase, pentru încărcări, sau în condițiile în care nu dispunem de utilaj și electrozi de performanță.

Sudarea cu electrozi fuzibili înveliți este însă procedeul cel mai larg folosit. El deține o sferă de activități de circa 60-75% din totalitatea procedeelelor de sudare.

5.2. Performanțele sudării cu electrozi înveliți

Sudarea cu electrozi înveliți (SE) este un procedeu de sudare manuală în care electrodul învelit este deplasat în lungul componentelor de sudat cu viteza de sudare v_s (fig.5.3).

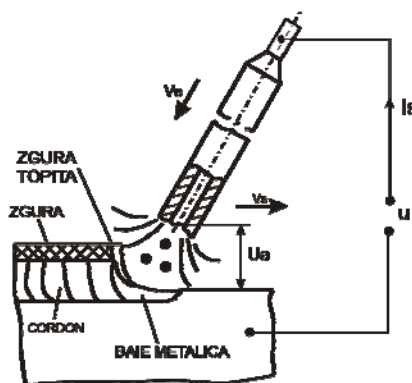


Fig. 5.3

Arcul electric se menține între capătul electrodului și componentele de sudat, electrodul fiind fuzibil este necesară o mișcare de înaintare a acestuia cu viteza v_e spre componentele de sudat. Intensitatea curentului de sudare se stabilește în circuitul format din electrod, arcul electric și sursa de sudare iar tensiunea arcului între capătul electrodului și baia de metal topit.

Dintre performanțele cele mai importante ale procedeeului S.E. se remarcă posibilitatea realizării operației de sudare aproape la toate metalele și aliajele metalice. Grosimea componentelor de sudat variază de la valoarea minimă de circa 1 mm până la valorile cele mai mari posibile. Prin acest procedeu se poate suda în orice poziție. Procedeul S.E. dă posibilitatea unei accesibilități ușoare la toate cordoanele de sudură a

unei structuri sudate. Echipamentele de sudare pentru acest procedeu sunt ieftine, simple și ușor de întreținut.

Procedeul S.E. are însă și o serie de dezavantaje de natură economică și a productivității. Astfel, factorul operator este foarte redus, mai mic decât 25%, iar gradul de utilizare al materialului de adaos este dintre cele mai reduse, cifrându-se la mai puțin de 65%. Din acest motiv sudarea cu electrozi înveliți, în multe situații, în care există posibilitatea tehnică și economică a înlocuirii ei cu o sudare mecanizată, aceasta din urmă trebuie introdusă. Factorul operator redus și gradul de utilizare al materialului de adaos mic se datorează necesității schimbării frecvente a electrozilor. Capătul prins în cleștele port electrod se pierde de obicei. De asemenea, pierderi importante au loc și în timpul procesului de sudare datorită stropilor. Schimbarea frecventă a electrozilor îngreunează desfășurarea continuă a procesului de sudare, scade productivitatea muncii, deci și factorul operator, dar totodată creează cratere care duc la concentratori de tensiune, zone periculoase în condițiile comportării fragile a materialului și care reduc rezistența la oboseală a îmbinării.

Componentele cu grosimea sub 3 mm se sudează dintr-o singură trecere fără prelucrarea marginilor. Componentele cu grosimea cuprinsă între 3-7 mm se sudează S.E. dintr-o singură trecere cu rostul prelucrat în V. Îmbinările de colț se sudează dintr-o singură trecere până la calibrul de 8 mm.

De obicei intensitatea curentului de sudare la sudarea S.E. este cuprinsă între 25-500 A. Nu se folosește o intensitate mai mare de 500 A întrucât electrodul ar trebui să aibă diametrul prea mare, pentru a reduce supraîncălzirea acestuia prin efect Joule, devine greu și dificil de mânuit. Tensiunea arcului este cuprinsă între 15 și 35 V, iar viteza de sudare între 6-30 m/h.

5.3. Funcțiile învelișului electrodului

Electrodul învelit este constituit dintr-o vergea metalică a cărei diametru poartă denumirea de diametrul electrodului învelit (d_e) și un înveliș format din o serie de substanțe presate pe aceasta. Funcțiile învelișului sunt următoarele:

Funcția de ionizare

Această funcție asigură funcționarea stabilă a arcului electric între vergeaua metalică a electrodului învelit și componentele de sudat. În învelișul electrodului se află substanțe cu potențial scăzut de ionizare care dau posibilitatea amorsării ușoare a arcului prin ionizarea acestora ca urmare a tensiunii aplicate arcului electric. Tensiunea arcului la sudarea S.E. este relativ mică datorită tocmai substanțelor ionizante din învelișul electrodului. În categoria acestor substanțe ionizante intră dioxidul de titan – TiO_2 - (rutitul), carbonatul de calciu, carbonatul de potasiu, oxizii și sărurile unor metale alcaline sau alcalino-pământoase.

Funcția de protecție

Se asigură printr-o serie de substanțe din învelișul electrodului care au rolul de a produce gaze a căror presiune protejează baia de sudură împotriva pătrunderii unor elemente din mediul înconjurător, în special oxigenul, hidrogenul și azotul. Aceste elemente deci izolează baia de metal topit de mediul înconjurător. Dintre substanțele protectoare (gazeifiante) se enumera carbonații de calciu, magneziu și bariu precum și o serie de substanțe organice (amidon, celuloză etc).

Funcția moderatoare

Această funcție este conferită de o serie de substanțe din înveliș care au rolul de a forma o crustă de zgură peste cordonul de sudură. Această crustă este izolatoare

termic, micșorând viteza de răcire a cordonului, îmbunătățind astfel plasticitatea acestuia. Totodată, zgura trebuie să aibă o densitate mică în raport cu materialul de baza topit astfel încât să se ridice la suprafața acestuia protejând cordonul de sudură și împotriva agenților atmosferici. Este preferabil ca această zgură să se elimine ușor de pe suprafața cordonului. Dintre substanțele folosite ca moderatoare (zгурifiante) se menționează minereurile de titan, mangan și fier (rutil, ilmenit, rodonit, hematită, manganită etc.) siliciu și silicații naturali (cuart, feldspat, caolin etc.) și carbonații naturali (dolomită, magnezită, calcită etc).

Funcția de purificare

Aceasta este conferită de substanțele din înveliș care se combină cu elementele nedorite din baia de sudură, în special cu sulful și fosforul precum și cu unele gaze ajunse sub presiunea arcului în baia de metal topit. Dintre substanțele purificatoare ale băii de metal topit se menționează carbonatul de sodiu, sulfatul de potasiu, boraxul, hidroxizii alcalini etc. O serie de feroaliaje, aluminiu, siliciu și grafitul exercită efectul de dezoxidare al băii metalice.

Funcția de aliere

Se realizează prin introducerea în învelișul electrozilor a unor pulveri de metale care în timpul procesului de sudare trec în baia de metal topit producând alierea acesteia. Uneori electrozii înveliți au un înveliș gros astfel încât în componența acestora se introduc pulveri de fier. Acestea măresc randamentul depunerii, respectiv cresc cantitatea de material depusă în unitatea de timp. Crește deci și coeficientul de depunere. Totodată adaosul de elemente de aliere în arcul electric are drept scop și compensarea pierderilor prin ardere a unor elemente în coloana arcului, cum ar fi carbonul, manganul, siliciul, cromul, nichelul etc.

Funcția de susținere

Se materializează prin aceea că zgura formată prin solidificarea învelișului electrodului și a altor oxizi, proveniți în urma procesului de sudare, asigură sprijinirea băii de metal topit evitând curgerea ei gravitațională. Aceasta funcție este pregnant folosită la sudarea de poziție, la sudarea pe verticală sau de plafon în care există tendința curgerii gravitaționale a băii de metal topit. Funcția de susținere se caracterizează și prin aceea că produce în zgura topită o tensiune superficială de valoare mare, astfel încât împiedică scurgerea atât a zgurii topite cât și a băii de metal topit.

Funcția de liant

Aceasta se caracterizează prin asigurarea legăturii între elementele aflate în învelișul electrodului precum și asigurarea aderenței învelișului pe sârma de sudat. Cei mai folosiți lianți din învelișul electrodului sunt silicații de sodiu și de potasiu. Uneori când aceștia sunt nedoriți, datorită prezenței suplimentare a siliciului în baia de metal topit, se folosesc ca lianți dextrina, lacuri bachelitice sau uneori lianți organici.

5.4. Caracterizarea electrozilor după înveliș

După tipul învelișului distingem electrozi cu înveliș acid, bazic, titanice, organic sau cu alte tipuri de învelișuri. Cu electrozi având înveliș acid, titanice sau organic se sudează bine, arcul fiind stabil atât în curent alternativ cât și în curent continuu. De asemenea, aspectul cusăturii este neted și regulat, zgura îndepărtându-se relativ ușor.

Învelișul acid se caracterizează prin aceea că în structura lui intra bioxidul de siliciu care-i asigură caracterul acid. Arcul creat de acest electrod cu înveliș acid este stabil și foarte cald, asigurând o penetrație bună în materialul de bază. Zgura este însă fluidă de aceea nu se recomandă folosirea lui la sudurile de poziție. Un inconvenient al

electrodului cu înveliș acid este acela al unei protecții nesatisfăcătoare față de hidrogenul și azotul din mediul înconjurător. Ca atare, învelișul acid se va folosi la sudarea oțelurilor tenace, necalmate, cu conținut maxim de carbon 0,22% și grosimi sub 20 mm, în poziție orizontală.

Învelișul titanic (rutilic) are în compoziția lui rutil sau ilmenit ce conține oxidul de titan TiO_2 . Creșterea conținutului de rutil mărește vâscozitatea zgurei dând posibilitatea sudării de poziție. Dezavantajul electrodului rutilic constă în aceea că viteza de topire este relativ mică și de asemenea, pătrunderea este moderată. Electrozii cu înveliș rutilic se vor folosi deci la sudarea construcțiilor din oțel calmat sau necalmat, cu maxim 0,25% carbon, solicitate static sau dinamic. Este unul din cele mai răspândite învelișuri.

Electrozii cu **înveliș organic** au în structura lor substanțe organice până la circa 12%. O categorie specială de electrozi cu un astfel de înveliș sunt electrozii cu înveliș celulozic. Acești electrozi au în structura învelișului rutilul sau ilmenitul, dar la care se adaugă și celuloza până la circa 12%. Celuloza are proprietatea că în procesul sudării cu arc electric se descompune formând dioxid de carbon, gaz protector al procesului de sudare. Prin urmare, prezența celulozei dă posibilitatea asigurării sudării de poziție datorită cantității mici de zgură, care aderă bine la suprafața metalică solidificată, precum și la sudarea rosturilor mari la care protecția de rădăcină este autoasigurată prin dioxidul de carbon. Arcul, de asemenea, este bine protejat împotriva hidrogenului și azotului din mediul înconjurător.

Concluzionând cele spuse mai înainte, se poate arata că învelișurile acid, rutilic și organic sunt folosite la electrozii destinați sudării oțelurilor nealiate, cu carbon scăzut și a oțelurilor slab aliate de uz curent. Aceste învelișuri nu se vor folosi la electrozii destinați sudării oțelurilor aliate, a fontelor, a oțelurilor slab aliate cu destinație specială, a metalelor și aliajelor neferoase.

Electrozii cu înveliș bazic sunt aceia care sunt destinați sudării oțelurilor aliate, slab aliate speciale și a unor materiale metalice neferoase. Acești electrozi produc metalul topit al zonei cordonului cu puritatea cea mai înaltă și cu plasticitate bună. Totodată reduc conținutul de hidrogen din cusătură îmbinării sudate, măresc plasticitatea acestei îmbinări, plasticitate care se menține până la temperaturi relativ scăzute. Componentele principale ale învelișului electrodului bazic sunt fluorina (CaF_2), carbonatul de calciu ($CaCO_3$) și oxidul de calciu (CaO). Caracterul bazic este dat de oxidul de calciu. Pe lângă marile avantaje ale învelișului bazic aceste învelișuri prezintă în procesul de sudare și unele inconveniente:

- învelișul bazic este hidroscopic producând în procesul de sudare pori dacă umiditatea depășește o valoare admisă, motiv pentru care acești electrozi, înainte de sudare, trebuie neapărat supuși procesului de uscare;
- potențialul de ionizare al învelișului este relativ ridicat. Ca atare, este nevoie de sudare în curent continuu pentru asigurarea stabilității arcului cu polaritate inversă pentru mărirea cantității de căldură administrată învelișului întrucât fluorina din înveliș se topește la temperaturi ridicate;
- trecerea metalului topit prin arcul electric se realizează în picături mai mari. Aceasta se explică prin faptul că oxigenul din aerul atmosferic precum și din reacțiile chimice este aproape inexistent în zona arcului. Oxigenul este acela care creează oxidul de fier ce se caracterizează printr-o tensiune superficială ridicată. Neexistând acest oxid de fier la sudarea cu electrozi bazici picăturile sunt de dimensiuni mai mari. Nu pot fi create picături mici care să intre în echilibru mecanic prin tensiunile superficiale existente. Totodată, datorită picăturilor mari și a tendinței de stropire, aspectul estetic al cusăturii lasă uneori de dorit.

O categorie specială de electrozi o constituie electrozii pentru sudarea materialelor neferoase. Astfel, electrozii pentru sudarea aluminiului și aliajelor sale sunt

constituiți dintr-o vergea metalică din aluminiu cu compoziția chimică similară cu a metalului de bază. Vergeaua este însă acoperită de un înveliș compus din cloruri și fluoruri ale metalelor alcaline, precum și din alte substanțe. Sub influența temperaturii ridicate a arcului electric clorurile și fluorurile se combină cu oxidul de aluminiu transformându-l în fluorură de aluminiu. Oxidul de aluminiu este dușmanul cel mai periculos al procesului de sudare a acestor aliaje. Acesta are o temperatură ridicată de topire și, ca atare, îngreunează desfășurarea procesului de sudare. El este înlăturat de pe suprafața băii de metal topit prin fenomenul descris anterior.

O altă categorie de electrozi înveliți speciali sunt electrozii pentru sudarea cuprului și aliajelor sale. Acești electrozi sunt constituiți în forma tubulară dintr-o vergea din cupru acoperită de un înveliș peste care se dispune o țeavă tot din cupru, învelișul intermediar în interiorul electrodului, între miezul acestuia și blindajul exterior de cupru asigură de fapt protecția arcului și ionizarea spațiului acestuia.

Un tip special de electrozi îl constituie și electrozii pentru sudarea sub apă. Acești electrozi au în învelișul lor substanțe organice, de obicei celuloză, care produc o mare cantitate de gaze. Gazele sub acțiunea presiunii lor dinamice înlătură apa din jurul îmbinării sudate dând posibilitatea desfășurării corecte a procesului de sudare cu arcul electric. Învelișul electrodului pentru sudarea sub apă pentru a nu fi umezit este învelit cu un lac de bachelită.

În ultimul timp se practică și sudarea cu electrozi polimetalici. Acești electrozi pot fi de tipul combinațiilor, prin alipire, a unor electrozi uzuali sau electrozi de formă tubulară. Acești electrozi se folosesc atunci când materialul ce urmează a fi sudat nu poate fi realizat sub aspectul obținerii compoziției chimice a îmbinării sudate cu electrozii clasici. În funcție de diametrul electrozilor componenți ai fascicolului de electrozi, folosiți la sudare, precum și de compoziția chimică a acestora se obține o baie de metal topit cu proprietățile impuse.

Electrozii tubulari constau din învelișuri dispuse coaxial din diferite materiale metalice peste care se dispune învelișul de protecție și ionizare. Astfel pentru sudarea fontelor se pot folosi electrozi formați dintr-un miez de nichel peste care se adaugă o camașă (țeavă) din oțel sau din cupru ambele fiind protejate de către un înveliș de natură bazică.

5.5. Algoritmul de calcul al tehnologiei de sudare cu electrozi înveliți

a) Alegerea electrozilor

Electrozii înveliți cu utilizare curentă la sudarea cu arc electric manuală au diametrele uzuale având valorile de: 1,6; 2; 2,5; 3,25; 4; 5; 6 [mm]. În funcție de valorile diametrului electrodului este stabilită și lungimea acestuia.

$$\begin{aligned} d_e < 3,25 \text{ mm} & \quad L_e = 350 \text{ mm} \\ d_e \geq 3,25 \text{ mm} & \quad L_e = 450 \text{ mm} \end{aligned} \tag{5.1}$$

Limitarea lungimii se impune din condiția încălzirii electrodului prin efect Joule. Se știe că, odată cu creșterea lungimii electrodului, deci a lungimii libere, și micșorarea diametrului acestuia, cantitatea de căldură degajată pe vergeaua metalică a acestuia crește cu efecte nedorite privind distrugerea învelișului electrodului. Puterea disipată în urma trecerii curentului electric prin electrodul învelit este dată de relația:

$$P = R \cdot I_S^2 = \rho \cdot \frac{4 \cdot L_e}{\pi} \cdot \left(\frac{I_S}{d_e} \right)^2 \quad (5.2)$$

Totuși, la diametre mici ale electrodului, $d = 1,6$ sau 2 mm, când se urmărește o lungime mare a acestuia prinderea electrodului în portelectrod se face de la mijlocul acestuia. Se sudează astfel cu ambele părți cu electrodul prins pe mijloc, și căruia i se transmite curentul de sudare pe mijlocul lungimii acestuia.

Alegerea diametrului electrodului se face în funcție de grosimea componentelor de sudat și de numărul de treceri, respectiv de ariile pe frecare trecere. În cazul în care sudarea se realizează într-o singură trecere unilaterală sau bilaterală în tabelul 5.2 se dă diametrul electrodului d_e în funcție de grosimea componentelor de sudat S .

Tabel 5.2. Alegerea diametrului electrodului în funcție de grosimea componentelor.

S [mm]	1...2,5	3	4...5	6...12	>12
d_e [mm]	1,6...2,5	3,25	3,25...4	4...5	5...6

Dacă sudarea se realizează prin mai multe treceri atunci diametrul electrodului cu care se sudează rădăcina cusăturii se alege la o valoare mai mică, astfel încât cordonul de rădăcină, fără susținere, deci cu baie săracă, să nu aibă o arie prea mare.

Electrodul se alege și funcție de compoziția chimică a materialului de bază și caracteristicile de rezistență ale acestuia. Se caută ca rezistența minimă de rupere garantată a materialului depus conform simbolului standard al electrodului să se apropie de rezistența materialului de bază ce urmează a fi sudat.

Sub aspectul compoziției chimice sunt selectate două categorii de electrozi: electrozii destinați sudării oțelurilor cu puțin carbon și slab aliate și electrozii destinați sudării oțelurilor aliate.

Alegerea electrodului se face și în funcție de energia minimă de rupere (de reziliență) impusă cordonului la o anumită temperatură de funcționare a construcției. Din acest punct de vedere energia minimă de rupere este cuprinsă ca valoare printr-o cifră trecută în simbolul electrodului conform STAS 1125- 76.

La alegerea electrodului se are în vedere și poziția de sudare, asigurând astfel evitarea curgerii gravitaționale a băii de metal topit în cazul sudării de poziție. Se are în vedere și posibilitatea de a suda dintr-o singură parte asigurând protecția de rădăcină (cu gaze, cu electrozi cu înveliș organic, cu dispozitive de susținere a rădăcinii).

În unele lucrări [3] se face o selecție a electrozilor și din punct de vedere funcțional, distingându-se astfel:

- electrozii rapizi; permit sudarea cu viteze mari;
- electrozii de umplere; depun o cantitate mare de material, respectiv au un coeficient de depunere și un randament superior;
- electrozi pentru sudarea de poziție; asigură o solidificare rapidă a zgurii și evitarea tendinței scurgerii gravitaționale a băii de metal topit. Sunt folosiți aceștia și pentru sudarea primului strat sau în rosturi neuniforme.

b) Alegerea tipului și dimensiunilor rostului

Pentru sudarea manuală cu electrozi înveliți standardul impune anumite geometrii ale rostului. Se are în vedere ca volumul de material depus să fie minim dar totodată asigurarea pătrunderii pentru realizarea caracteristicilor necesare îmbinării.

c) Calculul ariei rostului, a ariei unei treceri și a numărului de treceri

Aria rostului se împarte pe mai multe treceri. Pentru trecerea de rădăcină se alocă o arie mai mică, iar pentru trecerile de completare se alocă arii apropiate de valorile

maxime.

Fie A_{t1} aria stratului de rădăcină, ariile celorlalte treceri de completare se vor calcula cu relația:

$$A_{ti} = \frac{A_r - A_{t1}}{n_t - 1} \quad (5.3)$$

în care A_r este aria totală a rostului iar n_t este numărul de treceri.

Se urmărește ca valoarea A_{ti} să se apropie cât mai mult de valoarea ariei maxime. În aceste condiții toate trecerile începând cu $i = 2$ până la $i = n_t$ vor fi realizate cu același regim de sudare. Se practică $A_{t1} = (0,4 \dots 0,6) \cdot A_{ti}$.

d) Calculul intensității curentului de sudare

Intensitatea curentului de sudare cu un anumit electrod se alege funcție de indicațiile producătorului, trecute în prospectul electrodului, sau catalogul acestuia. În lipsa acestor valori intensitatea curentului poate fi calculată conform celor arătate în tabelul 4.2. La sudare S.E. cu electrozi înveliți fără pulbere de fier în înveliș,

$$I_S = 56,25 \cdot d_e - 75 \quad [A] \quad (5.4)$$

iar în condițiile sudării cu pulbere de fier în înveliș:

$$I_S = 62,5 \cdot d_e - 50 \quad [A] \quad (5.5)$$

în care d [mm].

În literatura de specialitate [3] se dau relații pentru calculul intensității de sudare separat pentru electrozii destinați sudării oțelurilor cu puțin carbon sau slab aliate, relație de forma:

$$I_S = 2,5 \cdot d_e^2 + 35,5 \cdot d_e - 18 \quad (5.6)$$

și pentru sudarea oțelurilor aliate, relația de calcul a intensității este:

$$I_S = 2,7 \cdot d_e^2 + 25 \cdot d_e - 11 \quad (5.7)$$

pentru gama diametrelor electrozilor cuprinsă între 1,6...6 mm.

e) Calculul tensiunii arcului

Când nu sunt indicații exprese ale producătorului de electrozi, tensiunea arcului se calculează cu relația:

$$U_a = 0,05 \cdot I_S + 10 \quad [V] \quad (5.8)$$

f) Calculul ratei depunerii

Rata depunerii A_D se calculează cu relațiile pentru electrozii fără pulbere de fier în înveliș:

$$A_D = K \cdot (0,756 \cdot 10^{-2} \cdot I_S + 0,68) \quad (5.9)$$

iar pentru electrozii cu pulbere de fier în înveliș:

$$A_D = K \cdot (1,588 \cdot 10 \cdot I_S + 0,34) \quad (5.9)$$

în care $K = 1,5$ pentru sudarea cu DC^+ și $K = 1$ pentru sudarea cu DC^- .

g) Calculul vitezei de sudare

Între rata depunerii, secțiunea unei treceri și viteza de sudare există relația:

$$A_D = A_{ti} \cdot \rho \cdot v_{Si} \quad (5.10)$$

din care rezultă expresia vitezei de sudare:

$$v_{Si} = \frac{A_D}{A_{ti} \cdot \rho} \quad (5.11)$$

Întrucât rata depunerii A_D a fost stabilită anterior, secțiunile trecerilor au fost precizate, viteza de sudare rezultă în baza relației (5.11).

5.6. Tehnica operatorie la sudarea cu electrozi înveliți

Pentru o bună funcționare a electrozilor înveliți este necesar ca învelișul acestora să fie uscat. Electrozii înveliți se păstrează în camere închise cu umiditate controlată. Dacă electrozii au învelișurile nebazice umiditatea absolută a camerei trebuie să fie sub 70%, iar dacă aceștia au învelișuri bazice umiditatea relativă trebuie să fie sub 40%. În condițiile în care umiditatea încăperii este peste aceste limite, este suficientă încălzirea camerei cu 10 grade peste temperatura din exterior pentru a reveni la umiditatea normală.

În cazul în care electrozii înveliți sunt umezi înaintea procesului de sudare ei trebuie să fie încălziți la temperaturile indicate în tabelul 5.3.

Tabel 5.3. Temperatura de uscare a electrozilor înveliți.

Tipul învelișului electrodului		Temperatura de uscare [°C]
acid + rutilic		120...150
organic (celulozic)		90
bazic	$\sigma_C \leq 30 \text{ daN/mm}^2$	70...150
	$\sigma_C = 30...56 \text{ daN/mm}^2$	250...310
	$\sigma_C \geq 56 \text{ daN/mm}^2$	310...370

Temperaturile de uscare ale electrozilor din acest tabel se vor alege cu atât mai mari cu cât se cere ca hidrogenul difuzibil din îmbinare să fie mai redus.

Operația de sudare este însoțită de o pendulare a vârfului electrodului, respectiv a arcului electric. În cazul îmbinărilor înguste la table subțiri pendularea poate să nu existe, figura 5.4A.

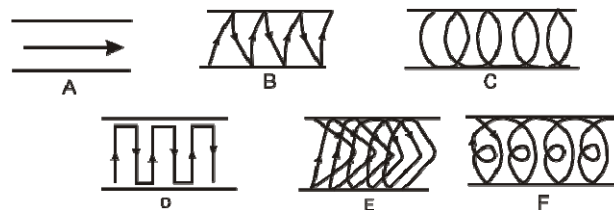


Fig. 5.4.

În cazul în care este necesară o topire pregnantă a marginilor componentelor de sudat se poate realiza pendularea conform figurii 5.4B și D.

În cazul în care este necesară depunerea de material de adaos în cantitate mai mare pendularea se face după figura 5.4C, E și F.

Se va evita în timpul pendulării amestecarea zgurei topite cu baia metalică pentru a nu apărea incluziuni de zgură în cusătură.

Rostul îmbinării sudate, pentru a evita defectele procesului de sudare, trebuie curățat de oxizi, rugină și pete de grăsime prin sablare, cu peria de sârma sau prin aschiere.

Lungimea arcului și implicit tensiunea de sudare se vor alege ținând seama de aspectele legate de sudarea cu arc scurt sau cu arc lung. Diferența dimensională dintre cele două categorii o constituie limita la care lungimea arcului este egală cu diametrul

vergelei electrod. Se are în vedere că sudarea cu arc scurt asigură o protecție mai bună a metalului topit, dar execuția este mai greoaie, solicitând o calificare superioară a sudorului. La sudarea în jgheab se recomandă ca electrodul să fie înclinat cu $15-45^\circ$ în planul cordonului spre sensul de sudare.

Sudarea cu electrozi înveliți impune schimbarea frecventă a electrozilor. La reluarea procesului de sudare cu un nou electrod (fig.5.5) este necesară înlăturarea zgurei pe o lungime de 20-30 mm, iar aprinderea arcului se va face nu în craterul rămas de la sudarea cu electrodul precedent ci la o distanță de 10..15 mm în aval de craterul respectiv, astfel încât arcul să se aducă în zona craterului, continuându-se procesul de sudare.

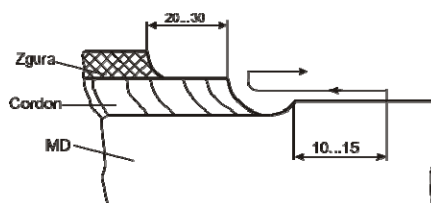


Fig. 5.5.

5.7. Defecte tehnologice și măsuri pentru evitarea lor

Parametrii tehnologici și în special parametrii tehnologici primari, determină geometria cusăturii sudate. Nealegerea corectă și nerespectarea acestora duce la defecte de natura geometrică ale îmbinării. Aceste defecte au fost analizate la caracterizarea parametrilor tehnologici de sudare.

Unul dintre defectele majore sunt fisurile. Ele se datoresc fragilizării ZIT-ului sau fenomenelor tenso-termice ale materialului cordonului îmbinării sudate. Fisurile trebuie eliminate, în condițiile în care sunt la valori mai mari decât cele admisibile, prin operații greoaie de prelucrări mecanice și apoi cordonul trebuie resodat.

Combaterea fisurilor este dificilă datorită multiplelor cauze care le provoacă.

Porii, denivelările și găurile în suprafața liberș a cordonului se datoresc ruginii marginilor componentelor, umezelii învelișului, petelor de ulei sau vopsea, sau răcirii prea rapide a materialului depus.

Stropii defavorizează estetica cordonului și reduc gradul de utilizare al materialului de adaos. Diminuarea stropirii se asigură prin micșorarea intensității curentului de sudare, reducerea lungimii libere a arcului, folosirea naturii și polarității curentului corespunzătoare cerințelor electrodului și organizarea suflului magnetic.

Un defect major, ce afectează rezistența îmbinării și în special rezistența la oboseală, îl constituie lipsa de topire a materialului de bază. Aceasta se datorează curățirii incorecte a rostului, pendulării necorespunzătoare, fără topirea marginilor rostului, deschiderii insuficiente a rostului sau unui diametru al electrodului prea mic. Evitarea acestui defect se asigură remediind deficiențele arătate, măbind intensitatea curentului de sudare și uniformizând viteza de sudare.

CAP.6. SUDAREA SUB STRAT DE FLUX (SF)

6.1. Clasificarea procedeelor de sudare sub strat de flux

Sudarea sub strat de flux se realizează în variantă mecanizată. Această sudare constă (fig. 6.1) din depunerea unui strat de flux 1, provenit din buncărul 2, deasupra rostului îmbinării de sudat. Sârma electrod 3, provenită din toba 4 este antrenată de un mecanism de avans al sârmei electrod 5 și, după ce trece prin piesele de contact electric 6, este trimisă asupra rostului unde se produce arc electric. Sârma se topește și odată cu ea și fluxul. Arcul este bine protejat de către perna de flux aflată deasupra lui.

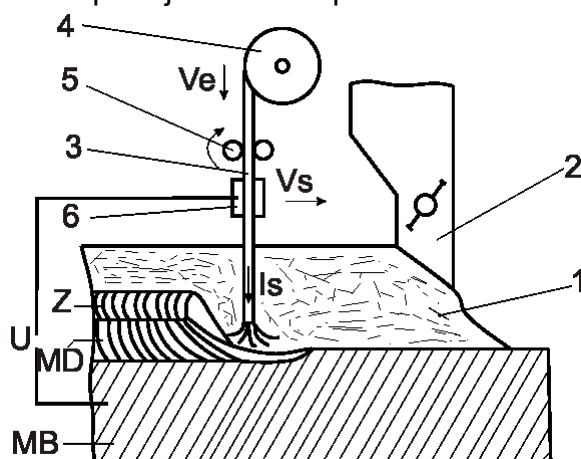


Fig. 6.1.

Materialul depus este de asemenea bine protejat de stratul de zgură.

Un alt punct de vedere al clasificării sudării sub flux este în funcție de numărul sârmelor electrod folosite în procesul de sudare. Distingem astfel două categorii de sudări sub flux:

- cu o singură sârmă electrod;
- cu două sârme electrod.

Uneori se folosesc procedee de sudare chiar cu mai multe sârme electrod.

Sudarea cu două sârme electrod se poate realiza cu arce independente, cu arce gemene și cu arc înseriat.

Sudarea cu arce independente poate fi realizată în aceeași baie sau în băi separate, în funcție de modul în care materialul de adaos provenit din arc electric, trece în material depus, solidificându-se simultan în cadrul băii comune a celor două sârme electrod sau separat. În figura 6.2 se prezintă sudarea cu două sârme electrod cu arce independente în baie comună.

Sârma electrod de diametru d_{e2} , prin care trece curentul electric I_2 , asigură pătrunderea de rădăcină a cordonului. Sârma electrod d_{e1} , prin care trece curentul electric I_1 , realizează trecerea de umplere. De obicei, diametrul sârmei ce asigură trecerea de rădăcină este mai mic decât al sârmei ce asigură trecerea de completare. În cazul în care diametrele sârmelor sunt identice, atunci intensitatea curentului $I_2 > I_1$. În scopul unei pătrunderi mai bune, realizată de sârma electrod de diametru d_{e2} , unghiul de înclinare a acestuia cu planul rostului, α_2 , este mai mare decât α_1 . Primul arc, cel al sârmei de diametru d_{e2} , lucrează de obicei în curent continuu. Cel de-al doilea arc poate lucra și în curent alternativ, stabilitatea arcului fiind asigurată datorită băii comune de metal topit.

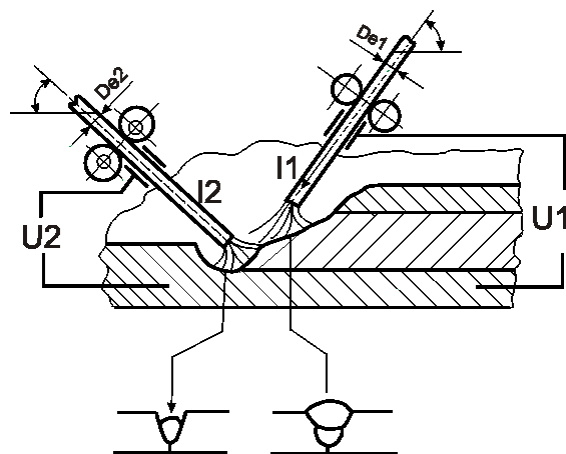


Fig. 6.2.

Principalul avantaj al băii comune este obținerea unei adâncimi mari de pătrundere a cordonului de sudură.

La sudarea cu arce independente în băi separate, distanța dintre cele două sârme electrod este mare, de 70...250 mm, băile de sudură fiind independente, respectiv fiecare cristalizează separat. Arcul al doilea are nevoie pentru realizarea îmbinării de o intensitate mai mică a curentului de sudare, întrucât materialul pe care se realizează depunerea, cu sârma din aval, este deja încălzit. Ca atare, se asigură o economie în ceea ce privește energia folosită în procesul de sudare. Dar, un aspect tehnic mai important și favorabil îl constituie acela că, cele două arce arzând în băi separate asigură o îmbunătățire a calității îmbinării sudate. Cel de-al doilea arc, realizează o degazare bună a băii de metal topit și totodată îmbunătățește structura îmbinării sudate prin efectul de normalizare a zonei îmbinării, respectiv de micșorare a dimensiunilor grăunților cristalini.

Sudarea cu arce gemene, este o sudare cu două sârme electrod, arzând în baie comună, însă cele două sârme electrod sunt legate la aceeași sursă. Spre deosebire, deci, de sudarea cu arce independente, corespunzătoare, la sudarea cu arce gemene, sârmele sunt legate la aceeași sursă sau la același pol al aceleiași surse, iar materialul de bază la polul celălalt. În funcție de poziția sârmelor față de rostul de sudură, distingem:

- așezare în tandem, atunci când planul sârmelor electrod se află în planul îmbinării;
- așezare în paralel, atunci când planul sârmelor electrod este perpendicular pe axa îmbinării.

La așezarea sârmelor în tandem (fig. 6.3), pătrunderea este mai mare decât la așezarea acestora în paralel.

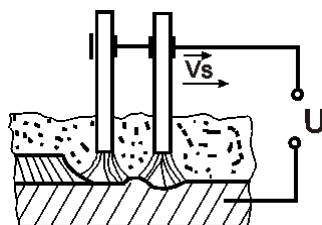


Fig. 6.3.

La așezarea în paralel a sârmelor, însă, lățimea îmbinării este mai mare. Așezarea sârmelor în paralel, se recomandă la sudarea pieselor cu rosturi mari și neuniforme. Avantajele principale ale sudării cu arce gemene, sunt legate de asigurarea participării materialului de adaos, cu o cotă mai mare, în realizarea îmbinării. Totodată, datorită temperaturii mari a băii de metal topit, se reduce sensibilitatea față de formarea porilor.

Sudarea cu arc înseriat constă în producerea arcului electric, direct, între

electrozii de sudat. Datorită prezenței arcului electric în zona îmbinării sudate, se realizează și topirea parțială a materialului de bază (fig. 6.4).

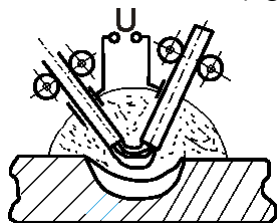


Fig. 6.4.

Sudarea cu arc inserat impune, însă, o cinematică precisă a deplasării sârmelor electrod și variații reduse ale intensității curentului de sudare. În caz contrar, geometria îmbinării este afectată de aceste perturbații. La sudarea cu arc inserat se asigură un aport, al materialului de adaos, mai mare decât la sudările prin celelalte procedee. Sudarea cu arc inserat se poate realiza în curent continuu sau în curent alternativ. Dacă curentul de alimentare al arcului este continuu sau alternativ monofazat, sudarea se realizează cu două sârme electrod.

Sudarea în curent alternativ trifazat poate fi realizată după metoda cu arce electrice directe sau cu arce electrice indirecte. Sudarea cu arce electrice directe constă în sudarea, în care două sârme electrod sunt puse la 2 faze ale curentului trifazat, iar materialul de bază al piesei la cea de-a treia fază a curentului trifazat.

Sudarea cu arce indirecte se realizează între trei sârme electrod, fiecare dintre aceste sârme, fiind alimentată cu una din fazele curentului trifazat. Toate arcele ard în baie comună.

Sudarea cu arc trifazat se caracterizează, prin aprinderea sacadată a arcului între electrozi, cu frecvența rețelei, sârma electrod rămânând permanent caldă. Arcul trifazat are, deci, o stabilitate mai bună, ca atare și tensiunea de mers în gol la alimentarea cu arc trifazat a procesului poate fi mai redusă. De asemenea, factorul de putere este mai bun, deci consumurile energetice mai mici, și încărcarea mai uniformă a fazelor rețelei.

Din punct de vedere al materialului de adaos folosit, sudarea sub strat de flux se poate desfășura cu:

- sârmă electrod;
- bandă electrod;
- sârmă electrod și material de adaos suplimentar.

Procedeele de sudare cu sârmă electrod au fost prezentate în exemplele anterioare.

Sudarea cu bandă electrod este folosită de obicei pentru operațiile de depunere a straturilor speciale pe materialul de bază al construcției sudate. Banda electrod este antrenată în baie de sudură, prin intermediul unui mecanism de avans cu role late (fig. 6.5).

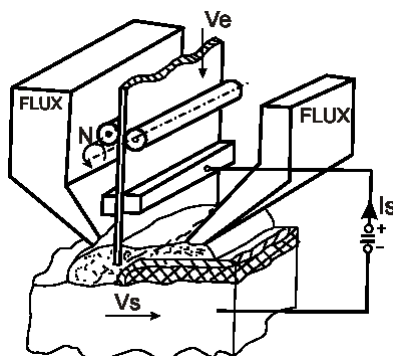


Fig. 6.5.

Ea primește curentul de la o sursă, prin intermediul unor patine de contact. La sudarea cu electrod bandă se folosește curentul continuu cu polaritate inversă, întrucât acest procedeu de sudare este destinat încărcării materialelor, deci, topirii mai intense a materialului de adaos, decât cel de bază. Banda are o lățime de 20...100 mm și ca grosime de 0,5...1,6 mm. Cea mai răspândită bandă are lățimea de 60 mm și grosimea de 0,5 mm.

Fluxul este depus atât înaintea procesului cât și după procesul de sudare, pentru acoperirea integrală a întregii lățimi a băii de sudură. Arcul electric arde între o porțiune a benzii și materialul de bază, deplasându-se permanent pe lățimea benzii de sudură. Procedeu se caracterizează printr-o mare productivitate, prin realizarea unei pătrunderi reduse, deci, a unei participări mari a materialului de adaos, precum și prin obținerea unor suprafețe de material depus relativ uniforme.

În categoria sudării sub strat de flux cu sârme electrod și material de adaos suplimentar, intră sudarea cu sârmă suplimentară și sudarea cu pulbere metalică. Aceste procedee de sudare, cu material de adaos suplimentar, se caracterizează printr-o productivitate mărită a procedurii de sudare, printr-un randament și depunerii crescut, printr-o pătrundere mică. De asemenea, zona influențată termic (ZIT) este redusă și totodată diluția este micșorată. Intensitatea curentului este relativ mică, față de cantitatea mare de metal depus.

Sudarea cu sârmă suplimentară se caracterizează prin introducerea în zona arcului de sudare, la sudarea cu o singură sârmă, a unei noi sârme, care se topește sub acțiunea căldurii degajate de arc electric. Diametrul d_e (fig. 6.6) al sârmei suplimentare este mai mic decât diametrul sârmei principale.

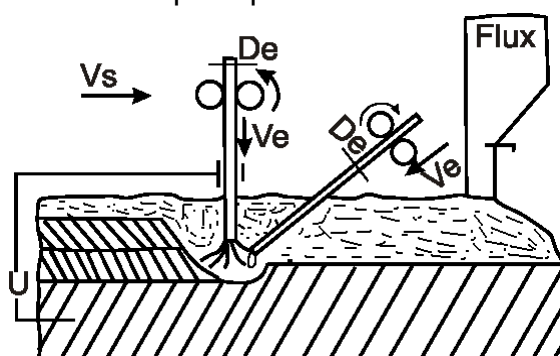


Fig. 6.6.

De asemenea, și viteza de avans a sârmei electrod suplimentare, v_e' , este mai redusă decât viteza de avans v_e , a sârmei electrod principale. Sudarea cu sârmă suplimentară, numită și sudare cu sârmă caldă, se aplică în cazul sudării componentelor groase cu calibrul mare. De remarcat că sârma suplimentară nu este racordată în circuitul electric, ea se topește prin cantitatea de căldură degajată de arc sursei principale.

Sudarea cu pulbere metalică (fig. 6.7) constă în introducerea în procesul de sudare, a unei pulberi cu proprietăți speciale pentru asigurarea unor anumite caracteristici ale îmbinării sudate. Pulberea are, de obicei, în compoziția ei pulbere de Fe, dezoxidanți și feroaliaje. Pulberea este depusă în rostul îmbinării sau pe suprafața materialului de bază, printr-un buncăr primar, după care ea este acoperită de fluxul provenit dintr-un buncăr secundar. Arcul electric pătrunde prin perna de flux, topește sârma electrod cât și pulberea depusă inițial pe materialul de bază asigurând astfel o aliere suplimentară a cordonului cu ajutorul elementelor pulberii metalice. Sudarea cu material de adaos suplimentar, cu ajutorul pulberilor metalice este de obicei folosită la încărcarea cu straturi având proprietăți speciale.

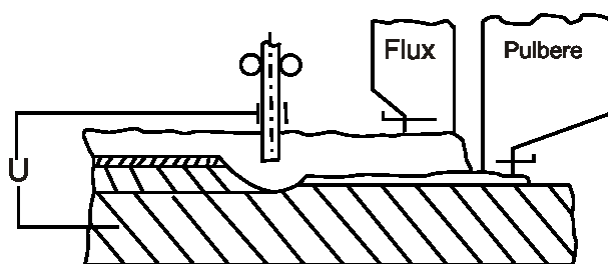


Fig. 6.7.

6.2. Performanțele sudării sub flux

Principalele avantaje ale sudării sub strat de flux constau în următoarele:

- datorită eliminării factorilor legați de îndemânarea sudorului, cusătura este mai omogenă și mai uniformă. Procedul fiind mecanizat, geometria cusăturii se menține constantă pe întreaga lungime a ei;
- productivitatea procedului este mai ridicată de la 5...20 ori față de sudarea manuală SE, aceasta datorându-se mecanizării procedului precum și ratei depunerii mult mai mari;
- consumurile energetice sunt cu 30...40 % mai reduse la aceiași cantitate de material depus, cu toate că intensitatea curentului de sudare este mai mare;
- curentul de sudare, I_s , este mai mare la același diametru al sârmei electrod, decât la sudarea cu electrod învelit, întrucât lungimea dintre contactul electric și arcul electric este mult mai mică la sudarea S.F. și ca atare pierderile prin efect Joule pe rezistența electrodului sunt mult diminuate;
- procedul asigură o foarte bună protecție contra pătrunderii aerului în zona arcului electric prin stratul de zgură topită cât și prin stratul de flux, în care sunt înmagazinate gazele procesului de sudare;
- cantitatea de fum degajată în urma procesului este mică, îmbunătățind condițiile de muncă în hale și ateliere;
- gradul de folosire al materialului de adaos, al sârmei electrod, este foarte mare apropiat de unitate. Față de sudarea electrică S.E, în care se pierde o cantitate din electrodul învelit rămas în port-clește, la sudarea S.F. sârma electrod se consumă aproape integral.

Principalele dezavantaje la sudarea cu procedul S.F. constau în:

- se pot suda eficient numai cordoane drepte și circulare cu diametrul relativ mare. Lungimea cordoanelor trebuie să depășească cel puțin 1 m, pentru ca sudarea să fie eficientă;
- pe cusătura de sudură rămâne zgură, care trebuie îndepărtată, ceea ce impune operații suplimentare pentru evacuarea ei. Din acest motiv, mai ales, la zgurile aderente la cordon, eficiența sudării în mai multe treceri este mai redusă. La acest procedu se impun pretenții mărite privind curățirea suprafeței metalului de sudat;
- arcul electric nu poate fi supravegheat și ca atare este necesară prelucrarea precisă, rectilinie sau circulară a componentelor pentru ca materialul depus să fie așezat corect în rostul de sudură;
- prin procedul S.F. se sudează în mod curent oțeluri, nealiate, cu puțin carbon și oțeluri aliate. Se mai sudează uneori oțeluri inoxidabile sau materiale neferoase cum ar fi: Ni, Cu și aliajele de tip monel. Se pot suda fără prelucrarea rostului, grosimi până la 15 mm și cu prelucrarea în V a rostului, grosimi până la 25 mm. Se poate suda atât în curent alternativ cât și în curent continuu.

Orientativ limitele extreme ale parametrilor tehnologici primari sunt: $I_S = 400 \dots 1200$ A; $U_a = 25 \dots 42$ V; $v_S = 40 \dots 120$ m/h,

6.3. Materiale de adaos la sudarea sub flux

6.3.1. Fluxuri de sudare

Fluxul este materialul de adaos ce se prezintă sub formă de granule sau pulbere, care se depune în fața procesului de sudare și sub care arde arc electric.

Fluxurile au următoarele roluri:

- asigură ionizarea mediului și menținerea arcului electric;
- asigură protecția băii de sudură față de aerul atmosferic;
- asigură protejarea cusăturii față de răcirea bruscă, prin zgura topită ce învelește metalul depus;
- reacționează cu metalul depus în stare topită, transferându-și o parte din elementele de aliere; se asigură astfel însușiri mecanice dorite îmbinării;
- extrage din metalul depus elementele dăunătoare ca: S, P, N, H;
- elimină gazele formate la sudare printre granulele de flux;
- asigură o formă rotunjită suprafeței libere a cusăturii datorită tensiunii superficiale în zgura topită;

Pentru realizarea acestor condiții fluxurile trebuie să îndeplinească următoarele caracteristici:

- zgura produsă să aibă densitate mai mică decât a materialului cusăturii pentru a se ridica deasupra acestuia și a proteja îmbinarea;
- temperatura de topire și solidificare să fie aceiași sau aproape aceiași cu a materialului ce se sudează;
- intervalul de solidificare să fie cât mai scurt pentru a proteja metalul depus în curs de solidificare sau pentru a evita curgerea gravitațională a acestuia;
- zgura trebuie să fie compactă și suficient de fluidă pentru a da posibilitatea degazării băii de metal topit.

Ca atare, fluxul de sudare trebuie să asigure funcția stabilizatoare (de realizare a stabilității arcului electric), funcția protectoare (protecția băii lichide față de acțiunea gazelor mediului înconjurător), funcția metalurgică (de aliere a băii de metal topit cu elementele din zgura topită), funcția termică (de ameliorare a ciclului termic al sudării).

Compoziția fluxului, respectiv a zgurei obținută prin topirea acestuia este caracterizată de coeficientul de bazicitate. Conform STAS 10123-75 coeficientul de bazicitate are expresia:

$$b = \frac{\%CaO + \%MgO + \%BaO + \%CaF_2 + Na_2O + 0,5 \cdot (\%MnO + \%FeO)}{\%SiO_2 + 0,5 \cdot (\%Al_2O_3 + \%TiO_2 + \%ZrO_2)} \quad (6.1)$$

Zgura se consideră acidă dacă $b < 1,1$; bazică dacă $b = 1 \dots 2$ și puternic bazică dacă $b > 2$.

O relație simplificată pentru determinarea bazicității fluxului este:

$$B = \frac{CaO + MgO + MnO}{SiO_2 + FeO + TiO_2} \quad (6.2)$$

Dacă $B > 1$, atunci fluxul folosit este bazic. Dacă $B < 1$, atunci fluxul folosit este acid.

Având în vedere procedeul de fabricare, fluxurile se împart în 4 categorii:

- fluxuri topite;
- fluxuri ceramice;
- fluxuri sinterizate;
- fluxuri amestecate.

Fluxurile topite se obține prin topire în cuptoare cu grafit la temperaturi 1400...1600°C, a unor compuși oxidici și apoi granularea acestora la dimensiuni 0,5...2,5 mm. Având în vedere procedeul tehnologic de obținere a fluxurilor topite, între componentele rețetei pot avea loc reacții chimice, astfel că fluxurile topite sunt mai puțin active în procesul de sudare. Fluxurile topite sunt de două categorii:

- cu mult MnO și SiO₂, corespunzând fluxurilor românești FSM 57 și FSM 57B;
- cu puțin MnO și SiO₂, corespunzând fluxurilor românești FB 10, FB 20. Primele fluxuri sunt acide, cea de-a doua categorie fiind bazice. Ca atare, fluxurile topite sunt mai puțin active în procesul de sudare, în schimb au o rezistență mecanică bună, putând fi ușor transportate, manipulate sau recirculate și totodată o hidroscoapitate foarte redusă.

Fluxurile ceramice se obțin prin amestecarea omogenă a diferiților compuși oxidici, apoi legarea lor cu un liant, silicatul de sodiu sau de potasiu, granularea și apoi uscarea lor până la temperaturi de 300...400°C. Datorită temperaturii reduse de uscare, componentele fluxului nu reacționează între ele. Ca atare, în structura fluxului se pot introduce elemente de aliere, în felul acesta metalul depus va schimba cu zgura topită elementele de aliere, producându-se alierea băii. Totodată au loc fenomene importante de dezoxidare și de rafinare a cusăturii. Ca atare, fluxurile ceramice sunt active în procesul de sudare și se caracterizează prin bazicitate ridicată. În schimb rezistența mecanică, a fluxurilor ceramice este scăzută, iar ele prezintă o hidroscoapitate mare. În țara noastră se fabrică fluxurile ceramice: FCR 28; FC 40; FC 60; FC-Cr 17 Mo. Ele sunt folosite în special la sudarea oțelurilor mediu sau înalt aliate.

Fluxurile sinterizate sunt asemănătoare fluxurilor ceramice din punct de vedere al modului de obținere, încă uscarea lor se face la temperaturi mult mai mari, de până la 800...900°C. Prin urmare aceste fluxuri sunt mai puțin active, datorită temperaturii mari de fabricație. În schimb au o rezistență mecanică mai bună și hidroscoapitate mai scăzută.

Fluxurile amestecate sunt obținute prin amestecarea mecanică a fluxurilor topite și ceramice, îmbinând parțial avantajele și dezavantajele acestora.

6.3.2. Sârme de sudare

Sârmele de sudare pline se produc în gama de diametre: 2; 2,5; 3,2; 4; 5; 6; 8; 10; 12 mm. Suprafața sârmei este de obicei cuprată, pentru a asigura protecția anticorozivă și îmbunătățirea contactului electric prin piesa de contact a capului de sudare. Sârmele se livrează în bobine de dimensiuni normalizate. Compoziția chimică a sârmelor se alege în funcție de metalul de bază care se sudează, precum și de fluxul folosit. În STAS 1126-76 sârmele sunt împărțite în funcție de nivelul de aliere, distingându-se:

- sârme nealiate și slab aliate, destinate sudării oțelurilor carbon, a oțelurilor slab aliate și cu limită de curgere ridicată;
- sârme mediu și înalt aliate pentru încărcarea prin sudare;
- sârme înalt aliate pentru sudarea oțelurilor inoxidabile și refractare.

6.4. Algoritmul de calcul a tehnologiei de sudare sub flux

S-a arătat anterior că **diametrul sârmei electrod**, d_e , este cuprins între 2...12 mm, dar în mod uzual diametrul sârmei electrod este cuprins între 2...6 mm. Diametrul sârmei electrod se alege în funcție de grosimea minimă a componentelor de sudat, conform tabelului 6.1.

Tabel 6.1.

Grosimea minimă a componentelor [mm]	2...6	7...9	10...14	14...16
Diametrul sârmei electrod de [mm]	2	3	4...5	5...6

Lungimea liberă a sârmei electrod se alege de obicei astfel:

$$L_L = 10 \cdot d_e \quad (6.3)$$

Intensitatea curentului de sudare se calculează cu relația:

$$I_S = 21 \cdot d_e^2 + 24 \cdot d_e + 270 \quad (6.4)$$

cu d_e [mm] și I_S [A].

Intensitatea poate varia totuși între o valoare maximă data de relația:

$$I_{S \max} = 13 \cdot d_e^2 + 147 \cdot d_e - 87 \quad (6.5)$$

și una minimă:

$$I_{S \min} = 162,5 \cdot d_e - 190 \quad (6.6)$$

Alegerea curentului de sudare între valoarea maximă și minimă, se face ținând seama de o serie de performanțe sau elemente tehnologice ce trebuie să fie îndeplinite. Astfel, creșterea intensității curentului electric spre valoarea maximă, se va realiza în scopul măririi ratei depunerii și a pătrunderii. Dacă se depășește valoarea maximă, atunci apar defecte în jurul cordonului. Scăderea intensității curentului spre valoarea limită minimă poate produce întreruperi sau instabilități ale arcului de sudare. Dacă se cere pe lângă pătrunderea adâncă și viteză mare de sudare se va folosi sudarea în curent continuu DC^+ . Când se urmărește o rată mare a depunerii, atunci se va lucra în curent continuu DC^- , dar pătrunderea va fi diminuată. De obicei, rata depunerii este cu 50% mai mare la sudarea DC^- , decât la sudarea DC^+ . Se are în vedere participarea mult mai mare a materialului de bază la formarea cusăturii, decât a materialului depus. Sudarea în curent alternativ are de obicei o stabilitate mai mică, dar prin alegerea curentului de sudare spre valoarea maximă, respectiv și prin alegerea unui diametru al sârmei electrod, d_e , mai mic pot corecta acest dezavantaj. Sudarea în curent alternativ se bucură de avantajul înlăturării suflajului magnetic.

Tensiunea arcului la sudarea S.F. este dată de următoarea relație statistică:

$$U_a = 2,125 \cdot 10^{-2} \cdot I_S + 16,5 \quad (6.7)$$

Mărirea tensiunii, U_a , peste valoarea calculată, în limite totuși normale poate avea efecte favorabile, cum este lățirea cusăturii, creșterea consumului de flux și ca urmare intensificarea proceselor de aliere a cusăturii cu elemente din flux, scăderea înălțimii cordonului, scăderea rezistenței față de formarea porilor etc. Reducerea tensiunii arcului este nefavorabilă determinând scăderea stabilității procesului.

Rata depunerii la sudarea sub strat de flux se calculează cu relația statistică:

$$A_D = \frac{k_1}{10,8} \cdot (10^{-4} \cdot I_S + 10^{-2} \cdot I_S + 4) \left[\frac{Kg}{h} \right] \quad (6.8)$$

în care k_1 ia valorile:

- $k_1 = 1$ pentru sudarea în curent continuu DC⁺;
- $k_1 = 1,5$ pentru sudarea în curent continuu DC⁻;
- $k_1 = 1,25$ pentru sudarea în curent alternativ AC.

Viteza de sudare se calculează cu relația etatică:

$$K \cdot v_S = 1,1 \cdot d_e^2 + 2,5 \cdot d_e + 56,1 + \frac{62,5}{d_e} + \frac{621}{d_e^2} \quad [\text{cm/min}] \quad (6.9)$$

în care coeficientul K, după cum se știe, are expresia:

$$K = \frac{A_t}{\frac{\pi \cdot d_e^2}{4}} \quad (6.10)$$

Produsul $K \cdot v_S$ are semnificația vitezei de sudare în condițiile în care aria trecerii este egală cu aria secțiunii sârmei.

Viteza de înaintare a sârmei electrod în baia de sudură se calculează pornind de la considerentul că la sudarea sub strat de flux volumul materialului depus este apropiat de volumul materialului de adaos topit. Ca atare:

$$A_t \cdot L_b = \frac{\pi \cdot d_e^2}{4} \cdot L_a \quad (6.11)$$

în care L_b , L_a reprezintă lungimea materialului de bază, respectiv a cordonului și lungimea materialului de adaos parcurse în același timp.

Împărțind relația (6.11) la timpul de desfășurare a procesului rezultă:

$$A_t \cdot v_S = \frac{\pi \cdot d_e^2}{4} \cdot v_e \quad (6.12)$$

și ca atare:

$$v_e = \frac{A_t}{\frac{\pi \cdot d_e^2}{4}} \cdot v_S \quad (6.13)$$

Se observă comparând relația (6.13) cu (6.10) că:

$$v_e = K \cdot v_S \quad (6.14)$$

Acesta este și motivul introducerii coeficientului K. El reprezintă multiplicatorul vitezei de sudare care conduce la calculul vitezei materialului de adaos.

Pentru calculul tehnologiei de sudare la sudarea S.F. mai pot fi folosite și alte relații, apelând la pătrunderea realizată în urma procesului. Se știe că pătrunderea este proporțională cu intensitatea curentului de sudare:

$$p = K_p \cdot I_S \quad (6.15)$$

în care: $K_p = (1,2 \dots 2) \cdot 10^{-2} \quad [\text{mm/A}]$ la rosturile prelucrate în U, V sau X.

$$K_p = (1, \dots 1,2) \cdot 10^{-2} \quad [\text{mm/A}] \text{ la rosturile prelucrate în I.}$$

Coeficientul K_p va lua valori spre limita maximă când se lucrează în varianta DC⁺ sau AC și spre limita inferioară când se lucrează cu DC⁻. Pătrunderea se stabilește cunoscând grosimea componentelor și numărul de treceri astfel încât volumul de material depus să umple întreaga secțiune a rostului. Tensiunea arcului și rata depunerii se pot calcula în baza relațiilor (6.7) și (6.8) dacă se cunoaște intensitatea curentului de sudare, determinată în baza relației (6.15). Viteza de sudare se poate calcula cu relația (6.9) sau

folosind coeficientul de depunere:

$$v_S = \frac{\alpha_d \cdot I_S}{A_t \cdot \rho} \quad (6.16)$$

Se are în vedere că la sudarea sub strat de flux coeficientul de depunere α_d variază astfel:

$$\alpha_d = (16 \dots 30) \text{ Kg/A} \cdot \text{h}$$

Viteza de înaintare a sârmei electrod se determină în baza relației (9.15). Această a doua metodă de stabilire a parametrilor de sudare se aplică de obicei la sudarea cap la cap cu rost în formă de I. Când sudarea se realizează dintr-o singură parte, pentru grosimi mai mici de 15 mm, atunci pătrunderea este egală cu grosimea tablelor. Când sudarea se realizează bilateral, la grosimi până la 35 mm, atunci pătrunderea se ia astfel încât suma celor două pătrunderi pe o parte și pe cealaltă a îmbinării să depășească grosimea tablelor cu 2...4 mm.

6.5. Defecte tehnologice și măsuri pentru evitarea lor

La sudarea S.F. se impune corelarea în limite precise a vitezei de sudare în raport cu curentul de sudare. Dacă viteza de sudare este mai mare decât cea necesară, la același curent de sudare, topirea pereților rostului poate fi insuficientă. Ca atare, apar la marginile cordonului defecte de tipul lipsei de topire sau porozități, mușcături laterale etc. Dacă viteza de sudare este mai mică decât cea necesară baia de sudură are lățime mare, rezultă stropi și incluziuni de zgură în cusătură.

Înălțimea pernei de flux trebuie bine dozată, ea fiind cuprinsă între 15...35 mm funcție de diametrul sârmei electrod și calibrul sudurii. Dacă înălțimea pernei de flux este prea mare, precum și dacă fluxul are granulație prea mică sau este degradat, ca urmare a impactului mecanic (prăfuit), apar defecte de tipul denivelărilor, porilor, cauzate de împiedicarea ieșirii gazului din zona procesului de sudare. O înălțime prea mică a stratului de flux nu realizează protecția corespunzătoare a băii de sudură și ca atare reacțiile acesteia cu aerul mediului înconjurător devin mai importante.

La sudarea S.F. printr-o singură trecere trebuie să se acorde o atenție mare genezei tensiunilor remanente, care, în multe cazuri conduc la fisurarea cordonului de sudură. Astfel, la sudurile cap la cap se recomandă realizarea unei lățimi a rostului de 2...5 mm astfel încât baia de metal topit să aibă posibilitatea contracției transversale fără împiedicarea acesteia, diminuând tensiunile interne și tendința de fisurare a cordonului. De asemenea, la cordoanele de colț se impune ca lățimea, fiind materializată prin ipotenuza triunghiului dreptunghic înscris în cordonul de sudură, să fie mai mare decât pătrunderea. Băile de sudură mai late, micșorează tensiunile remanente transversale, și ca atare, reduc tendința de fisurare.

Măsurile pentru evitarea principalelor defecte tehnologice la sudarea S.F. sunt:

- în cazul când pătrunderea cusăturii este prea mică, se va mări curentul de sudare, se va lucra în curent continuu DC⁺, se va micșora tensiunea arcului, se va micșora lungimea liberă, se va micșora viteza de sudare, înclinarea electrodului se va mări spre înapoi ($\alpha > 0$);
- în cazul apariției fisurilor în îmbinare sau în zona influențată termic, atunci se va lucra în curent continuu cu polaritate DC⁻, va fi micșorată intensitatea curentului electric, va fi micșorată tensiunea arcului, va crește dacă este posibil lățimea rostului, iar după caz se va folosi preîncălzirea;
- în cazul apariției fisurilor transversale în cusătură, caz întâlnit la sudarea în mai multe treceri, atunci se va mări temperatura de preîncălzire, se va introduce sudarea între

tregeri, va fi micșorată viteza de sudare, tensiunea arcului și intensitatea curentului electric;

– în cazii lipsei de topire sau a mușcăturilor laterale se va lucra în curent continuu cu polaritate DC⁻, va fi micșorată tensiunea arcului, va crește diametrul sârmei electrod, se va micșora viteza de sudare;

– în cazul în care cusătura prezintă pori se va remedia regimul de sudare prin curent continuu cu polaritate DC⁺, se va reduce intensitatea curentului electric și tensiunea arcului, se va face controlul grosimei pernei de flux și controlul degresării și curățirii rostului;

– în cazul tendinței curgerii gravitaționale a băii de sudură se va mări viteza de sudare, va fi micșorată intensitatea curentului și tensiunea arcului;

– în cazul unor pete pe suprafața cusăturii se va reduce tensiunea arcului, se va lucra în curent continuu cu polaritate directă, va fi redusă intensitatea curentului și tensiunea arcului și va crește viteza de sudare.

CAP.7. SUDAREA ÎN MEDIU DE GAZE (SG)

7.1. Clasificarea procedeelor de sudare în mediu de gaze

Sudarea în mediu de gaze poate fi clasificată după mai multe criterii:

După tipul electrodului:

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

După natura gazului de protecție, sudarea se poate desfășura:

- în gaz inert;
- în gaz activ;
- în amestecuri de gaze.

După forma arcului:

- sudare cu arc electric liber;
- sudare cu arc electric constrâns (plasma).

După felul aportului materialului de adaos:

- sudare fără material de adaos;
- sudare cu material de adaos.

Sudarea cu material de adaos poate fi realizată prin:

- introducerea acestuia din exterior;
- introducerea acestuia prin arc (electrod al arcului).

După felul sârmei electrod folosită la sudare distingem:

- sudare cu sârma plină;
- sudare cu sârma tubulară;
- sudare cu sârma plină și flux magnetizabil.

O clasificare sintetică a acestor procedee de sudare este prezentată și în tabelul 7.1.

Tabel 7.1.

Sudarea în mediu de gaze	→ cu electrod nefuzibil	→ cu hidrogen atomic	
		→ cu gaze inerte – WIG/TIG	
		→ cu arc constrâns - PLASMĂ	
	→ cu electrod fuzibil	→ cu gaze inerte MIG	
		→ cu gaze active MAG	→ cu sârma plină
			→ cu sârma tubulară
			→ cu sârma plină și flux magnetizabil
→ cu amestecuri de gaze inerte și active			

Sub aspect tehnic posibil și economic aceste variante se grupează în patru

procedee principale de sudare în gaze:

- WIG - wolfram inert gaz;
- MIG - metal inert gaz;
- MAG - metal activ gaz;
- PL - cu plasmă.

În figura 7.1. se prezintă schemele principalelor procedee de sudare enumerate anterior.

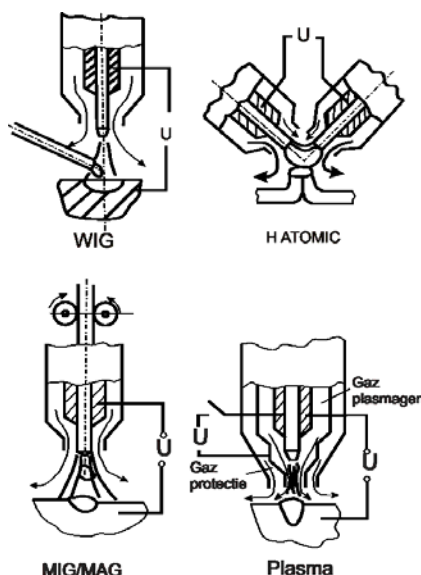


Fig. 7.1.

Procedeeul WIG (fig. 7.1.a) realizează arcul electric între electrodul de wolfram și materialul de bază, materialul de adaos fiind introdus sub formă de vergele în coloana arcului. Acest procedeu poate fi materializat și prin două capete, cu doi electrozi de wolfram între care se realizează arcul electric. Aceasta variantă poate fi utilizată în condițiile gazului inert sau a gazelor active mai des întâlnită fiind varianta cu hidrogen atomic. Sudarea cu electrozi de wolfram în alte medii active nu se utilizează datorită uzurii pronunțate a electrozilor de W. Varianta din fig.7.1.b dă posibilitatea manevrării ușoare a arcului fără a fi nevoie de amorsarea lui periodică. Acest procedeu de sudare cu hidrogen atomic este folosit de obicei la grosimi mici ale componentelor și fără metal de adaos.

Sudarea MIG-MAG (fig. 7.1.c) realizează arcul electric între sârma electrod și materialul de bază, sârma electrod trecând prin piesa de contact, împinsă de un mecanism de avans cu role. Gazul inert sau gazul activ asigură protecția arcului.

La sudarea cu plasma (fig. 7.1.d) arcul electric este constrâns printr-o duza intermediară, duza puternic răcită, care reduce secțiunea arcului. Reducând secțiunea arcului crește densitatea de energie astfel încât temperatura în coloana arcului ajunge până la 50000°C. Strangularea arcului o realizează gazul plasmogen trimis prin duza centrală - duza de strangulare a arcului. Acesta asigură nu numai micșorarea secțiunii arcului ci și răcirea duzei de strangulare. Protecția arcului o realizează gazul inert trimis în jurul arcului prin duza exterioară. Sudarea cu plasmă cuprinde două circuite electrice principale:

- circuitul tensiunii de amorsare a arcului;
- circuitul tensiunii de sudare.

Circuitul tensiunii de amorsare, U_0 , este realizat între electrodul de wolfram și duza intermediară, caz în care arcul ce se formează la amorsare se numește arc pilot. La punerea sub tensiune și a materialului de bază prin circuitul tensiunii U , arcul pilot se

transferă la materialul de bază sub forma arcului transferat. Uneori, tensiunea U_0 , tensiunea de producere a arcului este realizată direct între materialul de bază și electrodul de wolfram, caz în care sudarea se realizează fără arc pilot.

7.2. Gazele folosite la sudare

Sudarea S.G. se poate realiza în mediu de gaze inerte sau active. În tabelul 7.2 sunt date o serie din gazele participante în procesul de sudare S.G.

Tabel 7.2.

Gaz	Acțiunea chimică	Densitatea față de aer	Potențial de ionizare [v]
Ar	Inert	1,38	15,7
He	Inert	0,137	24,5
N ₂	Parțial inert	0,967	14,5
H ₂	Reducător	0,0695	1,35
CO ₂	Oxidant	1,53	14,4
O ₂	Puternic oxidant	1,105	13,6
Aer	Oxidant	1	-

Dintre gazele inerte cele mai folosite sunt argonul și heliul. Dintre gazele active cele mai folosite sunt dioxidul de carbon, hidrogenul și uneori acestea în combinații cu azotul și oxigenul. Densitatea față de aer și potențialul de ionizare sunt date în același tabel. Se constată că heliul este cel mai ușor gaz folosit la sudare. Din acest motiv asigurarea protecției băii cu ajutorul heliului trebuie făcută cu un debit de heliu aproape dublu decât debitul necesar protecției cu argon, întrucât acesta are tendința de a se ridica de la locul sudării în condițiile în care sudura se execută în plan orizontal. Potențialul de ionizare al heliului fiind mai mare decât al argonului, acesta necesită o tensiune mai mare a arcului pentru asigurarea stabilității procesului. Tensiunea mai mare a arcului atrage până la urmă o putere a arcului electric mai mare. Arcul arde mai liniștit în argon decât în heliu. Hidrogenul nu se folosește la sudarea aliajelor de aluminiu, cupru, magneziu fiindcă se dizolvă în cantități mari în baia de sudură formând pori și fisuri în îmbinare. De asemenea, hidrogenul nu se folosește nici în amestecuri cu alte gaze la sudarea acestor materiale. El poate fi folosit la sudarea tuturor materialelor metalice, în afara celor enumerate, prin procedeul atom arc sau cu hidrogen atomic. Dioxidul de carbon este un gaz activ având efect oxidant asupra unor materiale din baia de sudură. În cazul oțelurilor este afectat de procesul oxidării în special Si, Mn, Ti, Al, C și H₂. Oxigenul nu este folosit sub formă de gaz pur pentru protecție datorită caracterului lui puternic oxidant. El este introdus în amestecuri de gaze cu scopul creșterii temperaturii băii ca urmare a reacțiilor exoterme de oxidare pe care le produce.

Este cunoscut faptul că gazele de protecție asigură și ionizarea mediului dintre electrod și metalul de bază, respectiv aceste gaze se descompun în ioni pozitivi și electroni. Dacă sudarea se realizează în curent continuu DC⁻ atunci electronii bombardează materialul de bază, iar ionii pozitivi sârma electrod.

În cazul sudării cu electrod nefuzibil este preferată polaritatea DC⁻ întrucât sârma electrod nu este bombardată de electronii rapizi și ca atare durabilitatea electrodului este mărită. Excepție face sudarea aluminiului. La sudarea aluminiului în mediu de argon atunci se folosește polaritatea DC⁺ sau AC pentru ca ionii pozitivi grei ai argonului să bombardeze baia de sudură producând îndepărtarea peliculei de oxid de aluminiu creată

pe suprafața ei. Acest fenomen poartă denumirea de microsablarea băii de sudură. Electronii, însă la sudarea aluminiului, vor bombarda electrodul de W încălzindu-l și având tendința de a-l degrada. În aceste condiții intensitatea curentului de sudare se micșorează pentru a reduce efectul de uzare termică a electrodului de wolfram. Sudarea aluminiului, dacă se realizează în mediu protector de heliu, atunci efectul de microsablare dispăre întrucât ionii de heliu pozitivi au masă mică și ca atare impactul cu baia de metal topit este scăzut. Trebuie avut în vedere că la sudarea în mediu de gaze active și uneori și în mediu de gaze inerte trebuie asigurată o ventilație corespunzătoare a zonei procesului pentru a nu afecta operatorul uman. Se are în vedere că dioxidul de carbon devine toxic la concentrații mai mari. Azotul, de asemenea, la concentrații de peste 32% devine toxic. Argonul, heliul și hidrogenul sunt netoxice, dar sunt asfixiante, motiv pentru care în cantități mari trebuie evacuate din zona procesului. Oxigenul la o concentrație peste 25% devine dăunător sănătății operatorului uman.

Tehnica sudării S.G. în momentul de față folosește și tinde să folosească tot mai mult amestecurile de gaze datorită combinării avantajelor pe care le realizează fiecare gaz component în parte. Astfel în cazul când folosim amestecuri de gaze putem realiza un potențial de ionizare corespunzător asigurării unei anumite tensiuni a arcului. Prin amestecuri de gaze se poate realiza un efect de oxidare a materialului topit în limite impuse, ca atare nivelul de aliere al cusăturii devine cel dorit. Se asigură totodată o pătrundere corespunzătoare, precum și o rezistență și o reziliență impusă cusăturii.

Transferul masic prin arcul electric la procedeele MIG și MAG este influențat esențial de conductibilitatea termică a gazelor de protecție. În figura 7.2. este prezentată conductibilitatea termică a principalelor gaze de protecție în funcție de temperatura din arc. Se observă că argonul are conductibilitatea cea mai mică, pe când dioxidul de carbon, hidrogenul și heliul la temperatura arcului normal (nu a celui de plasmă) au conductibilități termice mari.

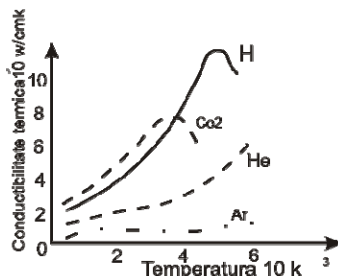


Fig. 7.2.

Ca atare, argonul creează un câmp termic concentrat ce acționează pe o suprafață restrânsă a materialului de bază conducând la creșterea pătrunderii și mărirea supraînălțării. Miezul arcului electric de argon este însă mai mare decât la celelalte gaze, electronii și ionii din coloana arcului sunt disipați pe o suprafață mai mare. Liniile de câmp electric înconjoară sârma electrod (fig.7.3). Forțele electrodinamice F din capătul sârmei electrod au o componentă orizontală F_H care strangulează picătura de metal topit (efect Pinch) și o componentă verticală F_V care expulzează picătura în baie. Ca atare, datorită componentei F_V se desprind picăturile lichide mai repede de pe capătul sârmei electrod, transferul masic făcându-se prin picături mici.

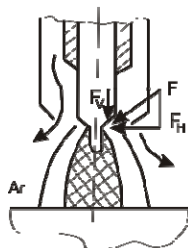


Fig. 7.3.

La sudarea în dioxid de carbon, conductibilitatea mare a gazului la temperatura arcului normal atrage un câmp termic împrăștiat pe o suprafața mare a materialului de bază. Baia metalică are o pătrundere mai mică și o lățime mai mare. Însă arcul electric are o suprafața transversală redusă, aceasta fiind produsă și de potențialul de ionizare mai mic al CO_2 față de Ar (fig.7.4).

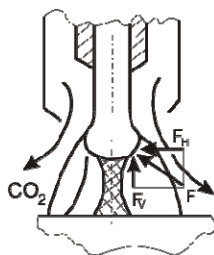


Fig. 7.4.

Arcul pe sârma electrod este aproape punctiform, liniile de câmp magnetic sunt plasate sub picătura metalică. Forțele electrodinamice au un efect de susținere a picăturii lichide, prin componenta F_v ce se opune transferului masic de material topit dispune sârma electrod spre materialul de bază.

Așa se explică transferul prin picături mari al materialului de adaos la sudarea în CO_2 . Picătura topită poate „rătăci”, împreună cu arcul electric ce-i asigură sustentația, lateral față de direcția de avans a sârmei electrod (fig. 7.5). Picătura se desprinde când forța de greutate și forța gazelor depășesc componentele verticale ale forțelor electrodinamice și de tensiune superficială.

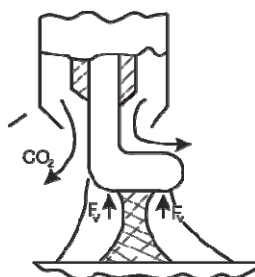


Fig. 7.5.

Sudarea de poziție și mai ales de plafon la procedeul MAG- CO_2 se desfășoară, ca atare, mult mai greu, cu o cantitate de stropi mult mai mare. Se știe faptul că transferul masic la sudarea MIG-MAG se poate realiza prin arc electric scurt sau lung.

Transferul short-arc se caracterizează prin producerea periodică a unor punți lichide între electrod și materialul de bază. Tensiunea superficială atrage materialul topit din vârful electrodului spre baia de sudare, se stinge arcul, crește intensitatea curentului electric și se evaporă brusc materialul din puntea rămasă. Arcul electric se reaprinde datorită mediului deja ionizat.

Tehnica sudării cu arc scurt se aplică la straturile de rădăcina sau la sudarea de poziție. Sudarea MAG- CO_2 de poziție în varianta short-arc reduce efectul de „rătăcire” a picăturii metalice pe vârful sârmei electrod, concentrează transferul masic și reduce stropirile.

Transferul prin arc lung se produce la intensități mai mari ale curentului de sudare. Trebuie făcută distincție între sudarea cu arc lung în general, posibil de aplicat la toate gazele de protecție și sudarea cu arc pulverizat (spray-arc) care se produce la anumite gaze sau amestecuri de gaze, la valori mari ale intensității curentului de sudare.

În figura 7.6 sunt prezentate domeniile de lucru cu tehnica short-arc, respectiv spray-arc. Sudarea spray-arc este posibilă numai dacă gazul de protecție conține peste 8% argon. Sudarea cu 100% CO_2 nu asigură transfer prin arc pulverizat, datorită celor prezentate anterior (cu referire la fig.7.4), chiar la intensități mari ale curentului de sudare,

întrucât nu se asigură „mărunțirea picăturii”, transformarea ei în „pulbere”, ca urmare a forțelor electrodinamice de susținere.

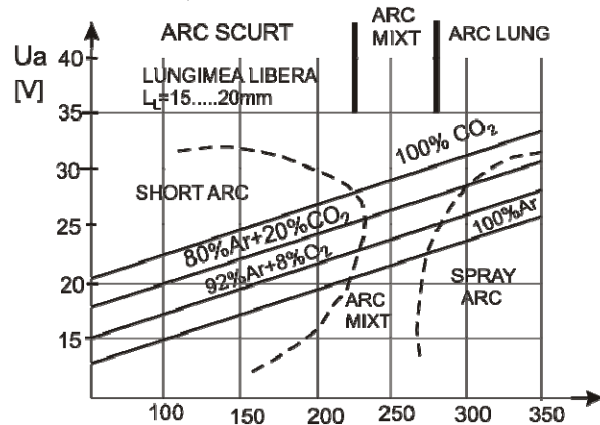


Fig. 7.6.

Arcul electric pulverizat, datorită energiei mari, este folosit în special la straturile de completare și de încărcare, la care se impune o rată mare a depunerii.

De o deosebită importanță în ordonarea transferului masic are utilizarea arcului pulsant. El se obține variind cu frecvența dorită intensitatea curentului de sudare între o valoare de bază, subcritică, fără transfer masic și o valoare de puls, supracritică la care se desprinde picătura de metal topit.

La sudarea cu arc pulsant se poate produce o creștere a efectului de stropire la valori mari ale intensității supracritice (fig. 7.7). Reducerea acestui dezavantaj poate fi obținută prin micșorarea vârfului de puls al intensității curentului de sudare. Sursa poate fi prevăzută cu bobină de șoc care face ca procesul de transfer să se desfășoare mai lin, lipsit de stropi.

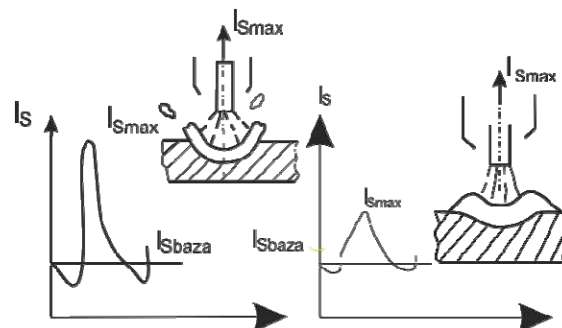


Fig. 10.7.

La alegerea gazelor sau amestecurilor de gaze se are în vedere și aspectul economic. Cel mai scump gaz inert folosit la sudare este heliul, cel mai ieftin gaz inert folosit la sudare este argonul. Cel mai ieftin gaz folosit în procesele de sudare este bioxidul de carbon.

În tabelul 7.3 se dau principalele gaze sau amestecuri de gaze pentru sudare și domeniul lor de folosire [3].

Tabel 7.3.

Gazul sau amestecul de gaze.	Acțiunea față de metalele topite.	Procedul folosit.	Materialele care se sudează.
100% Ar	Inert	WIG, MIG, PL	WIG - toate netalele MIG - neferoase
50% Ar +50% He	Inert	WIG, MIG	Al, Mg, Cu și aliajele lor
Ar + (2..4)% H ₂	Reducător	WIG, PL	Oțeluri inox, austenitice, Ni și aliajele lui

Ar + (1...2)% O ₂	Uşor oxidant	MIG	Oţeluri carbon şi slab aliate şi oţeluri inox austenitice
Ar + (3...5)% O ₂	Mediu oxidant	MIG	Oţeluri inox austenitice
75% Ar + 25% CO ₂	Uşor oxidant	STG	Oţeluri carbon şi slab aliate
100% He	Inert	WIG, PL	Al, Mg, Cu şi aliajele lor
90% He + 7,5% Ar + 2,5% CO ₂	Inert	MIG	Oţeluri aliate
100% CO ₂	Oxidant	MAG, STG	Oţeluri carbon şi slab aliate
CO ₂ + (10...20)% O ₂	Oxidant	MAG	Oţeluri carbon şi slab aliate

7.3. Electrozi nefuzibili

Electrozii nefuzibili sunt folosiţi la procedeele de sudare WIG (TIG) şi PL. Electrozii nefuzibili sunt realizaţi din wolfram, un metal cu punct de fuziune ridicat (3410°C).

Electrozii din wolfram aliaţi cu thoriu (1...2%Th) şi zirconiu (0,5% Zr) îşi măresc refractaritatea şi emisia termoelectronică prezentând avantajele:

- scade uzura termică a electrodului;
- la acelaşi diametru al electrodului se poate folosi o intensitate mai mare a curentului de sudare;
- stabilitatea arcului electric este îmbunătăţită prin creşterea emisie termoelectronice.

Electrozii de wolfram trebuie să fie bine protejaţi mai ales la temperatura ridicată a arcului electric. De aceea, după stingerea arcului electric jetul de gaz inert trebuie să mai acopere („spele”) electrodul pentru evitarea oxidării acestuia.

O importanţă deosebită o are pregătirea vârfului electrodului la sudarea cu diferite polarităţi ale curentului electric (fig. 7.8).

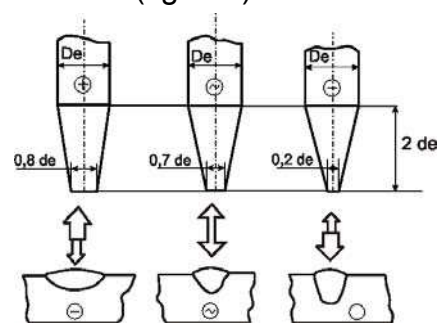


Fig. 7.8.

În cazul în care electrodul este conectat la sursa de curent continuu, la borna pozitivă, atunci el primeşte impactul energetic al electronilor. Cantitatea de căldură administrată acestuia fiind circa două treimi din cantitatea de căldură a procesului. Pentru acest motiv şi diametrul de vârf al electrodului se alege la valori mai mari, circa 0,8 d_e, în care d_e este diametrul electrodului. În cazul în care electrodul se leagă la borna negativă a sursei de curent continuu atunci cantitatea de căldură administrată acestuia este o treime din cantitatea de căldură a procesului, bombardamentul electronic manifestându-se asupra materialului de bază la care se asigură o pătrundere mai mare. Din acest motiv diametrul electrodului poate fi redus la circa 0,2 d_e.

La sudarea în curent alternativ diametrul vârfului electrodului se alege $0,75 d_e$, cantitatea de căldură distribuindu-se în mod egal între electrod și materialul de bază. Un diametru de vârf al electrodului mic asigură o stabilitate mai bună a arcului și o concentrare a acestuia asupra cusăturii. Un diametru de vârf prea mare face ca arcul să se miște pe suprafața electrodului (să „rătăcească” pe suprafața terminală a electrodului) de wolfram, stabilitatea sa fiind diminuată. Însă un diametru prea mic, în condițiile în care temperatura procesului este mare, cantitatea de căldură este importantă, duce la uzura electrodului, în sensul că se desprind periodic picături din electrod, care ajung în baie de metal topit, din materialul de bază, impurificând-o.

De o mare importanță este polaritatea curentului de sudare. Densitatea emisiei de electroni este mare când suprafața catodică este mai redusă. Ca atare, când electrodul este legat la catod atunci se produce o concentrare mai mare a electronilor ce vor bombarda materialul de bază. Prin urmare, suprafața de emisie fiind mică se asigură o stabilitate mai bună a arcului electric. La sudarea în curent alternativ stabilitatea arcului este mai redusă. De aceea de multe ori se suprapune peste curentul alternativ un curent de înaltă frecvență, sau se adoptă o tensiune de mers în gol de valori mai ridicate 100-200 V (pentru îmbunătățirea stabilității arcului).

7.4. Sârme de sudură. Transferul materialului de adaos prin arc.

Sârmele folosite la procedeul SG au diametrele: 0,6; 0,8; 1,2; 1,6; 2,5 și 3 mm. Prin procedeul SG, după cum s-a arătat, se poate suda prin varianta spray-arc și short-arc. Valorile intensității curentului care face trecerea de la o variantă de sudare la alta sunt date în tabelul 7.4.

Tabel 7.4.

d_e [mm]	0,6	0,8	1,2	1,6	2,5	3
min. I_s – spray-arc [A]	150	175	200	270	310	380
max. I_s – short-arc [A]	50	75	100	175	260	330

Valoarea minimă a curentului de sudare pentru care se asigură sudarea spray-arc este cuprinsă între 150 și 380 A funcție de diametrul sârmei electrod. Valoarea maximă a curentului sub care se asigură sudarea short-arc este cuprinsă între 50 și 330 A. Varianta spray-arc este de obicei de preferat întrucât se asigură sudarea tuturor componentelor cu grosimi mai mari decât 5 mm, în mediu de Ar sau amestecuri de gaze, realizându-se și o productivitate mare a procedului de sudare, respectiv o cantitate mare de metal depus. Când, însă, componentele sunt de grosimi mici, sau când este nevoie de o pătrundere mică, atunci se apelează la procedeul short-arc. La sudarea cu electrozi fuzibili îmbunătățirea stabilității arcului, prin organizarea transferului picăturilor de metal de adaos, se face sudând cu curent pulsant.

7.5. Sudarea WIG (TIG)

7.5.1. Performanțele procedului WIG

Prin procedeul WIG teoretic se sudează toate metalele. Datorită aspectelor economice este îndeosebi destinat sudării oțelurilor inoxidabile, a oțelurilor bogat aliate, a aliajelor de Al, Mg și Cu etc, a oțelurilor active și refractare, sudării componentelor subțiri

a unor metale și aliaje de tipul celor arătate mai sus. Este în general un procedeu destinat sudărilor dificile din toate punctele de vedere. Grosimile componentelor putând fi 0,1...3,5 mm, la sudarea dintr-o singură trecere, cu rost „I”, fără metal de adaos. Dacă componentele sunt mai groase se sudează cu rost în „V” sau cu alte tipuri de rosturi și metal de adaos. Gama parametrilor regimului de lucru este foarte variată, astfel:

- intensitatea curentului de sudare $I_S = 3...1000$ A;
- tensiunea arcului $U_a = 8...30$ V;
- viteza de sudare $v_S = 5...50$ cm/min;
- se sudează în curent continuu și alternativ; la sudarea în curent alternativ se aplică peste carentul de sudare un curent de înaltă frecvență, pentru asigurarea stabilității arderii arcului.

Procedeu WIG are însă și o serie de dezavantaje cum ar fi:

- mecanizarea procedurii este destul de dificilă; motiv pentru care se apelează de obicei la sudarea manuală, ca atare, calitatea sudurii depinde mult de operator;
- productivitatea procedurii este redusă, echipamentele pentru sudare sunt mai scumpe și cu întreținere pretențioasă.

În concluzie, procedeu WIG se caracterizează printr-o protecție foarte bună a arcului și a metalului depus împotriva aerului atmosferic, evitând astfel folosirea unor electrozi speciali, a unor fluxuri speciale sau curățirea de zgură a cusăturii. Lipsesc de asemenea, incluziunile de zgură din cordon, proprietățile mecanice și de rezistență ale cordonului și ale îmbinării fiind foarte bune.

7.5.2. Parametrii tehnologici de sudare

Elaborarea tehnologiei de sudare WIG începe cu stabilirea gazului de protecție precum și a diametrului vergelei electrod. Se reamintește faptul că grosimile componentelor sub 3,5 mm se sudează dintr-o singură trecere, cu rost în „I”, fără metal de adaos. Celelalte tipuri de cordoane cap la cap funcție de grosimea S a componentelor se sudează cu rost în „I” sau „V” conform figurii 7.9.

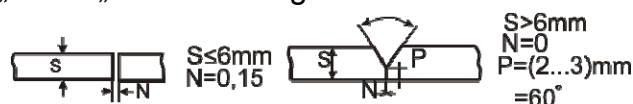


Fig. 7.9.

Diametrul electrodului nefuzibil se alege în funcție de grosimea componentelor de sudat conform relației statistice:

$$d_e = -0,024 \cdot S^2 + 0,77 \cdot S + 0,242 \quad (7.1)$$

în care atât d_e și S sunt exprimate în mm.

Această relație este valabilă pentru domeniul grosimilor componentelor cuprinse între $1 < S < 15$. Diametrul electrodului calculat cu această relație se aproximează la una din valorile diametrelor folosite la confecționarea electrozilor din wolfram sau wolfram thoriat: $d_e = 1; 1,2; 1,6; 2,4; 3,2; 4,8; 6,3$ și mai rar $9,5$ și $12,7$ mm. Corespondența dintre diametrul electrodului de wolfram (d_e), a vergelei material de adaos (d_{MA}) și debitul de argon este data în tabelul 7.5.

Tabel 7.5.

d_e	mm	1	1,6	2,4	3,2	5	6,3
d_{MA}	mm	1,5...2	2...2,5	2...3	2...3	3...5	5...6
Q_{Ar}	l/min	4...6	4...6	5...7	6...9	7...10	10...12

În cazul folosirii heliului drept gaz de protecție debitul acestuia se dublează față de debitul necesar de argon. Uneori diametrul materialului de adaos și debitul de argon se calculează calculează cu relațiile informative:

$$\begin{aligned} d_{MA} &= (1,5 \dots 1) \cdot d_e \quad [\text{mm}] \\ Q_{Ar} &= (4 \dots 2) \cdot d_e \quad [\text{l/min}] \end{aligned} \quad (7.2)$$

în care valorile mai mari sunt folosite pentru diametre mai mici ale lui d_e în [mm].

Următorul parametru tehnologic ce trebuie determinat îl constituie natura și polaritatea curentului. În acest sens în tabelul 7.6 sunt date indicații privind alegerea curentului de sudare și a polarității curentului continuu la sudarea diferitelor materiale după procedeul WIG.

Tabel 7.6.

Metalul de bază	DC		AC
	-	+	
Aluminiu și aliajele sale			
Magneziu și aliajele sale		S < 1,5 mm +	S > 1,5 mm +
Bronz cu aluminiu			+
Bronz cu siliciu	+		+
Cupru și aliajele sale	+		
Oțel slab aliat	+		
Oțel inoxidabile	+		
Nichel și aliajele sale	+		

Intensitatea curentului la procedeul WIG se calculează în funcție de felul curentului și polaritatea acestuia. Astfel în relațiile 7.3 sunt date expresiile de calcul ale intensității curentului de sudare, în care I_S [A] și d_e [mm]:

$$\begin{aligned} \text{DC}^+ : \quad I_S &= 14 \cdot d_e - 5 \\ \text{AC} : \quad I_S &= 67 \cdot d_e - 37 \\ \text{DC}^- \quad I_S &= 92 \cdot d_e - 42 \end{aligned} \quad (7.3)$$

Având în vedere forma rostului dintre componentele de sudat se stabilește numărul de treceri precum și secțiunea fiecărei treceri, A_t . În felul acesta se poate calcula viteza de sudare pe trecere conform relației:

$$v_S = \frac{3,2 \cdot I_S + 247}{A_t \cdot \rho} \quad [\text{cm/min}] \quad (7.4)$$

în care aria trecerii este exprimată în [mm²], iar densitatea materialului depus în [Kg/dm³].

Rata depunerii prin procedeul WIG în cazul sudării cu metal de adaos se calculează cu relația:

$$A_D = 0,192 \cdot 10^{-2} \cdot I_S + 0,148 \quad (7.5)$$

în care rata depunerii se măsoară în [Kg/h] dacă intensitatea curentului de sudare I_S se introduce în [A].

7.5.3. Tehnica sudării WIG

Sudarea WIG se realizează; manual cuprinzând mai multe etape. În primul rând se amorsează arcul electric, care topește componentele de sudat formând o baie comună (fig. 7.10). Amorsarea se face cu sârma electrod perpendiculară pe materialul de bază. Când baia de metal topit are un volum acceptabil, atunci pistolul se înclină la 75...80°, moment în care în coloana arcului se introduce vergeaua materialului de adaos.

Vergeaua este înclinată cu 15...20° față de materialul de bază. Vergeaua se topește, căzând în baia de metal topit 1...3 picături. Apoi vergeaua se retrage, arcul electric revine în poziția verticală, se trece la topirea unei noi băi de sudură alăturate celei precedente și puțin suprapusă cu aceasta și apoi fenomenul se repetă. Este de remarcă că în timpul procesului de sudare vergeaua materialului de adaos nu trebuie să se atingă de electrodul de wolfram adus la o temperatură foarte mare. În caz contrar electrodul de wolfram se impurifică și se deformează. Se preferă, sub aspectul tehnicii sudării, realizarea operației de la stânga la dreapta fiind mai comodă pentru operator.

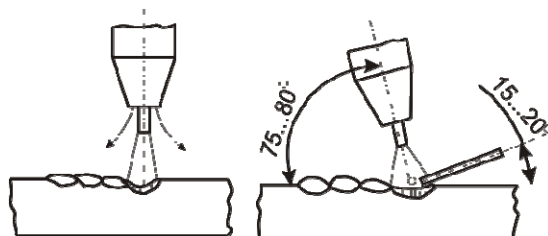


Fig. 7.10.

În cazul când materialul de adaos, respectiv materialul vergelei are o tendință mare spre oxidare, aceasta nu se extrage din conul gazului de protecție, asigurându-se astfel protecția și a vergelei materialului de adaos.

În concluzie sudarea WIG este o sudare cu un spectru larg de aplicare dar ea se va utiliza numai atunci când procesul tehnologic o reclamă datorită costurilor ridicate ale aparaturii, gazului de protecție și a electrodului nefuzibil. La aceasta se mai adaugă și faptul că randamentul termic al procedurii este relativ scăzut. Circa 50% din cantitatea de căldură produsă în arcul electric al procedurii WIG este folosită la topirea marginilor îmbinării materialului de bază, iar restul se pierde prin conducție în masa piesei și prin radiație și convecție.

7.6. Sudarea cu plasmă

După cum s-a mai arătat sudarea cu plasmă este similară din punct de vedere principal cu sudarea WIG. În plus sudarea cu plasmă; se aplică aceluiași material ea și sudarea WIG însă cu o serie de avantaje în plus.

7.6.1. Performanțele sudării cu plasmă

În figura 7.11 sunt prezentate comparativ procedeele de sudare WIG și cu plasmă, PL, indicându-se temperaturile zonei arcului electric. Se observă că la sudarea cu plasmă, urmare a constrângerii arcului electric, într-o duză suplimentară, temperatura arcului este mult mai mare și, ca atare, densitatea energetică a arcului crește.

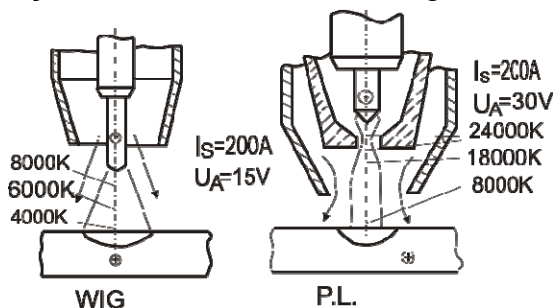


Fig. 7.11.

Ca atare, față de sudarea WIG sudarea cu plasmă prezintă următoarele avantaje:
- asigură o concentrare mai mare a energiei și, ca urmare, cantitatea de căldură

administrată este mai mare, asupra materialului de bază. Se obțin astfel temperaturi mai mari și posibilități mai rapide de a topi materialele în vederea operației de sudare. Ca urmare, productivitate operației de sudare cu plasmă și pătrunderea sunt mai mari. Raportul între lățimea cordonului și pătrundere este de circa 1:1 până la 1:2;

- stabilitatea arcului este mai bună chiar la curenți mai mici. La sudarea cu plasmă arcul nu mai „rătăcește” pe electrodul de wolfram și materialul de bază ci este concentrat și focalizat asupra zonei care trebuie să fie sudată din materialul de bază;

- la aceeași grosime a materialului de bază sudarea cu plasmă necesită curenți mai mici precum și un număr mai mic de treceri datorită concentrării mai mari a arcului;

- sensibilitatea față de variația lungimii arcului este mai redusă;

- este eliminată contaminarea cu W a băii de metal topit, ca urmare a trecerii lui prin arcul electric. Se asigură totodată și o protecție mai bună a electrodului de wolfram față de procedeul WIG;

- operatorul ce realizează operația de sudare cu plasmă poate să aibă o dexteritate mai redusă în ceea ce privește tehnica operatorie;

- deformațiile construcțiilor sudate sunt mai reduse în cazul sudării cu plasmă decât în cazul sudării WIG.

Pe lângă avantajele arătate sudarea cu plasmă prezintă o serie de dezavantaje cum ar fi:

- costul echipamentului de sudare cu plasmă este de circa 2...5 ori mai scump decât sudarea WIG;

- pistolul, cu diametru de vârf mai mare decât în cazul sudării WIG, datorită existenței celor două duze, una a gazului plasmagen și alta a gazului de protecție, are o greutate mai mare și totodată o manevrabilitate mai greoaie în rostul de sudură. Greutatea mărită este provocată și de necesitatea răcirii cu apă a pistolului la intensități ale curentului de sudare mai mari de 50 A;

- întreținerea pistolului de sudare, sau a plasmatronului este mai dificilă mai ales în ceea ce privește centrarea precisă a electrodului de wolfram în orificiul duzei de constrângere, precum și asigurarea protecției diametrului interior al duzei față de arcul pilot, totodată și menținerea circuitului de răcire în stare permanentă de funcționare.

Pentru o comparație mai bună între procedeul WIG și procedeul cu plasmă se dă în tabelul 7.7 o serie de parametri tehnologici, precum și elemente de productivitate, la sudarea unor aliaje pentru industria aerospațială. Se observă că la aceeași grosime a componentelor de sudat numărul trecerilor la sudarea cu plasmă este de 2...3 ori mai mic datorită concentrării mai puternice a energiei în zona rostului. Pentru aceeași intensitate a curentului de sudare viteza de sudare, la sudarea cu plasmă, este de circa 3 ori mai mare decât la sudarea WIG. În concluzie, sub aspectul timpului de sudare pentru un metru de cordon și al productivității, sudarea cu plasmă asigură o productivitate de circa 4...10 ori mai mare decât la sudarea WIG. Acestea sunt argumentele care recomandă sudarea cu plasmă în detrimentul sudării WIG.

Tabel 7.7.

PARAMETRU TEHNOLOGIC	Oțel inoxidabil		Oțel maraging (18%Ni)		Aliaj titan (6%Al+4%V)	
	WIG	PL	WIG	PL	WIG	PL
Grosime componente [mm]	6...8	6...8	6...7	6...7	2...3	2...3
Număr de treceri	2	1	3	1	5	2
Intensitate curent [A]	170...200	240	180...200	240...260	120...175	90...175
Viteză de sudare [cm/min]	10	30	10	30...32	15	36...38
Timp sudare 1m cordon [min]	20	3,3	30	3	33,3	5,4

7.6.2. Tehnica sudării cu plasmă

Din punct de vedere al intensității curentului de sudare, sudarea cu plasmă se clasifică în două mari categorii. Pentru curenți de sudare relativ reduși, $I_s = 0,1 \dots 100$ [A], sudarea se numește sudare cu microplasmă. Pentru curenți de sudare mai mari $I_s = 100 \dots 500$ [A] sudarea se numește sudare cu plasmă.

Sunt două tehnici operatorii principale la sudarea cu plasmă (sau microplasmă) și anume tehnica sudării MELTIN (metalului topit) și tehnica sudării KEYHOLE (găurii de cheie). Tehnica MELTIN se aplică materialelor subțiri la care cu ajutorul jetului de plasmă se formează o baie de metal topit, care în cazul folosirii și a materialului de adaos, asigură cusătura între elementele de îmbinat. Tehnica KEYHOLE folosește o intensitate mai mare a curentului de sudare și datorită vitezei jetului de plasmă se asigură străpungerea metalului pe întreaga lui grosime. Pe partea opusă îmbinării există un sistem pentru reținerea băii de metal topit, astfel că acest crater format de jetul de plasmă este apoi umplut de materialul de adaos sau materialul de baza care sub acțiunea tensiunii superficiale readuce metalul topit în gaură formând cusătura. Ca atare, tehnica KEYHOLE se aplică la materiale de grosime nu prea mare în cazul rosturilor în formă de I, sau la materiale de grosime mare, pentru stratul de rădăcină, la care pătrunderea poate fi asigurată pe întreaga grosime a materialului rădăcinii. După cum s-a mai arătat, sudarea cu plasmă se poate realiza în funcție de echipamentul de sudare existent în varianta cu arc pilot și cu arc transferat. În figura 7.12 se prezintă schema principială a variantei de sudare cu arc pilot.

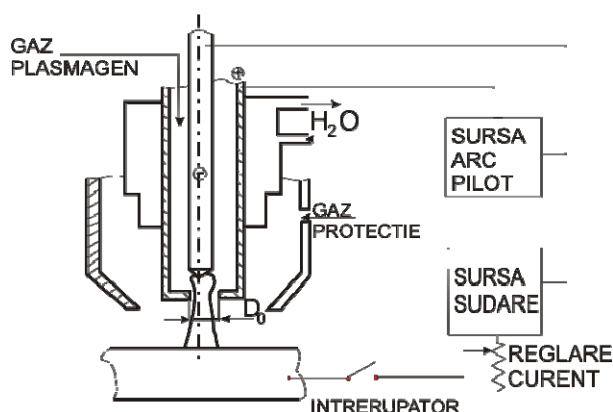


Fig. 7.12.

Sursa arcului pilot asigură curentul arcului între duza de constrângere, legată la polul pozitiv, și electrodul de wolfram la polul negativ. Datorită tensiunii mari a sursei arcului pilot se asigură menținerea unui arc permanent între aceste două elemente. Arcul este apoi transferat la materialul de bază prin intermediul sursei de sudare care se racordează între materialul de bază și electrodul de wolfram, prin închiderea unui întrerupător. Sursa de sudare are posibilitatea reglării intensității curentului de sudare.

În cazul în care sudarea se realizează fără arc pilot, sursa arcului pilot este scoasă din schema de funcționare astfel încât sursa de sudare conține și un echipament de ionizare a mediului, ca urmare a unei descărcări electrice de înaltă tensiune creată direct între electrodul de wolfram și metalul de bază. De o deosebită importanță, în buna funcționare a plasmatronului, o constituie corelația dintre diametrul duzei de constrângere, intensitatea curentului de sudare și debitul gazului plasmogen. Acești parametri sunt dați în tabelul 7.8.

Tabel 7.8.

d_e [mm]	I_s [A]	Debit gaz plasmagen 10^{-3} [m ³ /h]
0,8	1...25	14
1,5	20...75	28

2,0	40...100	56
2,5	100...200	112
3,2	150...300	140
4,75	200...500	168

Distanța minimă dintre materialul de bază și duza cu gaz la sudarea cu plasma este cuprinsă între 4...6 mm.

Procedeul de sudare cu plasma poate fi mecanizat, caz în care materialul de adaos poate fi adus în zona îmbinării fie sub formă de sârma electrod, fie sub formă de pulbere (fig.7.13). Pulberea, care participă la realizarea cordonului, este adusă în zona jetului de plasma fie prin capul de sudare, caz în care acesta conține o duză suplimentară, coaxială cu duza gazului plasmagen și a gazului de protecție, fie dintr-un buncăr antemergător care presară pulberea pe materialul de bază.

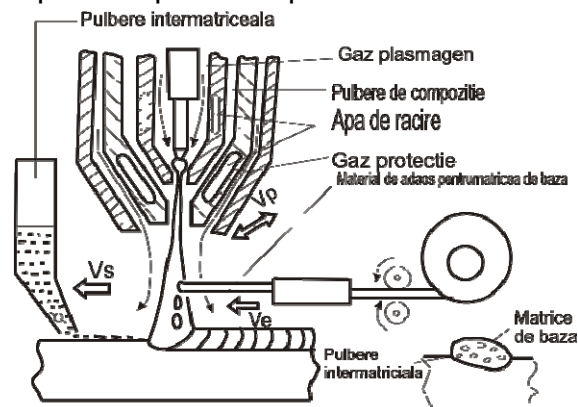


Fig. 7.13.

În figura 7.13 este prezentat cazul încărcării cu jet de plasmă, folosind atât sârma electrod cât și pulberea metalică. Uneori, la încărcare, pulberea metalică poate fi foarte dură (pentru straturi antiuzură) și cu temperatura de topire ridicată, caz în care ea nu se topește integral în baia de sudură și formează zone intermatriceale în materialul depus cu rezistență mare la uzură.

Pulberea metalică introdusă prin capul de sudare are ca agent de transport un gaz inert. Ea poate servi drept material de adaos sau pentru modificarea compoziției chimice a materialului depus.

Capul de plasmă, pe lângă viteza de sudare v_s , poate primi și o mișcare de pendulare cu viteza v_p , pentru mărirea lățimii cordonului de sudură sau a stratului de depunere.

7.6.3. Regimul de sudare cu plasmă

De o deosebită importanță în buna desfășurare a tehnologiei de sudare cu plasmă o constituie alegerea corespunzătoare a rostului îmbinării.

Datorită concentrării mai mari a căldurii la sudarea cu plasmă rădăcina rostului este mai mare decât la sudarea WIG. Totodată unghiul rostului la sudarea cu plasmă, datorită diametrului la vârf mai mare al pistolului, este mai mare decât la sudarea WIG. Datele privind tehnologia sudării cu plasmă sunt relativ puține în literatură motiv pentru care nu s-a stabilit un algoritm de calcul pe baza unor relații statistice între parametrii de regim. Din acest motiv, în tabelul 7.9 sunt dați parametrii regimului de sudare precum și alte elemente necesare tehnologiei sudării cu plasmă a oțelurilor inoxidabile, cuprului, aluminiului și oțelului cu puțin carbon, în cazul sudării într-o singură trecere. Se observă că în toate cazurile gazul plasmagen este argonul. Gazul de protecție poate fi argonul, combinația dintre argon și hidrogen, sau heliul. Combinația argon-hidrogen asigură față

de argonul pur un arc de plasmă mai cald și o mai mare eficiență a transferului căldurii spre materialul de bază. Mixtura argon-hidrogen în proporție 95%Ar + 5% H₂ este de obicei aplicată la oțelurile inoxidabile austenitice, la aliajele de nichel, sau uneori și la aliajele de cupru. Se observă că folosirea hidrogenului în amestecul gazului de protecție are ca efect creșterea vitezei de sudare ca urmare a îmbunătățirii transferului termic în arcul de plasmă. Și la sudarea cu plasmă sunt valabile recomandările privind polaritatea curentului de sudare de la sudarea WIG. Aluminiul și aliajele sale se sudează în curent continuu cu polaritate DC⁺, datorită aspectelor legate de efectul de microsablare al ionilor de argon (ioni grei), ce bombardează baia de metal topit, înlăturând oxidul de aluminiu.

Tabel 7.9.

Grosime S [mm]	Rost	Diametrul orificiului plasmagen d _e [mm]	Gaz de protecție la 0,56 m ³ /h [%]	Debit gaz plasmagen Ar·10 ⁻³ [m ³ /h]	Curent de sudare I _s [A]	Viteza de sudare v _s [cm/min]
Oțel inoxidabil						
0,2	I	2,4	100%Ar	14	12 ⁻	17,8
0,5	I	1,2	95%Ar+5%H ₂	14	12 ⁻	53,3
0,75	I	1,2	95%Ar+5%H ₂	14	34 ⁻	43
1,5	I	2	95%Ar+5%H ₂	20	65 ⁻	35,5
3	I	2	100%Ar	70	100 ⁻	25
3	I	2	95%Ar+5%H ₂	70	100 ⁻	41
5	I	2	95%Ar+5%H ₂	98	100 ⁻	18
6,5	V	2	95%Ar+5%H ₂	84	100 ⁻	12,5
Cupru						
0,4	I	2,5	100%He	14	18 ⁺	61
Aluminiu						
1	I	2	100%He	1,4	47 ⁺	61
1,2	I	2	100%He	14	48 ⁺	56
2,5	I	2	100%He	40	34 ⁺	10
Oțel cu puțin carbon						
0,75	I	2	100%Ar	14	45 ⁻	66
2	I	2	100%Ar	28	55 ⁻	43

7.7. Sudarea MIG și MAG

7.7.1. Performanțele procedurilor MIG și MAG

Procedeele de sudare în mediu de gaze MIG și MAG sunt folosite în varianta semimecanizată sau mecanizată (uneori automatizată). Varianta semimecanizată se întâlnește în mod curent, în care sudorul execută majoritatea operațiilor cu excepția aducerii sârmei de sudură și a gazelor de protecție în zona arcului. Aceste materiale de sudare vin în zona arcului prin intermediul unui tub flexibil de la panoul de distribuție al gazelor și de la mecanismul de avans al sârmei electrod. Varianta mecanizată sau automatizată folosește o sanie, sau un cărucior care realizează deplasarea arcului electric în lungul rostului elementelor de îmbinat. Pe sanie sau cărucior se află atât sistemul de avans al sârmei electrod cât și capul de sudare la care vin gazele de protecție, precum și sistemul de răcire cu apă a duzelor capului de sudare. Avantajele procedurilor de sudare MIG-MAG sunt următoarele:

- rata depunerii, coeficientul de depunere, productivitatea și factorul operator sunt

mult mai mari decât la sudarea SE, comparabile

- cu cele de la sudarea SF;
- arcul electric este vizibil și deci conducerea procesului de către operator este mult ușurată;
- în urma procesului de sudare nu rezultă o cantitate importantă de zgură, ca atare nu este nevoie de curățirea acesteia. În cordon probabilitatea apariției incluziunilor de zgură este mult redusă. Sudarea prin mai multe treceri este astfel ușurată evitând curățirea zgurei. Ca atare, productivitatea procedeelor crește;
- procedeele au un grad mare de universalitate, putându-se suda majoritatea materialelor metalice și în orice poziție.

Dezavantajele procedeelor MIG-MAG sunt următoarele:

- echipamentul de sudare este mai scump datorită complexității lui în ceea ce privește avansul sârmei electrod, necesitatea răcirii cu apă, necesitatea administrării gazului de protecție;
- pistolul de sudare este mai greu datorită existenței și a furtunului de legătură care transportă conductele de gaz, de apă de răcire și cablul flexibil de conducere a sârmei de sudare, precum și cablul de curent;
- operatorul nu poate urmări gradul de protecție al băii de sudură neobservând clopotul de gaz creat în jurul arcului;
- intemperii atmosferice provoacă deplasarea gazului de protecție și în special vântul ce acționează în condițiile de șantier.

Parametrii tehnologici primari la sudarea prin procedeele MIG-MAG, variază între următoarele valori:

- intensitatea curentului de sudare: $I_s = 50 \dots 500 \text{ A}$;
- tensiunea arcului: $U_a = 16 \dots 35 \text{ V}$;
- viteza de sudare: $v_s = 30 \dots 150 \text{ cm/min}$;
- diametrul sârmei electrod: $d_e = 0,6 \dots 3,2 \text{ mm}$, mai des folosit fiind $d = 0,8 \dots 2,4 \text{ mm}$;
- debitul de gaz $Q_g = 10 \dots 25 \text{ l/min}$.

7.7.2. Materiale de sudare

La sudarea MIG sârmele de sudare au în general aceeași compoziție ca și materialul de bază care se sudează. Drept gaze de protecție la sudarea MIG se folosesc argonul sau heliul. Argonul are avantajul ca este un gaz mai ieftin, asigură o stabilitate bună a arcului electric întrucât tensiunea de ionizare este mai mică. În plus, argonul produce și „autoascuțirea” sârmei în cursul sudării, ceea ce conduce la concentrarea arcului electric. Heliul este un gaz mai scump, cu o densitate mai mică decât argonul și chiar decât a aerului. El nu asigură fenomenul de microrablare așa cum se întâmplă în cazul argonului. Heliul însă realizează o pătrundere mult mai mare la sudarea diferitelor materiale metalice. Uneori, în gazul de protecție se mai introduce oxigenul și bioxidul de carbon. Oxigenul introdus, în proporții relativ scăzute, 1...5%, face să crească temperatura arcului datorită fenomenelor energice de oxidare, ca atare, crește și pătrunderea cusăturii. Trebuie avut în vedere faptul că oxigenul reduce cantitatea de elemente de aliere din compoziția materialului topit ca urmare a proceselor de oxidare din baie și din arcul electric. Combinarea argonului cu dioxidul de carbon, până la 25% CO_2 , are drept consecință același efect de oxidare energetică creat prin descompunerea bioxidului de carbon și, ca atare, conduce la intensificarea regimului de sudare. În plus arcul devine mai stabil, iar împrôșcările de metal se reduc.

La sudarea MAG sârmele de sudură au în compoziția lor un surplus de siliciu și

mangan, în cazul sudării oțelurilor, pentru a asigura dezoxidarea băii. În lipsa acestor elemente oxigenul provenit din descompunerea bioxidului de carbon ar ataca alte elemente de aliere, sau fierul creând oxizi cu efecte defavorabile asupra compoziției băii de metal topit. De obicei la sudarea MAG a oțelurilor carbon și slab aliate sârmele au circa 0,3...1,2% Si și 1,2...2,5% Mn. Uneori, în sârma de sudură se introduce și titan realizându-se o microaliere cu titan pînă la 0,2%. Această microaliere conduce la un procent de titan de 0,03% în cordonul de sudură având ca efecte creșterea caracteristicilor de rezistență ale îmbinării și în special creșterea rezilienței de peste două ori. Cel mai folosit gaz activ pentru sudarea MAG este dioxidul de carbon, după cum s-a arătat. Dar la sudarea MAG mai pot fi folosite și amestecuri de gaze. Astfel argonul introdus în dioxidul de carbon conduce la îmbunătățirea arderii arcului electric asigurând deci creșterea stabilității acestuia și totodată îmbunătățirea plasticității îmbinării ca urmare a reducerii cantității de oxigen din apațiul arcului. Oxigenul introdus în dioxidul de carbon are același efect ca și la sudarea MIG, respectiv creșterea temperaturii metalului topit, crește astfel viteza de sudare. Totodată, oxigenul micșorează și efectul de împoșcare a metalului topit, dând cusăturii un aspect mai uniform. Oxigenul se introduce în proporție de pînă la 10% la oțelurile nealiate, deci neafectate de reducerea prin oxidare a elementelor de aliere și în proporție pînă la 5% la oțelurile slab aliate. Gazele de protecție la sudarea MIG-MAG trebuie să aibă o puritate foarte mare de circa 99,9%. De asemenea, umiditatea gazelor trebuie să fie mai mică decît 300 mg/m³·N și în cazurile pretențioase de sudare sub 100 mg/m³·N. Se are în vedere că, cu cât puritatea gazului este mai mică și viteza de sudare se va reduce. O influență deosebită o are puritatea gazului asupra caracteristicilor mecanice ale îmbinării sudate. Umiditatea gazului este deosebit de nefavorabilă prin aceea că apa la temperatura arcului se descompune în hidrogen și oxigen ambele gaze având efecte defavorabile asupra băii de metal topit.

7.7.3. Algoritmul de calcul al tehnologiei de sudare MIG și MAG

Sudarea MIG-MAG poate să se realizeze dintr-o singură trecere, fără prelucrarea rostului, la grosimi pînă la 5 mm, în condițiile în care diametrul sârmei electrod este de 2 sau 2,4 mm. Sudarea se poate realiza dintr-o singură trecere pînă la grosimi de 10 mm, dacă rostul este cu prelucrare în „V” sârma de sudură fiind de 2,4 sau 3,2 mm. Pentru grosimi mai mari ale componentelor, sudarea se realizează cu rost în „V” sau „X” prin mai multe treceri. Se reamintește faptul că procedeul MIG sau MAG poate asigura transferul materialului prin arc în varianta short-arc (sha) sau spray-arc (spa). Varianta short este folosită de obicei la table subțiri cu grosimi cuprinse între 0,5 și 6 mm. Varianta spray-arc este folosită economic la table de grosimi mari, cu grosimea mai mare decît 5 mm. Sudarea short-arc se realizează în curent continuu atît în polaritate directă DC⁻ cît și în polaritate inversă DC⁺. Sudarea spray-arc se realizează în curent continuu numai în polaritate inversă DC⁺. Ca atare, odată stabilit diametrul sârmei electrod și felul trecerii metalului de adaos prin arcul electric, se calculează intensitatea curentului electric conform relațiilor:

$$\text{- trecerea short-arc: } I_S = 125,5 \cdot d_e - 32,25 \quad [\text{A}] \quad (7.6)$$

$$\text{- trecerea spray arc : } I_S = -67 \cdot d_e^2 + 370 \cdot d_e - 78 \quad [\text{A}] \quad (7.7)$$

Relații valabile pentru $d_e \in (0,8 \dots 2,4)$

În funcție de intensitatea curentului de sudare se calculează tensiunea arcului cu relația:

$$U_a = 13,34 + 0,05 \cdot I_S \quad [\text{V}] \quad (7.8)$$

Rata depunerii A_D se determină și ea funcție de curentul de sudare prin relația:

$$A_D = 0,3 \cdot 10^{-4} \cdot I_S^2 + 0,1 \cdot 10^{-2} \cdot I_S + 0,5 \quad [\text{kg/h}] \quad (7.9)$$

relație valabilă pentru $I_S \in (100 \dots 600) \quad [\text{A}]$.

Algoritmul de calcul al vitezei de sudare constă în determinarea acesteia în condițiile sudării în varianta short-arc sau spray-arc în cazul oricărui material metalic sau aliaj.

$$\text{- sudarea short-arc: } \rho \cdot (K \cdot v_S) = 1003,2 - \frac{249,13}{d_e} + \frac{1060}{d_e^2} \quad (7.10)$$

$$\text{- sudarea spray-arc: } \rho \cdot (K \cdot v_S) = 290 \cdot d_e^2 - 3158 \cdot d_e + 9243 - \frac{2891}{d_e} + \frac{1283,5}{d_e^2} \quad (7.11)$$

în care ρ este densitatea materialului sudat $[\text{Kg/dm}^3]$ cu d_e $[\text{mm}]$ și $(K \cdot v_S)$ $[\text{cm/min}]$

Pentru oțeluri relațiile de calcul ale vitezei de sudare sunt date de expresiile:

$$\text{- sudarea short-arc: } K \cdot v_S = 127,8 - \frac{31,7}{d_e} + \frac{135}{d_e^2} \quad (7.12)$$

$$\text{- sudarea spray-arc: } K \cdot v_S = 37 \cdot d_e^2 - 402 \cdot d_e + 1177,5 - \frac{368}{d_e} + \frac{163,5}{d_e^2} \quad (7.13)$$

cu aceleași unități de măsură ca și în relațiile precedente.

Cunoașterea vitezei de sudare impune stabilirea prealabilă a coeficientului:

$$K_i = \frac{A_{ti}}{\frac{\pi \cdot d_e^2}{4}} \quad (7.14)$$

în care ariile trecerilor au fost prestabilite.

Viteza sârmei electrod, se determină în baza relației:

$$v_{ei} = K_i \cdot v_{Si} \quad (7.15)$$

Timpu de sudare al unui metru cordon poate fi determinat cu expresia:

$$t_S = \sum_1^{n_t} \frac{100}{v_{Si}} \quad [\text{min}] \quad (7.16)$$

cu v_{Si} $[\text{cm/min}]$.

În condițiile acelorași viteze de sudare pe trecerile succesive:

$$t_S = \frac{100}{v_S} \cdot n_t \quad (7.17)$$

cu v_S $[\text{cm/min}]$ și t_S $[\text{min}]$.

CAP.8. ALTE PROCEDEE DE SUDARE CU ARC ELECTRIC

În capitolele anterioare s-au prezentat procedeele de sudare cu arc electric cu grad ridicat de universalitate. În cele ce urmează, în capitolul de față, se prezintă procedeele de sudare cu arc electric, cu domeniu restrâns sau foarte restrâns de aplicare.

8.1. Sudarea în puncte (electronituierea)

Acest procedeu de sudare este folosit la îmbinarea a două componente (fig. 8.1) de grosimi S_1 și S_2 în care grosimea S_1 este mult mai mică decât grosimea S_2 și nu depășește valori de circa 0,5...2 mm. Prin topirea unei porțiuni din componenta de grosime S_1 și pătrunderea băii de metal topit și asupra componentei S_2 se realizează un punct de sudură. Deci, punctul se va obține prin topirea locală pe toată grosimea ei a tablei superioare de grosime S_1 , precum și topirea tablei inferioare suficient de mult pentru asigurarea rezistenței mecanice cerute punctului.

Acest procedeu de sudare este folosit în locul sudării prin presiune în puncte, atunci când dimensiunile componentelor sunt mari și foarte mari, iar cleștele de sudat prin presiune în puncte nu poate asigura cuprinderea acestora. Totodată, acest procedeu poate fi folosit la sudarea la față locului a componentelor de sudat fără a fi necesară aducerea lor la mașina de sudat prin presiune. Sudarea în puncte se realizează prin procedeul WIG sau prin procedeele MIG-MAG.



Fig. 8.1.

Pistoletului de sudare (fig.8.2) i se adaugă o bucușă exterioară, în jurul duzei, bucușă prin care se asigură transmiterea forței F , de presare a componentelor de sudare. Gazul de protecție intră în aceasta bucușă și elimină aerul de pe suprafața componentei de sudat putând ieși printr-o serie de orificii practicate la baza bucușei în apropierea componentei superioare a îmbinării.

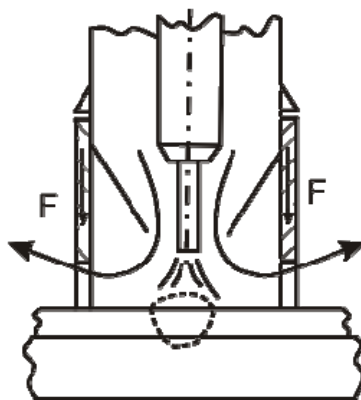


Fig. 8.2.

Sursele de sudare pentru procedeul WIG și MIG-MAG au în construcția lor și posibilitatea de a realiza suduri prin puncte. Astfel, înainte de amorsarea arcului electric se pornește gazul de protecție pentru evacuarea aerului din zona punctului de sudură. Arcul se amorsează datorită unei componente de curent de înaltă frecvență ce se

stabilește între electrod și piesa de sudat. Durata menținerii curentului de sudare este temporizată. De asemenea, gazul de protecție continuă să mai fie debitat în zona punctului până când cusătura se solidifică, diminuând contactul cu aerul, cât și degradarea proprietăților băii de metal topit.

La sudarea în puncte prin procedeul WIG se folosește drept gaz de protecție argonul sau, mai rar heliu. Argonul produce un punct de diametru mai mare decât heliul, în schimb heliul realizează un punct cu pătrundere mai mare decât argonul.

Sudarea în puncte prin procedeul MIG-MAG poate fi realizată, cu sârmă plină sau cu sârmă tubulară. Sudarea cu sârmă tubulară dă o pătrundere mai mare decât sudarea cu sârmă plină la procedeul MAG. Prin acest procedeu se realizează sudarea tablelor din oțeluri nealiate sau oțeluri mediu aliate, precum și din oțeluri inoxidabile pe suport de oțel carbon. Uneori, în condiții speciale tehnologice, legate de curățirea suprafețelor, se realizează îmbinarea prin puncte și a tablelor de aluminiu.

Sudarea prin puncte prin procedeul WIG a tablelor de oțel se realizează pentru componenta S_1 cu grosimi cuprinse între 0,5...2 mm, caz în care se folosește un curent de sudare $I_S = 100...200$ A, pentru varianta sudării în curent continuu, sau $I_S = 180...250$ A, pentru varianta sudării în curent alternativ. Timpul de menținere temporizată a arcului este cuprins între 1...5 s. Pentru sudarea în puncte prin procedeul MIG-MAG, grosimile tablelor din oțel folosite variază între 0,5...6 mm.

La sudarea prin procedeul STG diametrul sârmei tubulare este cuprins între 0,5...1,6 mm, iar în cazul sudării prin procedeul MAG diametrul sârmei pline este cuprins între 1,2...2,4 mm. Curentul de sudare $I_S = 100...500$ A, tensiunea arcului circa 30 V, iar timpul temporizat al menținerii arcului 1...3,5 s.

În cazul în care cele două componente de sudat au grosimi $S_1 = S_2$ este bine, ca în procesul realizării punctului, tabla inferioară să se așeze pe un suport metalic din cupru. Acest suport nu va permite străpungerea tablei inferioare de către baia de metal topit.

8.2. Sudarea cu electrod învelit culcat

Sudarea constă în plasarea în rostul îmbinării a unui electrod învelit, sau a mai multor electrozi înveliți, preferabil ca învelișul acestora să fie gros pentru a da posibilitatea arcului electric să ardă într-un spațiu corespunzător, asigurând lungimea arcului necesară. De obicei, electrodul este acoperit cu o placă din cupru și, de asemenea, sub îmbinare se plasează o placă de cupru pentru formarea corespunzătoare a cusăturii. Plăcile evită totodată producerea stropilor. Se fabrică și electrozi speciali pentru sudarea cu electrod culcat având lungimi de 1...2 m și având totodată proprietatea de a se asambla reciproc, creându-se astfel un electrod cu lungimea apropiată de lungimea îmbinării.

Alimentarea cu curent a electrodului se face pe diferite porțiuni reducând astfel lungimea electrodului între arcul electric și priza de alimentare, reducând lungimea liberă și micșorând pierderile prin efect Joule. Prin acest procedeu se pot realiza îmbinări cap la cap (fig. 8.3) sau îmbinări de colț în jgheab (fig. 8.4).

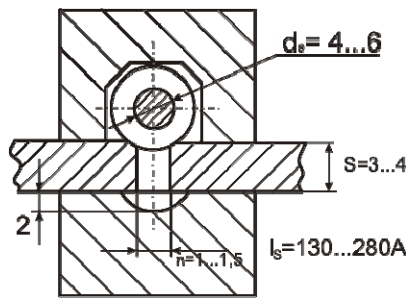


Fig. 8.3.

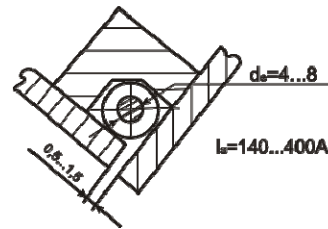


Fig. 8.4.

8.3. Sudarea gravitațională

Sudarea gravitațională reprezintă o mecanizare a sudării cu electrozi înveliți. Electrocul învelit 1 (fig.8.5) este fixat în bucșa 2 de la care primește și curentul electric. Aceasta bucșă este sprijinită pe culisa 3, care glisează pe ghidajul 4. Ghidajul 4 se află în planul axei cordonului de sudură. Amorsarea procesului se realizează manual, apoi electrocul se sprijină cu propriul înveliș pe rostul cordonului de sudură și, consumându-se, coboară împreună cu culisa 3 pe ghidajul 4. Ca atare, viteza de sudare este dată de către unghiul α de înclinare al ghidajului față de axa rostului. Totodată, acest unghi α impune și pătrunderea sudurii precum și calibrul acesteia.

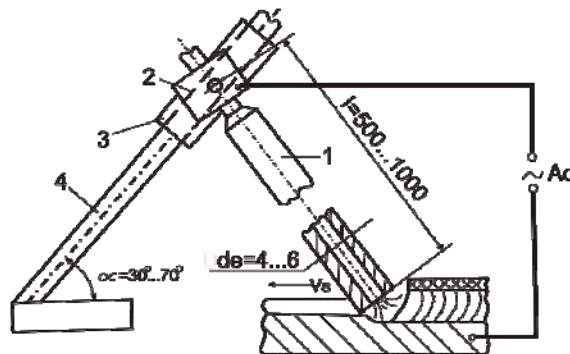


Fig. 8.5.

Pentru sudarea gravitațională se folosesc de obicei electrozi cu diametrul de 4...6 mm, cu înveliș gros pentru a da posibilitatea formării arcului și lungimii cuprinse între 500...1000 mm. Curentul de alimentare este curent alternativ pentru a evita suflajul arcului și tendința de deviere a arcului de la axa cordonului.

Folosirea curentului alternativ la sudarea cu electrozi înveliți impune ca învelișul electrodului să fie, în general, de tip titanice. Curentul folosit este cu numai 10...20% mai mare decât la sudarea cu electrozi înveliți, la același diametru al electrodului, pentru că, datorită lungimii mari a sârmei electrod se produc pierderi prin efect Joule pe acesta.

În concluzie, sudarea gravitațională asigură mecanizarea sudării cu electrozi înveliți, mărind productivitatea operației de sudare, îmbunătățind calitatea îmbinării, sudorul putând supraveghea mai multe posturi de sudare și totodată crește cantitatea de material depus, respectiv rata depunerii.

Acest procedeu este folosit de obicei în construcțiile metalice la care mai des folosite sunt îmbinările de colt, cum ar fi cazul construcțiilor navale. Totuși, la acest procedeu apar o serie de aspecte restrictive legate de necesitatea poziției orizontale a cordonului de sudură și necesitatea folosirii de electrozi speciali din punct de vedere al lungimii lor și grosimii învelișului. Sunt construite și instalații pentru sudarea gravitațională pe verticală și de plafon.

8.4. Sudarea în rost îngust

Acest procedeu de sudare este o variantă particulară a procedurii de sudare MAG, folosit la operațiile de îmbinare prin sudura cap la cap a componentelor cu grosime mare. Ca atare, rostul îmbinării este în forma de I prelucrat, iar grosimea elementelor îmbinării ajunge până la 200 mm. Lățimea rostului variază între 6...16 mm.

Avantajul principal al procedurii de sudare în rost îngust în mediu de gaz protector constă în aceea că reduce substanțial cantitatea de material de adaos folosit pentru realizarea îmbinării. Aceasta se explică în special prin faptul că aria rostului I este de câteva ori sau uneori de câteva zeci de ori mai mică decât aria unui rost cu prelucrare în V, X sau U, corespunzător grosimii componentelor de sudat. Procedeu de sudare în rost îngust (fig. 8.6) poate fi realizat cu o singură sârmă electrod, sau cu mai multe sârme electrod.

Procedeu cu o singură sârmă electrod folosește un rost cu lățime mai mică. Sudarea se face în mai multe treceri. La fiecare trecere sârma este înclinată în rost pentru a topi unul dintre pereții rostului.

Productivitatea operației de sudare este redusă datorită unui singur cap de sudare, în schimb, cantitatea de metal depus este relativ mică.

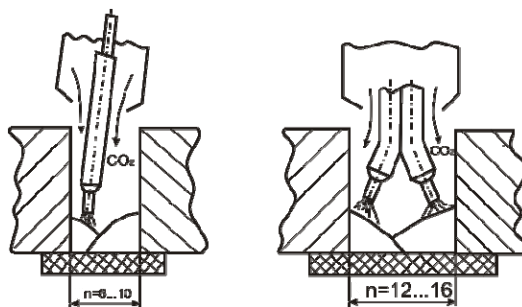


Fig. 8.6.

Sudarea cu mai multe sârme electrod mărește productivitatea operației de sudare, însă cantitatea de material depus este mai mare datorită rostului cu lățime mai mare. Se poate suda cu două, trei sau cinci sârme electrod. Sârmele electrod atacă separat unul sau celalalt din pereții rostului realizând topirea materialului de bază și creind baia de metal topit.

O îmbunătățire substanțială a calității îmbinării se asigură atunci când se folosește un amestec de gaze de protecție formate din argon și dioxid de carbon, preferabil în părți egale.

Ca atare, sudarea în rost îngust este un procedeu de eficiență economică importantă în condițiile în care se au în vedere și necesitatea executării unui rost prelucrat foarte precis, precum și a unui echipament de sudare care să asigure urmărirea rostului și poziționarea sârmei electrod corect în rostul adânc al îmbinării.

Sudarea se realizează cu energie liniară mică pentru o sârmă electrod a cărei diametru variază între 1,2...3,2 mm. Ca atare, dimensiunile ZIT-ului sunt relativ mici și în aceste condiții, mai ales la oțelurile mediu și bogat aliate, tensiunile remanente, deformațiile ca urmare a procesului de sudare sunt mai reduse, iar proprietățile fizico-mecanice ale îmbinării superioare.

8.5. Sudarea antigrațională

Sudarea antigrațională cuprinde o serie de procedee de sudare care se realizează evitând tendința naturală de curgere gravitațională a băii de metal topit.

Sudarea antigrațională este aplicată în cazul operațiilor de sudare de poziție, respectiv al realizării cordoanelor pe perete vertical și înclinat, cordoane orizontale sau verticale.

8.5.1. Sudarea mecanizată pe verticală

Sudarea pe verticală, în varianta mecanizată, se realizează de obicei apelând la procedeul de sudare în mediu de gaz protector, mai răspândit fiind procedeul MAG.

Sunt două tehnologii pentru sudarea mecanizată pe verticală și anume:

- sudare cu baie liberă;
- sudare cu baie constrânsă.

Sudarea cu baie liberă (fig. 8.7) asigură obținerea cordonului vertical în condițiile în care sudarea se realizează cu sârmă plină sau tubulară în mediu de gaz protector. Capul de sudare este înclinat de obicei cu unghiul $\alpha = 15^\circ \dots 25^\circ$ în raport cu normala la rostul îmbinării. Totodată, capul de sudare execută o pendulare pe unghiul $\beta = 40^\circ \dots 60^\circ$, în condițiile în care rostul are un unghi de 60° .

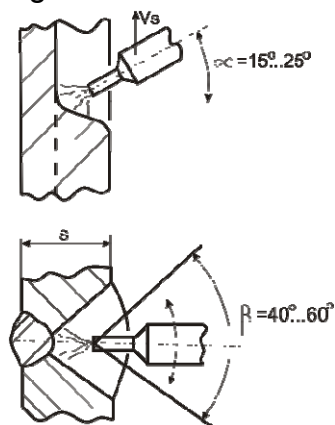


Fig. 8.7.

Pendularea se realizează cu o frecvență de 6...20 cicluri pe minut. La materialele cu grosimi mai mari, 20...35 mm pendularea se asigură astfel încât la capete de cursă sârma electrod să realizeze o topire mai accentuată a materialului de bază, impunând o întârziere, o staționare a arcului, la capăt de cursă. Pentru grosimi ale îmbinărilor cuprinse între 10...20 mm sudarea poate fi realizată dintr-o singură trecere. Pentru grosimi mai mari se folosesc două și mai multe treceri.

De obicei, când se începe sudarea mecanizată pe verticală stratul de rădăcină executat pe parte opusă celei pe care se va suda mecanizat, a fost deja realizat în varianta manuală.

Când nu este posibilă executarea unui cordon pe partea opusă atunci se atașează pe acea parte o placă metalică preferabil din același material cu al materialului de bază, care rămâne înglobată în îmbinare.

A doua variantă de sudare mecanizată pe verticală este sudarea cu baie constrânsă, numită și sudarea electrogaz (fig. 8.8).

La aceasta sudare cordonul se realizează între două patine de cupru răcite forțat cu apă. Dioxidul de carbon (gazul de protecție) pătrunde prin patine în zona arcului de sudură. Sudarea se realizează cu sârmă tubulară, arcul electric va crea o baie de metal topit, care se ridică, avansând pe verticală cu viteza de sudare v_s . Cu aceeași viteză avansează și cele două patine de cupru care au rolul de cristalizoare a băii topite.

Fluxul topit, provenit din miezul sârmei electrod, asigură și el protecția băii, iar surplusul de flux se solidifică în contact cu patinele și căptușește de o parte și de alta a

cordonul de sudură.

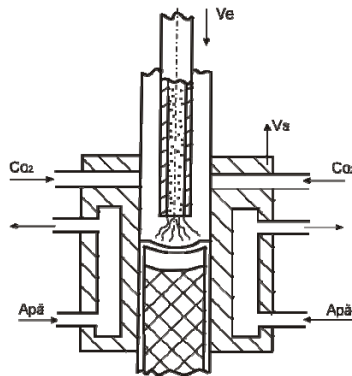


Fig. 8.8.

8.5.2. Sudarea mecanizată de cornișă

Sudarea mecanizată de cornișă poate fi realizată în varianta sub strat de flux sau în mediu de gaze protectoare.

Sudarea mecanizată sub strat de flux în poziție de cornișă a fost dezvoltată la noi în țara sub aspectul instalațiilor de sudare, precum și al tehnologiilor de sudare în cadrul laboratoarelor catedrei Robotică și Sudare ale Universității din Galați.

Aspectul tehnologic esențial la sudarea sub strat de flux constă în acordarea regimului de sudare cu fenomenele fizice ce conduc la evitarea curgerii gravitaționale a băii de metal topit. Fluxul, cu care se realizează operația de sudare, în timpul procesului trebuie să rămână nemișcat în raport cu materialul de bază, evitând astfel curgerea băii de metal și a băii de zgură.

Principiul procedurii de sudare sub strat de flux în poziție de cornișă constă (fig.8.9) în dispunerea fluxului a pe o bandă 1, înfășurată pe tamburii 2 și 3. Cei doi tamburi sunt fixați prin eclisa 4 pe pivotul 5. Odată cu înaintarea mecanizată a capului de sudat are loc rularea benzii 1 pe suprafața materialului de bază (rostogolirea fără alunecare a tamburilor 2 și 3 pe peretele vertical).

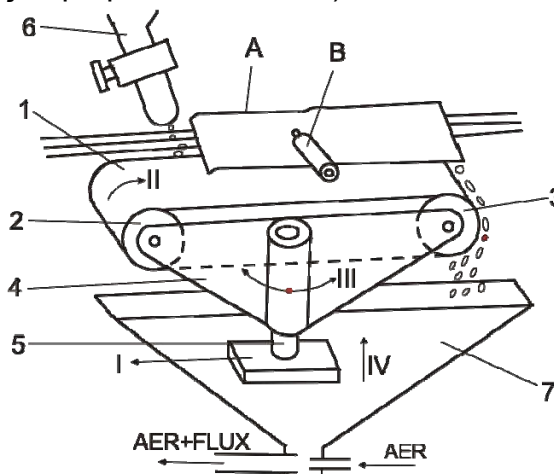


Fig. 8.9.

Fluxul curge din buncărul superior 6 pe banda de flux și apoi, după ce acesta a asigurat protecția cordonului de sudură, cade în buncărul inferior 7, de unde, de obicei, este recirculat pneumatic și adus din nou în buncărul 6.

Ca atare, odată cu antrenarea întregului sistem în mișcarea de deplasare cu viteza de sudare, în lungul cordonului de sudură, mișcarea I, banda susținătoare de flux rulează cu mișcarea II asigurând menținerea nemișcată a fluxului față de componentele de sudat.

Capul de sudare **b** trimite sârma electrod în zona arcului. Denivelările de la planeitate ale materialului de bază sau sudarea pe direcție circulară este posibilă datorită faptului că banda împreună cu tamburii 2 și 3, fixați pe eclisa 4, poate pivota în jurul axului pivotului 5 în mișcarea III.

Grosimea pernei de flux și poziția ei în raport cu rostul îmbinării este asigurată printr-o mișcare de reglare IV.

Sudarea mecanizată de cornișă sub strat de flux se caracterizează prin productivitate ridicată, instalațiile putând lucra cu una sau două sârme electrod, prin calitate superioară a materialului cordonului de sudură, asigurând reziliențe ridicate la temperaturi negative, prin uniformitatea cordonului de sudură asigurând concentratori reduși ai tensiunilor și rezistență mărită la oboseală. Prin alegerea corespunzătoare a fluxului se asigură desprinderea acestuia ușoară de pe îmbinare și, ca atare, productivitatea operației crește suplimentar odată cu creșterea factorului operator.

Procedeu prezintă o serie de dezavantaje legate de poziționarea precisă a instalației în raport cu rostul îmbinării, instalațiile putând să se deplaseze pe o șină (instalație de tip monoray) paralelă cu rostul îmbinării, sau instalațiile pot să se deplaseze direct pe marginea superioară a componentelor de sudat dacă aceasta este paralelă cu rostul.

De asemenea, rostul trebuie îngrijit prelucrat astfel încât straturile succesive să fie bine depuse în rost fără a fi nevoie de sisteme complicate de urmărire a rostului.

Sudarea mecanizată de cornișă poate fi realizată unilateral sau bilateral în cazul rosturilor cu prelucrare în V, respectiv în X. Sudarea bilaterală simultană are marele avantaj al formării unei băi comune evitându-se astfel defectele de rădăcină foarte frecvente la îmbinările sudate separat pe ambele părți.

8.6. Sudarea sub apă

Sudarea cu arcul electric este posibilă și sub apă până la adâncimi de câteva sute de metri, atât în apă dulce cât și în apă sărată.

Sunt trei variante principale de sudare sub apă:

- sudare umedă;
- sudare uscată;
- sudare cu uscare locală.

Sudarea umedă se realizează cu arcul electric direct în apă. Acest procedeu este cel mai simplu dar proprietățile îmbinării sunt cele mai scăzute.

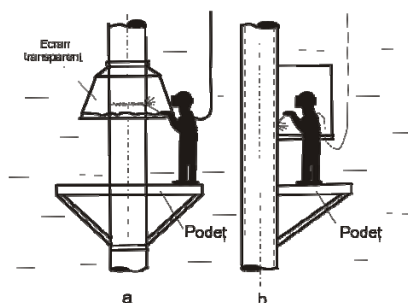


Fig. 8.10.

Sudarea uscată se realizează în habitaturi special amenajate din care este scoasa apă. În habitat pot fi cuprinși operatorul și echipamentul de sudare sau numai o porțiune din structura care trebuie sudată. Sudarea se numește hiperbară întrucât presiunea din habitat este egală cu presiunea hidrostatică la adâncimea de lucru

(fig.8.10). Sunt habitaturi ce pot lucra la presiunea atmosferică dar investițiile pentru aceste construcții sunt foarte mari.

Sudarea cu uscare locală constă în folosirea unui cap de sudare care asigura expulzarea apei din zona arcului și uscarea zonei, concomitent cu ionizarea și protecția spațiului.

În figura 8.11 se prezintă un cap de sudare MIG-MAG cu uscare locală care conține mai multe duze concentrice prin care se trimit gazul de protecție, aerul comprimat și apă sub presiune.

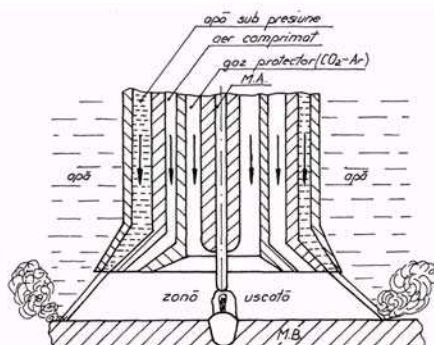


Fig. 8.11.

Gazul de protecție este Ar, CO₂ sau amestecul acestora. Aerul comprimat, uscat și încălzit formează un strat de protecție între perdeaua de apă („clopotul de apă”) și gazul protector micșorând totodată și consumul de gaz de protecție. Zona uscată asigură reducerea vitezei de răcire a sudurii și diminuează efectul de descompunere a apei la temperatura arcului, cu toate consecințele nefavorabile ce decurg din aceasta.

Particularitățile sudării umede sau cu uscare locală, sub apă pot fi sintetizate în următoarele:

- La sudarea sub apă arcul electric este uneori mai stabil datorită ionilor proveniți din descompunerea sărurilor din apă ce participă la transportul curentului.
- Viteza de răcire a cordonului este foarte mare datorită apei care este un mediu agresiv de călire. Ca atare, în ZIT structurile fragile pot avea o pondere foarte mare.
- La temperatura arcului electric apa se descompune în oxigen și hidrogen, ambele gaze având efecte defavorabile asupra caracteristicilor îmbinării (modificarea compoziției chimice, formarea oxizilor, fragilizarea prin hidrogen etc).
- Cu creșterea adâncimii la care se efectuează sudarea, deci cu creșterea presiunii, scad aproape toate caracteristicile mecanice ale îmbinării sudate datorită intensificării absorbției de gaze, creșterii vitezelor de reacție chimică, reducerii „clopotului” de gaz protector etc.