

Procedee tehnologice în ingineria materialelor (2)

Suport de laborator

Conf.univ.dr.ing. Ioan RUSU
Asist.univ.dr.ing. Mihai POPA

CUPRINS

1.	SURSE DE PUTERE UTILIZATE ÎN CAZUL PROCEDEELOR DE SUDARE CU ARC ELECTRIC (1)	3
1.1	Noțiuni generale	3
1.2	Studiul constructiv și analiza funcționării utilajelor existente	11
1.3	Modul de lucru	14
2.	DETERMINAREA ANALITICĂ ȘI EXPERIMENTALĂ A DIMENSIUNILOR ZIT ȘI ESTIMAREA TEORETICĂ A VITEZEI DE RĂCIRE	16
2.1	Noțiuni introductive	17
2.2	Stabilirea analitică a unor caracteristici ale câmpului și ciclului termic în sudură	22
2.3	Partea experimentală și activitate individuală	23
3	DETERMINAREA COMPOZIȚIEI CHIMICE MEDII A CUSĂTURII	29
3.1	Noțiuni introductive	29
3.2	Determinarea compoziției medii a cusăturii - analitic și grafic	31
3.3	Mod de lucru	33
4.	MODIFICĂRI STRUCTURALE ÎN ÎMBINAREA SUDATĂ	38
4.1	Noțiuni introductive	38
4.2	Principalele modificări structurale	39
4.3	Analiza microstructurală	42
4.4	Influența compoziției chimice asupra microstructurii oțelurilor inoxidabile	47
4.5	Mod de lucru	51
5	DISCONTINUITĂȚI ȘI DEFECTE ÎN ÎMBINĂRILE SUDATE. METODE DE CONTROL NEDISTRUCTIV UTILIZATE LA VERIFICAREA SUDURILOR REALIZATE PRIN TOPIRE	62
5.1	Noțiuni introductive	62
5.2	Defecte tehnologice	64
5.3	Defecte metalurgice	67
5.4	Controlul îmbinărilor sudate	68
5.5	Mod de lucru	69

LUCRAREA Nr. 1

SURSE DE PUTERE UTILIZATE ÎN CAZUL PROCEDEELOR DE SUDARE CU ARC ELECTRIC (1)

Surse de putere pentru sudarea cu electrozi înveliți

Obiective

- Cunoașterea principalelor utilaje utilizate la sudarea cu arc electric din dotare;
- Identificarea limitelor de funcționare pentru un utilaj dat funcție de indicațiile furnizate de producător;
- Cunoașterea principalelor pericole aferente sudării cu arc electric.

1.1 Noțiuni generale

Cele mai populare procedee de sudare sunt procedeele ce utilizează ca sursă de încălzire / topire a metalului de bază / și a metalului de adaos arcul electric.

Arcul electric utilizat la sudare este o *descărcare electrică stabilă* între doi electrozi, într-un *mediu gazos* aflat în *stare ionizată*, caracterizat de densități mari de curent (densitate de curent - curentul ce străbate unitatea de suprafață).

În general, electrozii la sudare sunt reprezentați de sârma electrod care se topește și participă nemijlocit la formarea cusăturii și piesa de sudat, al doilea electrod. Descărcarea electrică pentru sudare are loc la o tensiune relativ scăzută, și o intensitate mare a curentului, ce variază în funcție de procedeu.

Căldura rezultată este efectul termic al descărcării electrice, a fenomenelor complexe ce au loc în spațiul ionizat, respectiv în gazul dintre electrozi. Spre deosebire de efectul termic din corpurile solide, la trecerea curentului electric în mediul gazos se dezvoltă și energie radiantă (radiații în spectrul vizibil sau ultraviolet – efectul luminos al arcului), ceea ce impune măsuri de protecție specifice.

Formarea arcului electric de sudare este condiționată de două fenomene: emisia de electroni din electrozi și ionizarea gazului ce ocupă spațiul între cei doi electrozi.

Pentru desfășurarea acestor fenomene sursele de putere pentru sudare trebuie să îndeplinească condiții speciale.

Formarea arcului electric

În condiții normale, arcul electric nu se aprinde singur: coloana gazoasă este izolatoare din punct de vedere electric. Tehnologic este necesară asigurarea condițiilor de aprindere a arcului, etapă denumită *amorsare*. Pentru a facilita amorsarea, pe lângă diferența de tensiune dintre electrozi, se utilizează diferite metode ce ușurează inițierea și desfășurarea fenomenelor de emisie a electronilor și de ionizare a spațiului de arc. Astfel, în cazul *electrozilor fuzibili*, amorsarea arcului se realizează prin stabilirea contactului între cei doi

electrozi. Rezistența locală fiind practic nulă, curentul are valori mari (curent de scurt circuit, teoretic infinit), ceea ce duce la încălzirea locală rapidă, inclusiv topirea locală. Deși contactul electric este bun, valoarea curentului se menține ridicată datorită creșterii rezistivității cu creșterea temperaturii. Îndepărtarea electrozilor duce la îngustarea conductorului, respectiv creșterea suplimentară a rezistenței electrice și creșterea cantității de căldură degajate. Metalul atinge temperaturi apropiate de temperatura de fierbere, vaporii formați fiind ușor ionizabili, adică se permite electronilor activați prin încălzire să se desprindă din material sub acțiunea câmpului electric. Căldura degajată local susține în continuare ionizarea coloanei de gaz dintre electrozi, iar tensiunea asigură deplasarea sarcinilor electrice, figura 1.1.

O altă modalitate, utilizată cu precădere în cazul electrozilor nefuzibili, este suprapunerea unei componente de înaltă frecvență, capabilă „să agite” atomii din spațiul dintre electrozi, generând condițiile locale necesare amorsării arcului.

Realizarea sudurii presupune menținerea continuă, stabilă, a arcului. Menținerea arcului impune asigurarea unei distanțe relativ constante între electrozi (rezistență cu variații minime) dar și capacitatea sursei de putere de a se adapta variațiilor de rezistență locală. Stingerea arcului se face prin îndepărtarea electrozilor.

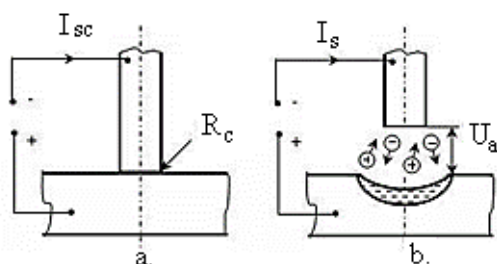


Fig. 1.1. Amorsarea arcului electric la sudarea cu electrod învelit. a. contact direct între electrozi; b. îndepărtarea electrozilor și stabilirea curentului de sudare. I_{sc} —curent de scurtcircuit; R_c —rezistența contactului; I_s , U_a —parametri electrici ai arcului

Temperatura arcului electric este cuprinsă între 5000...30000 K, în medie 5000 K în coloana centrală, temperatură ce asigură topirea electrozilor (componente de sudat, metal de adaos) ce formează baia lichidă. Forțele electromagnetice din arc permit transportul metalului de adaos topit, fenomen numit transfer de material, totdeauna spre piesele de sudat. Transferul are loc indiferent de dispunerea materialului de bază față de arc, de tipul de curent utilizat sau de polaritatea folosită.

În funcție de modul în care sunt legați electrozii în circuitul electric, de tipul acestora și de caracteristicile sursei de curent, arc electric admite mai multe variante. Aceste variante sunt prezentate în tabelul 1.1 iar unele schematic în figura 1.2.

Modul de funcționare al arcului influențează temperatura locală la sudare, implicit caracteristicile produsului finit.

Utilizarea arcului indirect permite un control superior al cantității de căldură introduse în materiale, cu un randament redus de utilizare a energiei primare; arc de curent alternativ este mai puțin eficient decât cel de curent continuu, dar are un efect intens de curățire a suprafețelor ceea ce îl recomandă în cazul materialelor cu tendință puternică de oxidare (efect de sablare a băii lichide). În curent continuu, alegerea polarității (modul de legare al electrozilor în circuit), permite influențarea nivelului de încălzire a materialelor,

deoarece totdeauna electrodul legat la polul pozitiv va avea o temperatura mult mai înaltă decât cel legat la polul negativ.

Tabelul 1.1

Variante de funcționare a arcului electric de sudare

Variante de funcționare a arcului electric la sudare	Tip curent	▪ Continuu, asigură posibilitatea alegerii polarității:	- directă, simbolizată c.c.⁻ electrod ^(*) la pol negativ
			- inversă, simbolizată c.c.⁺ electrod la polul pozitiv
		▪ Alternativ	- schimbarea rapidă a polarității are efect de sablare a suprafețelor
	Participarea materialului de bază la circuit	▪ Direct	metalul de bază este electrod
		▪ Indirect	metalul de bază nu este electrod
	Tip electrod	▪ Fuzibil	
		▪ nefuzibil	

(*) - este vorba de electrodul fuzibil sau greu fuzibil.

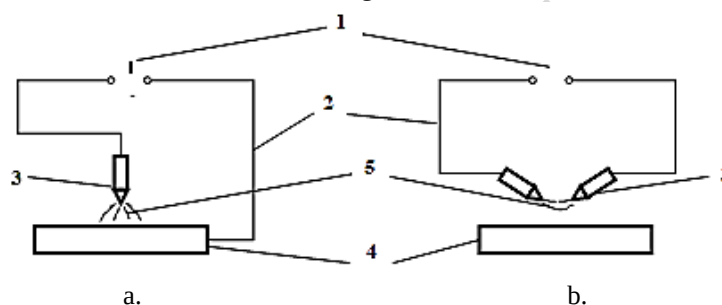


Fig. 1.2. Scheme de formare a arcului electric pentru sudare: a. circuit cu formare de arc electric direct, electrod fuzibil/nefuzibil; b. circuit cu arc indirect, electrozi nefuzibili; 1. sursa de curent (alternativ sau continuu); 2. cabluri de legătură; 3. electrozi; 4. material de bază; 5. arc electric

Clasificarea surselor de putere

Majoritatea surselor de putere preiau curentul electric disponibil comercial, din rețeaua de joasă tensiune, caracterizat de valori relativ mari ale tensiunii (220/380V) și valori relativ reduse ale curentului furnizat. Pentru sudarea manuală sursa de putere trebuie să asigure la electrod o valoare redusă a tensiunii (maximum 60V) și o valoare proporțional crescută a curentului de sudare.

Un criteriu fundamental de clasificare a surselor este tipul de curent furnizat la electrod. Funcție de acest criteriu, sursele se clasifică în:

- Surse de *curent alternativ* cu frecvența de lucru egală cu cea din rețeaua electrică – *transformatoare de sudare*;
- Surse de *curent continuu* cu variantele:
 - *redresoare* (utilizează elemente semiconductoare pentru ridicarea și netezirea pulsațiilor curentului alternativ;

- *convertizoare* sau motoare electrice ce utilizează fenomene electromagnetice pentru asigurarea unui curent continuu cu parametri ceruți de condițiile de sudare;
 - *generatoare*, sursele ce utilizează energia termică.
- Surse de curent moderne ce utilizează *frecvențe diferite* de cele din rețeaua de distribuție, surse cunoscute sub numele de *invertoare de sudare*. Modulatorul de frecvență, denumit uneori „ceasul din circuit”, poate fi inserat în circuitul primar sau în cel secundar.

De menționat că prezența transformatorului, element capabil să asigure caracteristicile parametrilor de lucru, este o constantă în construcția surselor pentru sudare, excepție fiind sursele antrenate de motoare, electrice sau termice.

O altă modalitate de clasificare a surselor este legată de modul de *variație al tensiunii* dintre electrozi în funcție de valoarea curentului de sudare. Relația existentă între tensiunea și curentul de la bornele de ieșire, atunci când sursa este conectată la o sarcină convențională, poartă numele de *caracteristica statică externă a sursei*, figura 1.3 (este „statică” deoarece este trasată în condițiile în care variațiile curentului debitat sunt suficient de lente astfel încât tensiunea să nu difere de cea indicată de către caracteristică). Aceasta este o reprezentare grafică a variației tensiunii de sudare (u_s) funcție de curentul de sudare (i_s).

În graficul se evidențiază două valori particulare:

- tensiunea de mers în gol (u_0) - corespunde situației când valoarea curentului debitat este nulă (înainte de amorsarea arcului electric și după stingerea acestuia, adică în pauza dintre suduri);
- curentul de scurtcircuit (i_k) - corespunde situației când bornele sursei sunt în scurtcircuit, tensiunea la borne fiind nulă.

Tensiunea de mers în gol și curentul de scurtcircuit sunt doi dintre parametrii importanți ce caracterizează sursele de sudare, fiind, în general, specificați pe placa de timbru a echipamentelor de sudare.

Se observă că există trei tipuri de caracteristici statice externe a sursei: liniară, neliniară și complexă.

Panta caracteristicii statice externe este definită prin rezistența diferențială a sursei:

$$R_{sd} = \frac{\Delta u_s}{\Delta i_s} = \operatorname{tg} \alpha_s \quad (1.1)$$

Funcție de acest parametru deosebit:

- sursă cu caracteristică pronunțat cazatoare (abrupt cazatoare), dacă $\alpha_{s1} > 90^\circ$, deci $R_{sd} < 0$. Orientativ, pentru ca o sursă să fie considerată cu caracteristică pronunțat cazatoare, valoarea absolută a rezistenței diferențiale trebuie să fie mai mare de 0,07 V/A, în vecinătatea punctului de funcționare, în regim normal de sudare;
- sursă cu caracteristică rigidă dacă $\alpha_{s2} \approx 0$ și deci $R_{sd} \approx 0$. Se considera uneori ca surse cu caracteristică rigidă și acelea la care valoarea absolută a rezistenței diferențiale e mai mică decât 0,07 V/A;
- sursă cu caracteristică urcătoare (ridicătoare) dacă $\alpha_{s3} < 90^\circ$, $R_{sd} > 0,02 \div 0,03$ V/A.

Sursele destinate sudării manuale cu electrod au o caracteristică coborâtore.

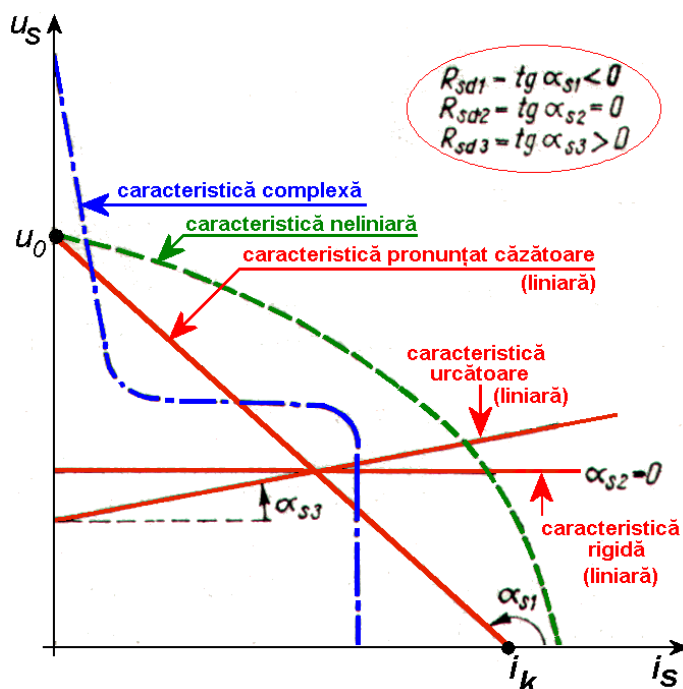


Fig.1.3. Caracteristici statice ale surselor de sudare cu elementele definitorii

Plăcuțe indicatoare

Sursele de curent vin din dotare prevăzute cu plăcuțe indicatoare ce dau, succint, informațiile necesare utilizatorului, figura 1.4. Acestea sunt standardizate, SR EN 60974-1:2006. Conform standardului, aceste plăcuțe pot fi denumite și etichete, neputând fi șterse.

Plăcuțele indicatoare sunt împărțite în trei registre: primul registru (casetele de la 1...7) conțin informații privind producătorul (nume, tip utilaj, etc.), cuprinse sub denumirea de *identificare*.

Cel de al doilea registru oferă utilizatorului informații privind procesul de sudare, purtând numele de *ieșire pentru sudare*. Caseta 7 figurează tipul de caracteristică a utilajului; caseta 8 simbolizează procedeul de sudare căruia îi este destinată sursa. Caseta 9 conține informații privind domeniul de reglare (valori minime – maxime ale curentului de sudare și tensiunile de lucru corespunzătoare), precum și durata activă recomandată pentru fiecare caz. Caseta 10 informează asupra frecvenței de lucru și caseta 11 valoarea valorile tensiunii de mers în gol. Casetele 12, 13 și 14 conțin detalii privind parametri de lucru – curent, tensiune, corespunzători diferitelor valori ale duratei active.

Al treilea registru conține detalii privind modul de *alimentare* al sursei. Caseta 15 – tipul prizei: monofazat sau trifazat; 16 – turația motorului (acolo unde este cazul) 17 – puterea; 18 – tensiunea, frecvența rețelei; 19 – curentul minim-maxim corespunzător puterii aparente; 20 - tip de răcire; 21 – gradul de protecție.

În figura 1.5 sunt prezentate, pentru comparație, plăcuța indicatoare pentru un convertizor, figura 1.5.a, iar în figura 1.5.b pentru un transformator.

1 Producator		2				
3 Tip		4 Numarul de fabricatie				
5 Proiect		6 Test standard				
7 Caracteristici		9 Domeniu de setare				
		10	12	12a	12b	12c
8 Procese		11	13	13a	13b	13c
			14	14a	14b	14c
15		Priza				
16		18	19	19a	19b	19c
17						
Clasa izolarii						
20		21 Sistem de Protectie	22		23	

Fig. 1.4. Plăcuța indicatoare conform SR EN 60974-1:2006

type:		fabrication number:			
		EN 60 974-1			
	15 A / 20.5 V - 200 A / 28 V				
	~ 420 Hz	X	%	60%	100 %
	U _s V	I _s		200 A	150 A
	60	U _s		28 V	26 V
	cos φ 0.82 (200 A)				
	U _s V	I _s A	I _s 33 A	I _s 16.5 A	
	220		19	9.5	
n 2800 U/min	380				
P _i (60%) 3.9 kW	50 Hz				
I, K _L H					
type of cooling AF	IP 21				

a

type: TRM 501		fabrication number:			
		EN 60 974-1			
	60 A / 22.4 V - 500 A / 40 V				
	~ 50 Hz	X	35%	60%	100 %
	U _s V	I _s		500 A	380 A
	70...78	U _s		40 V	35 V
	cos φ 0.84 (150 A)				
	U _s V	I _s	164 A	113 A	87 A
	220		95 A	65 A	50 A
type of cooling AF	50 Hz	S _i	36.1 kVa	24.7 kVa	19 kVa
I, K _L H					
Q 9.2 kvar	IP 22				

b

Fig. 1.5 Plăcuțe indicatoare pentru: a. convertizor de sudare; b. transformator pentru sudare

Versiunea revizuită, SR EN 60974-1:2013^(*), vine cu un număr de modificări, cea mai vizibilă fiind acceptarea fragmentării plăcuței și poziționarea separată a celor trei registre. Pentru comparație, mai jos sunt prezentate cele trei domenii, în formula modificată.

Identificare

1). Producător (nume, adresă, fabricant, distribuitor sau importator; opțional marcă comercială și țara de origine)	
2). Tip utilaj (conform catalogului fabricii)	3). Număr serie (trasabilitate)
4). Opțional simbol sursă (Tabel 1.1.A)	5). Trimitere la standardul cu care trebuie verificată conformitatea

Ieșire

6). Simbol procedeu (Tabel 1.2.A)	8). Simbol curent (Tabel 1.3.A)	10). Curent sudare minim/tensiunea corespunzătoare Curent sudare maxim/tensiunea corespunzătoare			
		11). Simbol durată de acționare (activă)	11.a) Durata activă corespunzătoare $I_s \max$	11.b) 60%	11.c) 100%
7). (*)	9). Tensiunea de mers în gol	12). I_s	12.a)	12.b).	12.c).
		13). U	13.a).	13.b).	13.c).

7). (*) Doar sursele adecvate lucrului în medii predispușe la șocuri electrice

Alimentare

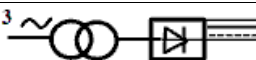
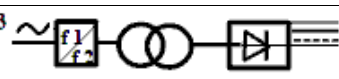
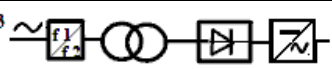
14). Circuit alimentare	Electric	15). Tensiunea alimentare nominală	16). Curent alimentare maxim	17). Curent alimentare efectiv
	Motor	18). Turația motor la sarcină nominală	19). Turația motor la mers în gol	20). Puterea maximă consumată
22). Grad de protecție (Ex.: IP2)				

Semnificația simbolurilor utilizate pentru gradele de protecție

Protecție	Prima cifră (protecție împotriva corpurilor străine și a atingerii)	A doua cifră (protecție împotriva umidității)
0	Neprotejat	Neprotejat
1	Protejat împotriva corpurilor străine solide mai mari de 50 mm	Protejat împotriva apei care picură
2	Protejat împotriva corpurilor străine solide mai mari de 12 mm	Protejat împotriva apei care picură sub 15 grade
3	Protejat împotriva corpurilor străine solide mai mari de 2,5 mm	Protejat împotriva jeturilor pulverizate de apă
4	Protejat împotriva corpurilor străine solide mai mari de 1mm	Protejat împotriva jeturilor de apă
5	Protejat împotriva prafului	Protejat împotriva jeturilor directe de apă
6	Etanș la praf	Protejat împotriva scufundărilor în apă
7	-	Protejat împotriva urmărilor scufundărilor
8	-	Protejat împotriva imersiunilor

Tabel 1.1.A

Simbolizarea principalelor tipuri de surse

Schița sursei	Denumirea
	Transformator monofazat
	Transformator – redresor trifazat
	Motor generator trifazat
	Transformator – redresor cu convertizor de frecvență mono sau trifazat
	Sursă de curent cu invertoare cu ieșire curent continuu și curent alternativ

Tabel 1.2.A

Simbolizarea principalelor procedee de sudare

Simbol procedeu	Denumire
	Sudare manuală cu arc electric cu electrod învelit
	Sudare în mediu de gaz inert/activ cu electrod fuzibil
	Sudare în gaz inert cu electrod nefuzibil (wolfram)
	Sudare cu arc electric cu sârmă autoprotectoare
	Sudare sub strat de flux

Tabel 1.3.A

Simbolizarea variantelor de curent

Simbol	Denumire
	Curent continuu
	Curent alternativ (se explică frecvența, în hertzi)
	Curent continuu sau alternativ la aceeași ieșire

Orice echipament este proiectat pentru a asigura un curent de sudare nominal pe o durată determinată. Pe durata funcționării, echipamentul se încălzește, ceea ce poate duce în timp la degradarea sistemului de redresare (diode) sau arderea izolațiilor din circuit. În cazul

echipamentelor de sudare, cu excepția celor robotizate, nu este posibil de lucrat continuu. Totdeauna este necesară întreruperea lucrului pentru schimbarea sârmei, a buteliilor, pregătirea pieselor și a rostului, etc. Totuși, se definește durata activă corespunzătoare unui număr de curenți de sudare.

Durata relativă de acționare

Se numește *durată relativă de acționare*, *durată activă*, raportul dintre durata de sudare efectivă și timpul total de lucru pentru un interval de timp dat și se exprimă procentual. Perioadele de pauză permit echipamentului să se răcească, pe durata lucrului, temperatura echipamentului menținându-se sub valoarea periculoasă și astfel este evitată deteriorarea echipamentului. Pentru echipamentele de sudare, intervalul de timp este de 10 minute. Un echipament ce are o durată de 60% poate lucra continuu 6 minute, urmate de o pauza de 4 min.

Relația care permite determinarea duratei active DA'' pentru o valoare a curentului $I_{DA''}$ diferită de cea furnizată de producător, I_{DA} , este:

$$I_{DA''} = I_{DA} \cdot \sqrt{\frac{DA}{DA''}} \quad (1.2)$$

Exemplu:

Să se calculeze intensitățile pentru DA 45% și 100%, dacă echipamentul vine cu specificația 60% la 500A (**R**: 577 A respectiv 387 A).

1.2 Studiul constructiv și analiza funcționării utilajelor existente

- Se vor identifica părțile componente ale surselor - transformator de sudură și convertizor de sudură din dotarea laboratorului.
- Se va ridica caracteristica statică a convertizorului.
- Se va urmări influența alegerii regimului de sudare (trepte de reglare) asupra configurației sudurii.
- Se vor analiza practic atitudinile incorecte din punct de vedere al normelor de securitate în muncă.

Transformator sudură

Principial, transformatorul lucrează pe baza fenomenului de inducție magnetică. O bobină parcursă de un curent variabil induce un câmp magnetic variabil în miezul său, câmp magnetic ce induce la rândul său într-o altă bobină dispusă pe același miez o tensiune electromotoare. Relația dintre tensiunile din primar, U_p , și secundar U_s și numărul de spire al celor două bobine este:

$$\frac{U_s}{U_p} = \frac{N_s}{N_p} \quad (1.3)$$

Energia posibil de transferat prin fenomenul de inducție depinde următoarele elemente:

$$E_{med} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot N \cdot a \cdot B}{\sqrt{2}} \approx 4,44 \cdot f \cdot N \cdot a \cdot B \quad (1.4)$$

în care - frecvența utilizată în circuit; N – numărul de spire; a – secțiunea miezului; B – inducția magnetică. Importanța acestei relații este dată de capacitatea transferului unei cantități mai mari de energie pentru o frecvență sporită. Este dependența ce se găsește la baza surselor moderne, de gabarit redus, în care creșterea frecvenței permite reducerea secțiunii întrefierului și, în consecință, reducerea gabaritului transformatorului.

Caracteristici

- Domeniul de reglare al regimului de lucru: 70 A/22 V-400 A/30 V
- Reglare curent sudare: continuă, prin modificarea întrefierului;
- Tensiunea de mers în gol: 60 V
- Tensiune de alimentare: 380V
- Frecvența curentului de alimentare: 50Hz

Procedura de lucru

- se verifică existența legării la pământ a transformatorului;
- se verifică izolația cablurilor de legătură și contactelor;
- legarea clemei de contact (masă) se va face cât mai aproape de viitoarea îmbinare. Prinderea acesteia pe materialul de sudat trebuie să fie fermă, evitând astfel formarea de arce parazite pe durata sudării;
- se alimentează transformatorul prin contactorul de perete;
- cu masca de mână sau cea de cap poziționată în dreptul feței se amorsează arcul;
- se efectuează operațiunea de sudare solicitată;
- se întrerupe arcul electric prin îndepărtarea ușoară a electrodului de piesa de sudat;
- se închide alimentarea transformatorului din contactor.

Convertizor sudură

Caracteristici tehnice

- Domeniul de reglare al regimului de lucru: 50 A/22 V-370 A/34 V
- Numărul treptelor de reglare brută: 4
- Numărul treptelor de reglare fină: 10
- Tensiunea de mers în gol: 65 V
- Puterea motorului de acționare: 14kW
- Turația: 1450 rot/min.

Procedura de lucru

Înainte de pornirea convertizorului de sudare se verifică obligatoriu următoarele:

- se verifică dacă comutatorul stea-triunghi este pe poziția zero (0);
- se verifică existența legării la pământ a utilajului;
- se verifică izolația cablurilor de legătură și contactelor;

- să nu existe scurtcircuit între port electrod și cablul de întoarcere.

Este interzisă conectarea convertizorului de sudare în circuitul de alimentare, dacă nu s-au făcut aceste verificări. Se execută în continuare următoarele operații:

- legarea clemei de contact (masă) se va face cât mai aproape de viitoarea îmbinare. Prinderea acesteia pe materialul de sudat trebuie să fie fermă, evitând astfel formarea de arce parazite pe durata sudării;
- se conectează întrerupătorul automat de protecție;
- se pornește convertizorul acționând comutatorul stea-triunghi din poziția (0) în poziția stea (Y), se așteaptă până ce turația devine constantă, apoi se comută pe poziția triunghi (Δ);
- se stabilește polaritatea circuitului de sudare ;
- se stabilește domeniul de reglaj și valoarea curentului de sudare prin intermediul comutatoarelor de reglare brută, respectiv fină. Manevrarea acestor comutatoare în timpul sudării sau în cazul apariției unui scurtcircuit este interzisă.
- oprirea convertizorului se realizează prin fixarea comutatorului stea-triunghi în poziția zero (0) și apoi se scoate convertizorul de sub tensiune.

Instrucțiuni de securitatea muncii

Înainte de începerea lucrului se va verifica legarea la pământ a transformatorului/convertizorului;

- nu se vor utiliza cabluri sau clești portelectrod necorespunzători sau cu învelișul izolant deteriorat;
- nu se intervine pentru remedierea defecțiunilor cu aparatele sub tensiune;
- pe durata operațiunii de sudare, la întreruperi operaționale, cleștele portelectrod va fi așezat în suportul special;
- pentru efectuarea operațiunilor de sudare se va folosi echipamentul de protecție adecvat (mască, șorț, mănuși);
- nu se sudează lângă materiale inflamabile;
- piesele sudate, calde, vor fi dispuse departe de căile de acces; se evită astfel producerea arsurilor.

Câmpurile electric și magnetic

Un curent electric ce străbate un conductor generează un câmp local de natură electromagnetică. Efectul asupra organismului uman a acestor câmpuri este încă în studiu la nivel mondial. Deși nu există deocamdată o opinie coerentă, se recomandă reducerea expunerii la acest tip de acțiune prin următoarele măsuri:

- se recomandă gruparea cablurilor de masă și de lucru; eventual se propune solidarizarea lor cu bandă adezivă;
- sursa, cablul de alimentare și cablurile(de lucru și de masă) vor fi dispuse cât mai departe posibil de operator;
- nu se înfășoară niciodată cablul în jurul corpului;

- legătura la piesa de sudat a clemii de masă va fi realizată cât mai aproape de zona de sudat;
- nu vor fi acceptate în zona de lucru persoanele cu pacemaker;
- la încheierea lucrului și decuplarea sursei de la rețea în vederea întreținerii/intervenției la utilaj, se va aștepta minimum 5 minute datorită prezenței condensatorilor (există pericolul descărcării condensatorului prin operator). După acest interval de timp tensiunea de la bornele condensatorilor atinge valori sub 35V, nepericuloase pentru om.

Condiții de lucru recomandate pentru sursele obișnuite

- se poate suda în condiții normale la o altitudine sub 1000m;
- temperatura recomandată este cuprinsă între -10...+40 °C;
- umiditatea relativă mai mică de 90%;
- suprafața de sprijin a sursei este preferabil să fie orizontală; se acceptă înclinații de maximum 15 grade;
- sursa va fi protejată de factorii meteorologici excesivi (ploaie puternică, soare);
- se va lucra în mediu lipsit de exces de praf, gaze corozive sau alte substanțe potențial periculoase (conținutul în acestea se va încadra în limitele recomandate de standard, incluse în plăcuța indicatoare);
- se va asigura o ventilație suficientă a sursei pe durata lucrului (min 30 cm între mașină și perete).

1.3 Modul de lucru

Se vor porni echipamentele după verificarea și parcurgerea tuturor elementelor cuprinse în procedură.

Se vor realiza două suduri – depuneri pe probe cu reglaje diferite, câte două pentru fiecare utilaj.

Referatul întocmit la încheierea lucrării va conține observații legate de aspecte subiective ale funcționării echipamentelor (zgomot, aspect arc, nivel stropiri, etc.). Se vor interpreta elementele incluse pe etichetele utilajelor. Se va calcula durata activă pentru valorile de curent utilizate practic.

De asemenea, se va trasa pe hârtie milimetrică caracteristica statică a sursei de sudare, datele necesare fiind prezentate în tabelul 1.4. Cu ajutorul datelor corespunzătoare tensiunilor de 40, respectiv 30V se vor calcula, în condițiile prezentate, rezistența diferențială a sursei și panta caracteristicii statice externe, pentru $u = 40V$ trebuind să se mai calculeze durata activă (rezultatele obținute se vor trece în tabelul 1.5).

Tabelul 1.4. Date necesare construirii caracteristicii statice a sursei de sudare

Nr.apl.	DA, %	i _{DA} , A	u, V	60	50	40	30	20	10	0
1.1	35	500	i, A	0	276	373	433	471	493	500
1.2	60	380		0	249	335	390	424	444	450
1.3	35	500		0	221	298	346	377	394	400
1.4	60	380		0	193	261	303	330	345	350
1.5	100	200		0	166	224	260	283	296	300
1.6	100	150		0	138	186	217	236	247	250

Tabelul 1.5. Rezultate calculate pentru aplicația:.....

R _{sd} , Ω	
α _s , grade	
DA'', %	

Bibliografie selectivă

1. Gheorghiu D.A. et al, Lucrări practice de sudură. Îndrumar pentru lucrări de laborator, Ed. PIM, Iași, 2021
2. <http://www.emil.matei.ro>

LUCRAREA Nr. 2

DETERMINAREA ANALITICĂ ȘI EXPERIMENTALĂ A DIMENSIUNILOR ZIT ȘI ESTIMAREA TEORETICĂ A VITEZEI DE RĂCIRE

Lucrarea își propune fixarea noțiunilor de câmp termic și de ciclu termic, sublinierea diferențelor și dependențelor existente între cele două noțiuni și cunoașterea parametrilor termici specifici sudării, cu evidențierea analitică și experimentală a distribuției de temperaturi din părțile de îmbinat pe durata procesului.

2.1 Noțiuni introductive

Majoritatea procedeele de sudare implică încălzirea zonelor de îmbinat ca o condiție a obținerii unei stări energetice specifice – creșterea locală a energiei atomilor periferici în vederea stabilirii noilor legături, fenomen cunoscut ca activarea atomilor.

În cazul îmbinărilor sudate prin topire, materialele din viitoarea cusătură suportă transformări de faze fizice (solid – lichid – solid), modificări de faze metalurgice, modificări chimice, modificări de volum, etc. Toate aceste modificări sunt consecința variațiilor de temperatură, variații ce au loc într-un volum restrâns, în prezența unui gradient termic extrem de intens. Ca urmare a acestei succesiuni de transformări, după încheierea procesului de sudare, îmbinarea prezintă o morfologie și proprietăți diferite de cele ale metalului intrat în proces, îmbinarea reprezentând astfel o zonă ce necesită o atenție sporită.

Evaluarea distribuției temperaturilor în zona îmbinării permite identificarea parametrilor termici din zonă și, astfel, estimarea efectelor post sudare și corectarea lor, atunci când e cazul, prin acțiuni corespunzătoare din punct de vedere tehnologic.

Transferul termic de la o sursă la un corp în condiții reale este asimilabil unui sistem termodinamic deschis, adică este variabil în timp, ireversibil și generează în corp o stare specifică, un câmp energetic descris de distribuția *instantanee* de temperaturi, distribuție ce definește câmpul termic obținut în procesul de încălzire/răcire, respectiv de sudare.

Câmpul termic

Câmpul termic reprezintă totalitatea valorilor instantanee ale temperaturii în spațiul de interes, formularea matematică fiind o funcție de spațiu și timp ce poate fi exprimată în toate sistemele de coordonate cunoscute (cartezian, cilindrice etc.). Pentru cazul coordonatelor carteziene, cele utilizate în continuare, formularea generală a câmpului termic este:

$$T = f(x, y, z, t) \quad (2.1)$$

Teoretic, funcție de comportarea în timp, câmpul termic poate fi staționar sau nestaționar. În cazul în care temperatura într-un punct nu variază cu timpul, câmpul termic corespunzător este de tip staționar. În realitate nu există un câmp staționar, temperatura variază în timp, câmpul termic fiind nestaționar.

Analizând figura 2.1 pentru cazul sudării, se poate intui faptul că în punctul de start modul de variație al temperaturii va fi diferit de modul de variație dintr-un punct, după un timp t_n . Dacă rămânem observatori pe poziția de start, câmpul termic va fi în continuă schimbare de-a lungul întregii cusături. Deci, dacă ne raportăm la sistemul Oxyz distribuția temperaturilor va fi în permanentă mișcare. Dacă ne raportăm însă la sistemul O'wyz, asociat sursei, atunci câmpul de temperaturi va atinge la un moment dat un pseudoechilibru față de acest sistem, ceea ce ușurează sensibil identificarea distribuției de temperaturi.

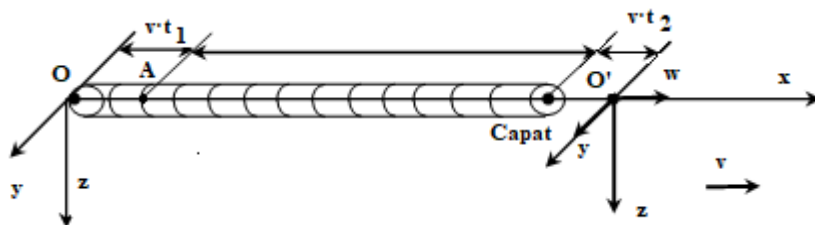


Fig 2.1. Sistemele de coordonate atașate cusăturii / sursei pentru stabilirea câmpului termic

Pentru o îmbinare suficient de lungă se pot identifica trei situații distincte: distanța $OA = v \cdot t_1$, regim nestaționar (punctul O, punct de pornire a arcului, încălzirea și formarea băii), zona de cvasiechilibru, după depășirea punctului A, și zona de capăt, unde răcirea se produce diferit de zonele aflate sub influența sursei în deplasare.

Reprezentarea grafică, intuitivă, a câmpului termic se realizează cu ajutorul izotermelor – liniile de temperatură egală, figura 2.2.

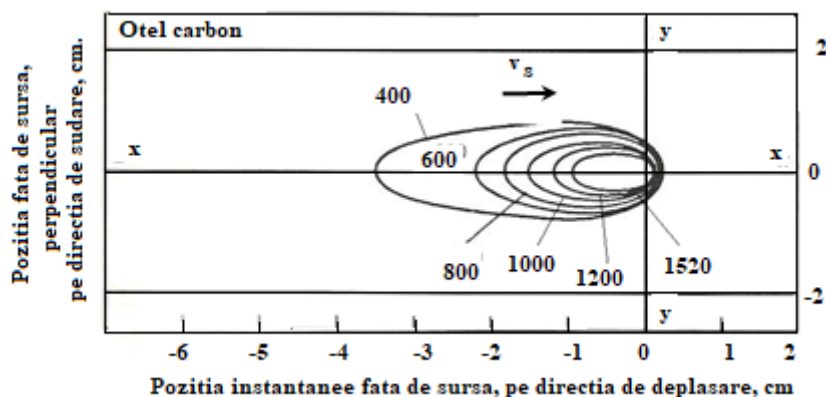


Fig. 2.2 Curbe izoterme în planul paralel cu suprafața piesei. Sudură pe oțel carbon cu o sursă de putere 4,2kJ/s și viteză de sudare 1mm/s

Pentru un câmp termic *staționar*, izotermele își vor menține forma și poziția relativă în timp și spațiu față de sistemul de referință mobil. Datorită acestei caracteristici se poate demonstra că locul geometric al limitelor izotermelor este o dreaptă paralelă cu axul

cusăturii. În cazul câmpului nestaționar forma și/sau poziția acestora vor fi diferite la momente și poziții diferite, indiferent de sistemul de referință. Regimul nestaționar este caracteristic cusăturilor scurte, etapelor de începere a sudurii respectiv celei de încheiere a sudurii. Regimul poate fi considerat staționar pentru cusături lungi, unde este posibilă atingerea stării de echilibru între căldura introdusă în cusătură și căldura pierdută în masa metalului.

În procesele de sudare prin topire se consideră semnificativ transferul termic prin conducție (între două corpuri solide aflate în contact), transfer descris matematic de legea lui Fourier:

$$q = \frac{dQ}{dA \cdot dt} = -\lambda \cdot \text{grad}T \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (2.2)$$

unde: q – densitatea de flux termic; dQ - cantitatea elementară de căldură; dA – elementul de suprafață prin care are loc transferul de căldură; dt – durata transferului; $\frac{dT}{dn}$ - gradientul de temperatură (variația de temperatură pe direcția normală la suprafață); λ - conductivitatea termică a materialului. Deci, fluxul termic este proporțional cu cantitatea de căldură ce tranzitează suprafața în intervalul de timp dat sau este proporțională cu gradientul de temperatură și cu conductivitatea termică, caracteristică de material.

Formularea completă a ecuației transferului termic în cazul sudurii are forma:

$$\nabla(\lambda \Delta T) + \rho c_p v \frac{\partial T}{\partial w} + Q = \rho c_p v \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.3)$$

Relația (2.3) descrie fenomenele termice din zona sudurii, ținând cont de mobilitatea sursei, v – viteza de sudare, și de posibila generare de căldură suplimentară în materialele de îmbinat, Q . Astfel, variația de temperatură în spațiul înconjurător prin fenomenul de conducție, $\nabla(\lambda \Delta T)$, de la baia lichidă, va fi influențată de variația de temperatură datorată sursei în mișcare și de căldura dezvoltată în circuitul format între baia lichidă (vârful electrodului) și clema ce asigură închiderea circuitului de sudare (încălzire prin efect Joule – Lenz). Temperatura instantanee, soluția ecuației pentru un punct și moment dat, va fi rezultatul acestui complex de fenomene simultane.

Rezolvarea ecuației, nu ușoară, permite stabilirea temperaturii instantanee, a câmpului termic, în diferite puncte și la momente diferite. Aplicând condițiile corespunzătoare se pot determina parametrii ciclului termic.

Ciclul termic

Ciclul termic reprezintă suma modificărilor de temperatură suportate de un corp într-un timp dat.

Orice ciclu termic este caracterizat de următorii parametri: timp de încălzire (t_{inc}), temperatură maximă atinsă (T_{max}), timpul de menținere la temperatura maximă (t_{ment}), timp de răcire, variabil în funcție de tehnologie, figura 2.3.a.

În cazul sudării, ciclul termic este extrem de dinamic, iar gradientul termic, diferența de temperatură dintre două puncte, foarte mare, figura 2.3.b.

Pentru determinarea parametrilor ciclului termic se folosesc relațiile obținute din ecuația transferului termic conductiv, folosind simplificările și condițiile inițiale adecvate. Problema este că aceștia diferă consistent pe distanțe mici.

Particularitățile parametrilor ciclului termic la sudare introduc o serie de influențe asupra echilibrului termodinamic din zona încălzită, cu efecte asupra transformărilor suferite.

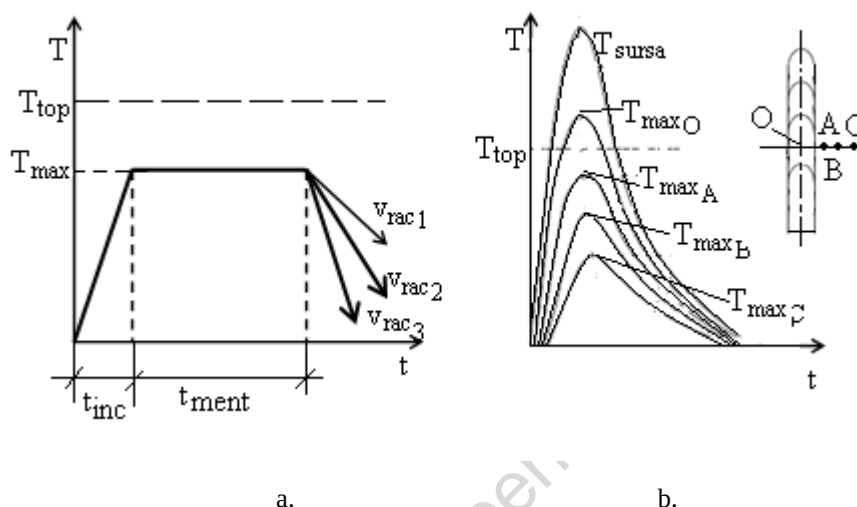


Fig. 2.3 Schematizarea ciclului termic pentru diferite procese tehnologice: a. Ciclul termic pentru procese lente, ce impun încălziri în toată masa materialului (tratamente termice, încălzire pentru deformare plastică); b. ciclul termic pentru sudare, cu prezentarea variațiilor de temperatură în secțiunea transversală a îmbinării

Parametrii ciclului termic - caracteristici

Viteza de încălzire, $v_{inc} = \frac{\Delta T}{\Delta t}$, cu valori foarte mari, se poate considera încălzire instantanee, are ca efect incapacitatea materialului de a răspunde structural în acord cu temperatura atinsă. Ca urmare punctele critice sunt depășite fără ca unele procese metalurgice, ce se desfășoară lent, controlate de difuzie, să se manifeste. Se spune că punctele critice sunt deplasate spre temperaturi mai mari. Determinarea analitică a vitezei de încălzire se face calculând derivata ecuației în funcție de timp.

Temperatura maximă atinsă determină structura obținută la temperaturi înalte și implicit permite estimarea structurii de pornire la răcire, cu rol determinant în stabilirea constituenților ce vor exista la temperatura ambiantă imediat după sudare.

Analitic, temperatura maximă se determină punând condiția ca derivata în punctul considerat să fie egală cu zero.

Timpul de menținere la o temperatură dată, respectiv la temperatură maximă, este determinant pentru nivelul de transformare al structurii existente la temperatură joasă, deoarece va dicta gradul de omogenizare al structurii de pornire la răcire. Timpul de menținere la sudare pierde din importanță datorită duratei reduse, figura 2.3.b.

Viteza de răcire este cea care dictează, alături de temperatura maximă, tipul de structură de temperatură joasă.

Viteza de răcire rezultă analitic din derivarea ecuației în forma generală (2.3). Soluția simplificată, pentru un corp masiv este:

$$v_{rac} = -2\pi\lambda(T - T_0)^2 \cdot \left(\frac{\eta \cdot U_a \cdot I_s}{v_s}\right)^{-1} = -2\pi\lambda(T - T_0)^2 \cdot E_l^{-1} \quad (2.4)$$

În relația de mai sus λ – conductibilitatea termică a metalului; T – temperatura de la care pornește răcirea; T_0 – temperatura inițială a materialului de sudat; U_a - tensiunea arcului; I_s - curentul de sudare; η – randamentul procedeului; v_s – viteza de sudare; E_l – energia liniară, mărime de legătură între parametri definiți anterior. Ecuația (2.4) demonstrează influența mărimii gradientului termic și a energiei liniare asupra valorii vitezei de răcire.

Parametri folosiți pentru caracterizarea ciclului termic la sudare

Viteza de răcire nu variază liniar, figura 2.3; caracteristic este „apropierea” vitezelor de răcire, omogenizarea temperaturilor în zona îmbinării după parcurgerea intervalului de temperaturi înalte. Deoarece diferențele de temperatură se manifestă într-un spațiu extrem de mic, iar la temperaturi relativ joase diferențele se estompează, în locul vitezei de răcire, dificil de stabilit punctual, s-a introdus o mărime convențională, *timpul de răcire* pentru intervalul de temperaturi decisiv pentru structura finală.

În cazul sudării oțelului carbon sau oțeluri slab aliate, intervalul de interes este zona transformării austenitei, respectiv răcirea sub 800°C (se consideră subrăcirea necesară amorsării transformării) până în domeniul stabilității minime a austenitei, respectiv 500°C, timpul astfel definit fiind cunoscut ca $t_{8/5}$.

Un rol esențial în desfășurarea răcirii îl joacă grosimea materialului, prin modul în care asigură evacuarea căldurii. În cazul semifabricatelor subțiri căldura este degajată pe cele două laturi – propagare bidimensională. Semifabricatele groase transferă căldura și pe grosimea materialului, propagare tridimensională, produsele fiind considerate corp masiv.

Relația de calcul pentru cazul propagării tridimensionale a căldurii este:

$$t_{8/5} = \frac{1}{2\pi\lambda} E_l \left(\frac{1}{500 - T_0} - \frac{1}{800 - T_0} \right) \cdot F_f [s] \quad (2.5)$$

unde se păstrează simbolurile din ecuația anterioară, F_f fiind un factor de formă a sudurii.

Pentru cazul corpului cu propagare bidimensională a căldurii, plăci subțiri, timpul de răcire se obține cu ajutorul relației:

$$t_{8/5} = \frac{1}{4\pi\lambda c_p \rho} \cdot \left(\frac{E_l}{s}\right)^2 \left[\left(\frac{1}{500 - T_0}\right)^2 - \left(\frac{1}{800 - T_0}\right)^2 \right] \cdot F_f \quad (2.6)$$

În relație intervin caracteristicile termofizice ale metalului, c_p – căldura specifică la presiune constantă, ρ – densitatea metalului; s – grosimea plăcii.

Stabilirea relației utilizate depinde de grosimea materialului de bază. Pentru selecția adecvată se introduce noțiunea de *grosime de tranziție* sau *grosime relativă* a piesei:

$$\delta_c = \left[\frac{E_l}{2\rho c_p} \cdot \left(\frac{1}{500 - T_0} + \frac{1}{800 - T_0} \right) \right]^{0,5} \quad (2.7.a)$$

$$\delta = s \left[\rho \cdot c_p (T_{crt} - T_0) \frac{1}{E_l} \right]^{1/2} \quad (6.7.b) \quad (2.7.b)$$

Grosimea relativă reprezintă o mărime ce stabilește cât mai nuanțat modul de transfer al căldurii, stabilind o legătură între dimensiunea materialului și tehnica de lucru. Există pentru stabilirea modului de transfer termic în placă două moduri de definire a acesteia, relațiile 2.7.a și 2.7.b. Relația 2.7.a oferă, după rezolvarea în condițiile tehnologice preliminate, valoarea grosimii critice. Dacă $s < \delta_c$ timpul de răcire se va calcula pentru transfer bidirecțional (placă subțire); dacă $s > \delta_c$ timpul de răcire se va calcula pentru cazul corpului infinit. În cazul relației 2.7.b soluția este de tip coeficient, adimensional. Pentru valori ale grosimii relative astfel calculate mai mici decât 0,75 îmbinarea se consideră realizată pe material subțire; pentru determinarea timpului de răcire se utilizează relația (2.6). Pentru valori cuprinse între 0,75...1,0 se va utiliza relația(2.5), placa fiind asimilabilă cu un corp infinit.

Deoarece grosimea relativă nu ține cont de *tipul* sudurii și implicit de căile de evacuare ale căldurii, standardele introduc coeficienți diferiți în funcție de tipul sudurii și grosimea critică a materialelor, tabelul 2.1.

Relațiile de calcul pentru timpii de răcire recomandate de SR EN 1011-2:2004, standard din care este extras tabelul 2.1, pentru oțelurile carbon și oțelurile slab aliate, sunt următoarele:

- pentru plăci groase, propagare tridimensională:

$$t_{8/5} = (6700 - 5 \cdot T_0) \cdot E_l \cdot \left(\frac{1}{500 - T_0} - \frac{1}{800 - T_0} \right) \cdot F_3 [s] \quad (2.8)$$

- pentru plăci subțiri, propagare bidimensională:

$$t_{8/5} = (4300 - 4,3 \cdot T_0) \cdot 10^5 \left(\frac{E_l}{s} \right)^2 \left[\left(\frac{1}{500 - T_0} \right)^2 - \left(\frac{1}{800 - T_0} \right)^2 \right] \cdot F_2 \quad (2.9)$$

Pentru relațiile 2.8 și 2.9 energia liniară este exprimată în kJ/mm.

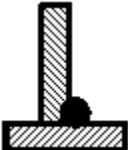
Stabilirea timpului de răcire în intervalul critic caracteristic fiecărui material ($t_{8/5}$ este timpul caracteristic pentru oțelurile carbon sau slab aliate) pentru zona sudată permite aprecierea anticipată a transformărilor structurale, ceea ce permite adoptarea unei tehnologii capabile să asigure cerințele impuse în exploatare.

Studiul teoretic, analitic, al distribuției temperaturilor permite, prin stabilirea convenabilă a condițiilor la limită, estimarea modului în care se vor desfășura procesele metalurgice din zona de interes. Dintre acestea, importanță deosebită se acordă cunoașterii:

- distribuției de temperaturi din ZIT;
- dimensiunile ZIT, mai cu seamă amplasarea zonelor unde se ating temperaturi critice;
- stabilirea vitezei de răcire.

Tabelul 2.1

Influența formei sudurii asupra timpului de răcire $t_{8/5}$

Forma sudurii	Schița	Factor de formă	
		F2, propagare bidimensională	F3, propagare tridimensională
Depunere, un rând pe placă		1	1
Între diferite treceri, sudură cap la cap		0,9	0,9
Sudură în colț, o singură trecere, îmbinare interioară		0,9...0,67	0,67
Sudură în colț, o singură trecere, îmbinare în T		0,45...0,67	0,67

2.2 Stabilirea analitică a unor caracteristici ale câmpului și ciclului termic în sudură

Deoarece rezolvarea ecuației câmpului termic este dificilă s-au elaborat, pe baza soluțiilor ecuației, în condiții bine definite, relații mult mai simple, de uz practic. Aplicarea acestor ecuații simplificate permite estimarea unor mărimi de interes, chiar dacă nu ajunge într-un acord perfect cu situația experimentală. O astfel de ecuație cu grad redus de complexitate este (2.10). Cu ajutorul acestei relații pot fi stabilite, în funcție de condițiile impuse de tehnologie, o serie de elemente ce caracterizează distribuția temperaturilor în zona sudată.

$$\frac{1}{T_M - T_0} = \frac{4,13 \cdot c_p \cdot s \cdot \rho \cdot Y}{E_l} + \frac{1}{T_{top} - T_0} \quad (2.10)$$

În relația (2.10) termenii întâlniți anterior își păstrează semnificațiile. Elementele nou apărute sunt: T_M – temperatura unui punct M, ales în funcție de scopul pentru care este necesară analiza, aflat la distanța „Y” de limita băii lichide; T_{top} – temperatura convențională de topire a aliajului de sudat. Reprezentarea schematică a mărimilor cuprinse în relația (2.10) este în figura 2.4.

Termenii T_{top} – temperatura de topire a materialului / aliajului de bază, ρ – densitatea materialului, $[g/mm^3]$, c_p – căldura specifică a materialului, $[J/g^\circ C]$; s – grosimea materialului, $[mm]$ sunt caracteristici de material sau caracteristici de material impuse de proiectare/situația existentă (grosimea de material).

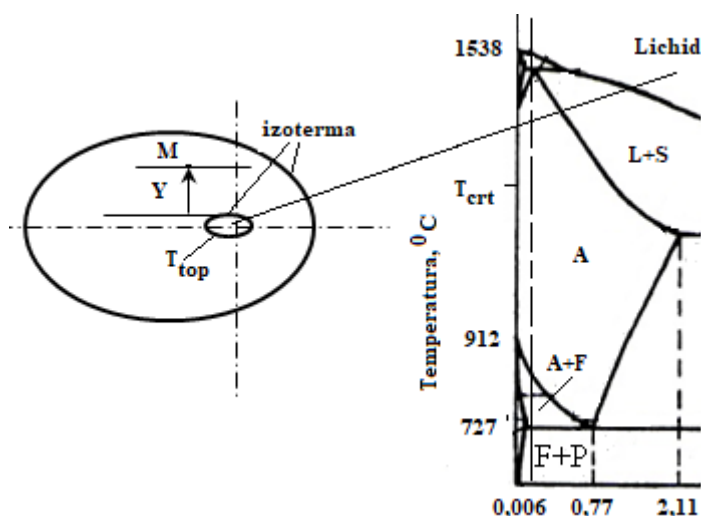


Fig. 2.4 Reprezentarea schematică a elementelor ce definesc poziția punctului „M” din relația (2.10), în corelație cu diagrama fier-carbon.

Termenul E_l este cunoscut sub denumirea de energie liniară și reprezintă energia netă introdusă în cusătură, fixată tehnologic. Relația de calcul este:

$$E_l = \eta \frac{U_a \times I_s}{v_s} \left[\frac{J}{mm} \right] \quad (2.11)$$

relație în care U_a este tensiunea arcului, măsurată în [V]; I_s – curentul de sudare, [A], η – randamentul (depinde de procedeu), v_s – viteza de sudare. Energia liniară reprezintă parametrul tehnologic sintetic pentru o situație practică dată.

Ecuția (2.10) permite, în funcție de elementele cunoscute, determinarea:

- Distanței la care se atinge o anumită temperatură maximă în ZIT;
- Temperaturii maxime pe care o atinge un punct oarecare din ZIT;
- Modificarea poziției izotermelor de interes datorită preîncălzirii.

Prin impunerea unei anumite dimensiuni a ZIT (Y impus) se pot estima valorile corespunzătoare regimului de sudare.

2.3 Partea experimentală și activitate individuală

În cadrul lucrării de laborator se va observa efectul încălzirii asupra materialului aflat în stare solidă. Se va determina distanța la care sunt atinse diferite temperaturi cu ajutorul cretei termosensibile, a pirometrului optic TROTEC TP7, cu plaja de temperaturi 50...1000°C și cu termometrul cu două canale AX-5003 de la Environmental Instruments, echipat cu sonde de temperatură k sau j. Determinările se vor realiza comparativ, pe diferite materiale de bază, pentru a permite analiza diferitelor moduri de comportare la sudare.

Creta termosensibilă este un produs prezentat sub forma unui creion mecanic cu mină de aproximativ 7 mm diametru. Masa cretei conține o substanță cu punct de fierbere sau punct de transformare al culorii bine definite. Cretile se livrează cu indicativul temperaturii caracteristice inscripționată pe suport.

Baza materială necesară

Pentru buna desfășurare a lucrării de laborator sunt necesare următoarele:

- aparat de sudat (convertizor, sursă MIG/MAG, sudare prin rezistență);
- materiale de bază adecvate;
- consumabile (electozi, sârmă, gaze de protecție);
- variante de monitorizare a temperaturii:
 - Creta termodensibilă;
 - piometrului optic TROTEC TP7, etc.

Desfășurarea experimentului

Varianta „creta termosensibilă”:

- se va selecta un regim de sudare corespunzător electrodului disponibil;
- se va trasa o linie cu creta termosensibilă transversal pe direcția de sudare;
- se sudează cu parametri stabiliți anterior;
- după stingerea arcului se stabilește distanța la care a fost atinsă temperatura indicată de cretă, respectiv zona în care creta a rămas vizibilă.
- cu creta se trasează o linie transversal pe sudura caldă: pe zona de temperatură corespunzătoare urma trasată „fierbe”.

Varianta piometru:

- se verifică funcționarea piometrului prin orientarea lui spre suprafețe cu temperaturi diferite. Se va avea în vedere plaja de temperaturi la care instrumentul poate lucra (maximum 1000°C);
- după încetarea sudurii se orientează spotul spre zona limitrofă sudurii și se deplasează transversal pe axul sudurii.

Varianta termocuplu:

- se verifică funcționarea aparatului;
- se fixează la distanțe convenabile sondele de temperatură;
- se urmărește variația temperaturii.

Partea analitică. Aplicație numerică

- Se va urmări analitic variația poziției unei izoterme de valoare critică pentru materialul de sudat în funcție de temperatura inițială a materialului de sudat. Pentru aceasta, fiecare student participant primește un exemplu de calcul – material, regim de sudare, conform tabelelor 2.2 și 2.3.
- Cu ajutorul datelor din tabel, a ecuației (2.10) și a relației de calcul pentru energia liniară se determină poziția punctului M (figura 2.4), definită de distanța de lungime Y pentru diferite valori ale temperaturii inițiale a materialului de sudat. Temperatura punctului M se consideră a fi temperatura critică a aliajului respectiv (se dezvoltă transformări structurale ce solicită o atenție specială).
- Cu valorile rezultate din calcul se trasează la scară poziția punctului Y, funcție de temperatura inițială a materialului, T_0 .

Tabel 2.2

Materiale de sudat și caracteristicile termofizice și metalurgice

Nr. Crt.	Material	Grosime material, s	Căldura specifică, c_p	Densitatea, ρ	Conductibilitate termică, λ	Temp. Topire, T_{top}	Temp. Critică, T_{crit}
		[mm]	[J/g °C]	[g/cm ³]	[J/m s °C]	[°C]	[°C]
1a.	Oțel 0,15%C	10	0,465	7,833	54	1510	820
1b		15					
1c		20					
2a	Oțel 1,0%C	10	0,473	7,801	43	1495	730
2b		15					
2c		20					
3a	Oțel 1,5%C	10	0,486	7,753	36	1460	730
3b		15					
3c		20					
4a	Oțel Cr-Ni	10	0,48	7,9	20,7	1580	760
4b		15					
4c		20					
5a	Oțel Cr	10	0,48	7,8	25,2	1600	810
5b		15					
5c		20					
6a	Aliaj Al-Cu	10	0,883	2,79	164	710	250
6b		15					
6c		20					
7a	Aliaj Al-Si	10	0,854	2,62	161	660	250
7b		15					
7c		20					

Tabel 2.3

Regim de sudare (randamentul se consideră 80%)

Nr. Regim	I_s	U_a	v_s	T_0
	[A]	[V]	[mm/s]	[°C]
1	200	20	5	20, 100, 200
2	300	25	6	20, 100, 200
3	250	25	7	20, 100, 200
4	350	20	9	20, 100, 200

Exemplu de lucru: (situația 1.a - tabel 2.2, regim de lucru 1 - tabel 2.3)

Se sudează o tablă de oțel OLC 15 cu grosimea $s=10$ mm. Regimul de sudare recomandat: $I_s=200A$, $U_a=20V$, $v_s=5mm/s$. Să se determine efectul preîncălzirii asupra lățimii ZIT, considerată ca porțiunea de material cuprinsă între punctul unde materialul a atins temperatura critică și limita băii lichide (baia va fi considerată de lățime *constantă* indiferent de temperatura inițială a materialului de sudat) și să se determine condițiile de răcire ale piesei respective

Rezolvare

Se vor considera temperaturile: $T_0 = 20, 100$ și 200°C (tabelul 2.3). Se va întocmi graficul reprezentând dependența lărimii ZIT de T_0 .

Date inițiale: Caracteristicile termofizice ale materialului sunt, Tabelul 2.2: $T_{\text{top}} = 1510^\circ\text{C}$; $T_{\text{crit}} = 820^\circ\text{C}$; căldura specifică $c_p = 0,465 \text{ J/g }^\circ\text{C}$; densitatea $\rho = 7,833 \cdot 10^{-3} \text{ g/mm}^3$

Condițiile de sudare, Tabelul 2.3: $I_s = 200\text{A}$; $U_a = 20\text{V}$; $v_s = 5 \text{ mm/s}$; randamentul $\eta = 80\%$

Temperatura inițială a materialului $T_0 = 20^\circ\text{C}$ pentru cazul 1; 100°C varianta a doua; 200°C varianta a treia.

Algoritm de lucru

a. Stabilirea distanței față de baie unde se atinge temperatura critică

- se verifică omogenitatea dimensională a mărimilor cu care se va realiza calculul. (nu se admit în aceeași relație mărimi ce sunt exprimate în unități de măsură reprezentând multipli sau submultipli ai unei aceeași unități de măsură).
- se calculează energia liniară (energia furnizată de sursă pe unitatea de lungime a cusăturii, menținută constantă în exemplul de calcul), cu relația 2.11:

$$E_l = \frac{\eta \cdot U_a \cdot I_s}{v_s} = \frac{0,8 \cdot 20 \cdot 200}{5} = 640 \left[\frac{\text{J}}{\text{mm}} \right]$$

Pentru un regim de sudare dat, primul termen din dreapta ecuației (2.10) este o constantă, depinzând de caracteristicile de material și energia liniară. Se calculează valoarea acesteia pentru cazul corespunzător exemplului considerat:

$$\frac{4,13 \cdot c_p \cdot s \cdot \rho \cdot Y}{E_l} = \frac{4,13 \cdot 0,465 \cdot 10 \cdot 7,8 \cdot 10^{-3}}{640} Y = 1,0446 \cdot 10^{-4} Y$$

Se calculează termenul din stânga ecuației (2.10), în care $T_M = T_{\text{crit}}$:

$$\frac{1}{T_{\text{crit}} - T_0} = \frac{1}{820 - 20} = 0,00125 = 1,25 \cdot 10^{-3} = 12,5 \cdot 10^{-4}$$

Pentru următoarele cazuri, temperatura inițială a materialului va crește succesiv.

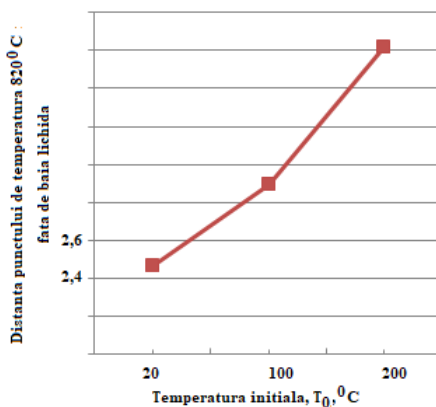
Se calculează termenul din dreapta capăt al ecuației (2.10):

$$\frac{1}{T_{\text{top}} - T_0} = \frac{1}{1510 - 20} = 0,0006711 = 6,711 \cdot 10^{-4}$$

Se înlocuiesc valorile calculate mai înainte în relația (2.10)

$$\begin{aligned} \frac{1}{T_M - T_0} &= \frac{4,13 \cdot c \cdot s \cdot \rho \cdot Y}{E_l} + \frac{1}{T_{\text{top}} - T_0} \Rightarrow \\ 12,5 \cdot 10^{-4} &= 2,35 \cdot 10^{-4} \cdot Y + 6,711 \cdot 10^{-4} \Rightarrow Y_{20} = 2,46 \text{ mm} \end{aligned}$$

Reluând pașii de mai sus se calculează Y_{100} pentru $T_0=100^\circ\text{C}$ și Y_{200} pentru $T_0=200^\circ\text{C}$. Cu datele obținute se trasează grafic modul de variație a lățimii ZIT (a distanței la care se găsește punctul Y în care s-a atins temperatura critică) funcție de temperatura inițială a materialului.



b. Stabilirea condițiilor de răcire

Modul de lucru cuprinde etapele:

1. se calculează viteza de răcire, relația (2.4);
2. se calculează valoarea grosimii relative; se stabilește astfel modul de transfer termic funcție de tipul de material, subțire sau gros;
3. se calculează timpul de răcire $t_{8/5}$ cu relațiile corespunzătoare modului de evacuare a căldurii.

Pentru exemplul selectat:

1. Determinarea vitezei de răcire (2.4)

$$v_{rac} = -2\pi\lambda(T - T_0)^2 \cdot E_l^{-1}$$

$$v_{rac} = 2 \cdot \pi \cdot 0,054 \cdot (820 - 20)^2 \cdot 640^{-1} = 339 \frac{^\circ\text{C}}{\text{s}}$$

2. Determinarea grosimii relative

Conform relației (2.7.a):

$$\delta_c = \left[\frac{E_l}{2\rho c_p} \cdot \left(\frac{1}{500-T_0} + \frac{1}{800-T_0} \right) \right]^{0,5} = \left[\frac{640}{2 \cdot 7,8 \cdot 10^{-3} \cdot 0,465} \left(\frac{1}{500-20} + \frac{1}{800-20} \right) \right]^{0,5} \cong 17,2 \text{ mm}$$

$\delta_c = 17,2 \text{ mm} > s = 10 \text{ mm}$, deci timpul de răcire se va calcula pentru transfer bidirecțional (placă subțire).

Conform relației (2.7.b):

$$\delta = s \left[\rho \cdot c_p (T_{crt} - T_0) \frac{1}{E_l} \right]^{0,5} = 10 \left[7,8 \cdot 10^{-3} \cdot 0,465 \cdot (820 - 20) \cdot \frac{1}{0,640} \right]^{0,5} = 0,67$$

$\delta_c = 0,67 < 0,75$, deci îmbinarea se consideră realizată pe material subțire.

Ambele relații situează placa în domeniul „perete subțire”.

3. Calculul timpului de răcire $t_{8/5}$

- Factorul de formă se adoptă, pentru simplificare, egal cu 1. Se verifică omogenitatea unităților de măsură.
- Deoarece avem de a face cu plăci subțiri, folosim relația (2.6):

$$\begin{aligned} t_{8/5} &= \frac{1}{4\pi\lambda c_p \rho} \cdot \left(\frac{E_l}{s} \right)^2 \left[\left(\frac{1}{500 - T_0} \right)^2 - \left(\frac{1}{800 - T_0} \right)^2 \right] \cdot F_f = \\ &= \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot 0,456 \cdot 0,054 \cdot 7,8 \cdot 10^{-3}} \cdot \left(\frac{640}{10} \right)^2 \cdot \left[\left(\frac{1}{500 - 20} \right)^2 - \left(\frac{1}{800 - 20} \right)^2 \right] = \\ &= 0,406 \cdot 10^3 \cdot 4096 \cdot 272 \cdot 10^{-8} = 4,5s \end{aligned}$$

- Folosim relația (2.9), recomandată de standard pentru plăci subțiri:

$$\begin{aligned} t_{8/5} &= (4300 - 4,3 \cdot T_0) \cdot 10^5 \left(\frac{E_l}{s} \right)^2 \left[\left(\frac{1}{500 - T_0} \right)^2 - \left(\frac{1}{800 - T_0} \right)^2 \right] \cdot F_2 = \\ &= (4300 - 4,3 \cdot 20) \cdot 10^5 \cdot \left(\frac{0,64}{10} \right)^2 \cdot \left[\left(\frac{1}{500 - 20} \right)^2 - \left(\frac{1}{800 - 20} \right)^2 \right] = 4,6s \end{aligned}$$

unde $F_2 = 1$.

Se observă că timpul de răcire pe intervalul 800 ... 500°C va fi mai mic de 5 s.

Bibliografie selectivă

1. Gheorghiu D.A. et al, Lucrări practice de sudură. Îndrumar pentru lucrări de laborator, Ed. PIM, Iași, 2021

LUCRAREA Nr. 3

DETERMINAREA COMPOZIȚIEI CHIMICE MEDII A CUSĂTURII

Lucrarea de față urmărește modificările chimice ce intervin în cusătura sudată ca urmare a diferențelor inerente existente între compozițiile materialelor, de bază și cel depus, domeniul posibil de variație a participării celor două în funcție de procedeul de sudare utilizat, soluții pentru obținerea unei compoziții chimice impuse. Lucrarea constituie o introducere necesară în analiza sudurilor eterogene.

3.1 Noțiuni introductive

Elementele ce condiționează alegerea materialelor adecvate sudării sunt:

- compoziția chimică;
- caracteristici mecanice apropiate, sau, în special în cazul sudurilor eterogene, caracteristici adecvate;
- corespondența dintre caracteristicile structurale.

Deși caracteristicile mai sus menționate depind de o multitudine de factori, compoziția chimică are o pondere importantă în crearea premiselor obținerii celorlalte condiții. Adeseori se utilizează materiale de adaos cu compoziții chimice diferite, capabile să asigure îmbinării plasticitate, tenacitate superioare, caracteristici ce garantează rezistența îmbinării în exploatare. Există, uneori, condiții speciale legate de concentrațiile admise pentru unul sau mai multe elemente. Toate aceste cerințe impun un control atent al compoziției chimice rezultate în cusătură.

Condiții privind compoziția chimică a cusăturii

Se consideră, în general, că o calitate bună a îmbinării este asigurată de asemănarea dintre compozițiile chimice ale metalului de bază și a celui de adaos. Condiția include conținutul în elemente de aliere, inclusiv carbon; conținutul în sulf și fosfor este indicat să fie cât mai redus (condiție cu atât mai importantă cu cât gradul de aliere al oțelului este mai ridicat).

Pentru sudarea cu electrod fuzibil compoziția cusăturii este rezultatul amestecării metalului de bază cu cel depus. Se definește metal depus metalul vergelei de electrod care a interacționat cu învelișul și cu gazele din arc, compoziție rezultată fără amestecarea cu un alt metal. Compoziția metalului depus face obiectul unei determinări standardizate, obligatorie pentru furnizorii de materiale de adaos. În limbajul specific, nestandardizat, compoziția chimică a metalului astfel obținut se mai numește și sudură pură. Rezultatul acestei determinări este compoziția chimică afișată pe pașaportul electrodului.

Corelarea compoziției chimice presupune alegerea unei compoziții capabile să limiteze sau chiar să evite formarea de compuși chimici cu proprietăți nedorite în îmbinare - temperaturi de topire considerabil mai mici decât cea a aliajului bază sau formarea unei structuri fragile.

Problema corelării compoziției chimice se pune cu mare seriozitate în cazul sudurilor în care corespondența între compozițiile chimice ale materialelor de bază (același sau diferite) și cel de adaos nu este satisfăcută, așa numitele suduri eterogene. Acest fapt este mai des întâlnit decât se consideră în general, deoarece abaterea de la compoziția chimică permite atingerea unor alte deziderate, iar îmbinarea unor materiale cu proprietăți complementare este o soluție tehnică și economică avantajoasă.

Pentru determinarea compoziției chimice medii a cusăturii se pleacă de la definiția coeficienților de participare.

Coeficientul de participare este raportul teoretic între masa de material ce contribuie la obținerea cusăturii (metal de bază sau metal depus) și materialul total ce formează cusătura.

Pentru o cusătură finită ce poate fi caracterizată geometric de secțiunea transversală „c” (mm²) și lungimea „l”, masa de material din cusătură este egală cu: $m_c = c \times l \times \rho$, unde ρ – densitatea materialului (în calcul densitatea poate fi luată ca egală pentru cele două metale). Secțiunea transversală „c” la rândul ei este proporțională cu cantitatea de metal topită în proces, figura 3.1. Porțiunea „d” din secțiunea transversală poate fi asimilată cu secțiunea metalului depus, iar porțiunea „b”, cu cea de metal de bază topit, deci:

$$m_c = m_b + m_d = c \times l \times \rho = b \times l \times \rho + d \times l \times \rho \quad (3.1)$$

Sau, după simplificări:

$$c = b + d \quad (3.2)$$



Fig. 3.1. Reprezentarea grafică a secțiunii cusăturii pentru definirea coeficienților de participare

Noțiunile de coeficient de participare a metalului depus, δ , respectiv a metalului de bază, β , sunt definite de raportul dintre secțiunile corespunzătoare contribuției fiecăruia dintre cele două materiale și secțiunea totală a sudurii.

$$\delta = \frac{d}{c} \quad \beta = \frac{b}{c} \quad (3.3)$$

Pornind de la relația (3.1), relația între coeficienții de participare este:

$$\delta + \beta = 1 \quad (3.4)$$

Coeficienții de participare se încadrează, funcție de procedeul de sudare, între niște limite minim/maxim, corespunzând parametrilor de sudare posibil de adoptat în cadrul procedeului dat. Valorile posibil de obținut în practică pentru diferite procedee de sudare se găsesc în tabelul 3.3.

3.2 Determinarea compoziției medii a cusăturii - analitic și grafic

Relațiile definite anterior pentru materialele ce participă la formarea cusăturii permit stabilirea unor relații numerice între masele de elemente din compunerea fiecărui aliaj ce participă la formarea sudurii. Fiecare din cele două materiale, cel de bază și cel depus, au – cel mai adesea, concentrații diferite în elementele de aliere.

Pentru o cusătură cu lungimea egală cu unitatea, bilanțul masic pentru un element, caracterizat de concentrația acestuia, E, în zonele de interes, este:

$$m_c E_c = m_b E_b + m_d E_d \Rightarrow c \times E_c = b \times E_b + d \times E_d \quad (3.5)$$

unde m_c , m_d , m_b – masa cusăturii, metalului depus respectiv metalului de bază, iar E_c , E_d , E_b – concentrația elementului analizat în cusătură, metal depus și respectiv metal de bază.

Ținând cont de relațiile de definiție pentru coeficienții de participare, relația (3.5) poate fi scrisă ca:

$$E_c = \delta \cdot E_d + (1 - \delta) \cdot E_b \text{ sau } E_c = (1 - \beta) \cdot E_d + \beta \cdot E_b \quad (3.6)$$

relație ce definește concentrația E a unui element în cusătură funcție de participarea materialelor.

Relația (3.6) permite calculul compoziției chimice medii a cusăturii atunci când se cunosc toate celelalte date. Calculul se repetă, atunci când este necesar, pentru fiecare element de aliere. Coeficientul de participare depinde de factorii tehnologici: procedeul de sudare, regimul de sudare, geometria rostului.

Calculul este similar, indiferent de forma sau complexitatea secțiunii cusăturii. În cazul rîndurilor suprapuse, compoziția – concentrația elementului urmărit în metalul de bază este concentrația anterior calculată.

Coeficientul de participare al metalului de bază este întâlnit în literatura de specialitate sub denumirea de diluție: modificarea compoziției chimice a metalului depus datorată amestecării cu metalul de bază sau cu metalul anterior depus:

$$D = \frac{b}{c} \times 100 \quad [\%] \quad (3.7)$$

Centrarea pe modificările induse de materialul de bază asupra celui depus se justifică prin faptul că materialele de adaos, realizate în scopul direct al sudării, sunt elaborate și procesate mult mai îngrijit decât cele supuse sudării.

Practic, problema poate fi exprimată altfel: fiind dat un material de bază, un procedeu de sudare și concentrații limită admisibile în cusătură să se definească compoziția favorabilă a materialului de adaos.

În cazul procedurii de sudare sub flux, se cunoaște de obicei compoziția metalului de adaos, E_a , nu cea a metalului depus. Cuplul sârmă de sudare / flux are rolul de a asigura obținerea unei compoziții dorite, dar aceasta diferă de la o rețetă de flux la altă rețetă. În aceste condiții concentrația elementului de aliere E în cusătură poate fi exprimată ca:

$$E_c = \delta \cdot E_a + (1 - \delta) \cdot E_b \pm \Delta E \quad (3.8)$$

ΔE reprezentând variația concentrației elementului ca urmare a reacțiilor metalurgice parcurse în funcție de caracterul fluxului.

În funcție de valoarea ΔE pentru un element dat, procesul de sudare poate fi descris din punct de vedere al activității metalurgice. Dacă $\Delta E = 0$, procesul – fluxul este pasiv pentru elementul dat; dacă $\Delta E < 0$, procesul este activ metalurgic, ducând la sărăcirea în elementul considerat; dacă $\Delta E > 0$, procesul este activ metalurgic, având ca efect alierea cusăturii cu elementul considerat.

De reținut că procesul poate fi activ metalurgic față de un element și pasiv față de altul, iar activitatea metalurgică diferă în funcție de elementul considerat.

Determinarea compoziției chimice a cusăturii pe cale grafică

Atunci când este necesară stabilirea compoziției chimice medii a cusăturii se cunosc, în general, următoarele date: compoziția chimică a materialului de bază, standard sau nominală și limitele de concentrație pentru elementele din metalul depus.

Cu ajutorul relațiilor (3.5 și 3.6) pot fi determinate limitele de variație a concentrației pentru fiecare element în parte sau pentru elementul chimic de interes.

O metodă clasică de identificare rapidă a capacității unui material de a răspunde solicitărilor o reprezintă utilizarea diagramelor de coordonare.

Diagrama de coordonare reprezintă o modalitate intuitivă, grafică, de rezolvare a problemei, figura 3.2. Se pornește de la ideea existenței unor limite de lucru. Astfel, coeficienții de participare au valorile limită 1 și 0 (compoziția nealterată de amestecare, valoare 1, până la situația în care participarea materialului analizat este nulă). Materialele ce contribuie la obținerea sudurii sunt, la rândul lor, caracterizate de concentrații limită (superioară și inferioară) pentru fiecare element în parte.

Pentru obținerea diagramei, se construiește un sistem închis de axe: ordonata cuprinde coeficienții de participare, în limitele teoretice 0 respectiv 1. Abscisa este dublă: una corespunde participării maxime a materialului corespunzător (ex.: ordonata este β , abscisa corespunzând valorii $\beta=1$ va cuprinde concentrația elementului analizat în materialul de bază) și cea de a doua absenței participării, respectiv concentrația în metalul depus, $\beta=0$, participarea maximă a celui alt material.

În figura 3.2 în ordonată este cuprins coeficientul de participare al materialului depus. Concentrația elementului de interes corespunzătoare cazului $\delta = 0$, este concentrația în elementul dat din materialul de bază, E_b . Tot aici vor fi figurate limitele admise în cusătură pentru elementul analizat, $E_{c \min}$ și $E_{c \max}$. Pe abscisa corespunzătoare

situației $\delta = 1$ vor figura concentrațiile din metalul depus, E_{d1} . Pe ordonată se amplasează limitele coeficientului de participare, $\delta_{\min}$, $\delta_{\max}$, în acord cu procedeul utilizat.

Prin trasarea de paralele la axele de coordonate prin punctele de minim / maxim astfel definite (coeficienții de participare specifici procedeului ales, concentrațiile impuse în elementul analizat) se definește dreptunghiul caracteristic, abcd, figura 3.2.

Să presupunem că în materialul depus concentrația elementului E este E_{d1} . Unind E_b -concentrația garantată de producător pentru elementul analizat în materialul de bază cu E_{d1} , dreapta obținută materializează variația concentrației elementului în funcție de gradul de participare al materialelor. Dreapta E_bE_{d1} intersectează dreptunghiul abcd doar în domeniul $\delta_{\min}\delta_1$. Pentru valori $\delta > \delta_1$ concentrația este în afara domeniului acceptat. Pentru a asigura condiția de compoziție impusă, concentrația în elementul E a metalului depus trebuie să se încadreze între limitele $E_{d\min}$ și $E_{d\max}$ (figura 3.2).

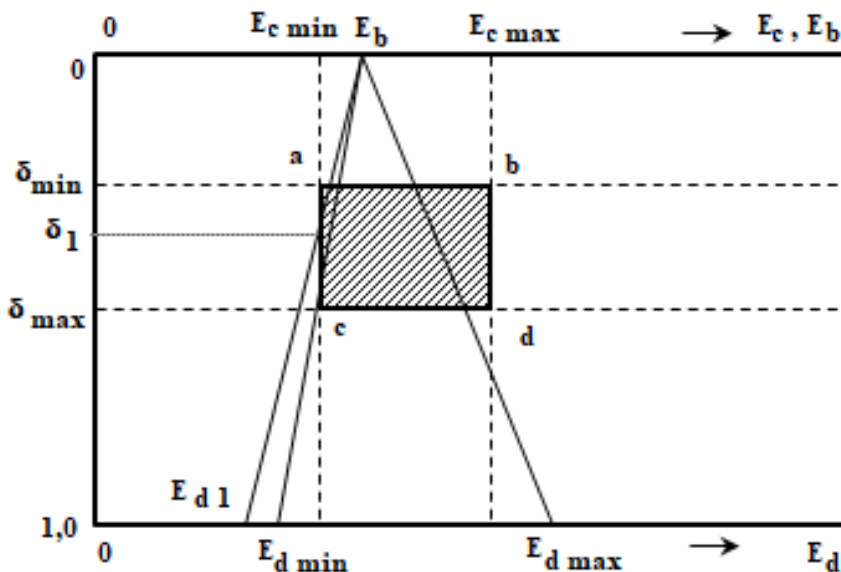


Fig. 3.2. Diagrama de coordonare metal depus / metal de bază

Exemplul de mai sus poate fi particularizat pentru diferite cazuri practice.

3.3 Mod de lucru

Fiecare student va primi un exemplu de calcul constând în: metal de bază de compoziție definită, tabelul 3.1; compoziția metalului depus corespunzătoare unui tip de electrod, tabelul 3.2; procedeul de sudare ales și coeficientul de participare corespunzător, tabelul 3.3. (Atenție: în tabel este introdusă diluția, respectiv participarea materialului de bază.)

Cu aceste date se vor calcula concentrațiile în cusătură (minim-maxim) pentru 5 elemente de aliere și va fi trasată diagrama de coordonare pentru cel puțin două elemente.

Tabelul 3.1. Compoziția chimică pentru câteva mărci de oțel

Marcă oțel		Compoziția chimică, %										
		C	Mn	Cr	Mo	Cu	Ni	Si	P	S	Al	Nb
1	OLC 15	0,1... 0,3	0,7... 0,9					0,1... 0,25	0,02	0,02		
2	Fc 250	3,0... 3,3	0,7... 0,9					1,6...2	0,1	0,1		
3	HY 80	0,12... 0,17	Max 0,3	1,4...1, 6	0,3...0 ,4	Max 0,03	2,2...2 ,6	Max, 0,2	Max, 0,007	Max, 0,014		0,005
4	HSLA 80	0,05... 0,07	0,3... 0,6	0,4... 0,7	0,1... 0,25	Max, 1,1	0,8... 1,0	Max, 0,3	Max, 0,007	0,004		0,044
5	Docol 1000	0,15... 0,38	1,1... 1,5					Max, 0,5	Max,0 01	Max, 0,002	0,04	0,015

Tabelul 3.2. Compoziția chimică a metalului depus pentru câteva tipuri de electrod

Simbol electrod		Tip electrod	Compoziția chimică, %							
			C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	S	P
A	E69 4 Mn2NiCrMoB 42 H5	Bazic	0,06	0,3	1,7	0,4	2,2	0,4	0,025	0,025
B	E CrMo1B42H5	Bazic	0,07	0,4	0,8	1,4		0,6	0,01	0,01
C	E55 6 Mn1NiMoBT 32H5	Bazic	0,06	0,4	1,8		0,8	0,5	0,02	0,02
D	E62 5 Mn2NiMo B42	Bazic	0,06	0,3	1,3		1,7	0,4	0,015	0,015
E	E42 2 C 21	Rutlic	0,1	0,14	0,5		0,4	0,3		

Tabelul 3.3. Coeficienți β de participare ai metalului de bază, funcție de procedeul de sudare

Procedeul de sudare	Coeficient de participare, β
Electrod învelit, înveliș bazic	0,2...0,25
Electrod învelit, înveliș acid/rutlic	0,2...0,3
Electrod nefuzibil, atmosferă de gaze inerte, WIG	0,08...0,2
Electrod fuzibil, atmosferă de gaze protectoare, MIG/MAG	0,25...0,3
Sudare sub strat de flux	0,2...0,4

Tabel 3.4. Exemplu de încadrare a compoziției chimice a materialului depus în recomandările standard (sârmă de sudare MIG/MAG)

	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Cu	Al
Compoz. Cf. SR EN 440 – 1996	0,06- 0,14	1,30- 1,60	0,70- 1,00	0,025	0,025		0,15	0,15			0,02
Cf. pașaportului de electrod.	0,086	1,45	0,852	0,009	0,011	0,027	0,017	0,003	0,001	0,083	0,001

Exemplu de rezolvare

A. Se sudează oțel HSLA 80 cu electrod E69 4 Mn2NiCrMoB 42 H5. Să se determine dacă se poate obține o concentrație de maximum 0,2% Si în cusătură.

1. Identificare tip electrod pentru stabilirea coeficienților de participare

Din simbolul electrodului rezultă că este un electrod bazic, deci coeficientul de participare, tabelul 3.3 va avea valori între 0,2...0,25.

2. Se determină analitic concentrația de siliciu ce poate fi obținută pentru:

$\beta=0,2\ldots0,25$, $E_{Si\ d} = 0,3\%$ (tabel 3.2), $E_{Si\ b} = \max. 0,3\%$ (tabel 3.1):

$$E_c = (1 - \beta) \cdot E_d + \beta \cdot E_b$$

Situația I, $\beta=0,2$

$$E_{Si\ c} = (1 - 0,2) \cdot 0,3 + 0,2 \cdot 0,3 = 0,3\%$$

Situația II, $\beta=0,25$

$$E_{Si\ c} = (1 - 0,25) \cdot 0,3 + 0,25 \cdot 0,3 = 0,3\%$$

Conform calculului analitic, în sudură nu se poate obține concentrația de 0,2%.

3. Se verifică rezultatul analitic cu ajutorul diagramei de coordonare, figura 3.3.

Pentru aceasta:

- se marchează în diagramă punctele corespunzătoare coeficienților de participare $\beta = 0,2$ și $\beta = 0,25$; din aceste puncte se trasează axe paralele cu axa absciselor;
- se marchează în diagramă punctul corespunzător concentrației de Si din metalul depus $E_{Si\ d} = 0,3\%$;
- se marchează în diagramă punctul corespunzător concentrației cerute de Si din cusătură $E_{Si\ c} = 0,2\%$; se coboară verticala din acest punct, în așa fel încât aceasta să se intersecteze cu dreptele trasate mai înainte;
- prin punctele de intersecție rezultate anterior și prin punctul $E_{Si\ d} = 0,3\%$ se trasează drepte, care ar fi trebuit să intersecteze axa $E_{Si\ b}$; deoarece nu se obține nici un punct de intersecție cu axa amintită, concluzia ce rezultă este că nu se poate obține o concentrație de maximum 0,2% Si în cusătură.

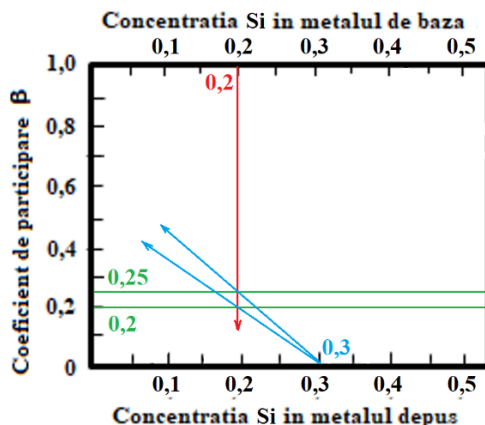


Fig. 3.3 Diagrama de corelație pentru concentrația de siliciu din exemplul dat

B. Pentru același exemplu să se identifice concentrațiile de mangan din cusătură.

2. Se determină analitic concentrația de mangan ce poate fi obținută pentru:

$$\beta = 0,2 \dots 0,25, E_{Mn\ d} = 1,7, E_{Mn\ b} = 0,3 \dots 0,6\%$$

$$E_{Mn\ c} = (1 - \beta) \cdot E_{Mn\ d} + \beta \cdot E_{Mn\ b}$$

De remarcat că în materialul de bază concentrația de mangan variază între un minim și o valoare maximă

Situația I, $\beta = 0,2$

$$E_{Mn\ c\ min} = (1 - 0,2) \cdot 1,7 + 0,2 \cdot 0,3 = 1,42\%$$

$$E_{Mn\ c\ max} = (1 - 0,2) \cdot 1,7 + 0,2 \cdot 0,6 = 1,48\%$$

Situația II, $\beta = 0,25$

$$E_{Mn\ c\ min} = (1 - 0,25) \cdot 1,7 + 0,25 \cdot 0,3 = 1,350\%$$

$$E_{Mn\ c\ max} = (1 - 0,25) \cdot 1,7 + 0,25 \cdot 0,6 = 1,425\%$$

Conform calculului analitic concentrația manganului în cusătură variază între 1,48 și 1,35%.

3. Se verifică rezultatele analitice cu ajutorul diagramei de coordonare, figura 3.4. Se procedează astfel:

- se marchează în diagramă punctele corespunzătoare coeficienților de participare $\beta = 0,2$ și $\beta = 0,25$; din aceste puncte se trasează axe paralele cu axa absciselor;
- se marchează în diagramă punctul corespunzător concentrației de Mn din metalul depus $E_{si\ d} = 1,7\%$;
- se marchează în diagramă pe axa $E_{si\ b}$ punctele corespunzătoare limitelor de concentrație a Mn din materialul de bază 0,3 și 0,6%; se unesc aceste puncte cu punctul $E_{Mn\ d} = 1,7\%$; se găsesc punctele de intersecție ale dreptelor trasate mai înainte și orizontalele coeficienților de participare;
- prin punctele de intersecție rezultate anterior se ridică verticale, a căror intersecții cu axa $E_{Mn\ b}$ vor determina limitele de concentrație a Mn din cusătura sudată. Se observă că se obțin concentrațiile aproximative de 1,37 și 1,5%Mn, valori apropiate de cele determinate analitic.

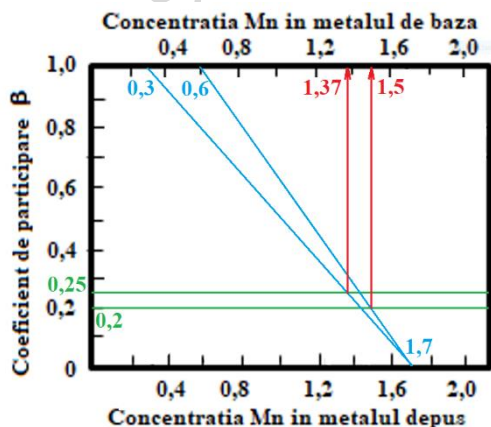


Fig. 3.4. Diagrama de corelație pentru concentrația de Mn din exemplul dat

Aplicații

Se sudează piese din oțel n ($n=1\dots5$), folosind un electrod m ($m=A\dots E$). Să se determine dacă se poate obține o concentrație de x% E_1 în cusătură. Să se identifice concentrația de E_2 . Folosiți metoda analitică și cea grafică.

Nr.apl.	Există % E_1 în cusătură?	Care este concentrația de E_2 în cusătură?
1A	1,5%Mn	Si
1B	0,25%Si	Mn
1C	0,6%Ni	C
1D	0,1%C	Ni
1E	2%Si	S
2A	0,77%C	Mn
2B	0,5%Mn	Si
2C	0,39%Mo	C
2D	1%Si	S
2E	0,6%Mn	Si
3A	1,5%Cr	Mo
3B	0%Mo	Mn
3C	1,7%Mn	Cr
3D	1,075%Mn	Si
3E	1%Ni	C
4A	0,2% Si	Mn
4B	1%Cr	C
4C	0,5%Si	Ni
4D	1,5%Ni	Mo
4E	0,35%Mo	Ni
5A	0,4%C	Mn
5B	1,1%Mn	Si
5C	0,002%S	Ni
5D	1,3%Mn	P
5E	0,2%Si	C

Bibliografie selectivă

Gheorghiu D.A. et al, Lucrări practice de sudură. Îndrumar pentru lucrări de laborator, Ed. PIM, Iași, 2021

LUCRAREA Nr. 4

MODIFICĂRI STRUCTURALE ÎN ÎMBINAREA SUDATĂ

Obiectivul lucrării de față este acela de a argumenta modul în care procesarea prin sudare afectează structura materialelor. Se urmărește identificarea principalelor fenomene ce influențează structura finală din diferitele zone ale îmbinării în cazul oțelului și, în măsura în care transformările sunt mai relevante, modificările ce apar și în alte aliaje.

4.1 Noțiuni introductive

Aliajele metalice, materialele cu cea mai mare pondere în structurile sudate, sunt formate din un număr de elemente chimice – componenții aliajului, preponderent metale, însoțite de un volum mic de nemetale (carbon, siliciu, oxigen, azot, sulf, etc.). În funcție de un complex de factori endogeni și exogeni atomii componenților se articulează în structuri microscopice caracterizate de proprietăți bine definite și diferite de cele ale componenților puri, structuri ce sunt cunoscute sub denumirea de faze. Fazele existente într-un aliaj sunt: metal pur, soluție solidă, compus chimic / compus intermetalic. Fazele prezente în aliaj și distribuția lor din punct de vedere cantitativ și calitativ depind de compoziția aliajului și de condițiile termodinamice (istoria metalurgică) pe care aliajul le parcurge.

Ciclul termic specific sudării afectează echilibrul local structural din materialul de îmbinat, metalul de bază, dar și echilibrul chimic în cusătură, prin amestecarea cu cel din materialul de adaos. Structura obținută este rezultatul variațiilor nivele de activare termică, urmare a ciclului termic, a fenomenului de difuzie (în zonele netopite) dar și a etapelor specifice parcurse de metalul adus în stare lichidă și solidificat „in situ”, în condiții complet în afara echilibrului.

Fenomene implicate în modificările structurale

Difuzia. Difuzia este fenomenul de pătrundere a moleculelor unui corp, printre moleculele altuia, fără să existe curgere. Difuzia explică fluxul de particule (atomi sau molecule) dintr-o regiune de concentrație mai mare spre una de concentrație mai mică. Este un fenomen de transport, echivalent curgerii fluidelor sau conductivității termice, reprezentând fundamentul transferului de masă.

Fenomenul este descris de legile lui Fick. Legea întâi stipulează că, în condiții staționare, un flux de atomi se va deplasa pe direcția gradientului de concentrație, stabilind un transport de atomi ce este proporțional cu diferența de concentrație, în timp ce legea a doua stabilește legătura între gradientul de concentrație și timpul necesar transformării.

În concluzie, difuzia se va produce cu atât mai intens cu cât diferența de concentrație este mai mare, temperatura mai ridicată, fenomenul având nevoie de timp pentru a-și produce efectele.

Tensiunea superficială. Interfața dintre două faze aflate în contact direct (solid – lichid, soluție solidă – compus chimic) este sediul unui exces energetic. Din acest motiv pe

suprafață se produc fenomenele de evaporare, topire la creșterea temperaturii și de condensare, solidificare la răcire. Această particularitate influențează atât fenomenul de difuzie, a cărui energie de activare este mai mică la interfața cu altă fază sau la limita de grăunte cât și procesul de solidificare ce are loc în baia lichidă.

Tensiunea superficială reprezintă energia necesară modificării suprafeței de separație (interfeței), fiind definită ca lucrul mecanic necesar obținerii unei schimbări a unității de suprafață.

Ciclul termic. Variația de temperatură specifică prelucrării prin sudare activează local fenomenele amintite anterior, mai ales cel de difuzie; viteza de încălzire și cea de răcire, de valori excesive, nepermitând desfășurarea acestora în condiții de echilibru. Din punct de vedere termodinamic un aliaj care intră în proces în stare de (cvasi)echilibru va prezenta după sudare o zonă cu diferite modificări ce sunt specifice transformărilor în afară de echilibru, cu particularități generate de tipul de aliaj.

4.2 Principalele modificări structurale

Modificări în cusătură – cristalizarea primară

Topirea este procesul de dezorganizare a rețelei atomice pe distanță mare, dezorganizare cu atât mai importantă cu cât dimensiunea băii este mai mare și energia introdusă în îmbinare crește.

Solidificarea metalelor este echivalentă cu restabilirea ordinii la lungă distanță. Solidificarea materialelor metalice și nemetalice se supune acelorași legi ale termofizicii. Astfel, cristalizarea depinde de atingerea unui grad anume de subrăcire, care este „motorul” transformării. Există particularități ale fiecărui proces de solidificare. Solidificarea poate amorsa pe germeni din masa lichidului – germinare omogenă, sau pe un suport existent în lichid – germinare eterogenă. În cazul germinării omogene este necesară subrăcirea maximă, germinarea eterogenă solicitând o subrăcire substanțial mai mică. În cazul particular al sudării se demonstrează teoretic și este confirmat de practică faptul că subrăcirea necesară este foarte mică, tinzând spre un grad. Solidificarea de acest tip se numește epitaxială (în continuarea rețelei metalice ce și-a păstrat structura).

Pentru solidificare, esențială este relația dintre gradientul termic din baia lichidă și viteza de cristalizare. Funcție de aceasta solidificarea îmbracă diferite aspecte, cristalizarea primară fiind, la fel ca în cazul lingourilor, o solidificare orientată, cu forme structurale diferite în funcție de raportul dintre cele două mărimi.

Un alt aspect cu importanță deosebită în modul de solidificare este relația existentă între viteza de sudare și cea de cristalizare a aliajului, relație ce este descrisă practic de forma băii lichide: o baie de formă eliptică are ca rezultat o structură cu calități superioare (viteza de sudare în limite corecte). Baia alungită conduce la formarea unei structuri susceptibile la fisurare și este rezultatul unei viteze de sudare excesive.

Structura rezultată în urma solidificării se numește structură primară.

În cazul în care aliajul prezintă transformări structurale în stare solidă structura primară este dificil de pus în evidență. Pentru aliajele fără transformări structurale în stare solidă structura primară este evidentă.

Cristalizarea secundară

Cristalizarea secundară este specifică aliajelor în care există transformări de fază în stare solidă. Cazul cel mai frecvent discutat este cel al aliajelor fier – carbon, respectiv oțelurile carbon sau cele slab aliate, aliajele prelucrate frecvent prin sudare.

Cristalizarea secundară modifică drastic structura primară a cusăturii, caracteristicile de solidificare și dimensiunile grăunților de austenită fiind dificil de pus în evidență.

Cu toate că structura secundară acoperă particularitățile cristalizării primare; influențele acesteia sunt foarte importante în dezvoltarea unor defecte și se reflectă în calitatea cusăturii sudate.

Modificări structurale în stare solidă

Zona influențată termic ZIT)

Zona aflată imediat sub cusătură este și zona principalelor probleme (defecte) ale îmbinărilor sudate.

Această zonă se încălzește prin conducție la temperaturi care variază în funcție de poziția relativă față de axul cusăturii, respectiv limita băii lichide. În funcție de temperatura maximă atinsă, de timpul cât materialul se află la temperatura maximă și de viteza de răcire, zona de influență termică se subîmparte, pentru cazul oțelurilor, în zone fine care au suportat un „tratament termic”. Cum diferența între tratamentele termice este dată de parametri ciclului termic, temperatura maximă experimentată de material prin poziția față de baia lichidă și viteza de răcire asigurată prin tehnologia de lucru vor dicta structura finală din zona influențată termic.

Legătura existentă între ciclul termic la sudare, subzonele din ZIT și diagrama FeC este prezentată în figura 4.1. Se tratează pentru cazul general această diagramă deoarece oțelul este materialul cel mai frecvent procesat prin sudare iar transformările structurale pentru oțelul cu conținut redus de carbon sunt edificatoare pentru transformările posibile în numeroase alte cazuri.

Zona de trecere (II)

Zona de trecere reprezintă interfața dintre metalul lichid (cu compoziție chimică rezultată din amestecul a două metale cu compoziție chimică în general diferită) și metalul care a trecut parțial în fază lichidă. Din punct de vedere termic zona de trecere cuprinde intervalul de solidificare.

Subzona supraîncălzită (III)

În materialul din această zonă s-a depășit temperatura de 1000°C, temperatura de la care stabilitatea limitelor de grăunte este substanțial redusă. Ca urmare grăunții mai mari suferă o creștere pe seama grăunților mici. Creșterea grăunților are ca efect reducerea proprietăților mecanice, creșterea durității (cantitatea de martensită formată la răcire este mai mare în cazul grăunților mari de austenită), dar și creșterea pericolului de apariție a fisurilor la cald. Dimensiunea acestei zone depășește arareori 1,5mm. Este unul din punctele nevralgice ale îmbinării.

Zona supraîncălzirii este comună tuturor procedeelor de sudare „la cald”; creșterea grăunților este un fenomen complex ce se sprijină atât pe difuzie cât și pe energia de interfață,

ce solicită temperaturi apropiate de linia solidus. Evident că domeniul termic depinde de la aliaj la aliaj, funcție de temperaturile caracteristice, linia solidus a acestuia.

Subzona normalizată (IV)

Caracterizată de grăunți fini, datorati recristalizării, zona este un punct slab pentru materialele aflate anterior în stare ecrusată (durificate prin deformare plastică la rece) când încălzirea în domeniul austenitic are ca efect pierderea texturii, deci pierderea unor proprietăți obținute anterior. Dimensiunea acestei subzone este comparabilă cu cea anterioară. Se dezvoltă în intervalul termic convențional dintre 1000°C și linia ce unește punctul 912°C (temperatura de transformare $\gamma \rightarrow \alpha$) cu 727°C, temperatura de transformare peritectică.

Fâșia austenitizării incomplete (V)

Pe diagrama de echilibru zona corespunde domeniului în care structura perlitică, de echilibru, se transformă incomplet în austenită, coexistând ferita netransformată cu austenita formată datorită încălzirii. Se manifestă o reducere a durității materialului din zonă comparativ cu materialul de bază neafectat termic. Structura este de obicei eterogenă, fiind posibilă, la răcire, formarea de martensită dispersă. La răcire apar grăunți mari de ferită (fenomen de creștere asemănător celui din zona supraîncălzirii) alături de colonii de perlită foarte fină, rezultată din austenita formată la încălzire.

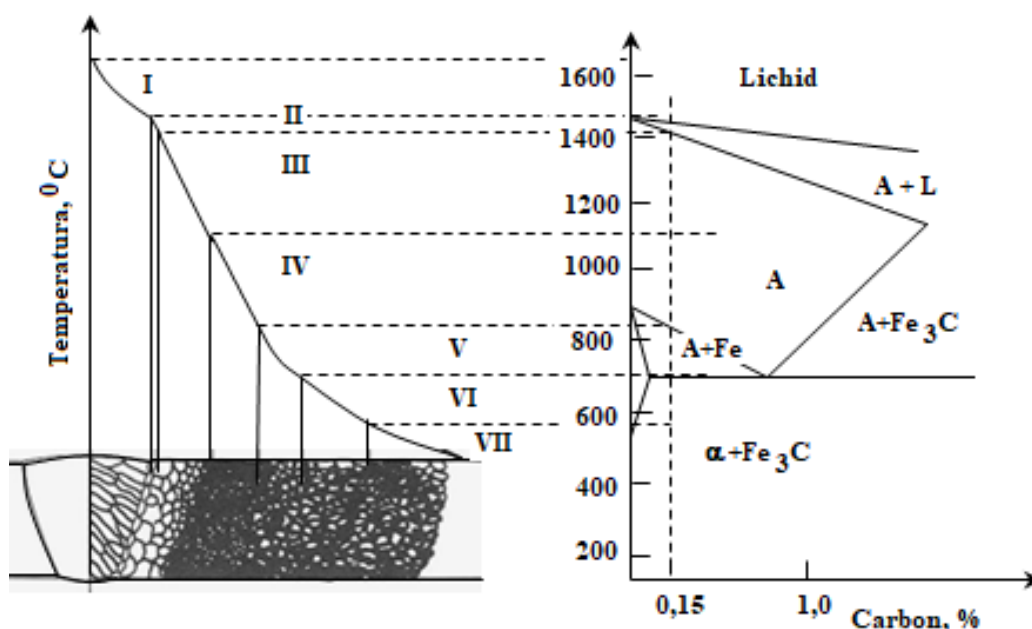


Fig. 4.1 Reprezentare schematică a domeniilor de transformări în fază solidă din ZIT în funcție de temperatura maximă atinsă pe durata procesării, oțel cu 0,15%C (sudabil). I. cusătura; II. zona de trecere; III. Zona supraîncălzită; IV. Fâșia normalizată; V. Zona austenitizării incomplete; VI. Zona revenită; VII. Metal de bază, neafectat termic

Subzona revenită (VI)

Materialul nu a depășit temperatura critică A_{C1} , deci nu au apărut transformări de fază. Este zona cea mai extinsă din ZIT (atinge până la 20mm, funcție de condițiile de

preîncălzire, caracteristicile de material, etc. Înmuierea este urmare a relaxării la nivelul rețelei atomice datorate încălzirii sau chiar globulizării unor constituenți structurali.

Fâșiile sunt descrise pentru cazul oțelului carbon cu conținut redus de carbon. Analiza transformărilor structurale pentru alte materiale se poate realiza similar prin asocierea diagramei de echilibru a aliajului cu schema termică parcursă de acesta.

4.3 Analiza microstructurală

Cristalizarea primară

În figura 4.2 sunt prezentate diagramele de echilibru binare pentru aliajele AlSi și AlMg, iar în figură 4.3 structuri observabile într-o sudură pe un aliaj AlSi7Mg1 (turnat) cu material de adaos AlSi4. În aliajele pe bază de aluminiu, adaosurile de siliciu au rolul de a reduce temperatura de topire, îmbunătățind proprietățile de turnare, adaosul de magneziu asigurând o creștere a rezistenței soluției solide și îmbunătățirea capacității aliajului de a-și crește capacitatea de durificare sub efort. În cazul alăturării siliciului cu magneziul se precipită compusul chimic Mg_2Si ; o concentrație necorespunzătoare de magneziu și/sau siliciu are ca efect formarea unui volum inacceptabil de compus chimic. Cu toate acestea, alăturarea din exemplu este soluția recomandată, deoarece atât siliciul cât și magneziul sunt reprezentate în concentrații corespunzătoare. De subliniat că materialele din gamă aliajelor Al-Si sunt destinate obținerii materialelor de adaos pentru sudare.

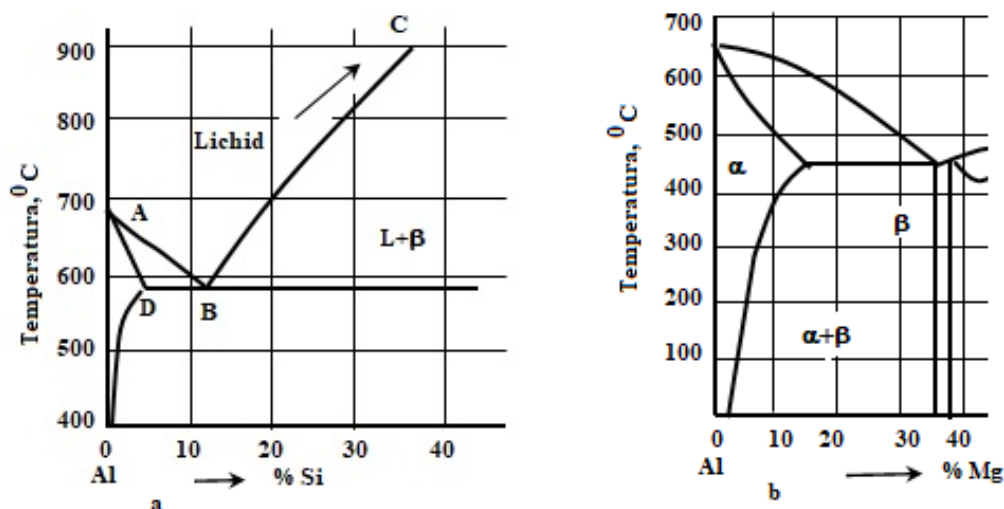


Fig. 4.2 Diagramele de echilibru pentru aliajele: a. Al - Si și b. Al - Mg, aliaje fără transformări de fază în stare solidă

În sistemul binar Al-Si, figura 4.2.a, porțiunea dinspre aluminiu, se observă reducerea temperaturii de topire cu creșterea conținutului de siliciu. În acest domeniu solidificarea începe cu germinarea și creșterea de dendrite din soluție solidă α , siliciu dizolvat în matricea aluminiu. Dacă aluminiul pur solidifică la 660°C, adaosul de siliciu reduce temperatura până la 570°C, la 11,2%Si, linia DB din figură. Soluția solidă are o concentrație maximă de siliciu la temperatura eutectică, concentrație de 1,32%Si (punctul D), ulterior aceasta scăzând până

la 0,067% și la 20°C (curba DE). În partea dinspre siliciu (punctul C, la 100%Si) este de 1414°C.

Eutecticul aliajului binar este plasat la o concentrație de 11,2% și constă adintr-un amestec de soluție solidă α și siliciu fin dispersat (asemănător perlitei).

Diagrama binară AlMg, figura 4.2.b, prezintă aceeași formă în zona dinspre aluminiu, temperatura eutectică fiind mai mică, 450°C, temperatură la care solubilitatea magneziului în aluminiu este de 15%, solubilitate ce scade până la 1,5% la 20°C. În domeniul 35...60%Mg diagrama devine complexă, existând o suită de soluții solide și compuși chimici. Pentru domeniul de interes, conținut redus de magneziu, compoziția chimică a eutecticului este soluție solidă α (Mg în matricea de Al) și compusul intermetalic Mg_5Al_8 .

În această compoziție prezența siliciului introduce un alt compus chimic, Mg_2Si , cu temperatura de topire 1081°C.

În aceste condiții, structura primară, de solidificare va fi următoarea: precipită inițial o cantitate mică de Mg_2Si (temperatura de solidificare cea mai mare), compus ce poate deveni germene de cristalizare pentru dendritele de soluție solidă α cu solvit siliciu sau magneziu. Dată fiind viteza mare de răcire, acestea nu au timp să se dezvolte și masa lichidă cristalizează sub formă de amestec mecanic fin de soluție solidă, siliciu și compus chimic Mg_2Si . În consecință, structura din cusătură prezintă dendrite scurte din soluția solidă α , aluminiu ce a dizolvat siliciu, structura de solidificare, într-o masă de eutectic format din soluție solidă suprasaturată cu siliciu și siliciu fin dispers, urmare a răcirii rapide, figura 4.2.a. Deoarece aliajele implicate nu prezintă transformări de faze în stare solidă, structura prezentată în figura 4.3.a este așa numita structură primară, structură rezultată din procesul de solidificare și care este posibil de examinat ca atare la temperatura camerei.

În zona de trecere materialul de bază se află practic, din punct de vedere termic, în intervalul de solidificare, domeniul de coexistență lichid-solid. Mecanismul de difuzie este activat și dendritele se dizolvă parțial (neuniformitatea de compoziție chimică susține acest fenomen), reducând dimenaiunea dendritelor.

Spre zona de trecere, zonă în care are loc atât amestecarea material de bază material de adaos cât și difuzia între cele două materiale de concentrații diferite, compoziția masei răcite după difuzie este diferită de cea obținută prin amestecarea celor două materiale. Prezența magneziului are ca efect formarea unei soluții solide complexe Al-Si (diagrama de echilibru Al-Si) și Al-Mg (diagrama de echilibru Al-Mg), alături de siliciul fin dispersat, precum și compusul $MgSi_2$, figura 4.3.b.

Zona de trecere și zona influențată termic sunt, microscopic, asemănătoare, caracterizate prin prezența unor dendrite fine de soluție solidă incluse într-o masă de tip amestec mecanic, aspect generat de difuzia activată în intervalul de solidificare al celor două sisteme, figura 4.3.c.

Metalul de bază, neafectat termic, figura 4.3.d, prezintă o structură omogenă, formată din celule dendritice bine dezvoltate de soluție solidă Al-Si-Mg separate de zone fine de eutectic.

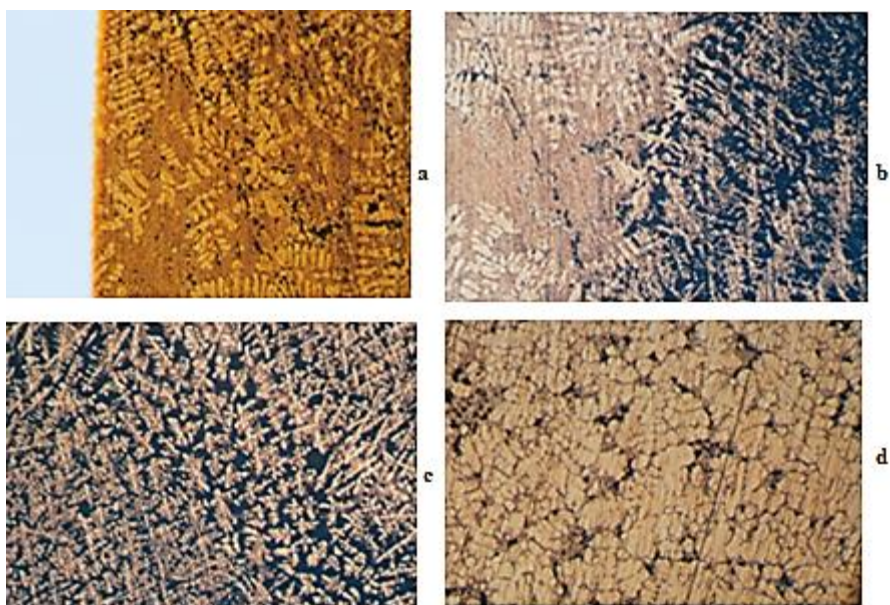


Fig. 4.3 Modificări structurale într-o îmbinare pe material de bază AlSi7Mg1 turnat, cu metal de adaos AlSi4, procedeu WIG: a. Metal depus; b. Limita metal depus / zona de trecere, c. Zona de trecere; d. Metal de bază

În figura 4.4 sunt prezentate modificările structurale într-o încărcare prin sudare realizată pe fontă albă aliată. Structura materialului de bază, figura 4.4.a și b, este formată din ledeburită (cementită și perlită - ferită + cementită) alături de carburi complexe, $(Cr, Fe)_7C_3$. Spre deosebire de carburile de tip cementitic, Me_3C , ce se dezvoltă sub formă de rețea (fagure), carburile superioare au un aspect fibros longitudinal (se dezvoltă pe o axă), iar în secțiune transversală au o formă poligonală.

Pe măsură ce temperatura crește insulele de perlită scad ca volum, iar rețeaua de carburi se reduce și se manifestă o aparentă tendință de orientare a celor doi constituenți pe direcția gradientului termic, figura 4.4 c...f.

În apropiere de linia de fuziune, sub efectul combinat al difuziei ce susține dizolvarea carburilor, al transformării rețelei fierului din structura $\alpha \rightarrow \gamma$, la temperaturi peste $1000^\circ C$, are loc dizolvarea integrală a perlitei, rezultând o masă ferito-austenitică (Cr stabilizează ferita) cu „lanțuri” de carburi complexe, caracterizate de anizotropie și stabilitate termică pe anumite direcții cristalografice mai bună, figura 4.4 g și h.

Zona de trecere este caracterizată de o structură martensitică cu numeroși pori fini, rezultați din difuzia gazelor dizolvate în masa fontei, figura 4.4.i.

Cusătura sudată este ferito-martensitică figura 4.4.j (masa metalului depus îmbogățit cu carbon difuzat din fontă) cu pori masivi în partea superioară figura 4.4.l, rezultați din gazele acumulate ce nu au reușit să se evacueze înainte de solidificare. Gazele este posibil să fie dezvoltate de materialul de adaos – electrod cu înveliș bazic, care impune uscarea înainte de utilizare dacă stocarea a fost necorespunzătoare. Se poate observa absența formațiunilor specifice cristalizării primare.

Fonta nu este sudabilă, cea albă prin excelență, dar modificările structurale susținute de difuzie și influențate de anizotropia pronunțată a carburilor complexe oferă o imagine completă a efectului sudării asupra microstructurii.

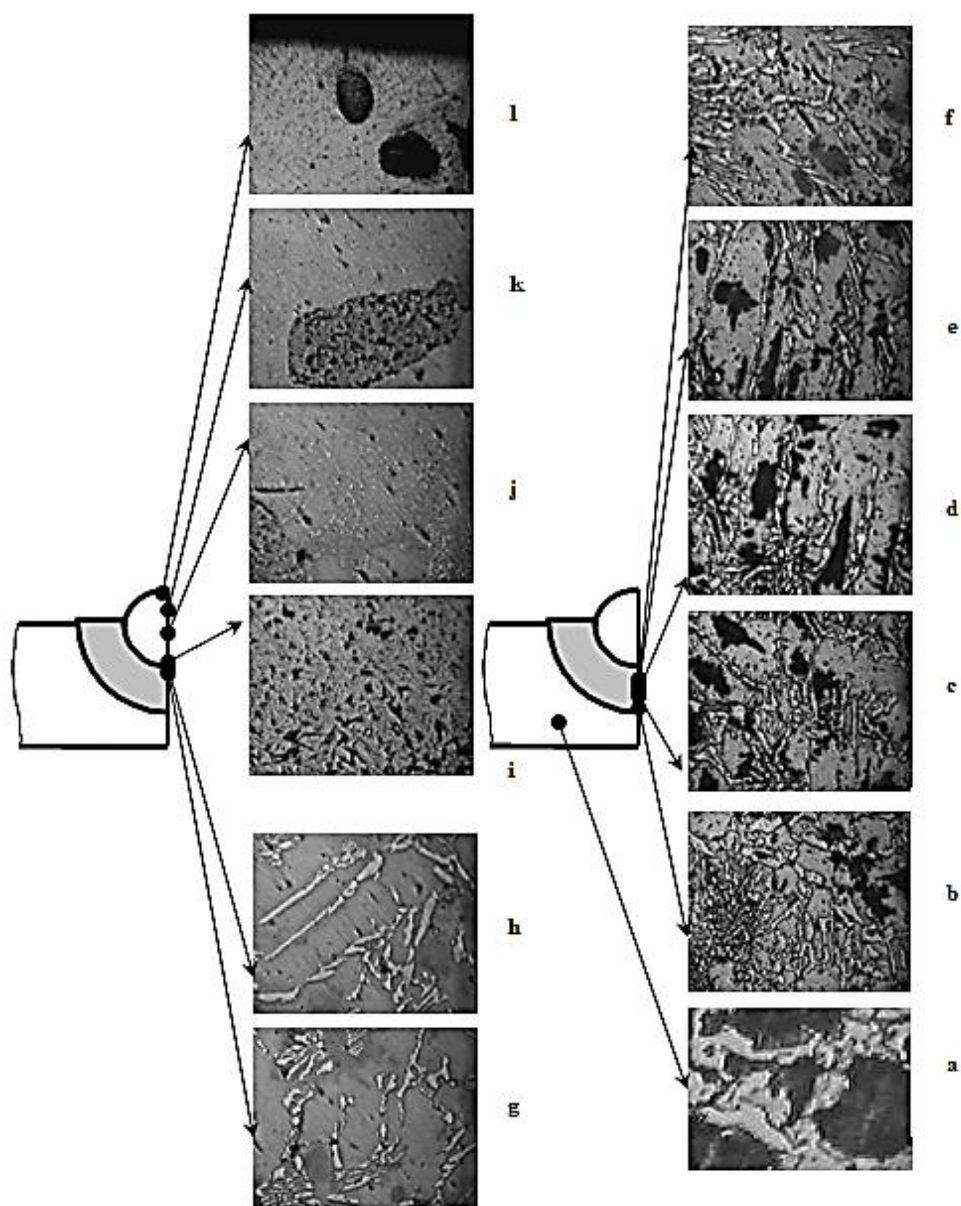


Fig. 4.4 Modificări structurale induse de o depunere prin sudare pe fonta albă aliată, FeCrMo1, cu electrod oțel E 42 4 B 42 H5

Modificări structurale în cazul oțelurilor inoxidabile

Oțelurile inoxidabile sunt oțeluri înalt aliate, prezența elementelor de aliere generând structuri tipice prin modificarea până la anihilare a punctelor caracteristice polimorfismului fierului. Există oțeluri austenitice, feritice și duplex, denumiri conferite de structura dominantă. În exemplul din figura 4.5 este un oțel austenitic.

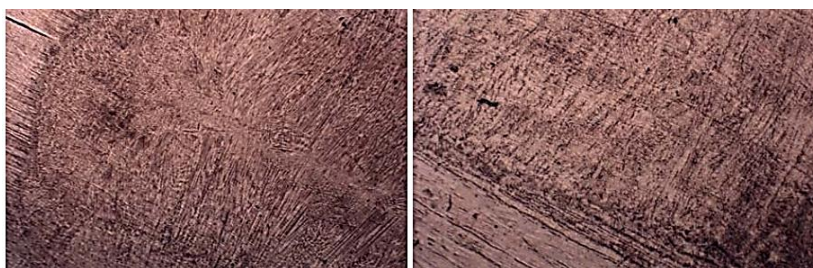


Fig. 10.5 Punct sudat prin rezistență pe oțel inoxidabil austenitic 304

Marca de oțel utilizată solidifică austenitic fără să parcurgă domeniul feritic tip δ . Astfel transformarea polimorfă este anihilată, ceea ce permite păstrarea structurii primare, de tip dendritic. În figura 10.5 este evidentă afectarea structurii inițiale a semifabricatului, structura texturată, rezultat al prelucrării prin laminare pentru obținerea tablei.

Modificări de structură în cazul oțelului sudabil

Revenind la cazul oțelurilor, la compoziție chimică identică, temperatură maximă atinsă pe durata ciclului identică, timpul de răcire pe intervalul termic critic determină modificările structurale în ZIT. De asemeni, poziția rândului de sudare, în cazul sudurilor multistrat, influențează microstructura îmbinării. În figura 4.6.b se poate observa granulația grosieră din ZIT în stratul final, comparativ cu stratul de rădăcină, figura 4.6.c, unde structura zonei influențate termic este finisată, urmare a tratamentului termic reprezentat de următorul rând de sudură.

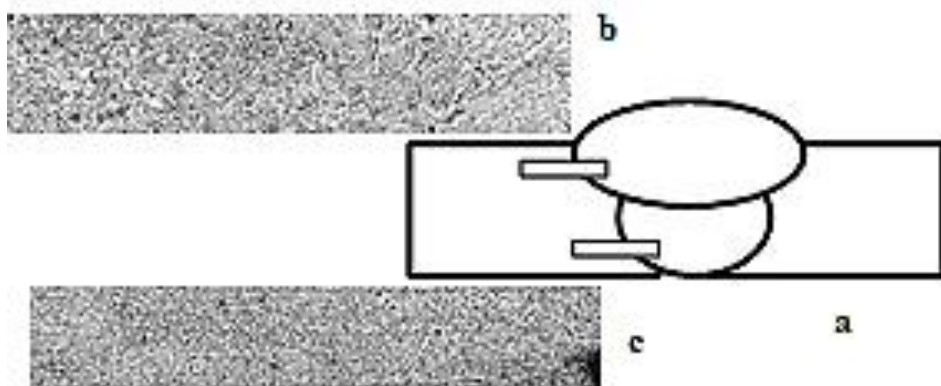


Fig. 4.6 Microstructura oțelului P235GH (oțel pentru țevi) funcție de nivelul rândului de sudare. a. schița îmbinării; b. microstructura rândului final, zona de trecere și ZIT; c. microstructura rândului de rădăcină, zona de trecere și ZIT

Cusătura este un mix de ferită cu morfologie aciculară (AF) alături de ferită germinată pe limita fostului grăunte de austenită (GBA), figura 4.7. În acest mix se întâlnesc separări perlitice (FC(P)). Zona supraîncălzită prezintă o rețea de ferită dezvoltată pe limitele de grăunte austenitic, constituenții fiind ferită în rețea asociată cu perlită. Zona normalizată este omogenă, cu grăunți fini, amestec omogen de ferită și perlită. Materialul de bază este prelucrat prin deformare plastică, fapt confirmat de grăunți de ferită alternând cu perlita dispusă predominant în șiruri.

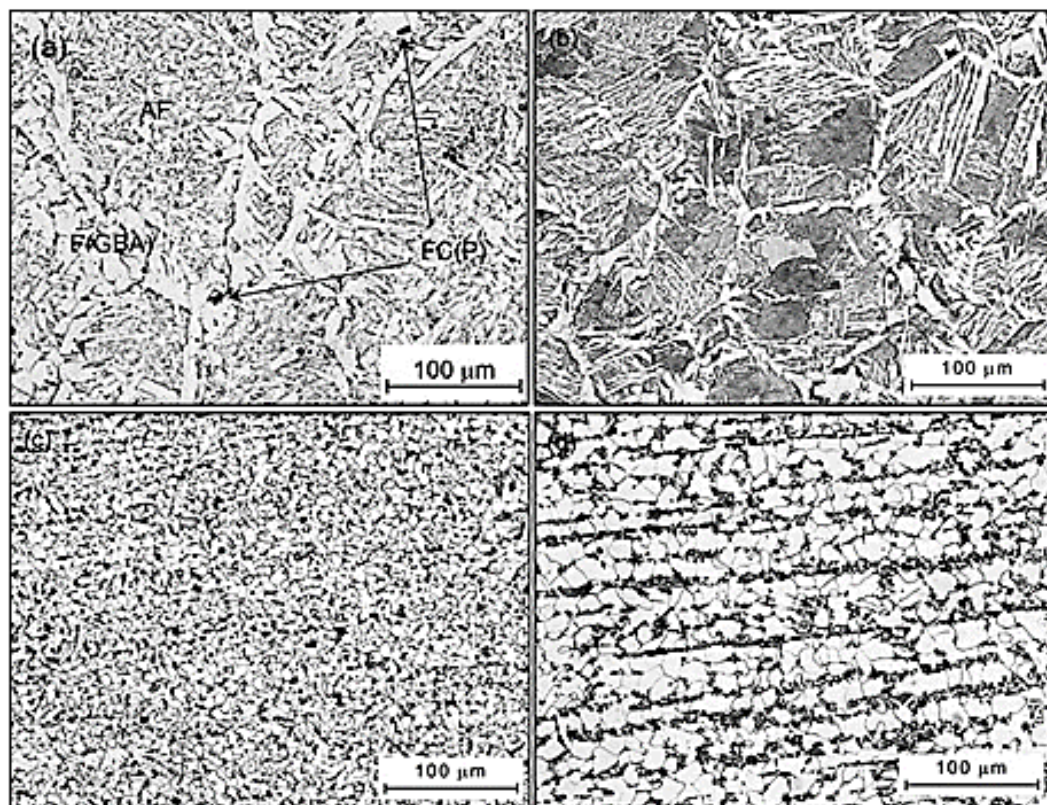


Fig. 4.7 Microconstituenți caracteristici în îmbinările pe oțel cu conținut redus de carbon. a. Cusătură; b. ZIT, fâșia supraîncălzită; c. zona normalizată; d. material de bază

4.4 Influența compoziției chimice asupra microstructurii oțelurilor inoxidabile

Oțelurile inoxidabile reprezintă o categorie aparte de aliaje. Sunt oțeluri ce conțin peste 12% crom, element ce le asigură rezistență la coroziune. Datorită acestei calități sunt utilizate cu precădere în structurile sudate din industriile chimică și alimentară. Prezența elementelor de aliere în concentrații importante modifică structura intimă a aliajelor, ceea ce le conferă stabilitatea la coroziune, dar impune o serie de măsuri tehnologice specifice asociate particularităților structurale și caracteristicilor termo-fizice, toate cu scopul obținerii unei îmbinări de calitate cu păstrarea calității lor specifice.

Elementele de aliere care extind domeniul de existență al fazei γ (austenita) și micșorează domeniului α , deci care determină scăderea temperaturii A_3 și creșterea A_4 se numesc *elemente gamagene*. Unele din aceste elemente, solubile în Fe γ , extind domeniul austenitei până la temperatura ambiantă, ceea ce conduce la dispariția transformării eutectoide. Din această familie fac parte Ni, Mn, Co, etc., nichelul fiind elementul gamagen de referință.

Alte elemente, între care carbonul, măresc doar domeniul austenitic, păstrând transformarea eutectoidă deasupra temperaturii ambiante, figura 4.8.a. Alături de carbon sunt de menționat și alte elemente cu acest efect, cum ar fi azotul, cupru și zinc.

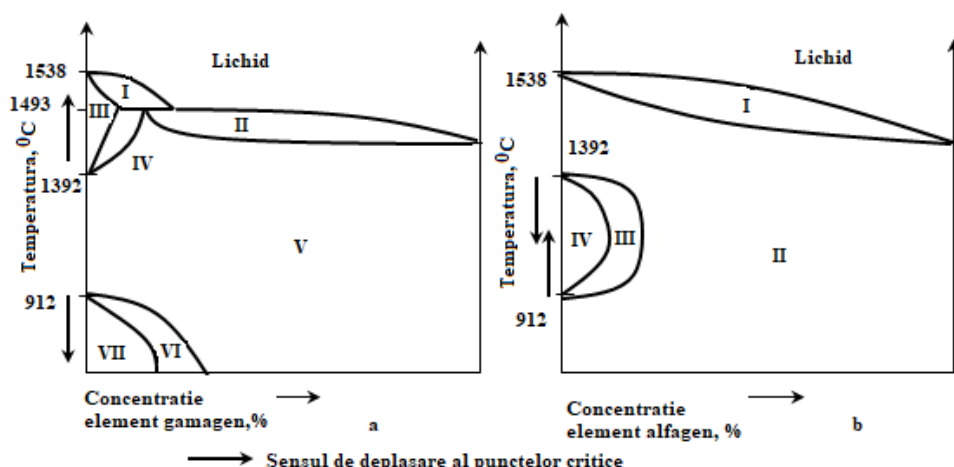


Fig. 4.8. Influența elementelor de aliere asupra transformărilor polimorfe ale fierului: a. Influența elementelor gamagene asupra punctelor critice A3 și A4. Domenii constituenți: I: L+ δ ; II: L+ γ ; III: δ ; IV: δ + γ ; V: γ ; VI: γ + α ; VII: α . b. Influența elementelor alfagene. Domenii constituenți: I: L+ α ; II: α ; III: α + γ ; IV: γ . Elemente de aliere gamagene: Ni, Mn, Co, Pt, Os, Ir, Ra, Rh. Elemente de aliere alfagene: Cr, V, Si, Al, Be, Ti, As, Sb, Mo, W

Elementele de aliere cu efect de extindere a domeniului α , respectiv creșterea punctului critic A3 și reducerea temperaturii punctului critic A4, figura 4.8.b, au fost incluse sub denumirea de *elemente alfagene*. Dintre elemente alfagene amintim cromul, vanadiul, molibdenul, wolframul, siliciul, aluminiul, titanul, beriliu, borul, zirconiu, niobiul, etc. Pentru elementele alfagene se consideră element de referință Cr.

La fel ca și elementele gamagene, unele din aceste elemente - Cr, Mo, W, V, Ti, Si, Al, Be etc., foarte solubile în forma de cristalizare CVC, fac ca, la anumite concentrații, ferita să ocupe tot domeniul de sub linia solidus, determinând dispariția transformărilor fazice $\delta \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$.

Efectul de rezistență la coroziune, proprietate specifică oțelurilor inoxidabile, este datorat conținutului de crom. Un oțel cu o concentrație mai mare de 12,5%Cr este un oțel inoxidabil. Cromul din aliaj asigură formarea unui strat de oxid aderent și rezistent la atacul unui număr important de reactivi chimici. Pentru a păstra aceste calități, pe lângă conținutul de crom este necesar ca procentul de carbon să fie redus, deoarece formarea carburilor sărăcește soluția solidă în crom, ceea ce permite atacul localizat al substanțelor agresive, urmat de evoluția procesului de coroziune în profunzimea materialului.

Prezența simultană a celor două tipuri de elemente, în proporții variabile, permite obținerea unei familii extinse de aliaje cu caracteristici structurale, anticorozive și mecanice variate.

Funcție de concentrația în diferitele elemente de aliere oțelurile inoxidabile pot solidifica și păstra una din cele două forme de existență a fierului (α - CVC sau γ - CFC) ori un amestec între acestea. În funcție de structura existentă, oțelurile inoxidabile pot fi feritice, când este suprimată transformarea δ - γ , austenitice, când faza γ rămâne și la temperatura ambiantă, sau duplex, situație în care cele două faze coexistă. Este necesar să subliniem proprietățile dezavantajoase ale acestor două faze: austenita este predispusă la

fisurare la cald în timp ce ferita este predispusă la creșterea grăunților și dezvoltarea de tensiuni reziduale importante.

Sudarea intervine agresiv în acest echilibru dozat cu atenție din faza de elaborare a oțelului inoxidabil, supus acestui proces tehnologic, existând pericolul afectării tuturor proprietăților materialului.

Noțiunile de nichel echivalent și crom echivalent

Particularitățile legate de efectele induse de elementele de aliere au condus la introducerea noțiunilor de nichel echivalent și crom echivalent, noțiuni asemănătoare celei de carbon echivalent, noțiuni utile atât pentru sudarea oțelurilor aliate cât și în cazul sudurilor eterogene. Aceste noțiuni au la bază efectul de stabilizare a formelor alotropice corespunzătoare și cuprind, în relațiile elaborate în acest scop, un număr de elemente de aliere utilizate frecvent în compoziția oțelului inoxidabil, cu efect asemănător. Coeficienții ce afectează concentrația fiecărui element în parte reflectă intensitatea intervenției asupra poziției punctelor de transformare.

Pentru estimarea, pe baza compoziției chimice a tipului de structură obținută după sudare s-a construit diagrama Schaeffler, figura 4.9. S-a realizat astfel legătura între valorile calculate și microstructura caracteristică. În funcție de valorile obținute pentru indicatorii de compoziție chimică, structura obținută va fi monofazică, bifazică sau plurifazică, fiecare din aceste structuri prezentând avantaje și dezavantaje specifice.

Relația de calcul pentru crom echivalent:

$$Cr_e = Cr + 1,5 \cdot Si + Mo + 0,5 \cdot (Ta + Nb) + 2 \cdot Ti + (W + V + Al) \quad (4.1)$$

iar cea pentru nichel echivalent:

$$Ni_e = Ni + 30 \cdot C + 0,5 \cdot Mn + 0,5 \cdot Co \quad (4.2)$$

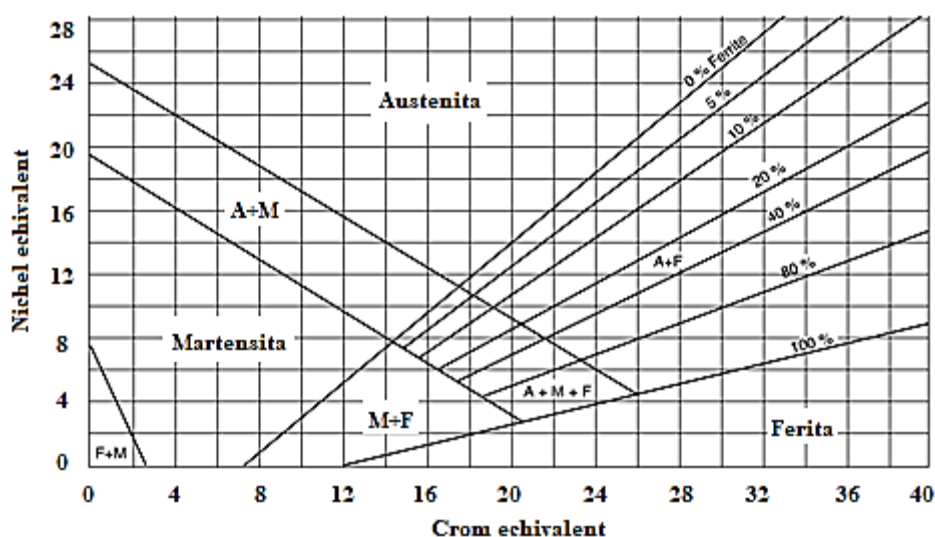


Fig. 4.9. Diagrama Schaeffler. A – austenită; M – martensită; F – ferită

Tipuri de oțeluri inoxidabile și caracteristicile acestora privind sudabilitatea

Se consideră, în general, că oțelurile ce conțin peste 12%Cr sunt considerate oțeluri inoxidabile. Există însă un număr considerabil de mărci al căror conținut în crom este de 9%. În funcție de proporția de elemente alfa-gene și gama-gene, tipul de constituenți microstructurali variază considerabil și conferă aliajului trăsături specifice.

În practică se întâlnesc următoarele variante de oțeluri inoxidabile:

- martensitice;
- austenitice;
- feritice;
- ferito-austenitice (duplex).

Oțelurile martensitice sunt oțeluri Fe-Cr-C (carbon până la 1,2%), magnetice, caracterizate de rezistență mecanică bună, rezistență la coroziune moderată, dar bună rezistență la temperaturi înalte. Sunt utilizate în special în echipamentele energetice (turbine). Sudabilitatea este slabă, existând pericolul de fisurare la rece, în prezența hidrogenului, sensibilitate accentuată atât de structura martensitică, incapabilă să dizolve hidrogen, cât și de coeficientul de dilatare ce induce la sudare tensiuni importante în zona influențată termic.

Starea de tensiuni se controlează prin preîncălzire, pericolul fisurării la rece prin pregătirea atentă a materialelor (curățare, uscare materiale de adaos, etc.) și utilizarea de material de adaos de tip austenitic.

Oțelurile austenitice sunt considerate oțelurile inoxidabile cu cea mai bună sudabilitate. Sunt oțeluri nemagnetice. Din punct de vedere tehnologic, mod de asigurare a proprietăților mecanice, se împart în două tipuri: oțeluri durificabile prin deformare plastică și oțeluri durificabile prin precipitare. Fără a intra în detalii, problemele legate de aceste mărci de oțel sunt cele legate de creșterea grăunților și de posibilitatea de formare la încălzire a feritei. Ferita permite formarea carburilor $M_{23}C_6$, ceea ce duce la pierderea proprietăților anticorozive sau, la răcire, permite precipitarea fazei σ pe baza grupărilor FeCr. Pentru a evita aceste inconveniente materialul de adaos este necesar să fie sărac în carbon. O altă problemă este legată de tendința de fisurare la cald, urmare a segregării intense.

Oțelurile feritice sunt oțeluri cu conținut de crom de până la 30%, cu rezistență excelentă la coroziune, dar sudabilitate relativ modestă. Există, în funcție de modul de elaborare, mai multe variante de oțeluri feritice. Oțelurile de mare puritate impun condiții speciale privind protecția pe durata sudării.

Inconveniente principale sunt cele legate de creșterea excesivă a grăunților în zona de influență termică, cu formarea de martensită la răcire. Sudabilitatea este puternic influențată de prezența elementelor stabilizatoare pentru ferită, elemente ce controlează plasticitatea în stare sudată. Durificarea se poate produce prin formarea de fază σ (sigma) sau fază χ (chi) de forma $Fe_{36}Cr_{12}Mo_{10}$, faze ce se pot descompune la răcire în două faze alfa: α pe bază de fier (bogată în fier) și faza α' , bogată în crom, ceea ce conduce la scăderea rezistenței la coroziune.

Ca material de adaos se recomandă în general evitarea utilizării unui material de adaos sau utilizarea unui material cu compoziție identică pentru mărcile de puritate ridicată. Pentru

mărcile obișnuite se recomandă materiale de adaos de tip austenitic, capabil să solubilizeze hidrogenul, sau chiar materiale bogate în nichel.

Oțelurile ferito-austenitice au proprietățile asigurate de proporția controlată între ferită și austenită, ceea ce face ca la sudare să se impună condiții tehnologice riguroase. Materialul de adaos se recomandă să fie selectat, ideal, identic cu cel de bază, eventual mai bogat în nichel.

Importanța diagramei rezidă în faptul că știind compozițiile chimice ale materialului de bază, metalului depus și procedeul de sudare – coeficienții de participare specifici procedeului, se poate estima identitatea structurală a cusăturii. Dată fiind importanța tenacității pentru materialul cusăturii, precum și caracteristicile constituenților, pentru oțelurile aliate domeniul preferat este domeniul austenitic cu conținut redus de ferită, maximum 20%. De asemenea, se observă că pentru oțeluri carbon sau slab aliate martensita este constituentul de temut.

Pentru selecția materialului de adaos se ține cont de criteriul structurii finale. Pornind de la domeniile de existență ale materialului de bază / a celui de adaos exprimate prin dreptunghiul caracteristic delimitat de conținutul calculat minim / maxim de elemente tip Ni /Cr atât pentru materialul de bază cât și pentru cel de aport și impunând tehnologic contribuția fiecăruia la cusătura (coeficientul de participare) se poate selecta cu suficientă acuratețe un material de adaos corespunzător.

Se vor evita domeniile cu constituenți fragili sau se vor lua măsuri tehnologice de evitare a constituenților fragili. Se evită de asemenea domeniile bifazice cu constituenți fragili și mai ales domeniile trifazice.

În concluzie:

- structura de tip integral austenitic în materialul cusăturii asigură proprietăți de tenacitate și plasticitate corespunzătoare, dar este expusă pericolului fisurării la cald;
- structura de tip feritic este predispusă la fisurare asistată de hidrogen;
- soluția cu cea mai largă aplicație din punct de vedere a alegerii materialului de adaos este o compoziție chimică care să asigure o structură austenitică cu un procent redus de ferită.

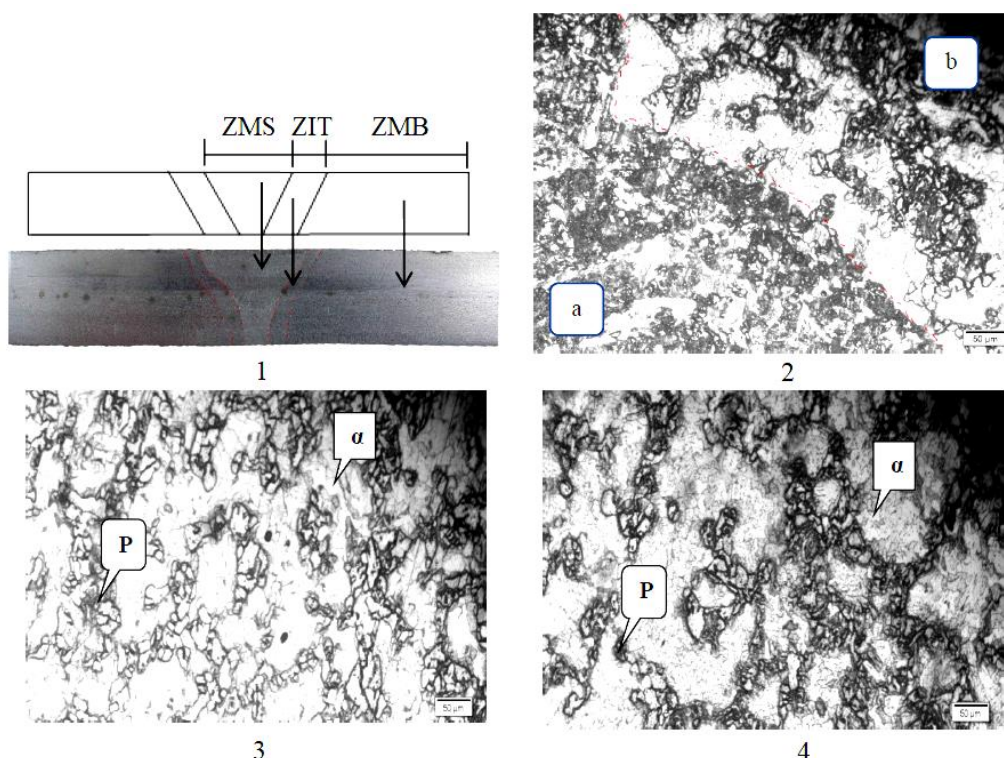
4.5 Mod de lucru

Această lucrare de laborator are două părți aplicative. Astfel, în prima parte se vor analiza microstructuri ale unor îmbinări sudate, iar în a doua parte, folosind diagrama Schaeffler, se va fi identifică microstructura rezultată în urma sudării unor oțeluri inoxidabile.

Analiza microstructurii unor îmbinări sudate

1. Se vor discuta microstructurile prezentate în continuare.
2. Se vor analiza la microscop diferite îmbinări sudate alături de diagrama de echilibru corespunzătoare aliajului.
3. Se vor analiza corelațiile existente între microstructură și diagramele de echilibru.
4. Aspectele discutate precum și structurile analizate vor fi cuprinse în referatul lucrării.

1. Microstructura unei îmbinări sudate; oțel cu 0,1%C și 0,27%Mn [2]



În figura de mai sus: 1 – macrostructura piesei sudate; 2 – microstructura zonei metalului solidificat (ZMS, a) și a celei influențate termic (ZIT, b), 20x; 3 – microstructura zonei influențate termic, 20x; 4 – microstructura metalului de bază (ZMB), 20x.

După cum se poate observa din figura 2, grăunții din ZMS sunt mai fini comparativ cu cei din ZIT. Linia roșie aproximează limita dintre cele două zone.

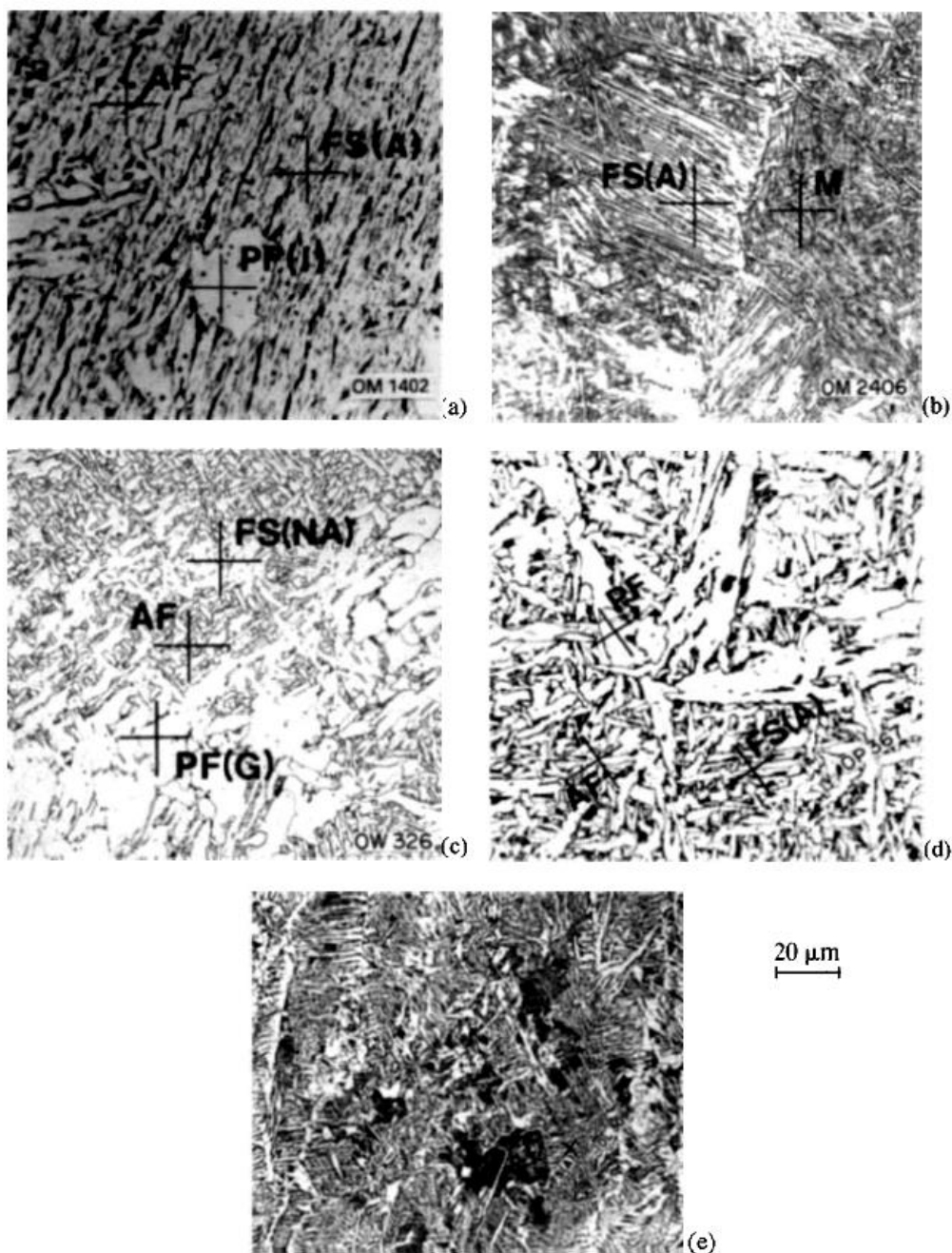
Microstructura ZIT (figura 3) este formată din grăunți mari, grosolani de ferită și din perlită. Această structură apare ca urmare a faptului că, în timpul procesului de sudare, zona ZIT, adiacentă liniei de fuziune, suferă o încălzire și o răcire rapidă, temperatura putând depăși punctul de topire al oțelului. În consecință, zona vecină liniei respective va avea o microstructură grosolană. Se observă că predomină grăunții de ferită α , în timp ce perlita P este în cantitate mult mai mică.

Figura 4 arată că microstructura zonei de metalului de bază este mai fină decât celelalte zone ale îmbinării sudate. Aici, căldura generată în timpul procesului de sudare nu induce modificări ale microstructurii și proprietăților metalului. După cum se vede în imagine, microstructura este predominant feritică, cantitatea de perlita fiind mai mică, neapărând nici un fel de modificare a acesteia din punct de vedere al constituenților structurali sau a mărimii grăunților.

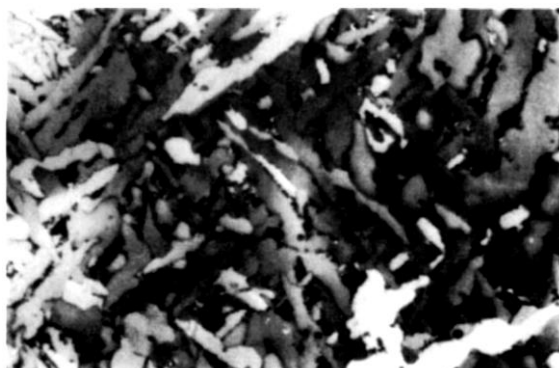
2. Microstructuri ZMS în cazul sudării unui oțel manganos [3]

Constituenții structurali ce pot apărea în zona solidificată a unei îmbinări din oțel manganos sunt prezentați în figura de mai jos, în esență, aceste structuri fiind un amestec de ferită primară (crescută la limita foștilor grăunți de austenită și poligonală), denumită PF(G) și PF(I), și ferită Widmanstätten. Aceasta din urmă poate lua forma unor plăci laterale, germinate la limita grăunților de austenită, formând o structură lamelară notată cu FS(A),

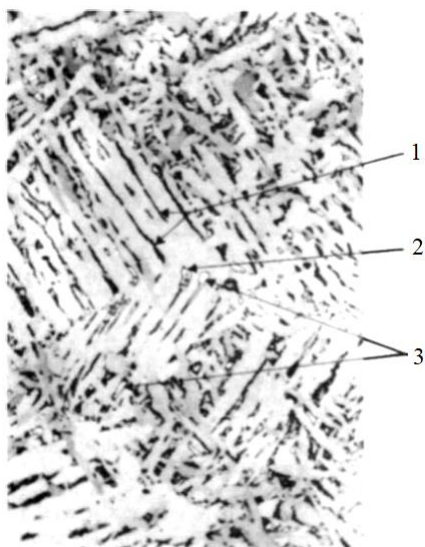
figura (a) și (b). Alternativ, interiorul grăuntelui se poate transforma total sau parțial într-o ferită aciculară fină, așa cum se vede în imaginile (c) și (d). În unele cazuri, pot apărea agregate ferito-carburice asemănătoare cu cele de echilibru (perlita), (e). Ferita aciculară este prezentată mai detaliat în imaginea (f), iar ferita aliniată cu martensita (2), austenita (3) și carburi (1) în figura (g).



În figură: PF – ferită primară; PF(G) – ferită crescută la limita grăuntelui austenitic; PF(I) – ferită poligonală intergranulară; AF – ferita aciculară; FS(A) – ferită aliniată cu o fază secundară; FS(NA) – ferită nealiniată cu o fază secundară; FC – agregat ferito-carburic (inclusiv perlită); M – martensită.



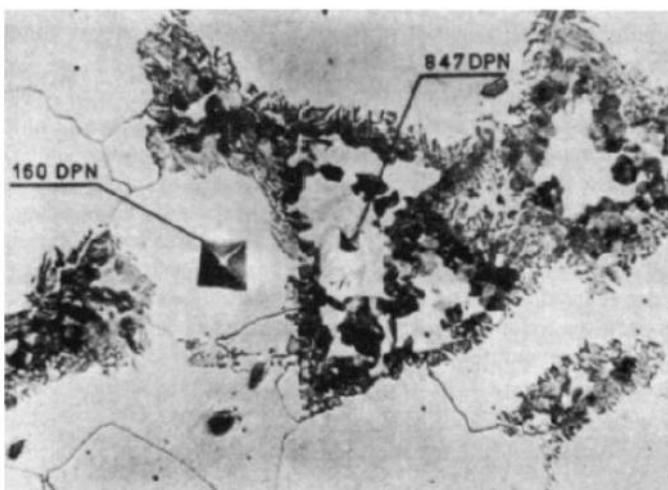
(f), 1600x



(g), x1000

Pentru acest tip de oțeluri, o bună ductilitate în zona rostului este în general asociată cu o proporție mare de ferită aciculară, în același timp trebuind evitate pe cât posibil structurile lamelare grosolane tip FS(A).

3. Microstructura ZIT a unui oțel carbon rezultată în urma unei transformări structurale parțiale [3]

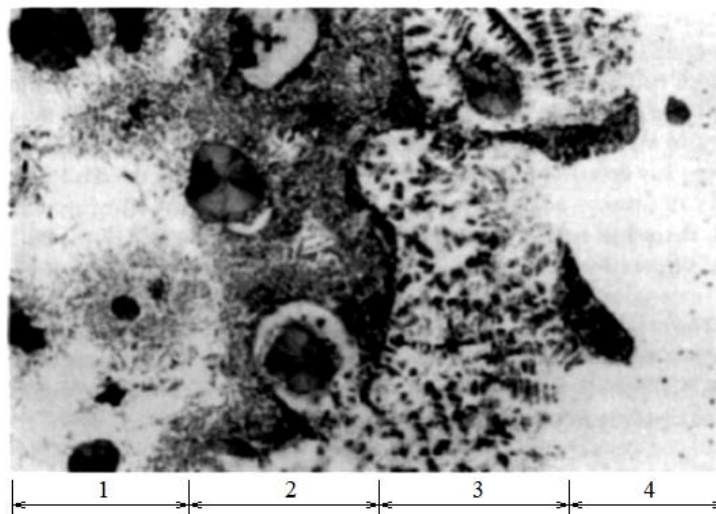


În regiunea ZIT, care este relativ îngustă, pot avea loc și transformări structurale parțiale. De exemplu, într-un oțel carbon cu structură ferito-perlitică înainte de sudare, insulele de perlită se transformă în austenită la încălzire și apoi în martensită sau bainită la răcire (în figură transformarea are loc preferențial în centrul insulei de perlită, 820x). Astfel, după sudare, regiunea poate conține compuși duri încorporați într-o matrice feritică relativ

moale, netransformată (se observă diferența de duritate între cele două zone; s-a folosit metoda microdurității Vickers).

Acest tip de structură nu este dezavantajoasă din punct de vedere funcțional (deși conține regiuni dure încorporate într-o matrice relativ moale), necunoscându-se până acum nici o distrugere a vreunei îmbinări sudate în timpul funcționării sau în teste de laborator.

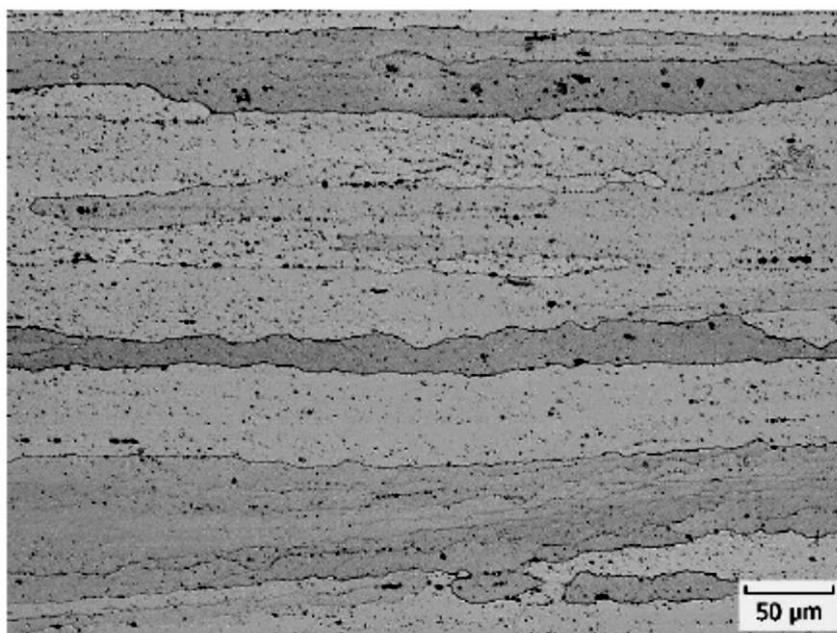
4. Microstructura ZIT a unei fonte cenușii cu grafit nodular [3]



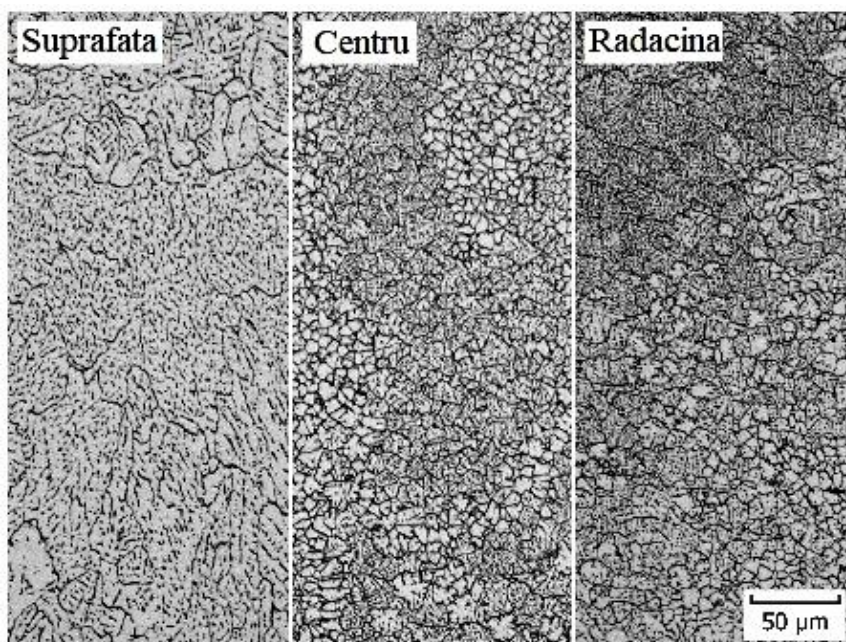
Sudabilitatea fontei cenușii cu grafit nodular este ceva mai bună decât a celorlalte tipuri de fontă cenușie și aceasta deoarece are un conținut de sulf și fosfor la un nivel mai scăzut, riscul de fisurare la cald în zona metalului solidificat fiind redus. Modificările metalurgice care au loc în ZIT, în urma sudării prin topire, sunt, totuși, practic aceleași în toate fontele cenușii. În regiunea care se încălzește peste temperatura de transformare eutectoidă, ferita trece în austenită. Peste cca. 800°C, grafitul începe să treacă în soluție, simultan precipitând cementita, mai întâi la limita grăunților, iar apoi, la temperaturi mai ridicate, când se dizolvă și mai mult grafit, în interiorul grăunților de austenită. La temperaturi și mai ridicate pot apărea topiri locale. La răcire, rețeaua de cementită se menține, dar austenita se transformă: în regiunile cu conținut ridicat de carbon în martensită, iar în cele cu conținut mai scăzut de carbon în perlită. În consecință, zona influențată termic are o structură complexă, cuprinzând zone retopite, grafit nedizolvat, martensită, perlită fină, perlită grosolană și ceva ferită (1 – grafit, ferită și constituenți structurali de reacție, cu procent scăzut de carbon; 2 – grafit sferoidal parțial dizolvat, cementită și constituenți structurali de reacție; 3 – fontă retopită, grafit, cementită și martensită; 4 – zona metalului solidificat, aliaj de nichel). Această structură este dură și fragilă și va conduce la ruperea îmbinării sudate dacă aceasta este supusă tracțiunii sau încovoierii.

5. Microstructura unui aliaj de aluminiu – litiu (2,4% Cu, 2% Li, 1%Zn) sudat cu fascicul de electroni [4]

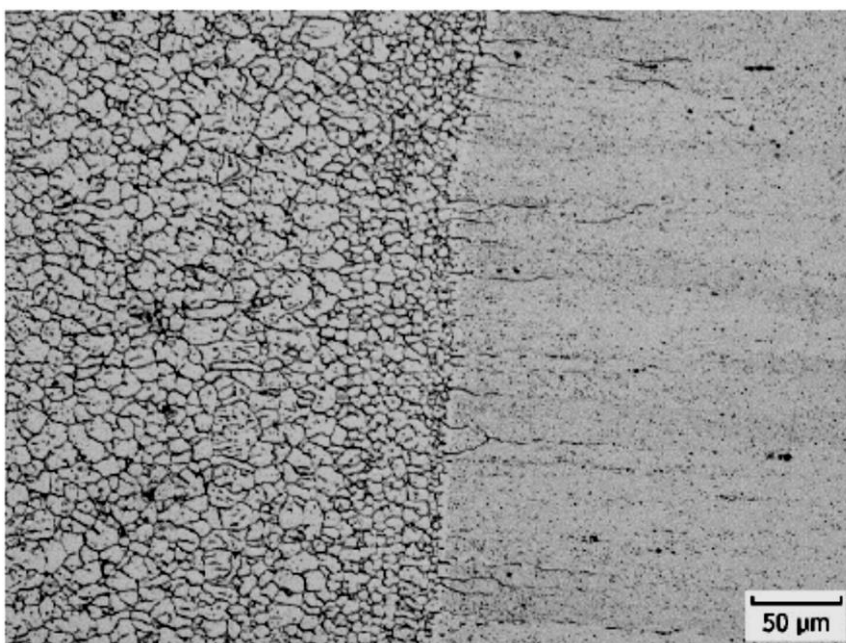
Aliajele durificabile de aluminiu Al-Li au un modul de elasticitate ridicat, densitate mică, rezistență specifică mare și rezistență ridicată la deteriorare. De aceea, componentele structurale din aliaje Al-Li joacă un rol-cheie în industria aerospațială, rol legat de reducerea greutateii, creșterea sarcinii utile și, astfel, îmbunătățirea eficienței consumului de combustibil al aeronavelor.



Analizând imaginea obținută prin microscopie optică a metalului de bază se observă grăunți alungați ca urmare a deformării prin laminare. Particulele negre reprezintă compuși precipitați, care au condus la durificarea aliajului.



Microstructura zonei solidificate a prezentat relativ mici diferențe între zonele caracteristice. Astfel, se poate observa că microstructura din centrul acesteia este formată din grăunți fini dendritici, aici viteza de răcire având valorile cele mai mari. Cei mai mari grăunți se găsesc, așa cum era de așteptat, în apropierea suprafeței sudate.



Imaginea de mai sus prezintă microstructura zonei de tranziție de la zona metalul solidificat la zona materialului de bază. Se observă că zona influențată termic este foarte puțin vizibilă.

Determinarea microstructurii obținute în urma sudării unui oțel inoxidabil

În cadrul lucrării de laborator fiecare student va primi o temă prin care i se alocă un material de bază cu compoziția chimică din tabelul 4.1 și un material de adaos, electrod, conform tabelului 4.2. Folosind diagrama Schaeffler va identifica structura rezultată în urma sudării. În cazul în care structura este necorespunzătoare se va sugera o soluție pentru îmbunătățirea acesteia.

Tabel 4.1

Compoziții chimice oțeluri inoxidabile									
Nr. Crt.	Tip oțel	Compoziție chimică							
		C	Mn	Si*	Cr	Ni	Mo	N	Altele
1.	M	0,08-0,15	0,5- 0,9	0,35	11,0-12,5	2 - 3	1,5-2	0,01-0,05	0,25-0,4V
2.		0,13-0,18	0,4- 0,6	1,5	11,5-13	0,5*	0,2*		0,15-0,45 Nb+Ta
3.	Fe	0,12	1,0-1,25	1,0	16-18	0,75			
4.		0,12	1,5	1,0	16-18	0,75	0,6		
5.		0,2		1,0	23-27			0,25	
6.	A DP	0,12-0,25	14 - 15	0,75*	16,6-18	1,0-1,75		0,32-0,40	
7.		0,08	5,0-6,5	1,0	16-18	5,0-6,5			1,75-2,25Cu
8.		0,2*	2,0*	0,75	22-24	12-15			
9.		0,25*	2,0*	1,5*	24-26	19-22			
10.		0,25*	2,0*	1,5-3,0	23-26	19-22			
11.		0,08	2,0*	0,75	16-18	10-14	2-3	0,1-0,16	
12.	A P	0,07	1,0*		1,0	15-17,5	3-5		0,15-0,45 Nb+Ta
13.	Duplex	0,06*	1,0*	1,0*	25-26	6-7			
14.		0,03	1,0	0,75	24-26	5,5-7,5	2,5-3,5	0,1-0,3	0,2-0,8Cu 0,1-0,5W

X* - valoare maximă

Simbolizare: M – variante martensitice; Fe – oțeluri feritice; A-DP – austenitice, durificabile prin deformare plastică; A-P - austenitice, durificabile prin precipitare; duplex – oțeluri inoxidabile austenito-feritice.

Tabel 11.2

Compoziția chimice electrozi							
Nr. Crt.	Simbol	Compoziția chimică, %					
		C	Mn	Si	Ni	Cr	Altele
1.	E 18 8Mn B 22	≤0,15	4,5-7,5	0,9	7-11	18-21	
2.	E 18 8Mn R 12	≤0,15	5-8	1,5	7-11	17-21	
3.	E 19 9 L R 12	≤0,04	0,5-1	0,6-0,9	9-11	18-21	
4.	E 19 9 L B 12	≤0,04	0,5-2,0	≤0,9	9-11	18-21	Cu≤0,1 Mo≤0,2
5.	E 19 9 L R 22	≤0,03	0,8	0,9	10,5	19	
6.	E 23 12 L R 12	≤0,04	0,5-1	0,5-0,9	12-14	22,5-24,5	
7.	E 23 12 L B 12	≤0,04	0,5-2,5	0,5-0,9	12-14	22-25	Cu≤0,5 Mo≤0,5

Exemplu de lucru

Se sudează oțelul nr. 1 austenitic cu electrod nr. 2. Coeficientul de participare al materialului de bază (diluția) este 0,2...0,3.

- Se calculează valorile Ni_e și Cr_e pentru materialul de bază.

$$Cr_{e\ min} = 13,275; Cr_{e\ max} = 15,425$$

$$Ni_{e\ min} = 4,65; Ni_{e\ max} = 7,95$$

- Se calculează valorile Ni_e și Cr_e pentru materialul depus.

$$Cr_{e\ min} = 19,25; Cr_{e\ max} = 22,25$$

$$Ni_{e\ min} = 14; Ni_{e\ max} = 19,5$$

- Coeficientul de participare este 0,2...0,3.

Valorile astfel determinate se înscriu pe diagrama Shaefler, figura 4.10. Se obține un dreptunghi caracteristic pentru concentrațiile metalului depus, **a**, și un al doilea dreptunghi caracteristic, **b**, pentru metalul de bază. Linia care unește centrele celor două domenii sugerează modul în care va evolua structura, în funcție de diluție.

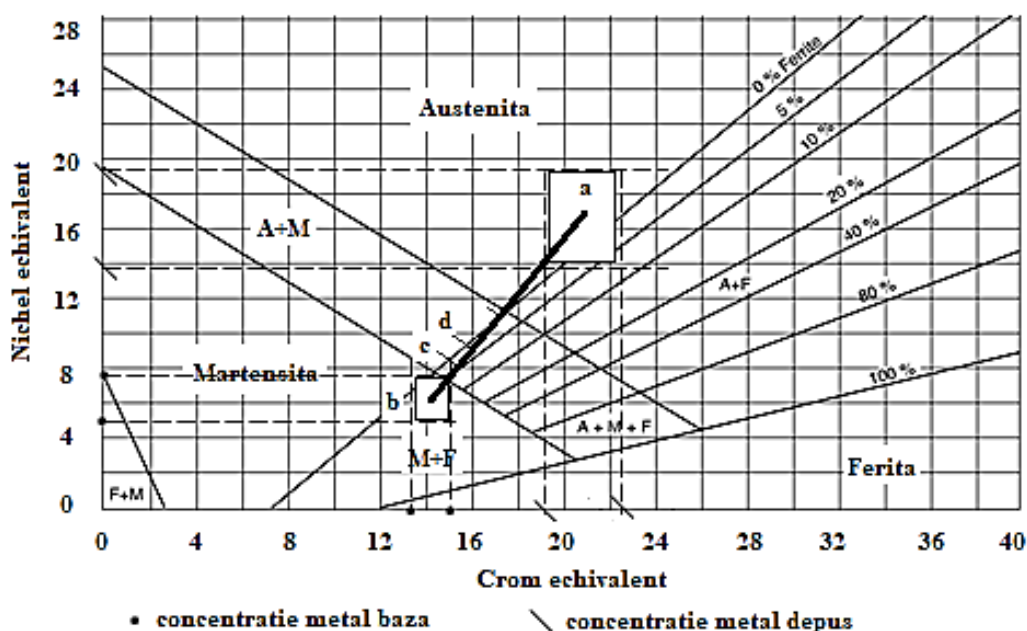


Fig. 4.10 Diagrama Schaeffler cu domeniile aferente celor două materiale din exemplu, a și b și domeniul microstructural cel mai probabil în cusătură

Împărțind linia ce unește domeniile în zece segmente egale și selectând domeniul corespunzător participării materialului de bază, segmentul cd, se pot trage concluziile privind cuplul de materiale.

Concluzie: Cuplul de materiale nu este bine ales. Cusătura va prezenta, în condițiile cele mai bune, o structură bifazică de tip austenito-martensitic; probabilitatea cea mai mare o are însă microstructura de tip austenită-martensită-ferită, inacceptabilă.

Se poate încerca un material de adaos cu valori Ni_e respectiv Cr_e mai mari, astfel încât dreapta de diluție să străbată domeniul austenito-feritic, recomandat.

Bibliografie selectivă

1. Gheorghiu D.A. et al, Lucrări practice de sudură. Îndrumar pentru lucrări de laborator, Ed. PIM, Iași, 2021
2. Husaini, N ș.a., Effects of welding on the change of microstructure and mechanical properties of low carbon steel, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 523 (2019) 012065
3. Lancaster, J.F., Metallurgy of welding, Abington Publishing, 1999
4. Bárta, J., Electron Beam Welding of 2099-T83 Aluminium-lithium Alloy Thick Plates, MATEC Web of Conferences 269, 02010 (2019)

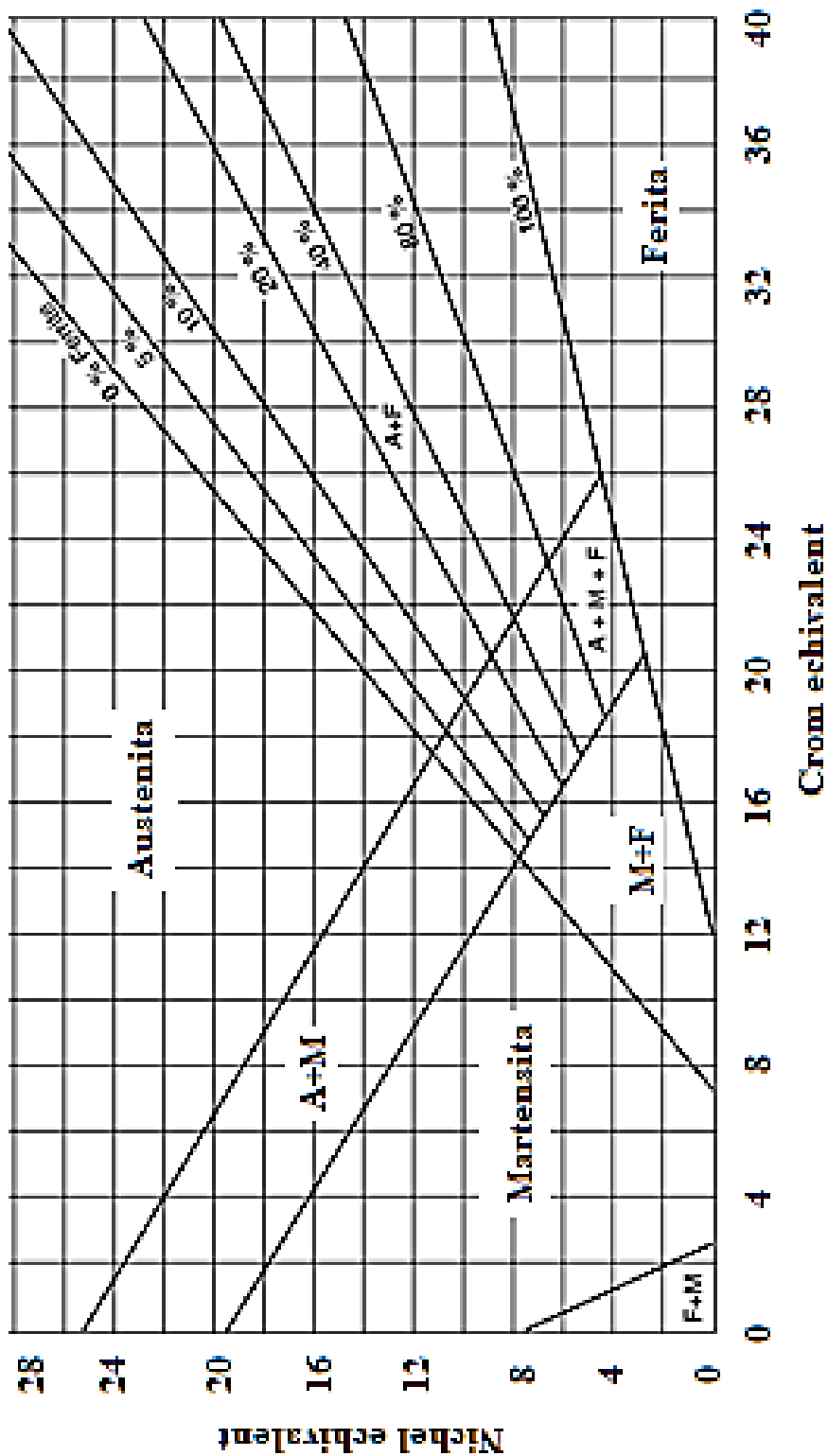


Diagrama Shaeffler de lucru

LUCRAREA Nr. 5

DISCONTINUITĂȚI ȘI DEFECTE ÎN ÎMBINĂRILE SUDATE. METODE DE CONTROL NEDISTRUCTIV UTILIZATE LA VERIFICAREA SUDURILOR REALIZATE PRIN TOPIRE

Obiectivul lucrării este cunoașterea principalelor defecte decelabile vizual, discutarea posibilității dezvoltării discontinuităților în îmbinările sudate și nivelul acceptabil al acestora. De asemenea, se urmărește stabilirea condițiilor de lucru pentru unele metode de control nedistructiv.

5.1. Noțiuni introductive

Orice produs prezintă în structura sa neuniformități, variații ale compoziției chimice sau ale structurii sale.

Se numește discontinuitate sau imperfecțiune (termenul utilizat de SR EN 5817:2015) orice întrerupere în structura ideală a unui produs, respectiv îmbinare sudată.

Atunci când prezența acestora – prin formă, dimensiune sau număr, reprezintă un pericol pentru funcționarea în siguranță a structurii sudate, discontinuitatea se încadrează ca defect. Imperfecțiunea ce primește denumirea de defect trebuie îndepărtată, reparată sau, la limită, impune rebutarea.

Defecte în îmbinările sudate

Principalul criteriu de clasificare a defectelor apărute la sudare este cauza apariției lor. În funcție de acest criteriu există trei mari categorii de defecte:

- defecte de proiectare;
- defecte/discontinuități de proces (tehnologice);
- defecte/discontinuități metalurgice.

Defectele de proiectare

Defectele de proiectare sunt de obicei imperfecțiuni majore. Îmbinările cu astfel de probleme ajung rareori în exploatare. Defectele de proiectare cuprind neglijarea ordinii de realizarea a cusăturilor, imposibilitatea umplerii unui detaliu; alegerea necorespunzătoare a tipului de sudură (ex. corelarea defectuoasă a dimensiunilor rostului/tipului de rost cu grosimea de material, deformații inacceptabile, etc).

Defectele tehnologice

Defectele tehnologice sunt defecte datorate modului de operare, nerespectarea fișei tehnologice sau vicii. Aceste defecte cuprind viciile de așezare, de poziționare relativă a componentelor de îmbinat precum și configurația necorespunzătoare a cusăturii (defecte de formă) datorate fie dispunerii incorecte a sursei de căldură/materialului de adaos, fie nerespectării unor parametri (curent sudare, viteza de sudare). Abaterile tehnologice pot

genera probleme în chimia și/sau în desfășurarea proceselor metalurgice, ceea ce poate genera o discontinuitate de tip metalurgic. Tehnologia adoptată – procedeu adoptat, parametri de lucru, operațiuni auxiliare, toate incluse în tehnologia specifică produsului, permite îmbunătățirea capacității de sudare chiar și în cazul materialelor cu proprietăți slabe de sudare.

Defectele metalurgice

Defectele metalurgice sunt defecte care sunt asociate caracteristicilor materialului de bază. Reducerea lor presupune cunoașterea metalului de bază, a răspunsului acestuia la procesul de sudare și adaptarea procesului, a tehnologiei la aceste particularități.

Defecte metalurgice sunt: crăpăturile, fisurile, segregările, porii, incluziunile, destrămarea lamelară.

Prezența defectelor metalurgice și numărul acestora este răspunsul sistemului la un număr însemnat de factori de intrare: material de bază, material de adaos, procedeu de sudare ales; tipul de îmbinare; proiectarea îmbinării și conformitatea cu proiectul; materialele utilizate; condițiile de lucru/mediu. Neuniformitatea metalului de bază, fluctuațiile de compoziție chimică, diferențele structurale pot genera discontinuități reduse ca dimensiuni și dispersate în masa materialelor. Este argumentul ce stă la baza diferențierii ce se face între discontinuitate și defect. Orice îmbinare este posibil și probabil să prezinte un număr de discontinuități, dar doar un număr mare sau dimensiuni excesive permit încadrarea acestora în categoria defectelor.

Este evident că apariția discontinuităților este tributară unui număr important de factori ce țin de material, operator, tehnologie. Tehnologia adoptată permite evitarea unor imperfecțiuni, deși uneori acestea fac parte din inconvenientele unui procedeu dat. De exemplu porozitatea, problemă comună multor procedee, poate fi redusă prin măsuri simple: uscare materiale, preîncălzire ușoară, etc.

Tabel 5.1.

Corelația defect – procedeu de sudare, în ordinea descrescătoare a frecvenței

Frecvența defect	Sudarea cu electrod învelit	Sudarea sub flux	Sudarea MIG-MAG		WIG
			Sarmă plină	Sarmă tubulară	
+	– incluziuni – zgură – porozitate – lipsa topire / lipsă pătrundere	– lipsă topire /lipsă pătrundere – incluziuni zgură – porozitate	– porozitate – lipsă topire	– incluziuni zgură – porozitate – lipsă topire	– porozitate – incluziuni de W.
-					

În tabelul 5.1 sunt prezentate defectele frecvent întâlnite în cazul unor procedee de sudare. Standardul SR EN ISO 5817:2015 limitează caracteristicile acceptate și cele limită pentru diferite discontinuități prezente în îmbinare în funcție de nivelul de calitate al sudurii.

5.2. Defecte tehnologice

Defecte tehnologice observabile macroscopic

Supraînălțare și convexitate excesivă. Supraînălțarea este o îngroșare excesivă obținută la depunerea ultimului strat, figura 5.1.a, determinată de viteza de sudare și curentul de sudare mici și de calitatea fluxurilor. Convexitatea excesivă este un defect al sudurilor de colț, figura 5.1.b. Cauza acestui defect este fie valoarea prea mică a curentului, fie avansul electrodului nesincronizat cu viteza de sudare.

Ambele defecte produc depășirea normelor pentru consumul materialelor și se pot remedia prin polizare, dacă au lungimi mici. Pentru sudurile de colț convexitatea ridică probleme privind tensiunile reziduale.

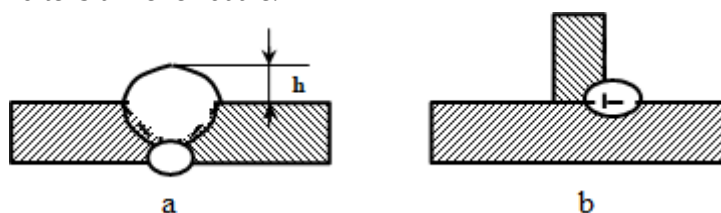


Fig. 5.1. Defecte de formă: -supraînălțare (a) și convexitate excesivă (b) în îmbinările sudate

Craterul final apare la întreruperea arcului la capătul cordonului. Se evidențiază ca o adâncitură aplatizată, cu un centru bine definit.

Cauzele producerii acestuia sunt cel mai frecvent lipsa de experiență profesională, ceea ce duce la conducerea greșită a arcului, întreruperea brutală a arcului prin retragerea bruscă a electrodului. Întreruperea bruscă duce la variația curentului și tensiunii, amplificând forțele electromagnetice locale.

Rădăcina nesudată, figura 5.2, are forma unei retasuri, determinând o grosime incompletă a îmbinării, ceea ce reduce rezistența proiectată a îmbinării.

Cauzele ce conduc la apariția acestei imperfecțiuni sunt:

- prindere inițială necorespunzătoare a pieselor de îmbinat;
- deformații excesive pe durata sudării (datorate tehnologiei);
- rost incorrect ales/prelucrat.

Remedierea se face prin curățire și completare până la obținerea dimensiunilor normale.

Scurgerea reprezintă o extindere a metalului topit pe suprafața metalului de bază în afara conturului rostului, figura 5.2.

Scurgerea este generată de folosirea unui curent prea mare, poziția incorectă în lucru a electrodului sau viteza de sudare prea mică, necorelată cu viteza de topire prea mare. Scurgerea este frecventă la suduri realizate în plan vertical și de plafon, unde condițiile de sudare sunt dificile – baia lichidă sub efectul gravitației. În consecință, recomandările tehnologice converg în utilizarea unei energii liniare minime, electrozi cu diametrul cel mult de 4 mm, destinați sudării de poziție – zgura are o vâscozitate mare, asigurând un suport suplimentar băii, sau rețete de gaze ce cresc vâscozitatea metalului lichid. Scurgerile provoacă în metalul de bază efectul de creștătură, care influențează negativ rezistența la

solicitări dinamice. Remedierea se face prin înlăturarea scurgerii prin polizare și completarea acolo unde efectul de creștătură este prezent.

Străpungerea este neconformitatea ce descrie situația în care materialul se perforază; zona cordonului este umplută parțial iar la rădăcina atâră picături solidificate.

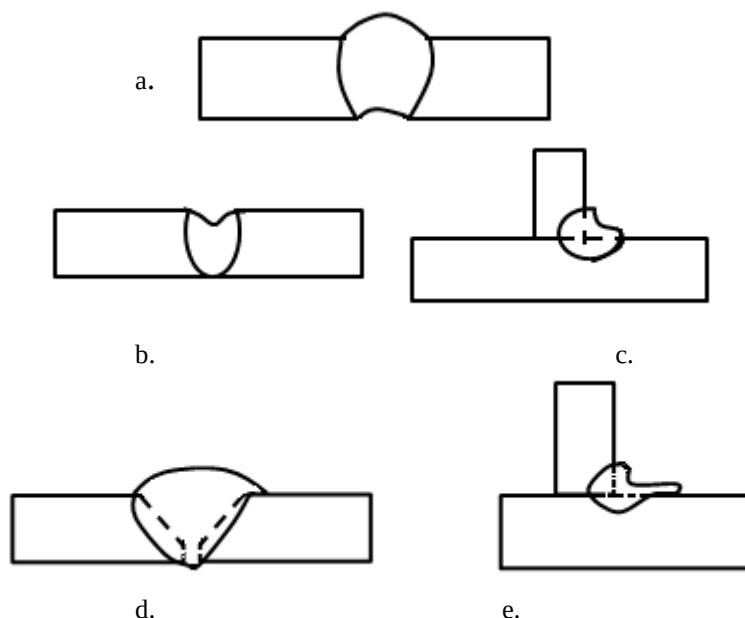


Fig. 5.2. Alte defecte de formă: a. rădăcină nesudată; b. scobitură în cusătură cap la cap; c. scobitură în cusătură de colț; d. scurgere în cusătură cap la cap; e. scurgere în cusătură de colț

Cauzele acestui defect sunt următoarele: grosimea materialului mică în comparație cu regimul de lucru folosit, diametrul materialului de adaos prea mare; conducerea cu viteza neuniformă a electrodului.

Suprafața neregulată a cusăturii reprezintă un alt defect de formă, când cordonul are o lățime neregulată, reliefată prin strangulări sau lățiri mari. Există o legătură directă între vâscozitatea băii și gradul de reliefare a solzilor cordonului. Aceștia sunt cu atât mai mari și mai aspri că cât vâscozitatea băii este mai mare. Asupra formării acestora are influență curentul de intensitate mare, conducerea neuniformă a electrodului și natura învelișului. Remedierea suprafeței neregulate a cusăturii se face prin polizare și resudare pentru uniformizare.

Creștătura este o lipsă de material de forma unui șanț, dispusă pe lungimea cordonului (parțial sau total). La îmbinările în unghi, creștăturile se produc cu predilecție pe materialul în poziție verticală, iar la sudarea în cornișă de-a lungul marginii superioare.

Cauzele care duc la apariția acestui defect sunt: mișcarea rapidă a electrodului; curentul de sudare prea mare; calitatea electrodului; viteză mare de înaintare la sudarea automată. Calitatea pregătirii materialului lângă rost influențează apariția defectului, care se dezvoltă datorită pojghiței de oxizi rămași de la laminare.

Creștăturile sunt defecte care reprezintă amorse puternice de rupere prin fragilizare/reducere de secțiune și ca atare nu sunt admise.

Remedierea se face prin înlăturarea lor prin polizare pe toată lungimea pe care s-au dezvoltat, operațiune urmată de resudarea și controlul remedierii.

Stropii sunt părți din metalul lichid (provenind din baia lichidă sau din materialul transferat) care aderă la materialul de bază, în afară cordonului. Gradul de stropire este mai accentuat la folosirea curentului alternativ față de cel continuu sau când utilizăm electrozi acizi față de bazici.

Un efect puternic asupra gradului de stropire îl are cantitatea de gaze, care se degajă ca urmare a reacției metalului lichid cu cel solid, mai cu seamă în absența unei pregătiri corecte a suprafețelor. Cu cât cantitatea de gaze care se degajă este mai mare, cu atât și gradul de stropire este mai intens. În cazul procedeelor de sudare cu atmosferă protectoare apariția stropilor este datorată fie regimului de sudare, fie compoziției gazului de protecție, stropirea fiind mai intensă în cazul sudării cu CO_2 .

Defecte tehnologice ce solicită control specializat

Lipsa de topire și **lipsa de pătrundere** sunt defecte tehnologice profunde, frecvent întâlnite, cu cauze diverse, datorate unor deficiențe de proiectare sau indisciplinei tehnologice, vezi Tabelul 5.2. Sunt defecte greu de depistat prin control nedistructiv, cel mai eficient fiind controlul cu ultrasunete, unde pot fi confundate cu porozitatea.

Tabel 5.2.

Cauzele care generează lipsă de pătrundere sau lipsă de topire

	Lipsă pătrundere (L.P.)	Lipsă topire (L.T.)
+	- curent sudare mic (I_s); - viteza sudare mare (V_s);	- viteza sudare mare; - diametrul M.A. mare;
-	- mărire incorectă a tensiunii; - pregătire incorectă a rostului.	- curent sudare mic; - manevrare incorectă a arcului.

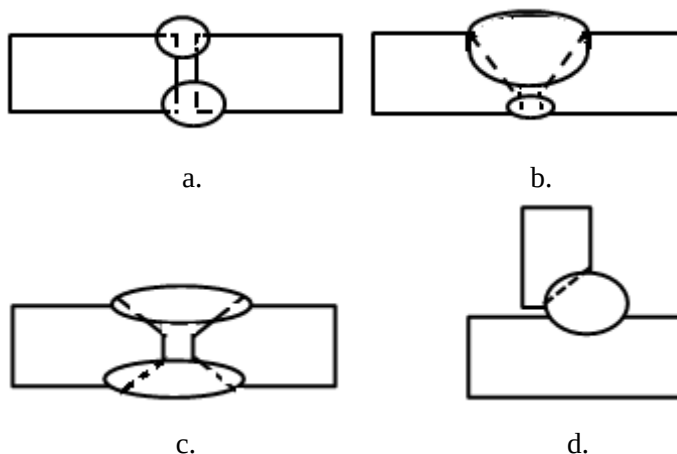


Fig. 5.3 -Lipsa de pătrundere la o îmbinare sudată: a,b. sudură cap la cap fără pregătirea rosturilor cu sau fără dezaxare, b. sudură cap la cap pregătită în V; c. sudură cap la cap pregătită în X; d. lipsa de pătrundere la o îmbinare sudată în colț

Lipsa de pătrundere este defectul la care materialul topit nu acoperă toată secțiunea, astfel încât rămâne un interstițiu între metalul depus și metalul de bază, ca în figura 5.3. Aceasta micșorează rezistența mecanică statică, datorită modificării secțiunii active a îmbinării. La solicitări dinamice, chiar nepătrunderi mici acționează ca niște concentratori de tensiune.

Lipsa de topire se materializează ca o legătură incompleta între metalul de bază și cel de adaos sau între straturile metalului depus. Poate fi situată atât pe flancurile sudurii, lateral, cât și la rădăcină, figura 5.4. Remedierea se face prin polizare până la zona cu defect, resudare și apoi controlul pentru confirmarea îndepărtării discontinuității.

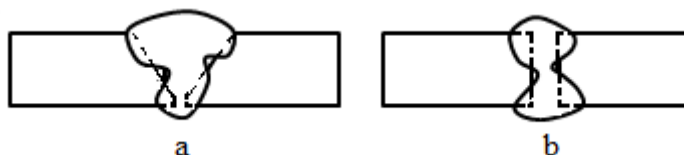


Fig.. 5.4. Lipsa de topire în cusătura sudată cap la cap: a. laterală; b. la rădăcină

5.3. Defecte metalurgice

Cele mai periculoase defecte metalurgice sunt fisurile. Fisurile sunt discontinuități caracterizate de o deschidere mică între flancuri și lungime mare. Crăpăturile sunt fisuri dezvoltate, ce capătă totdeauna calificativul de defect, distanța între flancuri fiind clară.

Clasificarea fisurilor se realizează după mai multe criterii:

- după locul de formare (material de bază, cusătură);
- după orientarea față de cusătură;
- după localizarea față de grăunți (inter, intracristaline sau mixte);
- după momentul apariției (întârziate sau simultane procesului);
- după mecanismul de apariție.

În figura 5.5 sunt prezentate diferite moduri de dispunere a fisurilor.

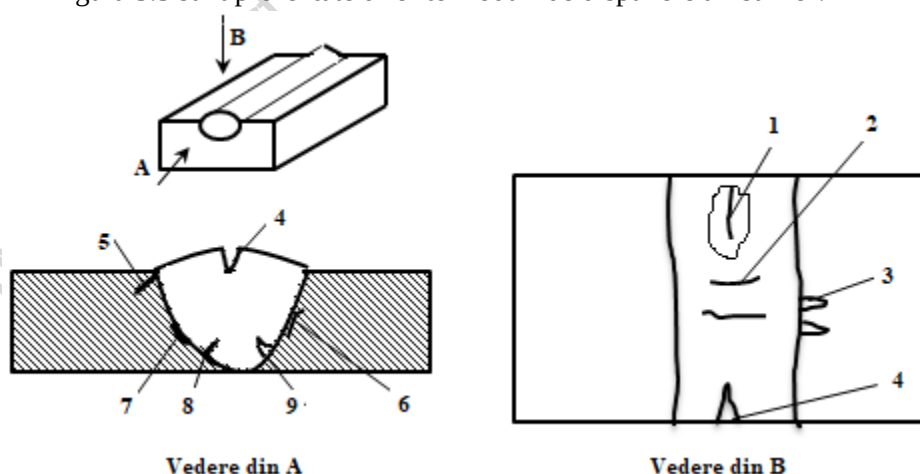


Fig. 5.5. Fisuri într-o îmbinare sudată: 1. fisură în crater, 2. fisură transversală în cusătură; 3. fisură transversală în ZIT; 4. fisură longitudinală în cusătură; 5. fisură în ZIT la partea superioară a cusăturii; 6. fisură longitudinală sub cusătură, în ZIT; 7. fisură pe linia de fuziune; 8., 9. fisuri în cusătură

Porii sunt discontinuități de tip cavitate, formați prin acumularea gazelor pe durata procesului de solidificare. Porii pot fi distribuiți uniform sau preferențial în cusătură, prezența lor fiind constatată mai ales în zona superioară a cusăturii, pe suprafață sau imediat sub suprafața cusăturii. În figura 5.6. sunt prezentate variante de dispunere a porilor. Sunt discontinuități cu efect redus de concentrare a eforturilor, datorită forme sferice. Totuși, în număr mare sau dispunere continuă, au ca efect reducerea secțiunii active a îmbinării.

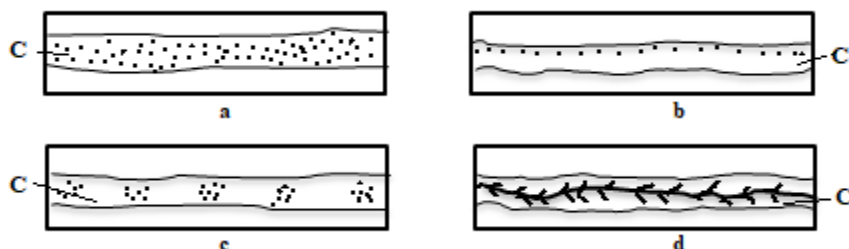


Fig. 5.6. Moduri de dispunere a porozității în cusătura C: a. porozitate uniform distribuită; b. porozitate grupată; c. porozitate dispusă liniar; d. porozitate alungită, continuă

Incluziunile sunt defecte de natură metalurgică ce constau din particule fine nemetalice (oxizi simpli și mai ales complecși) rămași captivi în cusătură. Efectul lor depinde de dimensiunea și forma pe care o adoptă. Incluziunile fine (ce se formează în urma reacțiilor chimice ce au loc în baia metalurgică) pot juca uneori un rol benefic; incluziunile grosolane, rezultate din resturi de înveliș sau zgură rămase între rândurile de sudură, pot deveni amorse de fisuri și, în final, de rupere a structurii sudate.

5.4. Controlul îmbinărilor sudate

Controlul îmbinărilor sudate cuprinde un complex de metode și încercări. Modul de control al sudurilor depinde de nivelul de calitate solicitat în exploatare.

Metodele de control al sudurilor se pot subîmpărți în metode nedistructive și metode distructive.

Controlul nedistructiv cuprinde un număr de proceduri de detectare a discontinuităților într-un material, componentă sau structură. Avantajul principal al acestui tip de control este posibilitatea implementării metodelor de control pe toată durata fabricației. Dezavantajul principal este modul de evaluare a nivelului discontinuităților. Evaluarea este indirectă, în marea majoritate a cazurilor calitativă, ceea ce implică un nivel ridicat de subiectivism. În aceste condiții, operatorul ce controlează sudurile este obligatoriu să posede o experiență consistentă în utilizarea metodelor de control nedistructiv.

Controlul nedistructiv cuprinde următoarele metode:

- controlul vizual (inclusiv măsurarea caracteristicilor geometrice ale îmbinării, cu aparate destinate acestei operațiuni);
- controlul cu lichide penetrante;
- controlul cu pulberi magnetice;
- controlul cu curenți turbionari;
- control cu ultrasunete;
- control radiografic.

Controlul distructiv include o suită de metode de încercări mecanice a sudurilor, incluzând atât încercările mecanice clasice (tracțiune, duritate, tenacitate, etc.) cât și metode specifice, elaborate cu scopul evaluării unui procedeu de lucru.

Metode de control nedistructiv utilizate în laborator

Pentru identificarea defectelor de suprafață sau profunzime redusă, precum și în cazul produselor subțiri, se aplică: controlul vizual direct sau cu lupa, controlul cu lichide penetrante, cu pulberi magnetice.

Defectele profunde, pe structuri masive, pot fi detectate cu următoarele metode: control cu ultrasunete, control radiografic.

Controlul vizual este metoda cea mai frecvent utilizată și permite depistarea următoarelor tipuri de defecte: fisuri superficiale, microretasuri, defecte geometrice (supraînălțare excesivă, convexitate excesivă, scurgeri la rădăcină, pătrunderi excesive, arderi, dezaxări, abateri de la planeitate, completare incompletă a rostului, stropi, cratere, etc.).

Controlul cu lichide penetrante este destinat, de asemenea, identificării discontinuităților de suprafață. Metoda se bazează pe capacitatea lichidelor de a umecta suprafața produsului și a pătrunde în discontinuitățile fine, respectiv în fisurile cu deschidere pe suprafața îmbinării sudate.

Avantajul controlului cu lichide penetrante este acela că sporește vizibilitatea fisurilor prin „creșterea” acestora – indicația este mai mare decât fisura. Efectul este sporit prin utilizarea de substanțe colorate intens.

În principiu, pe piesa verificată se aplică un strat de lichid, numit lichid penetrant. Acesta este lăsat în contact cu suprafața de controlat un timp stipulat de producător, după care este îndepărtat de pe suprafață. Urmează faza de evidențiere a discontinuităților cu ajutorul unei a doua substanțe, numită revelator. Acesta interacționează cu lichidul rămas în discontinuități, ceea ce permite observarea comodă a discontinuităților.

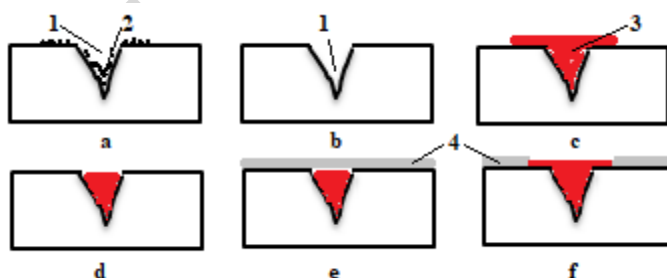


Fig. 12.7 Etapele controlului cu lichide penetrante: a. fisura (1) acoperită cu impurități (2); b. fisura după etapa de curățare; c. aplicare lichid penetrant (3); d. curățare exces lichid penetrant; e. aplicare revelator; f. evidențiere fisură

Indiferent de caracteristicile specifice, controlul cu lichide penetrante presupune o succesiune de operațiuni simple, dar esențiale, pentru obținerea unor rezultate cât mai corecte, figura 5.7. Aceste etape sunt:

- curățarea probei - proba trebuie curățată pentru a permite lichidului penetrant să pătrundă în defect. Suprafața trebuie curățată de uleiuri, grăsimi, apă sau orice

- alți agenți contaminanți, ce ar putea împiedica pătrunderea lichidului penetrant în interiorul fisurilor. Se folosesc solvenți (acetonă, etc.), având în vedere că aceștia nu trebuie să afecteze suprafața piesei. O metodă recomandată este curățarea cu ultrasunete;
- aplicarea lichidului penetrant se face după ce suprafața a fost bine curățată și uscată. Dacă nu sunt condiții impuse de producător, lichidul penetrant poate fi aplicat cu pensula, prin pulverizare sau imersie;
 - timpul de așteptare - pentru a avea certitudinea pătrunderii lichidului și o probabilitate maximă ca acesta să rămână în discontinuități după îndepărtarea de pe suprafață, piesa va rămâne în contact cu lichidul penetrant minimum 10 minute, timpul putând ajunge însă și la 60 minute;
 - îndepărtarea lichidului penetrant este cea mai delicată operațiune, deoarece trebuie evitat pericolul îndepărtării penetrantului din zonele cu discontinuități. Se vor urmări cu atenție recomandările producătorului;
 - aplicarea revelatorului este ultima operațiune; acesta poate fi, funcție de pigmentul folosit, vizibil în lumină naturală sau în lumină ultravioletă (fluorescent).

5.5. Mod de lucru

Se vor realiza probe sudate în condiții tehnologice excesive (electrozi bazici menținuți în aer liber, table subțiri sudate cu valori mari de curent, suduri pe materiale ruginite/unsuroase, etc.) pentru a realiza corelația tehnologie – defecte.

În cadrul lucrării vor fi puse la dispoziția studenților piese cu defecte tehnologice, ce pot fi identificate prin control vizual. Se vor prezenta și probe sudate secționate, cu defecte vizibile (de exemplu porozitate), cât și probe obținute prin alte procedee tehnologice (sudare prin rezistență, sudare prin frecare, etc.).

De asemenea, vor fi prezentate piese aparent corecte, a căror radiografie pune în evidență prezența unor defecte severe.

După înregistrarea defectelor identificabile prin control vizual se va recurge la controlul cu lichide penetrante a suprafețelor probelor analizate anterior.

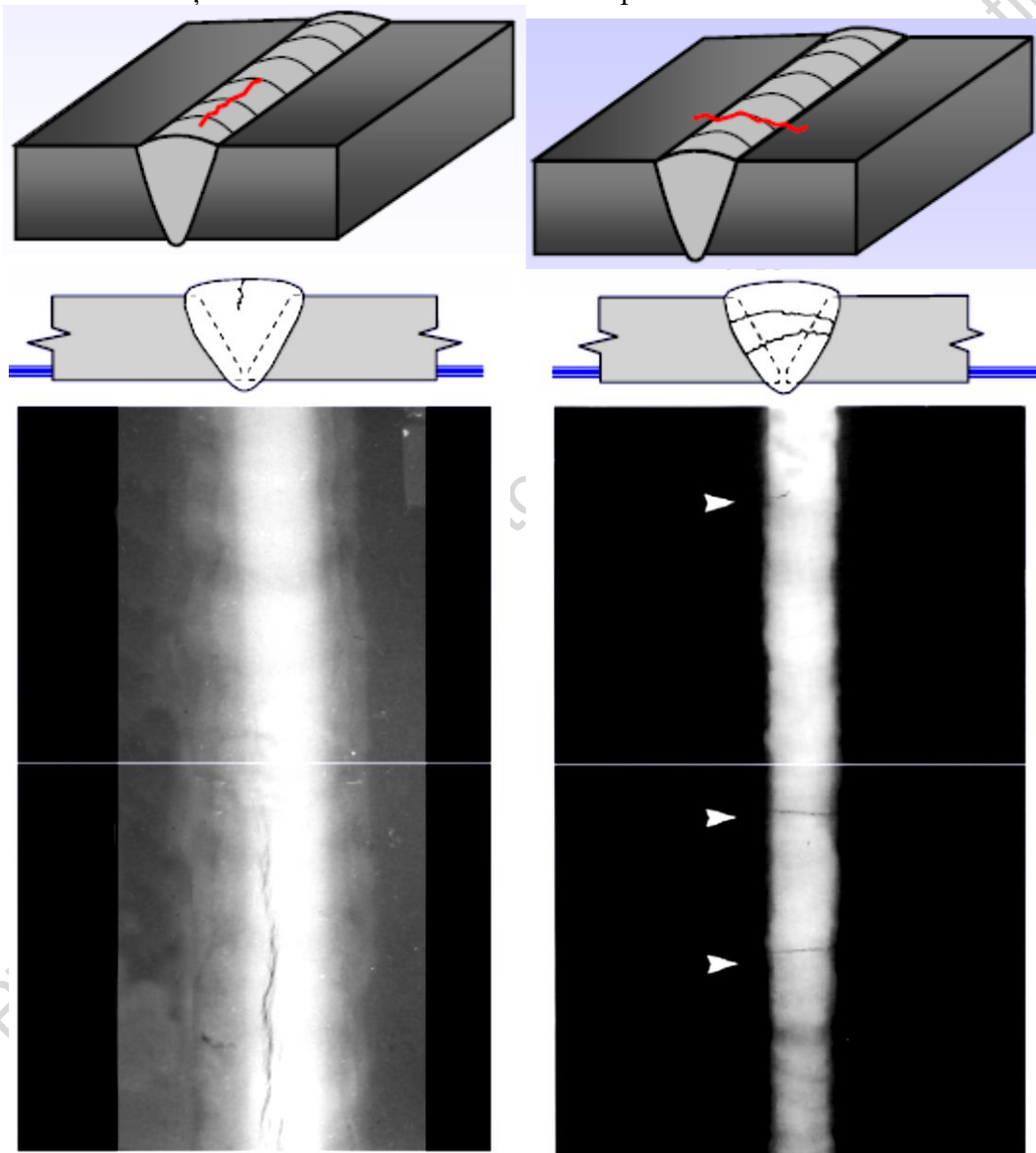
Se vor avea în vedere recomandările producătorului de lichide penetrante (moduri de pregătire a suprafețelor, timpi de așteptare, substanțe de curățire recomandate, etc.).

A. Fisuri

Fisurile de sudare pot fi de diferite forme și dimensiuni și pot apărea atât la suprafață cât și în interiorul îmbinării, sau chiar la rădăcină. Pot fi de diferite tipuri:

- longitudinale;
- transversale;
- radiale;
- sub formă de crater (doar în ZMS);
- ramificate.

În funcție de natura lor fisurile de sudură pot fi:

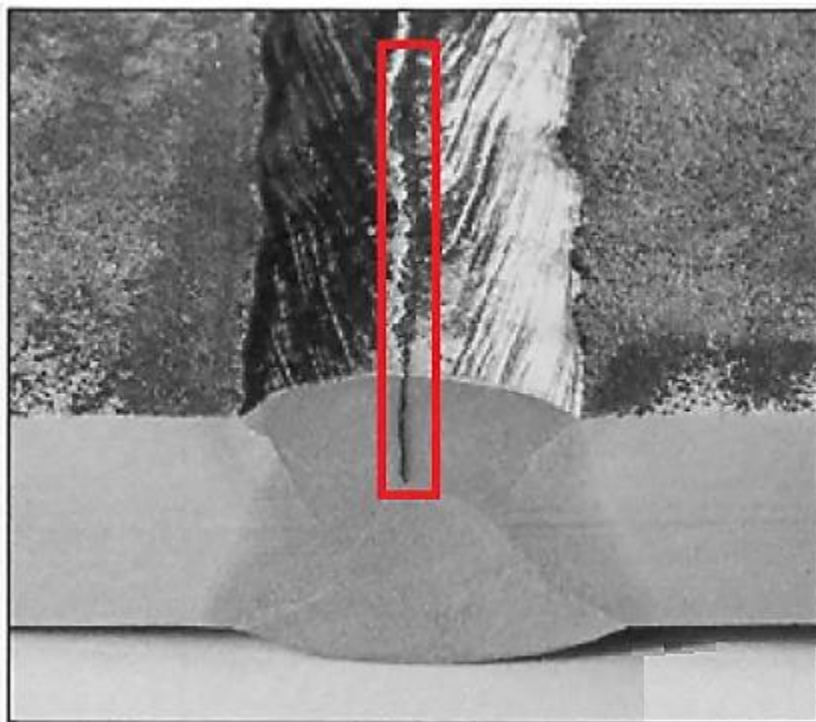


- la cald;
- la rece;
- lamelare (în trepte).

Fisuri la cald

Apar în mod normal în timpul procesului de solidificare, deci imediat după sudare. În funcție de loc și de modul de apariție pot fi:

- fisuri de solidificare: apar în ZMS în timpul procesului de solidificare atunci când metalul de adaos are un procent ridicat de carbon și impurități, rostul are un raport de formă prea mare (grosimea materialului /deschiderea rostului) sau apar întreruperi ale fluxului termic.



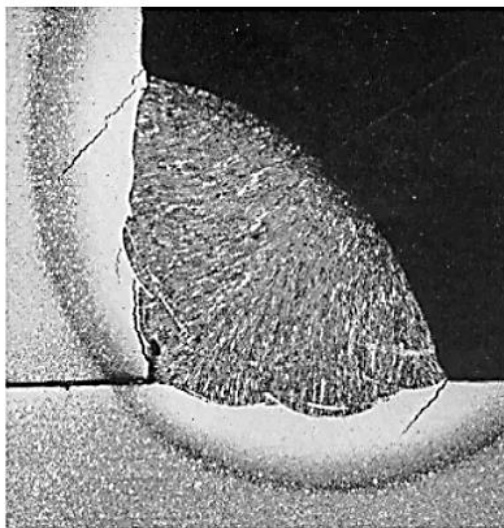
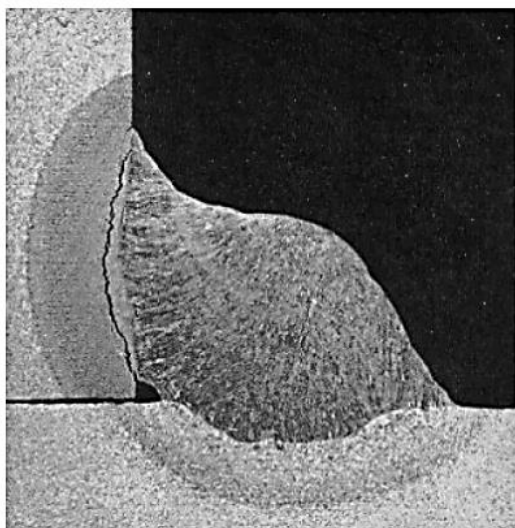
- fisuri de licuație: apar în grăunții grosieri din ZIT, ca urmare a încălzirii la temperatură ridicată a materialului și care provoacă licuația constituenților cu punct de topire scăzut la limita grăunților.

Notă: licuație - fenomen de separare a compuşilor sau a elementelor cu puncte de topire diferite dintr-un material.

Fisuri la rece

Apar după solidificarea metalului, în regiunea grăunților grosolani din ZIT. Sunt cunoscute și sub numele de fisuri întârziate, deoarece se pot dezvolta la câteva zile de la sudare. Sunt dispuse paralel cu linia de fuziune, dezvoltându-se de obicei pe o direcție combinată inter și intragranulară. Uneori însă, datorită tensiunilor reziduale, traseul fisurii se găsește departe de linia de fuziune, către o regiune cu sensibilitate mai mică la fisurarea datorată hidrogenului.

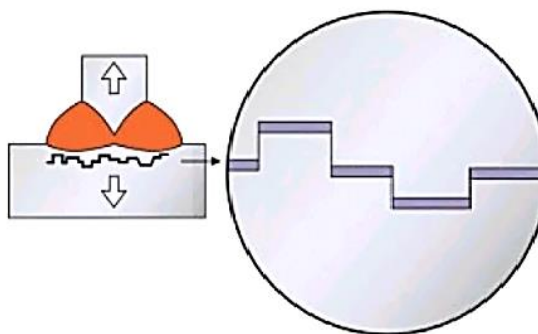
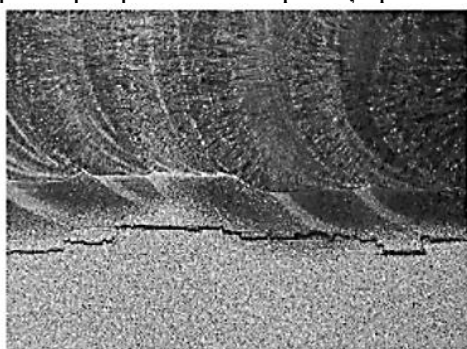
Principalele cauze ale apariției fisurilor la rece sunt: lipsa preîncălzirii, temperatura scăzută, solicitările ridicate, structura susceptibilă la fisurare a materialului, conținutul ridicat de hidrogen ș.a.



Fisurarea lamelară

Are loc în mod normal în tablele laminate din oțel, fiind caracterizate de un traseu în trepte. Se dezvoltă în îmbinările în care:

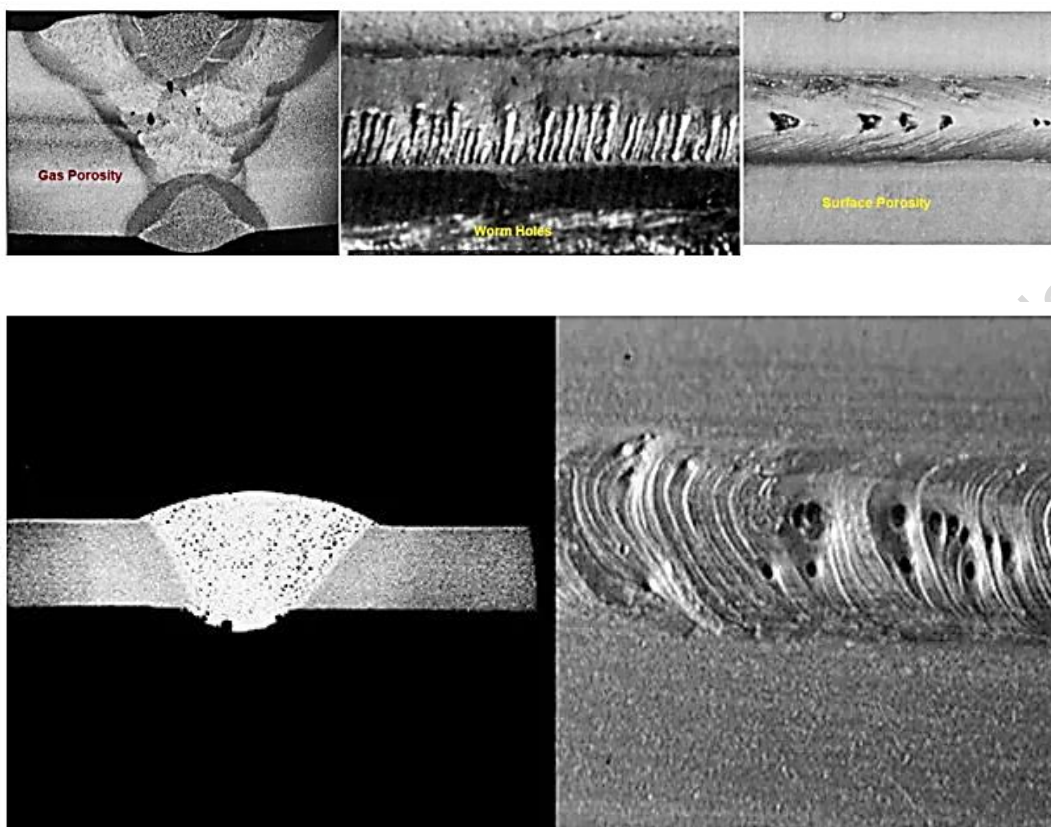
- pe grosimea tablei apare o tensiune termică de contracție;
- în material există incluziuni nemetalice alungite, foarte subțiri, având planul principal paralel cu suprafața plăcii.



B. Porozități

Sunt cauzate de captarea bulelor de gaz/aer în metalul solidificat, micșorând rezistența mecanică a secțiunii sudate. Pot fi localizate sau distribuite uniform, fiind de diverse tipuri:

- sufluri – sunt cavități mici, în principiu de formă sferică, determinate de gazele prinse în interiorul materialului solidificat. Pot fi: izolate, uniform distribuite, de suprafață, în clustere; alungite sau liniare;
- porozitate alungită - în timpul solidificării, gazul poate forma cavități tubulare sau alungite, izolate sau grupate pe suprafața sudurii;
- pori – sunt determinați de gazele care reușesc să iasă la suprafața materialului solidificat.

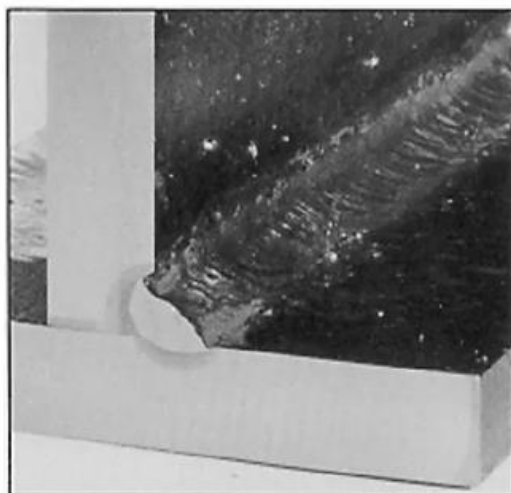


Porozitatea este determinată de mulți factori dintre care amintim:

- învelișul electrodului nu este corespunzător sau este deteriorat;
- electrodul este corodat;
- prezența uleiului, grăsimii, hidrocarburilor, apei sau ruginii pe suprafața de sudat;
- gaz de protecție incorect ales sau neizolare corespunzătoare față de aerul din mediul înconjurător;
- debit de gaz prea mare;
- tensiune arcului prea mare;
- degajare de gaz datorită tratamentului necorespunzător al suprafeței.

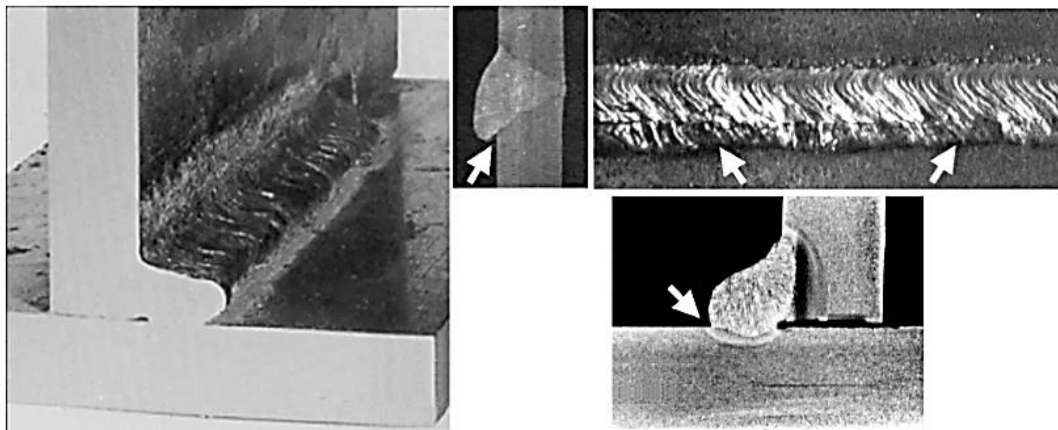
C. Străpungeri

Sunt defecte de sudare ce apar în metalul de bază, sub forma unor canale înguste, neregulate, dispuse paralel cu metalul solidificat și care reprezintă concentratoare de tensiuni în cazul încercării la oboseală. Apar ca urmare a topirii marginii superioare determinate de viteza prea mare de sudare sau a tensiunii ridicate, tensiunii mari a arcului electric, electrodului de dimensiuni prea mari, unghiului incorect de înclinare a electrodului, metalului de adaos ales greșit, selectării incorecte a gazului de protecție ș.a.



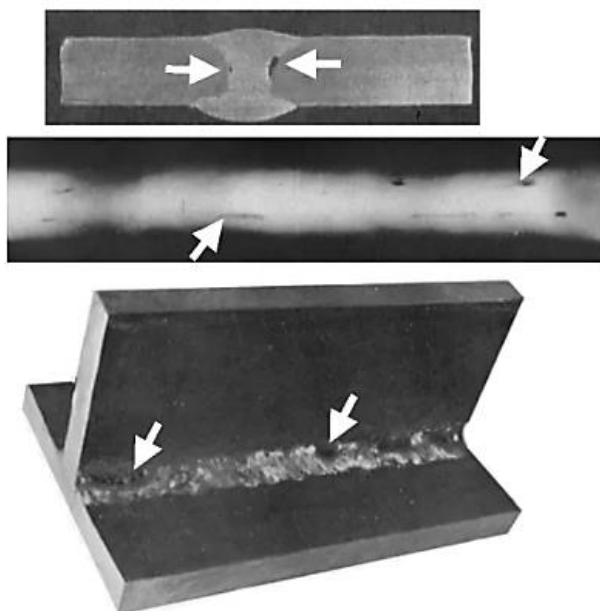
4. Scurgerea

Apare atunci când baia lichidă de metal se scurge pe suprafața metalului de bază. În acest caz metalul topit nu fuzionează cu metalul de bază. Defectul este determinat de: depunerea prea mare de material la o singură deplasare; manipularea defectuoasă a electrozilor; înveliș necorespunzător al electrodului; densitatea de curent prea mare; poziția de sudare incorectă; arc electric prea lung ș.a.



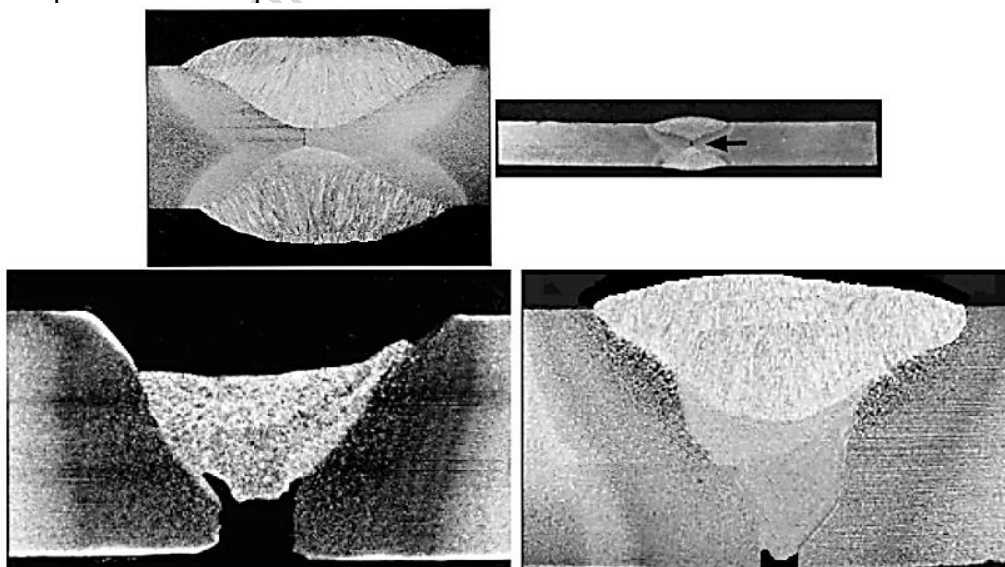
5. Incluziuni

În timpul procesului de sudare în cusătură pot fi incluse și diverse particule solide. Aceste defecte de sudare sunt cunoscute sub denumirea de incluziuni solide. Ele pot fi de diferite tipuri: incluziuni de zgură (vezi figura de mai jos), incluziuni de oxizi, incluziuni de înveliș sau incluziuni metalice (wolfram, cupru etc.)



6. Lipsa de pătrundere

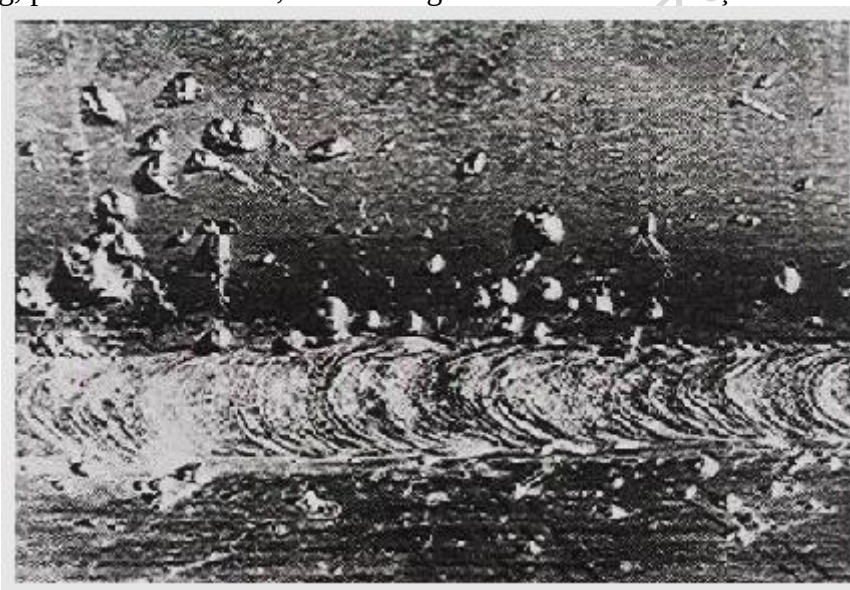
Defectul de referă la faptul că materialul metalic lichid nu umple complet rostul îmbinării, fapt datorat unor cauze cum ar fi: mărimea prea mare a umărului rostului, deschiderea rostului prea mică, viteză de sudare prea mare, poziția de sudare „peste cap”, flux termic scăzut, electrod prea mare ș.a. Poate fi de două tipuri: incompletă sau incompletă la rădăcină.





7. Stropi

Sunt mici picături globulare de metal solidificat expulzate din zona arcului electric în timpul procesului de sudare și lipite de suprafața metalului de bază. Apariția lor este determinată de o densitate de curent prea mare, electrozi umezi, arc prea lung, polaritate incorectă, atmosfere gazoase incorect alese ș.a.



Bibliografie

1. Gheorghiu D.A. et al, Lucrări practice de sudură. Îndrumar pentru lucrări de laborator, Ed. PIM, Iași, 2021
2. <https://whatispiping.com/welding-defects-types-of-welding-defects/>
3. <https://www.weldingandndt.com/welding-defects/>
4. <https://technoweld.com.au/2019/11/13/the-most-common-welding-defects-causes-and-remedies/>
5. <https://whatispiping.com/welding-defects-types-of-welding-defects/>
6. <https://www.weldingis.com/welding-discontinuities/>