

Clasificarea procedeelor de sudare

Obținerea unei îmbinări de tip monolit, în care părțile componente să fie dificil de pus în evidență, se poate realiza pe mai multe căi. Procesele tehnologice de acest gen sunt cuprinse sub denumirea de procese de sudare.

Sudarea este metoda de îmbinare nedemontabilă a două piese care constă în stabilirea legăturii chimice între suprafețele de îmbinat, legătură care se realizează prin încălzire, prin presiune sau combinat, cu sau fără aport de material din afară.

Prin **sudură** se înțelege rezultatul operației de sudare, adică îmbinarea sudată, iar prin **cusătură sudată** se definește acea zonă a îmbinării în care s-a stabilit legătura chimică între suprafețele de îmbinat.

Sudarea, ca metodă de îmbinare, se utilizează într-un număr foarte mare de cazuri, pe nu număr de materiale tot mai mare. Această dezvoltare continuă a procesului de sudare se datorează avantajelor sale, respectiv: posibilitatea de obținere a unor îmbinări etanșe; economii de material prin proiectarea de elemente simple, ce se assemblează ulterior; manoperă simplă.

Procedeele de sudare se pot clasifica după numeroase criterii, cele mai importante fiind:

- După starea de agregare a materialului pe durata procesului în zona de îmbinat;
- După temperatura la care se realizează îmbinarea (în strânsă relație cu criteriul anterior);
- După natura energiei utilizate pentru realizarea îmbinării.

O clasificare generală a proceselor de sudare cunoscute este prezentată în figura 1.

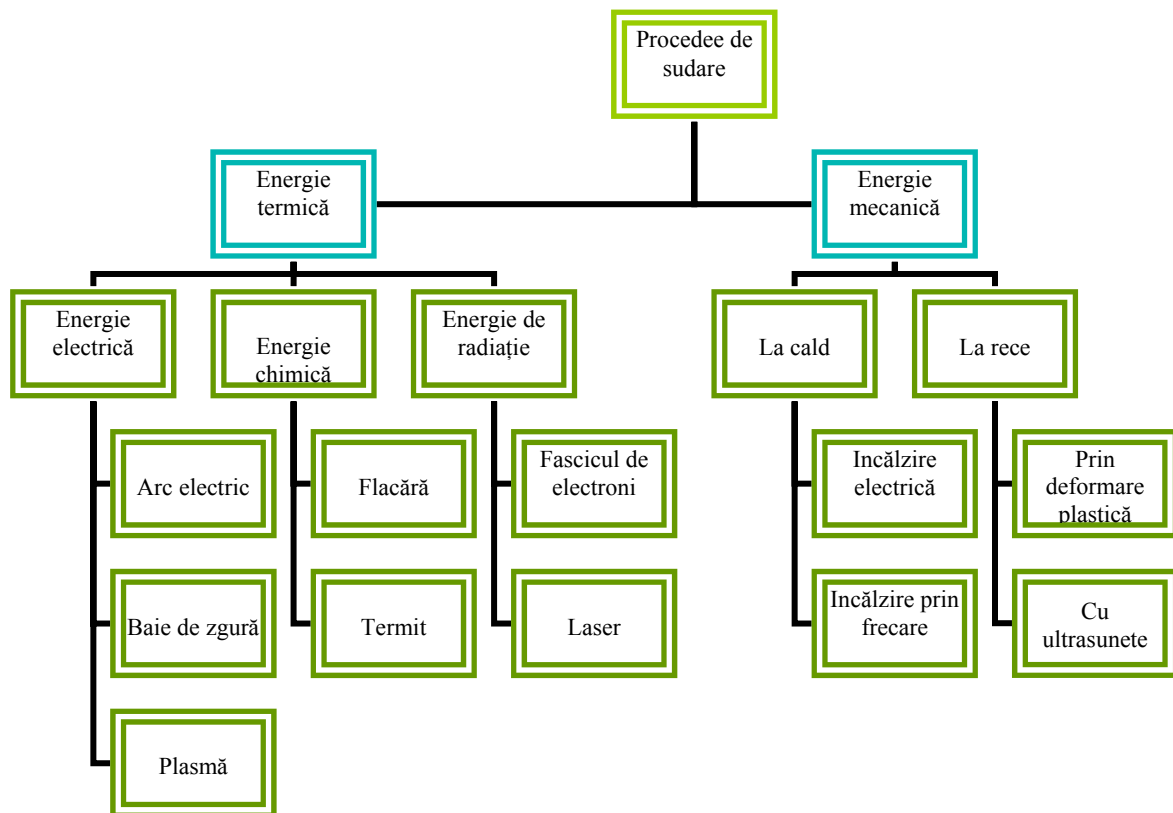


Fig. 1 Clasificarea procedeelor de sudare

Dintre procedeele de sudare cuprinse în clasificare, cea mai mare răspândire o au procedeele de sudare prin topire, mai ales cele care utilizează energia electrică, în special procedeele de sudare cu arc electric, a căror clasificare este prezentată în figura 2.

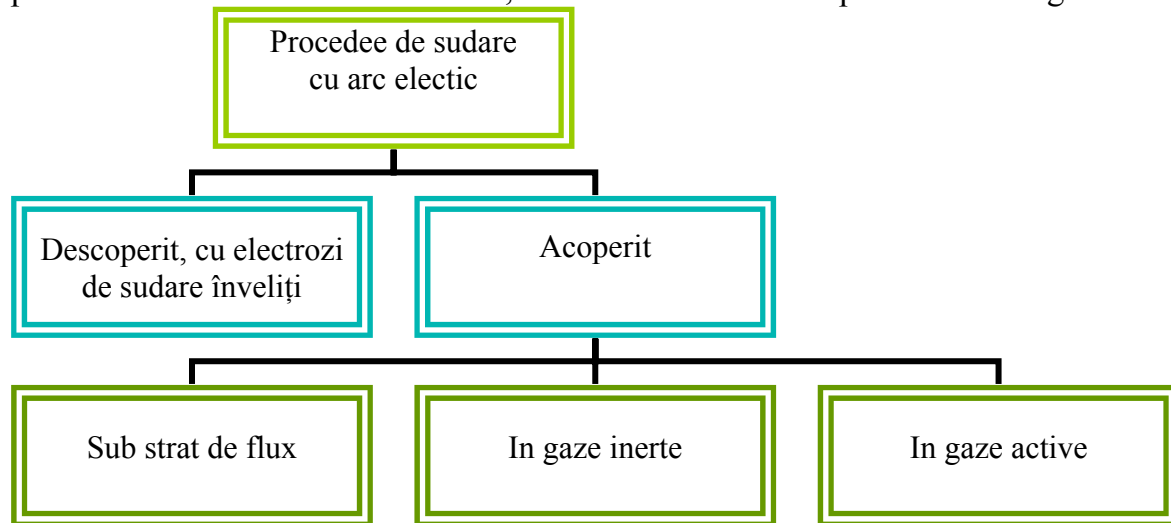


Fig. 2. Clasificarea procedeeleor de sudare cu arc electric

Îmbinarea se realizează pe o zonă limitată din semifabricat / piesă, zonă care trebuie activată într-un mod oarecare. Activarea este impusă de necesitatea ca atomii celor două componente să formeze un tot continuu după procesare.

Terminologia utilizată la îmbinările realizate prin sudare cu topire

În cazul îmbinărilor prin topire, sudura finită prezintă o alcătuire specifică, zonele purtând denumiri consacrate și recunoscute prin standarde.

Metalul din zona îmbinării aparținând pieselor ce se sudează se numește **metal de bază**, iar cel din afară, care eventual se adaugă între suprafețele care se îmbină, se numește **metal de adaos**.

Spațiul dintre piesele de sudat care urmează să fie umplut cu metalul de adaos se numește **rost**. Rostul se alege în funcție de grosimea de material și gradul de solicitare al piesei.

Porțiunea din metalul de bază vecină cusăturii, în care se produc modificări structurale datorate încălzirii peste o anumită temperatură se numește **zonă influențată termic, ZIT**.

În figura 3 se prezintă rostul de sudură, cusătura sudată corespunzătoare, precum și o sudură de depunere, pentru prezentarea tuturor caracteristicilor geometrice.

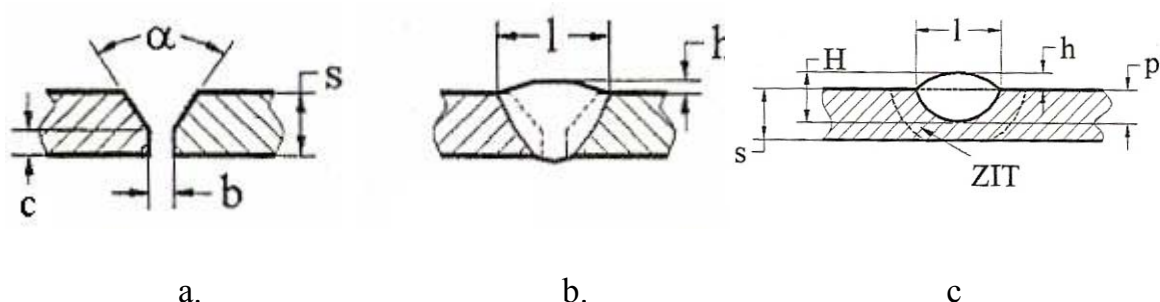


Fig. 3. Elementele caracteristice unei suduri prin topire: a. Rostul de sudare (s – grosimea materialului de bază; b – deschiderea rostului; c – înălțimea rădăcinii rostului; α – unghiul de deschidere al rostului); b. Cusătura sudată (l – lățimea cusăturii; h – supraînălțarea. Nu este figurată ZIT) c. Sudare cu depunere (p – pătrunderea; H – înălțimea cusăturii).

Sudabilitate

Pentru ca un material să poată fi sudat ușor trebuie să fie fără defecte interioare și exterioare, să nu fie fragil la rece și la cald. Aliajele folosite să fie rezistente la rupere și să prezinte de preferință o rupere plastică. Ruperea plastică, respectiv însoțită de o deformare plastică care precede cu mult timp ruperea care se manifestă printr-o schimbare de formă permite un “control” al apariției ruperii. Ruperea fragilă este periculoasă deoarece nu permite o anticipare printr-o manifestare anterioară. Ruperile la oboseală nu sunt ruperi fragile.

Materialele care întrunesc condițiile menționate sunt desemnate ca „sudabile”, respectiv pentru obținerea unor calități bune ale sudurii nu sunt necesare măsuri deosebite în proces.

Totuși, și în cazul materialelor sudabile este posibilă apariția ruperii fragile, cauzele fiind următoarele:

- o tensiuni reziduale din construcții ;
- o temperaturi ambientale scăzute sau scăderea bruscă a temperaturii;
- o viteze mari de deformare sau șocuri;
- o influența ciclului termic de la sudare care poate fi asimilat unui tratament termic care formează constituenți în afară de echilibru.

Pe durata procesului de sudare se dezvoltă în cusătură un număr mai mare sau mai mic de defecte, cele mai temute fiind fisurile. Fisurile reprezintă amorsă pentru ruperea fragilă, iar prezența lor, mai ales la materialele cu sudabilitate redusă este foarte periculoasă. Pentru aliajele fier – carbon sudabilitatea scade cu creșterea conținutului de carbon, când conținutul de carburi din masa metalică crește. În figura 4 este prezentată dependența între conținutul de carbon și sudabilitate în cazul oțelului.

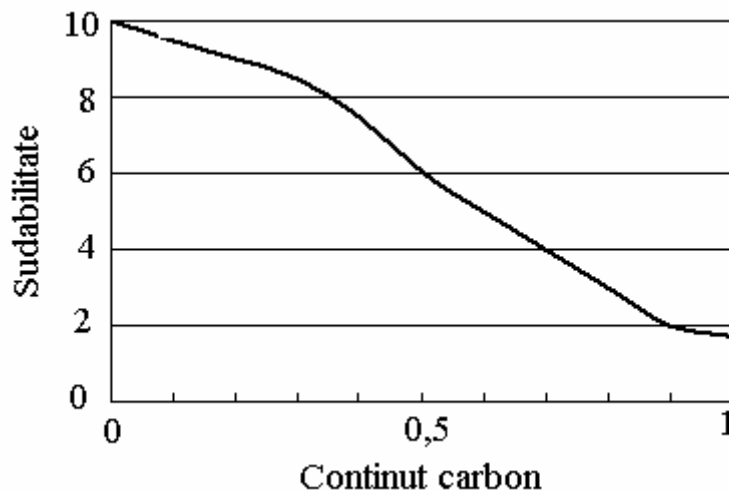


Fig. 4. Dependența sudabilității oțelului de conținutul de carbon

Material de adaos

În cazul sudării manuale, materialul de adaos este constituit din electrozi, vergele metalice de diametre standard, 2mm, 2,5mm, 3,25mm, 4mm și, mai rar, 5mm și 6mm.

Electrozii pentru sudarea clasică au lungimea standard de 450 mm, cei cu $\Phi=2\text{mm}$ și $\Phi=2,5\text{mm}$ se fabrică și cu lungimi de 300 sau 350 mm, și sunt acoperiți cu un înveliș fuzibil 2, mineral sau organic, care îndeplinește mai multe funcții.

În cazul general al sudării cu arc electric se utilizează și vergele metalice (flacără, arc electric în gaze inerte cu electrod nefuzibil) sau sârme subțiri pentru sudarea automată sau semiautomată în gaze inerte sau active.

Surse termice. Caracteristici

Pentru a putea topi materialele implicate în proces este necesară o sursă de căldură suficient de puternică.

Există o mare varietate de surse termice. Pentru calitatea îmbinărilor sunt importante caracteristicile surselor privind influența de natură fizico-chimică pe care o exercită asupra materialelor și modul în care este distribuită energia în spațiu și timp.

Mărimi ce caracterizează sursa termică

Pentru a încălzi / topi un material fie și pe o porțiune limitată este necesar un aport termic, o cantitate de căldură ce este transferată spre materialul de sudat, Q , [J].

Căldura este furnizată corpului într-un interval de timp, t [s].

Fluxul termic al unei surse reprezintă cantitatea de căldură furnizată de sursă în intervalul de timp Δt :

$$\Phi = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{dQ}{dt} \quad [W]$$

Căldura furnizată de sursă poate fi diferit repartizată pe suprafață, A . Distribuția spațială a căldurii pentru o sursă termică este descrisă de densitatea de flux termic, q :

$$q = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta \Phi}{\Delta A} = \frac{d\Phi}{dA} \quad \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

Exemplificarea importanței densității de flux termic: pentru topirea superficială a unui oțel este necesar, teoretic, un flux de 400W/cm^2 . Timpul necesar topirii superficiale este de 2 minute, în aceste condiții, dar dispersia căldurii în masa materialului / mediu împiedică topirea. Valoarea minimă necesară pentru topirea oțelului este de 1000W/cm^2 .

Dacă $q = 10^{13} \dots 10^{14} \left[\frac{W}{cm^2} \right]$, metalul este vaporizat în intervale de timp de ordinul milisecundelor, sudarea fiind imposibilă.

Fiecare sursă prezintă o distribuție a căldurii, a densității de putere, de tip gaussian, figura 5, cu valoarea maximă, q_{\max} , și dispersia caracteristică fiecărui tip de sursă.

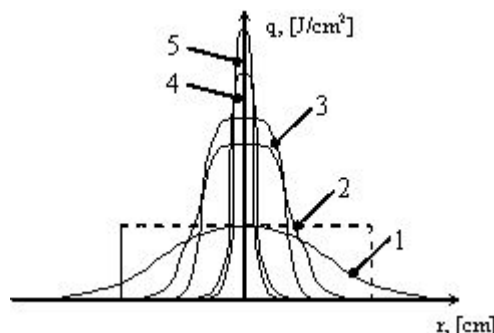


Fig. 5. Distribuția densității de putere (densitatea de flux termic) pentru surse de sudare caracteristice: 1. flacără; 2. arc electric; 3. rezistență de contact; 4. plasmă; 5. fascicul de electroni.

Dintre sursele cu utilizare curentă cea mai mare răspândire o are arcul electric.

Definitie, caracteristici ale arcului electric.

Arcul electric este o descărcare electrică stabilă între doi electrozi care se produce într-un mediu gazos ionizat la densități mari de curent: $j = (0,75 \dots 3,5) \cdot 10^8 \text{ A/m}^2$

Arcul electric – lumina orbitoare cunoscută este forma de manifestare a fenomenelor produse în timpul descărcării electrice

2.3.2. Generalități

Arcul electric este una din sursele termice cele mai utilizate în procesele de sudare, datorită accesibilității tehnologice și eficienței energetice ridicate, respectiv un randament de: $\eta_t = 0,40 \dots 0,98$

Puterea specifică (densitatea de flux termic) în arc de sudare este suficient de mare: $P = 10^8 \dots 10^9 \text{ W/m}^2$, respectiv $10^4 \dots 10^5 \text{ W/cm}^2$.

În cazul cel mai des întâlnit arc de sudare acesta este amorsat între un electrod (obișnuit sârma electrod) și piesa de sudat, descărcarea electrică având loc la o tensiune relativ scăzută: $U_a = 10 \dots 40 \text{ V}$ și o intensitate mare a curentului $I_s = 5 \dots 2000 \text{ A}$.

Formarea arcului electric de sudare este condiționată de două fenomene: emisia de electroni și ionizarea gazelor aflate între cei doi electrozi.

Fazele formării arcului de sudare sunt reprezentate în figura 4.

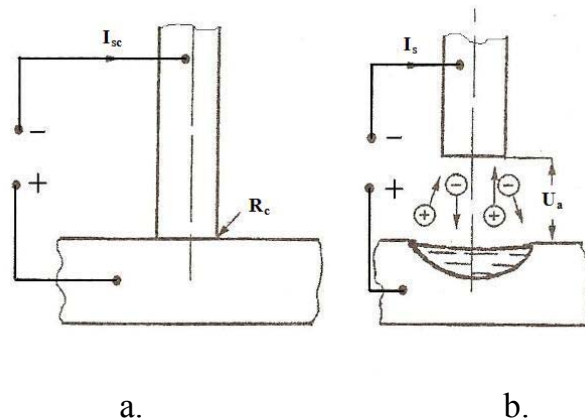


Fig. 4. Fazele existenței arcului electric la sudare: a. Amorsarea; b. Arderea arcului, principalii parametri și transportul de sarcină electrică în coloana de arc.

În prima fază (a) cei doi electrozi, sârma electrod și piesa, conectați la o sursă de curent electric, se scurtcircuitază. Curentul de scurtcircuit are valoare mare, rezistența de contact la fel, astfel încât căldura degajată local prin efectul Joule – Lenz ($Q = R_c \cdot I_{sc}^2$) este importantă și locul de contact ajunge la o temperatură ridicată, suficientă inițierii termoemisie. În faza următoare (b) scurtcircuitul se întrerupe, prin îndepărtarea celor doi electrozi, astfel încât catodul, ajuns la temperatura ridicată, emite electroni. Pe traseul spre anod, electronii ciocnesc atomii amestecului gazos dintre cei doi electrozi, producând excitarea și ionizarea acestora. Se creează astfel condiții de descărcare electrică prin arc, cu alte cuvinte, se amorsează descărcarea electrică. Menținerea la

distanță constantă a vârfului de electrod de materialul de bază permite arderea stabilă a arcului. Creșterea spațiului dintre electrozi are ca efect stingerea arcului.

Pe durata funcționării arcului emisia de electroni este stimulată de câmpul electric produs de tensiunea arcului, U_a (căderea de tensiune dintre cei doi electrozi) și bombardamentul efectuat de ioni asupra catodului, căruii îi cedează energia.

Sub acțiunea arcului electric piesele se topesc local, formând baia de sudură.

Atunci când piesa este conectată ca electrod în circuitul de sudare, arcul electric este direct, iar dacă piesa este independentă față de circuitul de sudare, arcul este indirect (în acest caz efectul termic al arcului asupra piesei este mai redus).

Arcul electric poate fi alimentat cu curent continuu sau cu curent alternativ. Pentru cazul curentului continuu polaritatea joacă un rol important, profilul băii fiind influențat și de polaritate.

Electrozii utilizați la sudarea cu arcul electric pot fi fuzibili sau nefuzibili, influențând puternic fenomenele din arc. Tipul de curent, polaritatea, tipul de electrod utilizat influențează semnificativ repartiția căldurii în spațiul de lucru și implicit profilul băii, figura 5, precum și efectele din materialul de bază.

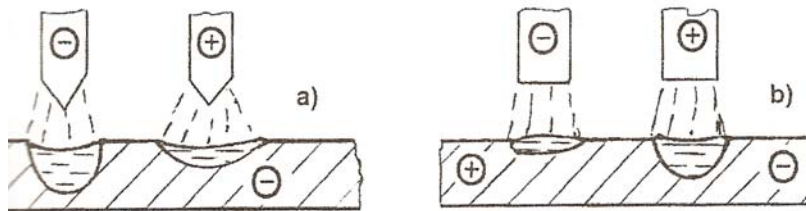


Fig. 5. Influența polarității curentului asupra profilului băii: a. Electrod nefuzibil; b. Electrod fuzibil (Electrod la polul negativ: polaritate directă; electrodul la polul pozitiv: polaritate inversă).

Câmpul termic

Căldura furnizată de sursă, indiferent de caracteristicile acesteia, generează în corp un câmp energetic diferit de cel al corpului, câmpul termic la sudare. Câmpul termic diferă de la sursă la sursă și de la material la material (având în vedere atât proprietățile fizice cât și geometria acestuia).

Câmpul termic la sudare cuprinde totalitatea fenomenelor de transfer termic prin materiale, în timpul procesului la sudare. Distribuția temperaturii, durata de menținere la temperaturi înalte a materialului, vitezele de răcire vor influența numeroase aspecte legate de performanțele îmbinării.

Câmpul termic se dezvoltă și la nivelul materialului de adaos, determinând topirea acestuia.

Este bine de reținut că procedeele de sudare cu topire prezintă următoarele particularități:

- încălzirea materialelor de îmbinat depinde în mod semnificativ de tipul de sursă, încălzirea fiind adeseori complexă (conducție și radiație);
- câmpul de temperaturi din baia lichidă este influențat de convecția din baie;
- încălzirea materialelor care nu suferă transformări de fază se face prin conducție.

Se poate afirma că fenomenul de încălzire este dominant de tip conductiv.

Formularea matematică a conducției

Sursa termică degajă o cantitate de energie termică. Această energie se transmite zonelor învecinate printr-un proces de transfer energetic, modificându-le temperatura. Variația temperaturii în spațiu și timp este diferită funcție de dimensiunile relative sursă / material. Deoarece modul de transfer energetic este preponderent conductiv, pentru determinarea câmpului termic se utilizează legea lui Fourier, relația 1 cu particularizările necesare.

$$\frac{dT}{dt} = \frac{q_v}{c \cdot \rho} + \frac{\partial}{\partial x} \left(a \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(a \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(a \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (1)$$

Unde:

T - temperatura atinsă într-un punct oarecare al piesei, ca urmare a transferului termic sursa - material;

t - timpul considerat pentru transferul termic;

q_v - puterea sursei termice;

c - căldura specifică la presiune constantă a materialului;

ρ - masa specifică a materialului;

$a = \lambda / c \cdot \rho$ - difuzivitatea termică a materialului;

x, y, z - vectorii direcțiilor de propagare a căldurii în material.

Prin adaptarea condițiilor limită de interes se poate determina distribuția temperaturilor în spațiu și timp, viteza de răcire într-un punct dat, lungimea băii lichide, etc.

Forma izotermelor generate de surse cu dimensiuni mici în cazul pieselor masive este semisferică în adâncimea piesei, având același centru cu punctul sudat (cu sursa). Este cazul cel mai frecvent întâlnit în practica sudării, respectiv la sudarea cu electrod învelit, sudarea semiautomată sau automată cu electrod fuzibil / nefuzibil în atmosferă de gaze, figura 6. Abaterea de la conturul teoretic este urmare a turbulenței din baia metalurgică sub efectul dinamicii gazelor și a gradientului de temperatură.

Pe suprafața piesei forma izotermelor este eliptică, având în centru baia lichidă, cu lungimea și lățimea influențate de caracteristicile de material și de tehnologia de sudare (energia utilizată, viteza de sudare). Izotermele din materialul solid depind de caracteristicile de material și de parametrii tehnologici, figura 7.

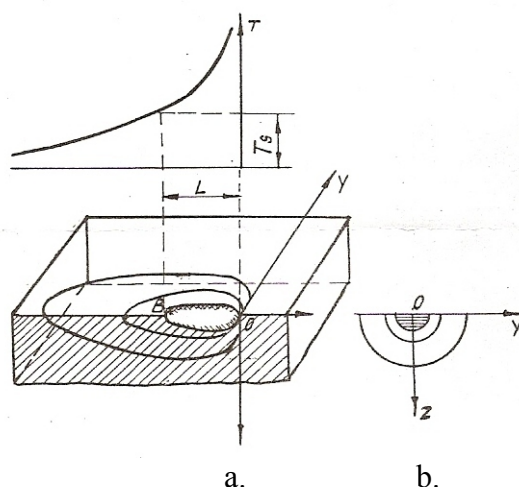


Fig. 6. Forma conturului băii lichide și conturul izotermelor în materialul solid: a. Lungimea băii (lb, cu temperatura peste T_s) b. Adâncimea băii, teoretică..

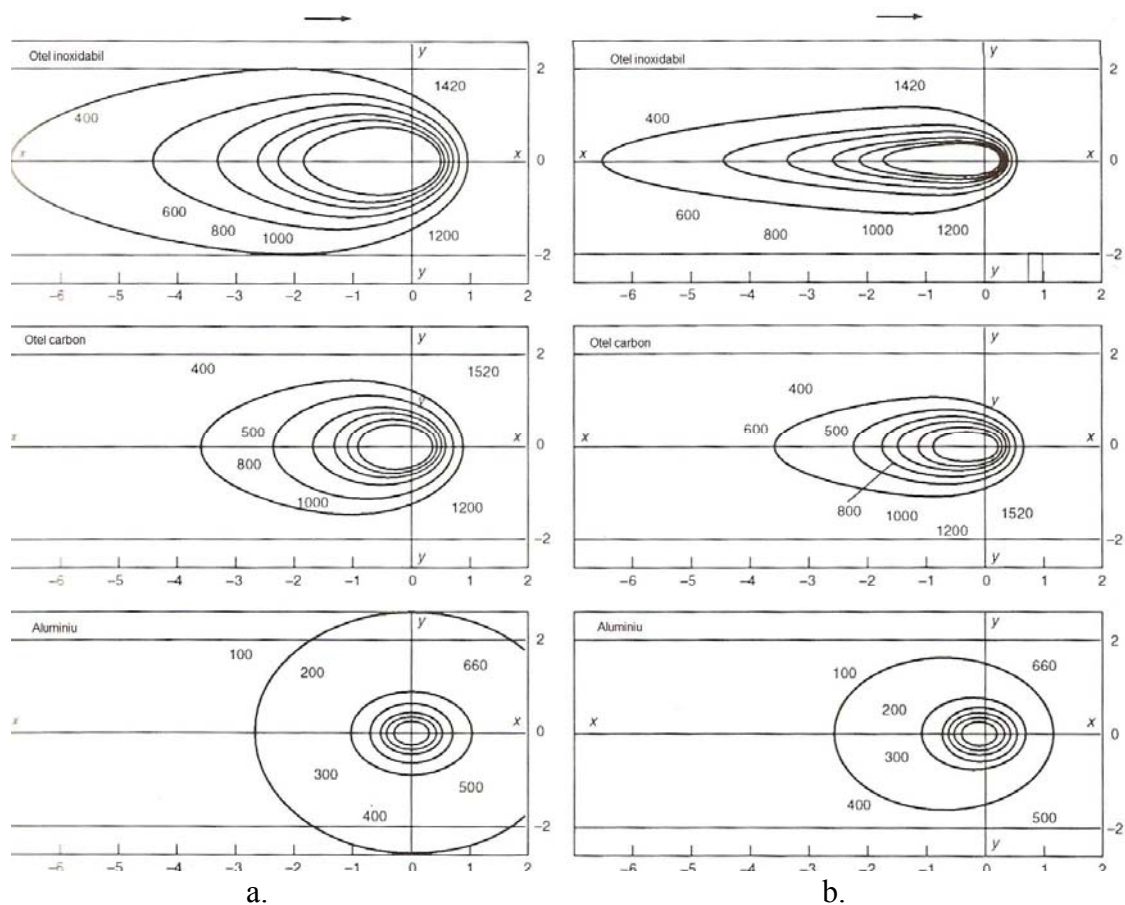


Fig. 7. A. Influența conductivității termice a materialului de bază asupra formei izotermelor *câmpului termic) pentru densitate de putere 4,2kJ/s și viteză de sudare 1mm/s.(conductibilitatea termică a materialului modifică dimensiunile băii lichide și dimensiunile zonei influențate termic. Alumiuniul, deși are temperatura de topire cea mai mică, are baia foarte mică și zona încălzită extinsă.) B. Efectul vitezei de sudare asupra conturului izotermelor: viteza de sudare 5mm/s, putere 4,2kJ/s (creșterea vitezei de sudare se manifestă ca și când s-a introdus o cantitate de căldură mai mică – energia liniară mai mică).

Energia liniară utilizată în proces este o mărime frecvent utilizată în practica sudării. Ea face legătura între parametrii electrici (în cazul arcului electric) și cei cinematiți.

Relația de calcul pentru sudarea cu arc electric este:

$$E_l = \frac{P}{v_s} = \frac{\eta \cdot U \cdot I}{v_s} \quad \left[\frac{j}{m} \right]$$

PROCEDEE DE SUDARE

SUDAREA CU FLACARA

În cadrul acestei metode de sudare, sursa termică o constituie flacăra de gaze, figura

Flacăra 4 topește metalul de adaos 2 și marginile metalului de baza 1, rezultând cusătura 6. Flacăra secundară 5 încălzește marginile metalului de bază. Coeficientul de concentrare este redus, materialul de bază este încălzit pe distanțe relativ mari. Materialul de adaos și baia lichidă sunt puțin supraîncălzite.

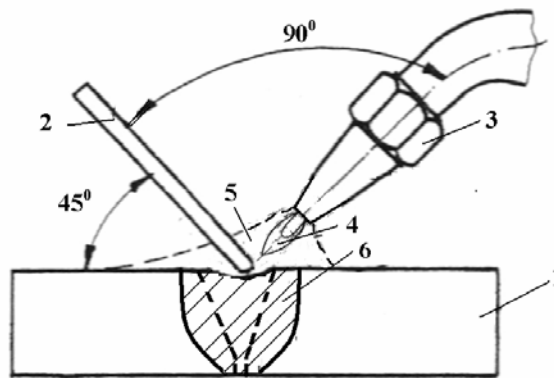


Figura Schema sudării cu flacăra: 1. metal de bază; 2. metal de adaos; 3. suflai; 4. flacăra primară; 5. flacăra secundară; 6. baie lichidă / sudură.

Sudarea oxi-acetilenică și oxi-gaz în general, se caracterizează prin următoarele particularități:

- avantaje – este o sursă concentrată de căldură, ușor controlabilă, cu temperatură și densitate de putere mai redusă decât cea a arcului. Acest lucru permite sudarea corectă și estetică a materialelor cu grosimi mici (0,5...1,5 mm), completând sudarea cu arc, care în aceste condiții este mai greu sau chiar imposibil de realizat. Metoda este eficientă în lucrări de reparații;

- dezavantaje – productivitate mică, cost ridicat și calitate slabă la sudarea pieselor groase (sudarea în mai multe straturi se face greu și nu asigură o calitate corespunzătoare); nu se pot face alieri în cusătură, calitatea sudurii depinde de calificarea sudorului. Protecția băii de efectele mediului este redusă.

SUDAREA MANUALĂ CU ELECTROD ÎNVELIT

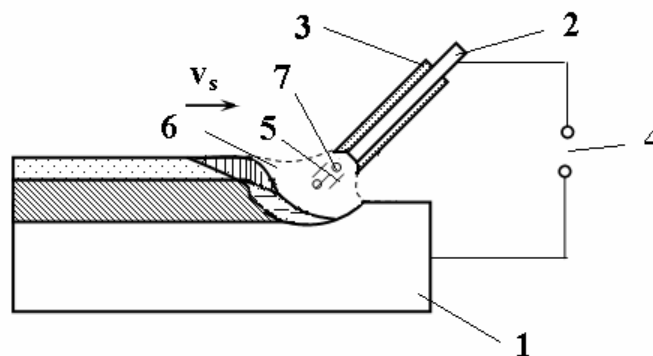


Fig. schema sudării manuale cu electrod învelit: 1. material de bază; 2. vergea metalică; 3. Înveliș de electrod; 4. sursă de curent; 5. arc electric; 6. atmosferă protectoare rezultată din arderea învelișului; 7. picături de metal transferate prin arc.

La sudarea manuală cu arc electric cu electrod învelit arcul arde între o vergea metalică – electrodul învelit și metalul de bază. Electrozii înveliți sunt electrozi fuzibili. Aceștia sunt formați dintr-un miez metalic și un înveliș cu compoziție chimică complexă - minerale, compuși chimici ai metalelor, săruri, etc. După aprinderea arcului electrozii sunt avansați manual în arc pe măsură ce se consumă. Simultan arcul se deplasează de-a lungul semifabricatului, realizând cusătura.

Temperatura din arcul electric asigură topirea materialului de bază dar și a vârfului electrodului. Fenomene complexe de natură electromagnetică asigură transportul metalului topit din electrod totdeauna spre piesele de sudat. Fenomenul de trecere a metalului prin arcul electric, întotdeauna în sensul electrod-piesă, poartă denumirea de transfer de metal prin arc. Protecția băii se realizează prin atmosfera obținută în urma arderii învelișului. Tot prin compoziția chimică a învelișului sunt asigurate o serie de funcții metalurgice ce influențează produsul finit, respectiv calitatea cusăturii sudate.

Particularități ale procedurii:

- avantaje – extrem de flexibil în ceea ce privește compoziția chimică a cusăturii, posibilități de aliere a cusăturii, echipament simplu și fiabil, posibil de sudat cam în orice condiții de mediu;
- dezavantaje – și aici, calitatea sudurii depinde de calificarea sudorului; selecția materialului de adaos (electrozi) trebuie făcută cu maximă atenție, iar unele materiale de adaos cer condiții speciale de lucru / conservare.

SUDAREA AUTOMATĂ CU ARC ELECTRIC SUB FLUX

Acest procedeu folosește ca electrod sârmă neînvelită sub formă de colaci . Protecția arcului și băii de sudură de acțiunea atmosferei este asigurată de compuși asemănători celor din învelișul de electrod, dispuși pe metal sub formă de pulberi numite flux. Fluxurile pentru sudare sunt caracterizate de compoziția chimică, capacitate de a reacționa chimic la temperaturi înalte și granulația inițială.

Avansul sârmei electrod se face totdeauna mecanizat. Sunt preferate soluțiile tehnologice în care și mișcarea de deplasare a ansamblului de lucru este automată, dar există și soluții semimecanizate. Schema de principiu este prezentată în figura 1.3.

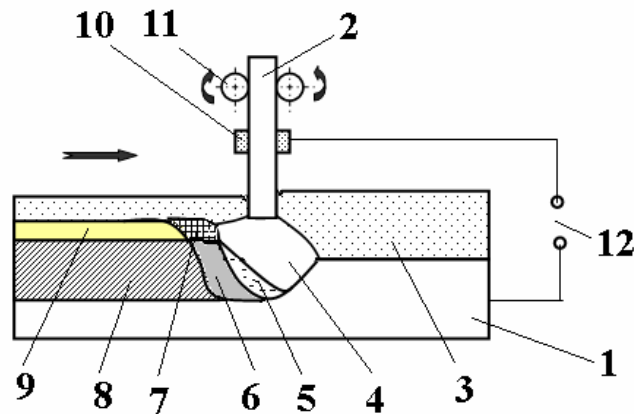


Figura 1.3. . Schema sudării automate sub strat de flux: 1. metal de bază; 2. sârmă electrod; 3. strat de flux; 4. spațiu ardere arc (atmosferă gazoasă); 5. baie lichidă; 6. metal în curs de solidificare; 7. zgură în curs de solidificare; 8. cusătură finită; 9. zgură solidificată; 10. patina contact curent; 11. role de antrenare; 12. sursă de curent.

Fluxul granular se depune pe metalul de bază pe o grosime de 30...50 mm. Arcul electric este amorsat și arde în masa de flux. O parte a fluxului arde și formează o atmosferă de gaze de compoziție controlată de compoziția chimică a fluxului. Parte din flux se topește și formează pe suprafața băii metalice zgura lichidă.

Sudarea sub strat de flux asigură o pătrundere mare în metalul de bază (sudează grosimi mari dintr-o singură trecere), o productivitate ridicată și o calitate foarte bună a îmbinării. Principalul dezavantaj este legat de poziția de lucru, doar pe orizontală. De asemeni, solicită o prelucrare atentă a rostului de sudare.

SUDAREA IN MEDIU DE GAZE PROTECTOARE

Termenul include o sumă de procedee de sudare cu aplicații relativ recente în practică. Ideea a pornit de la asigurarea unei atmosfere total neutre față de metalul incandescent. Acest lucru era posibil prin utilizarea unui gaz inactiv chimic, un gaz inert. În stadiul actual al dezvoltării tehnicilor de sudare nu se mai utilizează decât rar gaze inerte simple, cel mai adesea fiind utilizate rețete de gaze (două sau mai multe, în raporturi bine definite, inclusiv amestecuri de gaze inerte). Tot atmosferă protectoare este și

atmosfera formată din gaze active chimic (dioxid de carbon, hidrogen) atunci când utilizarea ei aduce beneficii calității sudurii.

Dintre gazele inerte sunt utilizate gazele heliu și argon. Cel mai folosit este argonul, deoarece este mai ieftin și are densitate mai mare, pe când heliul este mai ușor, mai scump și se consumă mai mult. În rețete sunt utilizate volume de dioxid de carbon, hidrogen și oxigen.

Se deosebesc două procedee: sudare cu electrod nefuzibil (WIG- wolfram-inert gas); sudare cu electrod fuzibil, asemănător sudării sub strat de flux. Cele două variante se prezintă schematic în figura 1.4.

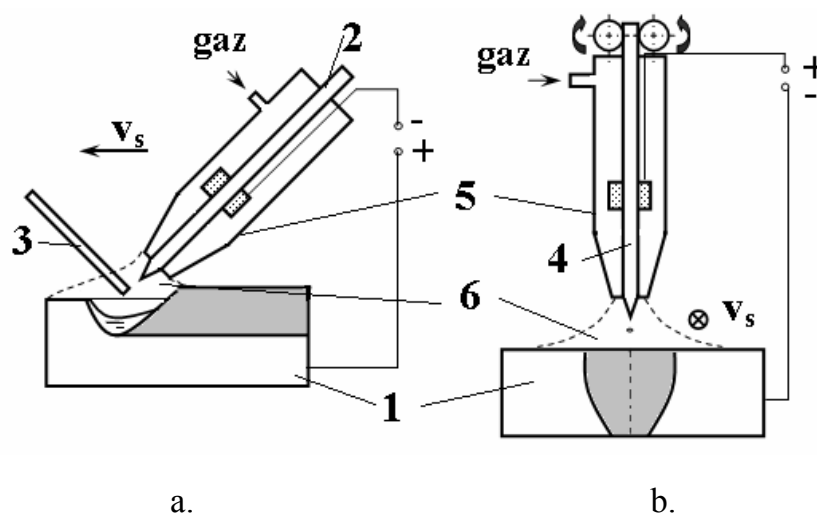


Figura 1.4. Schema metodelor de sudare cu gaze protectoare:

a. procedeu WIG; b. procedeu MIG; 1. metal de bază; 2. electrod de wolfram, nefuzibil; 3. metal de adaos (vergea); 4. metal de adaos (electrod fuzibil); 5. corp pistol de sudare; 6. atmosferă protectoare (ieșire gaz).

Echipamentul pentru sudarea în atmosferă protectoare este prevăzut cu un pistol de sudare. Pistolul are funcții multiple: asigură legătura electrodului la sursa de curent; asigură curentul de gaz de protecție; la sudarea cu electrod fuzibil asigură antrenarea sârmei electrod, asemănător cazului sudării sub flux.

Metoda WIG utilizează un electrod de wolfram infuzibil (wolframul se topește la 3370°C). Ca desfășurare se aseamănă cu sudarea cu flacără, metalul de adaos (atunci când se utilizează) fiind introdus separat în arc. Procedeele se utilizează pentru sudarea profilelor subțiri și mai ales în cazul semifabricatelor de aluminiu. Pentru evitarea uzării electrodului nefuzibil, atmosfera de lucru este formată din gaze inerte, heliu sau argon sau combinații ale acestor două gaze. Sudarea până la grosimi de metal de 3 mm se face numai cu topirea metalului de bază, peste această grosime, se folosește sârmă de adaos. Sudarea se face în general în curent continuu cu polaritate directă. Se utilizează alimentare în curent alternativ când se sudează metale puternic active chimic, aluminiu, magneziu, etc. Nu se folosește polaritatea inversă deoarece se uzează electrodul nefuzibil. Pentru protecția electrodului de supraîncălzire, pistolul de sudare este prevăzut cu sistem de răcire. La curenți de sudare mici răcirea este asigurată de debitul de gaz, la

valori mari ale curentului de sudare răcirea se realizează cu circuit suplimentar de răcire cu apă.

Metoda cu electrod fuzibil, variante MIG / MAG – metal inert gas / metal activ gas

Metoda MIG/MAG se folosește pentru sudarea metalelor cu grosimi de peste 1,5 mm, utilizându-se sârmă electrod avansată automat în arc, asemănător sudării sub flux. Foarte important este faptul că sudarea MIG / MAG permite, funcție de regimul de sudare ales, variația modului de transfer al materialului prin arc. De asemeni, pe ansamblu, datorită lungimii libere mici a materialului de adaos este posibil de utilizat un regim de sudare mult mai intens (densități de curent de peste 100 A/mm²). Este procedeul ce tinde să înlocuiască sudare manuală cu electrod învelit.

Avantajul specific este o sudură curată, fără incluziuni nemetalice. Oferă o alternativă eficientă de sudare a materialelor reactive. Procedeul cu electrod fuzibil asigură performanțe foarte variate în funcție de selecția compoziției materialului de adaos și a regimului de sudare (curent, viteză de sudare, rețetă de gaz, etc.).

În cazul în care se utilizează gaz activ, este posibil ca pe suprafața cusăturii să se formeze o peliculă de zgură.

Față de sudarea cu electrod învelit, sudarea în atmosferă de gaze permite obținerea unor productivități ridicate, a unor pătrunderi mai bune și asigură o calitate superioară a materialului depus. În condiții de teren sudarea cu electrod învelit este de preferat deoarece cleștele port electrod este mai mic și în consecință mai maniabil iar protecția față de intemperii se pare că este mai sigură.

MODIFICĂRI INDUSE DE PROCESELE DE SUDARE ASUPRA MATERIALELOR

Sudarea are efecte complexe, care se materializează în trei mari grupe de modificări:

- Modificări de natură chimică
- Modificări de volum
- Transformări structurale

MODIFICĂRI DE NATURĂ CHIMICĂ

Criteriul fundamental de alegere a materialelor de adaos, electrozilor, este compatibilitatea dintre metalul de bază și cel al electrodului.

Elementele ce condiționează compatibilitatea materialelor din punct de vedere al sudării sunt:

- existența solubilității reciproce a metalelor;
- corelarea compoziției chimice;
- corelarea caracteristicilor mecanice;
- corespondența dintre caracteristicile structurale.

Zonarea modificărilor compoziției chimice

Pentru o bună compatibilitate la sudarea oțelurilor este de dorit ca materialele, de bază și cel de adaos, să posede compoziții chimice cât mai apropiate. 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). Practic acest deziderat nu poate fi complet acoperit din compoziția vergelei metalice. Oțelurile aliate se deformează greu, realizarea de șarje de capacitate redusă nu este economică, etc. Se recurge la o soluție de compromis: sârma de compoziție apropiată dar din mărcile de producție curentă, deformabile, cu adaosuri de tip elemente de aliere introduse în înveliș.

Pe durata procesului au loc oricum modificări de compoziție chimică (arderii, vaporizări, dat fiind faptul că în arc temperatura depășește 3000°C). Coroborat cu reacțiile posibile în arc (dizolvări de gaze, reacții cu gazele) modificările de natură chimică au un rol bine determinat pe ansamblul procesului.

Schema de principiu a modificărilor de natură chimică suferite de materiale pe durata sudării este dată în Figura 8. Pentru sudarea cu electrod învelit compoziția cusăturii este tributară compoziției materialului de bază și materialului depus, respectiv metalul ce a interacționat cu învelișul electrodului și a traversat arcul electric. Pentru alte procedee de sudare zonele prezentate câștigă sau pierd în importanță sau intensitate.

De exemplu, în cazul sudării în atmosferă protectoare cu electrod nefuzibil, când baia lichidă (materialul de adaos și material de bază) nu este expus unui mediu activ modificările de compoziție chimică sunt de tip pierderi reduse de elemente de aliere, pierderi datorate vaporizării unor elemente.

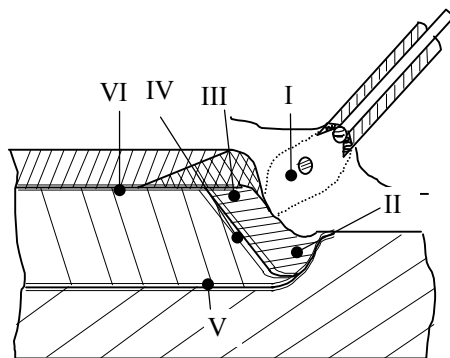


Fig. 8. Zone de interacțiune chimică în arcul electric la sudarea cu electrod învelit: I. transfer picătură prin arc: interacțiune picătură lichidă, înveliș lichid -gaze; II. baie lichidă: amestecare metal de bază topit – metal de adios sub formă de picături; III. interacțiune zgură lichidă-metal lichid; IV. reacții la suprafața cusăturii; V. front cristalizare, solid-solid; VI. linia de fuziune .

Reacții de natură chimică la sudare

Disocierea gazelor

Reacția de disociere a gazelor este o reacție endotermă. Disocierea are loc în zonele fierbinți ale arcului. În jurul băii lichide, unde temperaturile sunt relativ reduse gazele se recombina cu degajare de energie.

Disocierea gazelor privește atât gazele biatomice cât și cele triatomice.

Disocierea gazelor biatomice

Reacțiile de disociere în arc sunt:



În reacțiile de mai sus, Q reprezintă cantitatea de căldură necesară pentru desfășurarea reacției. În cazul recombinației reacția este exotermă, căldura de reacție se degajă în mediul exterior.

La temperatura din arc, 5000K, hidrogenul este complet disociat, azotul este disociat în proporție de aproximativ 40%; la temperaturile din arc disocierea gazelor triatomice - vapori de apă, CO₂, este aproape completă.

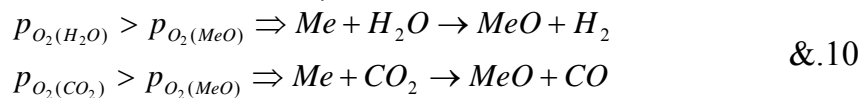
Dizolvarea gazelor presupune parcurgerea unor etape. În faza inițială se realizează adsorbția pe suprafața metalului. Cea de a doua etapă este formarea soluției sau a compusului chimic, funcție de tipul de gaz și metalul de bază. Aceste etape se desfășoară cu viteză mare, practic instantaneu. Cea de a treia etapă, pătrunderea compusului sau

soluției în profunzimea masei metalice, este un proces de durată. Se realizează prin difuzie pe baza diferenței de concentrație între suprafață și interiorul materialului.

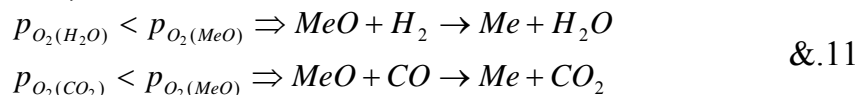
În cazul sudării cu arc electric s-a pus în evidență prezența adsorbției electrice a gazelor în metal. Adsorbția electrică este sesizabilă la catod, unde ionii grei sunt antrenati în profunzimea metalului sub acțiunea câmpului electric.

Disocierea și dizolvarea gazelor creează condiții pentru desfășurarea unor reacții chimice, asemănătoare reacțiilor din cadrul proceselor de elaborare.

De exemplu, dacă presiunea parțială a oxigenului provenit din descompunerea vaporilor de apă, respectiv a dioxidului de carbon depășește presiunea oxigenului provenit din descompunerea oxizilor metalici, atmosfera din preajma băii va stimula reacția de oxidare a metalului lichid, atmosfera fiind oxidantă.



Invers, dacă presiunea parțială a oxigenului provenit din descompunerea vaporilor de apă, respectiv a dioxidului de carbon este mai mică decât presiunea oxigenului provenit din descompunerea oxizilor metalici, reacția dominantă va fi cea de legare a oxigenului provenit din oxizi, atmosfera fiind reducătoare.



Interacțiunea cu oxigenul

Oxizii metalici rezultați din interacțiunea metal lichid – oxigen pot fi solubili sau insolubili în metal. Oxizii solubili formează soluții cu metalul ceea ce crește conținutul de oxigen al metalului. Oxidarea metalului poate avea loc prin reacție directă metal – fază gazoasă sau indirect, prin reacție chimică complexă, când oxigenul rezultă dintr-o reacție chimică.

În fierul din oțel oxigenul se dizolvă în cantități variabile cu temperatura. Cantitatea maximă este prezentă în fierul lichid, circa 0,16%. La temperatura ambiantă conținutul de oxigen dizolvat este de ordinul de mărime $10^{-3}\%$.

Condițiile specifice sudării, temperaturi foarte mari, agitația intensă în zona băii lichide au ca efect creșterea conținutului de oxigen în fază lichidă. Scăderea rapidă a temperaturii nu permite evacuarea excesului de oxigen.

Prezența oxigenului în metal reduce dramatic toate proprietățile mecanice, în special tenacitatea și plasticitatea.

Interacțiunea cu hidrogenul

În zona băii metalice hidrogenul apare din descompunerea vaporilor de apă prezenți fie în materialul de adaos, fie pe metalul de bază, gazul de protecție, etc. O altă sursă este reprezentată de impuritățile de natură organică.

Hidrogenul nu formează compuși chimici cu fierul. Solubilitatea hidrogenului crește cu temperatura, prezentând salturi de solubilitate la traversarea transformărilor alotropice. Saturarea cu hidrogen a metalului are loc la transferul picăturii prin arc.

La răcire – solidificare solubilitatea hidrogenului în metal scade. Parte din gaz se degajă din metal sub formă gazoasă – hidrogen efervescent. Gazul rămas captiv se degajă în stare solidă a metalului – forma difuzibilă, devenind posibilă sursa de amorsa de fisura.

Dimensiunea mică a atomilor le permite migrarea prin rețeaua metalului solid. Difuzia permite aglomerarea atomilor în zonele de defecte ale rețelei (vacanțe, dislocații, limite de grăunte), unde atomii gazului se asociază, rezultând hidrogen molecular. Acesta nu mai poate difuza, ceea ce are drept consecință creșterea locală a presiunii. Efectul este ecrisarea locală a materialului, însoțită de reducerea plasticității, a tenacității cu creșterea tendinței la fragilizare. În final, în zona acumulărilor de hidrogen molecular poate amorsa o fisură, cel mai temut defect din îmbinările sudate, hidrogenul amplificând influența defectelor de rețea.

Interacțiunea cu azotul

Azotul în stare atomică se dizolvă în fierul lichid, cu care formează compuși chimici, nitruri. În oțel azotul formează nitruri cu aproape toate elementele de aliere (siliciu, titan), nitruri cu stabilitate mai mare decât cele ale fierului la temperaturi înalte. Prezența azotului în oțel reduce plasticitatea și tenacitatea oțelului, dar crește proprietățile de rezistență. Creșterea fragilității face ca azotul să fie un element de evitat în îmbinări.

Interacțiunea cu monoxidul de carbon, CO

În zona băii lichide CO provine din atmosferă, din atmosfera protectoare sau din descompunerea carbonaților din flux. Este un gaz insolubil în metal, indiferent de cantitatea existentă în atmosferă nu afectează proprietățile metalului. Prin proprietățile sale reducătoare și prin reacția exotermă de formare a dioxidului, are o funcție de protecție precum și una termică, de reducere a vitezei de răcire.

Monoxidul de carbon format în cusătură din reacția carbonului cu oxizii metalului, $C + MeO \rightarrow Me + CO$, se degajă și provoacă „fierberea” băii. În stare lichidă efectul este acceptabil, antrenând impuritățile spre suprafața băii. În absența unei cantități suficiente de dezoxidanți (Si, Mn) fierberea se continuă la temperaturi reduse având ca efect apariția porilor și reducerea conținutului de carbon.

Interacțiunea complexă metal – gaz - zgura

Reacțiile chimice ce se desfășoară aici vor fi cele specifice elaborării, respectiv oxidarea, dezoxidarea, rafinarea și alierea.

Oxidarea

Formarea oxizilor metalici în sistemul baie lichidă – zgură – fază gazoasă are loc prin două mecanisme:

Oxidarea directă, relația ...&.21 când oxigenul din reacție provine din atmosferă, din disocierea gazelor sau a unor compuși chimici (carbonați, oxizi complecși). Reacția este rapidă și exotermă.



Me_B – metalul de bază, elementul metalic principal din aliaj (oțel – Fe).

Cel de al doilea mecanism presupune existența a doi oxizi metalici, ai unor metale diferite. Reacția, în forma generală exprimată în relația ...&.22, se numește oxidare indirectă.



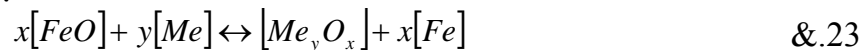
Me_B – metalul de bază, Me_A – un element metalic din materialul de adaos.

Tendința descrescătoare spre oxidare a elementelor prezente în procesul de elaborare este: Ca, Mg, Al, Ti, Si, Na, Mn, Cr, P, Fe, Ni, H₂, C, Cu, S, N₂. Se remarcă cu ușurință că există un număr important de elemente cu afinitate mai mare decât cea a fierului pentru oxigen.

Eliminarea efectului reacțiilor de oxidare, dezoxidarea pe seama elementelor cu afinitate crescută față de oxigen este metoda cea mai utilizată de reducere a cantității de oxigen din cusătura sudată. De remarcat că oxizii formați de elementele dezoxidante sunt insolubili în metalul lichid, ceea ce ușurează îndepărtarea lor în zgură.

Dezoxidarea

Particularizând relația generală ...&.22 pentru oțel, unde oxidul solubil este FeO, ($Me_B = FeO$).



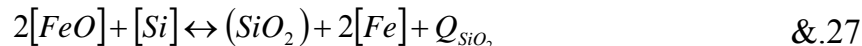
[Me] – dezoxidantul introdus Si, Mn, Ti, Al, C, H₂.

Prezența parantezei pătrate semnifică prezența elementului dizolvat în baia metalică lichidă. Prezența parantezei rotunde simbolizează prezența elementului sau compusului în zgură.

La o creștere a conținutului de dezoxidant în metalul lichid împreună cu reducerea cantității de oxizi ai acestuia reduce concentrația de oxid feric liber.

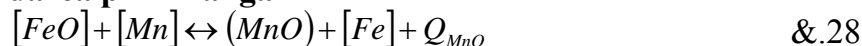
Dezoxidarea prin siliciu

Reacția de dezoxidare este:



Produsul de reacție este insolubil, formează ușor silicați care trec în zgură. Silicații sporesc vâscozitatea și aciditatea acesteia, ceea ce limitează utilizarea Si. Capacitatea dezoxidantă a Si crește cu scăderea temperaturii, figura ...#.7.

Dezoxidarea prin mangan

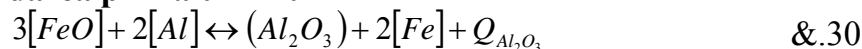


Reacția de dezoxidare are ca rezultat formarea MnO, bazic, și insolubil în metal, dar reciproc solubil în FeO atât în fază solidă cât și în cea lichidă. Acțiunea dezoxidantă a Mn scade cu creșterea temperaturii, figura ...#.8.

Dezoxidarea prin titan

Ca dezoxidant, titanul este mai puternic decât Si sau Mn. Produsul de reacție este un oxid acid. Specific titanului este afinitatea pentru azotul din metal cu care formează nitruri stabile, insolubile în metal. Are o funcțiune de modificador, reducând dimensiunea grăunțurilor.

Dezoxidarea prin aluminiu



Este dezoxidantul cel mai puternic, dezavantajul care limitează puternic utilizarea lui fiind separarea dificilă a produsului de reacție.

Dezoxidarea cu carbon

Deși un dezoxidant puternic, carbonul este limitat ca utilizare din cauza pericolului apariției porilor. Dezoxidarea se poate realiza și prin intermediul H_2 dar există pericolul dizolvării acestuia în masa metalică.

Rafinarea cusăturii

Rafinarea este un proces metalurgică care constă în îndepărtarea impurităților dăunătoare, sulful și fosforul. În cusătură, afinarea se desfășoară simultan cu reacțiile de oxidare dezoxidare ca rezultat al interacțiunii dintre metal, zgură și atmosferă. Condițiile de desfășurare a reacțiilor specifice sunt mai bune decât în cazul elaborării: agitare intensă a materialelor, suprafață de reacție mare, temperaturi ridicate.

Desulfurarea

Conținutul ridicat de sulf favorizează fisurarea la cald. Fisurarea este consecința prezenței sulfurii de Fe, FeS, care formează eutectici ușor fuzibili (temperaturi de topire sub $1000^{\circ}C$).

Legarea sulfurii în zgură se face cu elemente cu afinitate mare pentru sulf, Al, Ca, Si, Mg. Toate aceste elemente au afinitate crescută pentru oxigen, ceea ce face ca cel mai utilizat desulfurant să fie manganul.

Defosforarea

Fosforul favorizează fragilitatea la rece a oțelului. Fosfurile se dizolvă în ferită. Acestea se distribuie neuniform, formând un eutectic cu carbonul și fierul. Defosforarea se bazează pe formarea de anhidridă fosforică P_2O_3 ce urmează să fie legat în compuși chimici complecși, ce se separă în zgură.

Funcțiile învelișului de electrod și clasificarea electrozilor funcție de natura învelișului

Învelișul de electrod are numeroase funcții, ceea ce îi conferă o complexitate sporită față de materialele auxiliare (zgurefiante) din cazul elaborării. Aceste funcții sunt:

- funcția ionizatoare – arderea stabilă a arcului electric. Se realizează prin introducerea unor substanțe care măresc stabilitatea funcționării arcului electric prin intensificarea procesului de ionizare a mediului între electrod și piesă. Aceste substanțe sunt pe bază de Ca, Na, K, Ba;
- funcția moderatoare – formarea unei cruste de zgură deasupra sudurii. Aceasta are rolul de a reduce viteza de răcire a cusăturii sudate, de a crește plasticitatea sudurii, de a împiedica pătrunderea gazelor din atmosferă în sudură;
- funcția protectoare - formarea unui mediu gazos protector pentru picătura metalică ce traversează coloana arcului și baia de metal topit.;
- funcția de aliere. Se realizează prin introducerea unor elemente metalice (feroaliaje) care absorb oxigenul (dezoxidante) și produc îmbogățirea cordonului cu anumite elemente (Mn, Si, Fe etc.);
- funcția de curățire (rafinare). Realizează reducerea conținutului de sulf și fosfor la anumite tipuri de învelișuri, prin introducerea unor elemente mai avide față de acestea decât de fier;
- funcția de sprijinire. Constă în întărirea rapidă a zgurii, condiție necesară la executarea sudurilor pe plafon.

Electrozii înveliși destinați sudării manuale cu arc electric se împart în mai multe grupe, în funcție de grupa de materiale (oțeluri) pentru care au fost elaborate.

În cadrul fiecărei grupe există mai multe tipuri, ce se disting prin caracteristicile mecanice ale metalului depus și compoziția chimică a învelișului.

Învelișul este realizat prin dozarea de minerale (mică, cuarț, feldspat, carbonați de Ca și Mg), minereuri (oxizi metalici), substanțe organice, feroaliaje și altele în vederea asigurării funcțiilor amintite anterior corespunzător destinației propuse. De ex., dacă se elaborează un electrod destinat sudării de poziție pentru recipiente care lucrează sub presiune, zgura rezultată din topirea învelișului va trebui să asigure o dezoxidare avansată, o rafinare corectă (se asigură astfel caracteristicile mecanice solicitate de recipientele sub presiune) dar și o bună funcție de susținere a băii lichide pentru asigurarea condiției de poziție.

Principalele tipuri de învelișuri sunt: celulozic, oxidant, acid, rutilic, bazic.

Încadrarea tipului de înveliș se face cu ajutorul coeficientului de bazicitate, definit ca raportul cantităților de oxizi cu caracter bazic și a oxizilor cu caracter acid:

$$B.I. = \frac{CaO + CaF_2 + MgO + K_2O + Na_2O + Li_2O + \frac{1}{2}(MnO + FeO)}{SiO_2 + \frac{1}{2}(Al_2O_3 + TiO_2 + ZrO_2)}$$

Oxizii de la numărător sunt oxizi cu caracter bazic; cei de la numitor sunt cu caracter acid – oxidul de siliciu și cu caracter amfoter (comportament bazic în prezența oxizilor bazici și acid în prezența oxizilor acizi).

Electrozii cu înveliș bazic asigură, datorită chimismului lor, o bună rafinare a băii, un bun transfer de elemente de aliere, o îndepărtare corespunzătoare a gazelor (oxigen și hidrogen) din cusătură. Ei vor asigura o sudură de calitate. Datorită stabilității reduse a arcului, îndepărtării dificile a zgurii solidificate și riscului de absorbție a apei se preferă electrozii de tip acid sau rutilic în cazul sudurilor cu pretenții medii.

MODIFICĂRI DE VOLUM LA SUDARE – TENSIUNI ȘI DEFORMAȚII

Încălzirea locală sub acțiunea sursei termice urmată de răcire are ca efect apariția de variații de volum locale, care induc deformații și tensiuni în materialele sudate. Pentru explicarea intuitivă a apariției deformațiilor și tensiunilor la sudare se analizează următoarele exemple, figura 9:

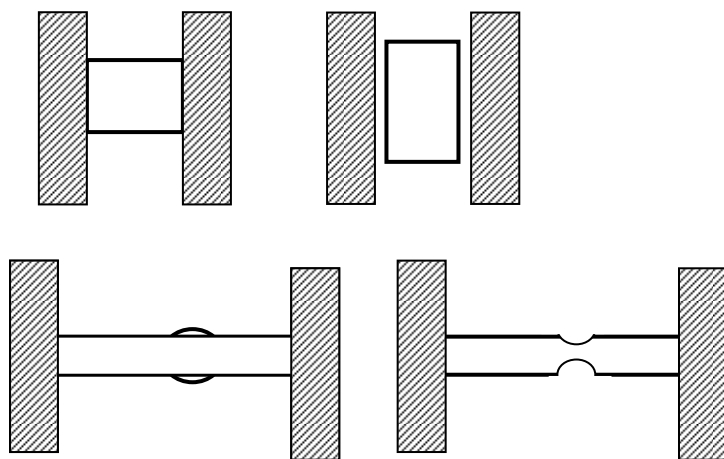


Fig. 9. Exemplificarea apariției deformațiilor și tensiunilor la sudare

Primul caz: o piesă liber așezată între două reazeme fixe se încălzește. Datorită limitării posibilităților de dilatare, piesa își modifică dimensiunea care are gradul de libertate necesar. La răcire, reducerea de dimensiuni se face liber, piesa rezultând mai mică pe una din dimensiuni. În cel de al doilea caz, bara fixată rigid, încastrată, este încălzită. Deformația se localizează undeva pe lungimea barei. La răcire contracția are ca efect îngustarea secțiunii (depășirea limitei de curgere), iar la limită, se poate atinge ruperea.

Variația unei dimensiuni a piesei, datorate încălzirii, se exprimă ca:

$$\Delta l = l_1 - l_0 = l_0 \cdot \alpha \cdot (T_1 - T_0)$$

Unde l_1 – lungimea finală, l_0 – lungimea inițială, α – coeficientul de dilatare liniară, T și T_0 – temperaturile inițială și finală.

Deformația relativă pe o dimensiune este:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \alpha(T_1 - T_0)$$

Dacă corpul este izotrop se poate considera deformația volumică:

$$\varepsilon_v = 3 \cdot \varepsilon$$

Pe lângă anizotropia materialelor, în practică coeficientul de dilatare nu este constant decât pe intervale de temperatură relativ restânse.

Pentru oțeluri, variația coeficientului de dilatare liniară prezintă salturi importante în cazul transformărilor de fază, figura 10.

Prezența elementelor de aliere modifică, de asemenea, coeficientul de dilatare. Astfel, manganul, nichelul cresc coeficientul de dilatare, pe când carbonul îl reduce.

Deformațiile suferite în timp nu sunt libere: straturile vecine de material, aflate la temperaturi diferite, se opun modificărilor generate de încălzirea viitoare a cusăturii. Se dezvoltă deformații complexe, cu componentă elastică și plastică, deformații elastoplastice.

Deformația totală este:

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p$$

Deformațiile elastice pot fi estimate cu ajutorul legii lui Hooke, peste 600°C ele tind la zero, deformația plastică se determină estimativ pe baza curbelor dilatometrice ale materialului.

În funcție de locul și modul în care se manifestă, deformațiile pot fi:

- funcție de volumul de material afectat: Locale
generale
- funcție de efectul asupra piesei: transversale
longitudinale
unghiulare

Tensiunile la sudare

Tensiunile n piesele sudate ca în orice piesă procesată la cald sunt rezultatul deformațiilor reținute. În cazul sudării efectele sunt cu atât mai importante cu cât încălzirea este un proces local, neuniform, care are loc în condiții departe de echilibru.

Clasificarea tensiunilor

După natura lor: termice;

structurale (fazice);

de lucru (apar datorită montajului).

Volumul în care se echilibrează: macroscopice (ordinul I)

Microscopice (ordinul II)

Reticulare (ordinul III – la nivelul rețelei atomice).

Distribuția în spațiu: monoaxiale

Biaxiale

triaxiale

Tensiunile termice se pot aprecia cu ajutorul legii lui Hooke:

$$\sigma = \varepsilon \cdot E_{(T)} = \alpha \cdot \Delta T \cdot E$$

Unde: ε – deformația relativă la încălzire; α – coeficientul de dilatare termică, E - modulul de elasticitate, ΔT – variația de temperatură.

Pe durata procesului temperatura variază mult, în consecință valoarea și orientarea tensiunilor induse termic variază rapid. Astfel, în fața sursei, ca urmare a dilatării materialul este comprimat, după trecerea sursei, starea de tensiuni trece în întindere, cu valori ce cresc cu scăderea temperaturii. La oțeluri, în domeniul transformării austenitei n ferită, creșterea de volum poate modifica starea de tensiuni în tensiuni de compresie.

Tensiuni structurale. Apariția lor se datorează transformărilor de fază pe care le suferă aliajele la încălzire respectiv răcire.

În cazul oțelurilor, trecerea temperaturii peste linia Ac3, inevitabilă în zonele vecine cusăturii, are ca efect transformarea structurii inițiale (ex. ferită și perlită) în austenită. Aceste transformări nu au loc simultan, variația de volum fiind incomodată de zonele netransformate.

Suplimentar, încălzirea și răcirea rapidă din spațiul afectat are ca efect deplasarea punctelor de transformare și implicit a curbelor dilatometrice, care pun în evidență dependența intensității deformațiilor de distanța relativă față de cusătură.

Tensiunile de reacție apar ca urmare a legăturilor rigide ale pieselor în structura sudată. Pot fi reduse / evitate prin proiectarea corectă a construcției sudate, asigurarea unei ordini de sudare judicioase.

Tensiunile reziduale sunt tensiunile induse de proces care se echilibrează în interiorul construcției sudaate. Ele nu pot fi evitate, eliminate, pot fi reduse și li se poate asigura o orientare favorabilă pentru exploatare.

Metode de reducere a stării de tensiuni

- Utilizarea unui material de adaos cu rezistență la curgere mică;

- Aplicarea unor sarcini exterioare pe durata sudării
- Aplicarea unui tratament termic – uniformizarea deformațiilor, are ca efect trecerea lor din domeniul elastic în cel plastic;
- Aplicarea unui tratament mecanic: modifică câmpul de tensiuni periculos local.

MODIFICĂRI STRUCTURALE LA SUDARE

Modificările structurale se datorează ciclului termic parcurs de materiale. Deoarece materialul din cusătură experimentează un ciclu complet de încălzire – topire – răcire – solidificare – răcire iar materialul de bază doar încălzire și răcire, se vor aborda distinct cele două zone.

Se vor urmări pe rând:

- Modificări în cusătură: structura primară, obținută prin solidificare; structura secundară, cea posibil de pus în evidență metalografic pe sudura finită.
- Modificări structurale în ZIT (transformările în fază solidă suportate de materialul de bază).

Modificări în cusătură – cristalizarea primară

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.

Particularități la sudarea cusăturilor sudate

Deși se poate asimila sudarea cu răcirea materialului turnat în cochilă, există niște fenomene particulare:

- Materialul cusăturii se află sub efectul cuplat al sursei termice și al materialului rece care îl înconjoară: gradientul termic este cel mai mare posibil într-un proces care nu urmărește răcirea rapidă cu orice preț;
- Cristalizarea se realizează pe un suport, „formă” la care materialul trebuie să adere și cu care, adesea, este izomorf (aceeași rețea): în acest caz, cristalizarea pe suport este epitaxială și solicită o subrăcire foarte mică, practic nulă.
- Cristalizarea depinde de modul în care se deplasează sursa termică
- Materialul cusăturii este supraîncălzit ($2300\dots 1900^{\circ}\text{C}$) – număr mic de centre de cristalizare, suport pentru cristalizarea omogenă;
- Baia metalurgică este caracterizată printr-un gradient de temperatură mare.
- Curenți puternici în baia metalurgică
- Neomogenitate chimică datorată amestecării rapide a celor două materiale (neomogenitate în linia de fuziune, unde viteza de amestecare este practic nulă);
- Viteza de creștere a cristalelor foarte mare, aproximativ egală cu viteza de sudare.

În funcție de raportul existent între gradientul termic și variația de compoziție chimică din baia de sudare, frontul de solidificare se poate deplasa diferit în baia lichidă, generând morfologii diferite ale cristalelor primare. Cel mai frecvent în cusătură cristalizarea se produce sub formă columnar dendritică.

Morfologia primară fină a cusăturii are un aspect de tip rețea alcătuită din intersecția coloanelor cristaline dezvoltate pe direcția frontului de cristalizare; peste această structură se suprapun straturile, generate de intermitențele deplasării frontului de cristalizare, ca urmare a segregării și a eliberării căldurii latente de solidificare, figura 10.

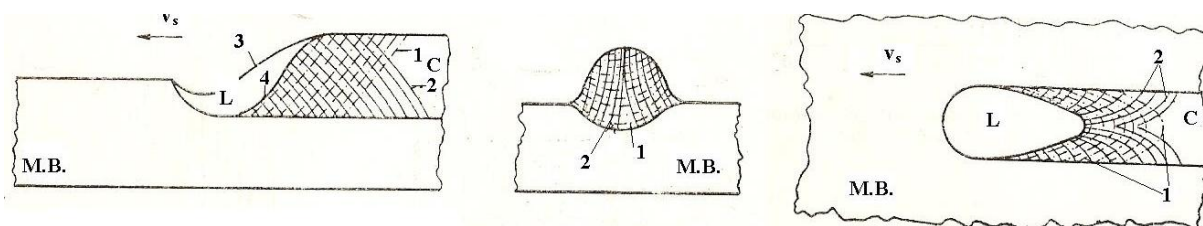


Fig. 10. Morfologia cusăturii sudate: M.B. – metal de bază; L – baie de metal lichidă; C – cusătură; 1 – liniile rezultate în urma alcătuirii în straturi; 2 – linii de separație pentru coloanele din alcătuirea columnară; 3 – suprafața liberă a băii; 4 – front cristalizare; v_s – viteza de sudare.

Structura secundară acoperă particularitățile cristalizării primare; influențele acesteia sunt foarte importante în dezvoltarea unor defecte, deci se reflectă în calitatea cusăturii sudate.

Modificări în cusătură – cristalizarea secundară

Răcirea cusăturii este însoțită de transformările de fază n stare solidă, transformări ce generează structura secundară a cusăturii.

Structura secundară depinde de compoziția materialului de bază, a celui de adaos, de viteza de răcire, gradul de impurificare al metalului cusăturii pe durata procesului, etc. Pentru o estimare a structurii secundare s-au elaborat o serie de diagrame care au ca scop stabilirea aproximativă a structurii în exploatare, capacitatea de selecție cât mai corectă a materialului de adaos în vederea obținerii unei structuri cu caracteristici cât mai bune privind în special tenacitatea materialului depus.

Diagramele de acest tip s-au dezvoltat pe structura diagramei Schaeffler. Diagrama Schaeffler determină structura posibilă în cusătură pentru oțelurile aliate și înalt aliate, pornind de la compoziția chimică a materialului. Pentru a îngloba diferitele influențe, diagrama lucrează cu elementele de aliere din oțel grupate n funcție de efectul lor asupra domeniului de existență al formei alotropice gama. Astfel elementele ce stabilizează domeniul feritei, elementele alfa-gene, dintre care reprezentativ este cromul, sunt reprezentate în abscisă. Efectul lor cumulat este exprimat prin valoarea crom echivalent.

Pentru elementele gamma-gene, reprezentant nichelul, efectul tuturor elementelor este exprimat prin valoarea nichel echivalent, reprezentat în abscisă. Domeniul astfel conturat a fost împărțit experimental în domenii de existență a diferiților constituenți structurali, figura 11.

Există mai multe variante ale relațiilor de calcul pentru crom echivalent, respectiv nichel echivalent. Cele mai nou confirmate sunt:

$$Cr_e = Cr + 1,5Si + Mo + 0,5(Ta + Nb) + 2Ti + (W + V + Al) \text{ și}$$

$$Ni_e = Ni + 30C + 0,5Mn + 0,5Co$$

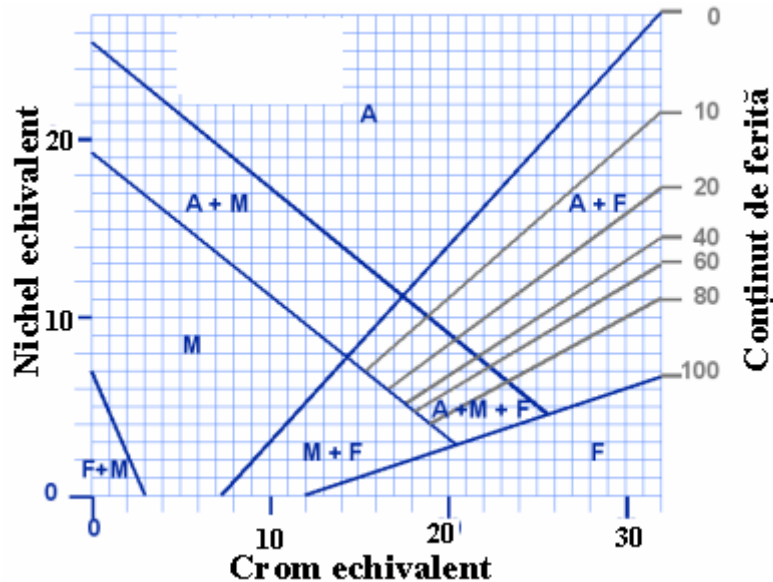


Fig. 11. Diagrama Schaeffler. A – austenită; M – martensită; F – ferită.

Cunoscând compozițiile chimice ale materialului de bază, materialului de adaos sau ale cusăturii finite se poate delimita identitatea structurală a cusăturii. De remarcat că, dată fiind importanța tenacității pentru materialul cusăturii, pentru oțelurile aliate domeniul preferat este domeniul austenitic, conținând puțină ferită. De asemenea, se observă că pentru oțeluri carbon sau slab aliate martensita este constituentul de temut.

Modificări structurale în ZIT

Zona adiacentă băii lichide 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 în zone fine care au fost indirect „tratate termic”. Legătura existentă între ciclul termic la sudare, subzonele din ZIT și diagrama FeC este prezentată în figura următoare.

Subzona supraîncălzită

Materialul din această zonă a depășit limita convențională a încălzirii, intrând în zona supraîncălzirii (peste 1000°C). Ca urmare grăunții suferă o creștere pe seama grăunților mai mici. Creșterea grăunților are ca efect reducerea proprietăților mecanice, creșterea durității, dar și creșterea pericolului de apariție a fisurilor la cald. Dimensiunea acestei zone depășește arareori 1,5mm.

Subzona normalizată

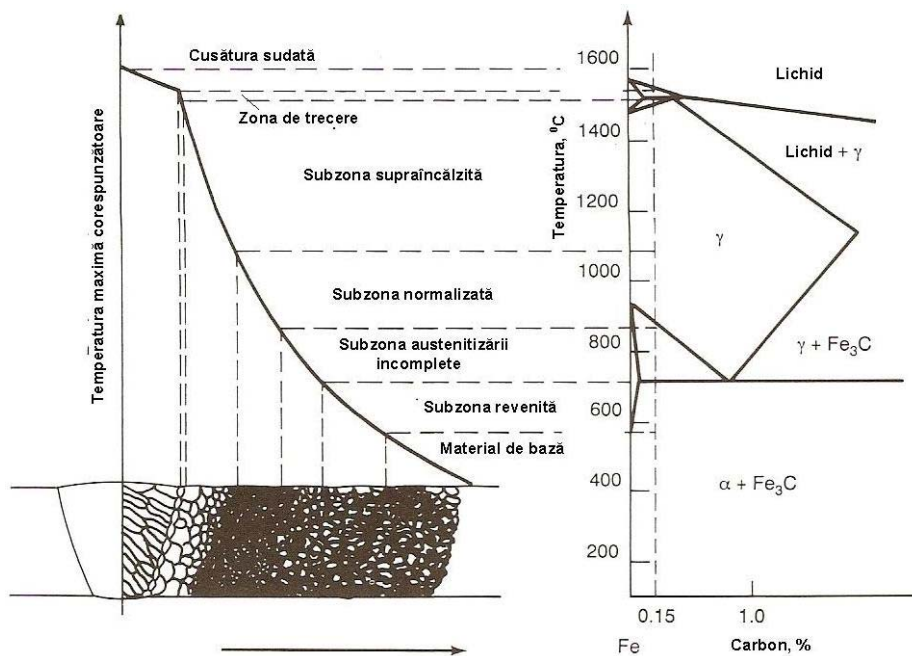
Caracterizată de grăunți fini, zona este un punct slab pentru materialele aflate anterior în stare ecruisată (durificate prin deformare plastică la rece) când încălzirea în domeniul austenitic are ca efect recrystalizarea, deci pierderea proprietăților obținute anterior. Dimensiunea acestei subzone este comparabilă cu cea anterioară.

Subzona austenitizării incomplete

Materialul se austenitizează incomplet la încălzire, aici manifestându-se o reducere a durității materialului comparativ cu materialul de bază neafectat termic. Înmuierea este datorată relaxării datorate încălzirii.

Subzona revenită

Materialul nu a depășit temperatura critică AC_1 , 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).



Fâșiile sunt descrise pentru cazul oțelului carbon cu conținut redus de carbon. Analiza transformărilor structurale pentru alte materiale se poate realiza similar.

Clasificarea și descrierea discontinuităților la sudarea prin topire

1. Generalități

Criteriul de clasificare a defectelor are în vedere cauza apariției lor, modul în care acestea s-au format. În funcție de cauzele majore de apariție există trei mari categorii de defecte:

- defecte de proiectare
- defecte de proces, tehnologice
- defecte metalurgice

DEFECTELE DE PROIECTARE

Defectele de proiectare sunt de obicei defecte majore, care ajung rareori în exploatare. Defectele de proiectare cuprind proiectarea incorectă a detaliilor (neglijarea ordinii de realizare a cusaturilor, imposibilitatea unplerii unui detaliu); alegerea necorespunzătoare a tipului de sudură (corelarea defectuoasă a restului cu grosimea de material, a tipului de rest cu posibilitățile practice de realizare, etc). Un alt tip de eroare este asocierea unor porțiuni cu dimensiuni foarte diferite, știut fiind că aceste diferențe mari de secțiune generează tensiuni reziduale mari.

DEFECTELE TEHNOLOGICE

Defectele tehnologice sunt defecte datorate modului de operare. Aceste defecte cuprind viciile de așezare, de poziționare relativă a componentelor de îmbinat, a sursei de căldură / material de adaos, nerespectarea sau neconformitatea unor parametri (curent sudare, viteza de sudare). Aceste defecte sunt enumerate în continuare și prezentate în subcapitolul următor.

- Crestătură: Material de baza topit, golul nefiind completat cu Material adaos.
- supraîncălzire : material depus în exces
- scurgere laterală : M.D. care acoperă M.B.
- lipsa de patrundere : patrundere mai mică decât cea impusă de material / cerințe tehnice
- lipsa de topire - topirea M.B. nu s-a făcut pe tot conturul
- Cratere : depresiune la sfârșitul cusăturii
- strapungere : baia lichidă mai adâncă decât necesar
- stropi : particule din M.A. proiectate în timpul sudării și care nu fac parte din cusătură
- umplere incompletă : depresiune a cusăturii sub nivelul M.B.
- arsuri : zone din M.D. retopite sau zone din ZIT atinse de arc
- dezaxări
- incluziuni oxidice: particule din oxizi superficiali care nu s-au topit și sunt amestecate în M.D.
- patina de susținere aderentă (la suduri ce impun prezența patinei)
- incluziuni de W – particule de wolfram în cusătură (la sudare WIG)
- incluziuni de zgură : particule nemetalice prinse în cusătură, între materialul de bază și cusătură sau între straturi.

- Porozitate : goluri (cavitati) formate prin captarea gazelor la solidificare.

DEFECTELE METALURGICE

Defectele metalurgice sunt defecte care sunt asociate personalitatea materialului de baza. Reducerea lor presupune cunoasterea M.B., a raspunsului acestuia la procesul de sudare si adaptarea procesului, a tehnologiei la aceste particularitati.

Defecte metalurgice sunt :

- crapaturi
- fisuri
- destramare lamelara
- segregatii
- ochi de peste: por sau incluziune care in ruptură este inconjurat de o zonă stralucitoare, circulara.

Prezenta defectelor si numarul acestora este raspunsul sistemului la un numar insemnat de factori de intrare, respective :

- procedeu de sudare ales ;
- tipul de imbinare ;
- proiectarea imbinarii si conformitatea cu proiectul ;
- materialele utilizate ;
- conditiile de lucru / mediu.

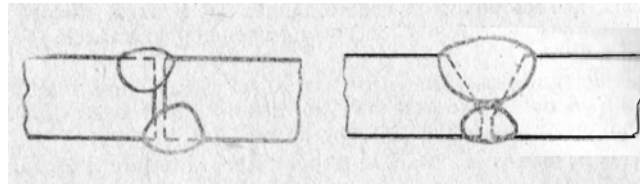
2.2. DEFECTE TEHNOLOGICE

Lipsa de topire si lipsa de patrundere sunt defecte tehnologice frecvent intalnite, cu cauze diverse, datorate unor deficiente de proiectare sau indiscipliniei tehnologice,.

Sunt defecte greu de depistat prin control nedistructiv, cel mai eficient fiind controlul cu ultrasunete unde apare ca porozitate continua.

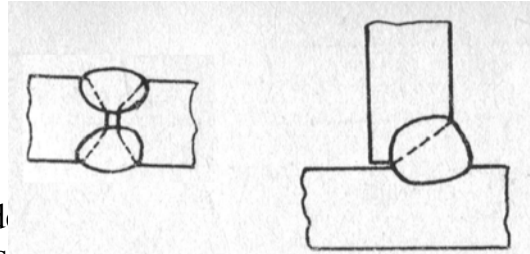
2.2.1. Lipsa de pătrundere

Lipsa de partundere 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 2.1 sau dimensiunea este necorespunzătoare.



a.

b.



c.

d.

FIG. 2.1. -Lipsa de pătrundere la o îmbinare sudată cap la cap fără pregătirea rosturilor cu șanț în V; b. lipsa de pătrundere la o îmbinare sudată cap la cap fără pregătirea rosturilor cu șanț în X; c. sudură cap la cap pregătită în V; d. Lipsa de pătrundere la o îmbinare sudată în unghi

Lipsa de pătrundere micșorează rezistența mecanică statică, datorită modificării secțiunii active a îmbinării. Cercetările experimentale au arătat că nepătrunderile care micșorează secțiunea cu mai puțin de 10-15 % nu au o influență semnificativă asupra rezistenței statice, dar reduc în schimb mult rezistența la oboseală și plasticitatea. La soliciții dinamice, chiar nepătrunderi mici acționează ca niște concentratori de tensiune.

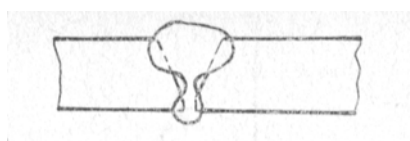
În tabelul 2.3 se arată cauzele ca și consecințele și metodele de evitare a acestui defect.

2.2.2. LIPSA DE TOPIRE

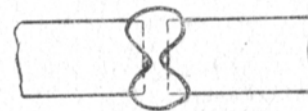
Lipsa de topire este o legătură incompleta între metalul de bază și cel de adaos sau între straturile metalului depus.

Lipsa de topire poate fi situată atât lateral, între staturi, cât și la rădăcină, figura 2.2.

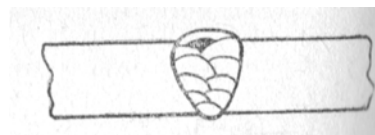
Depistarea lipsei de topire se face prin controlul cu raze X sau ultrasunete.



a.



b.



c.

Fig.. 2.2. Lipsa de topire în cusătura sudată cap la cap: a. laterală; b. la rădăcină; c. între straturi.

Remedierea se face prin crauire până la zona cu defect, resudare și apoi controlul pentru confirmarea îndepărtării.

DEFECTE DE FORMĂ LĂȚIMEA NEREGULATĂ A CUSĂTURII

Atunci când rostul este mai mare față de cel prescris, se obțin cusături cu dimensiuni necorespunzătoare. Defectul apare mai frecvent la sudarea automată.

Factorii principali care produc acest defect sunt următorii : variația tensiunii în rețea, dereglarea vitezei de înaintare a tractorului sau electrodului, schimbarea poziției electrodului. Micșorarea lățimii se reglează prin reducerea tensiunii și creșterea vitezei de înaintare.

Lățimea neregulată duce la creșterea sau scăderea dimensiunilor și de aici la un consum suplimentar de materiale, modificări ale rezistenței mecanice, generarea altor defecte în îmbinare.

SUPRAÎNĂLȚARE ȘI CONVEXITATE EXCESIVĂ

Suprainaltarea este o îngroșare excesivă prin depunerea ultimului strat, figura 2.3.a, determinate de viteză de înaintare și curentul de sudare mici, de calitatea fluxurilor. Convexitatea excesivă este un defect al sudurilor de colț, figura 2.3 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 restranse.

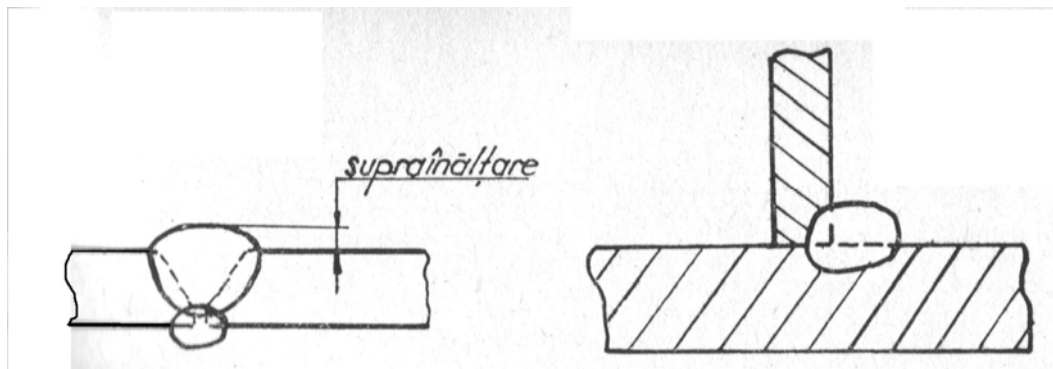


FIG. Defecte de formă: -Suprainaltare și convexitatea excesivă într-o îmbinare sudată

ALTE DEFECTE DE FORMĂ

Craterul final apare la întreruperea arcului la capătul cordonului. Se evidențiază că o adâncitură aplatizată.

Cauzele producerii acestuia sunt următoarele : lipsă de experiență profesională, conducerea greșită a arcului , variația curentului și tensiunii etc.

Rădăcina nesudată, are forma unei retasuri, evidențiind o grosime incompletă a îmbinării. Remedierea se face prin curățire și completare până la obținerea dimensiunilor normale.

Scobitura este concavitatea în cordon produsă de o topire excesivă. Forma acesteia are în vedere planul în care se lucrează și felul îmbinării putând fi la sudura în cornișă, la sudura la colț, la sudura cap la cap, la sudură cu suprapunere, figura

Apariția unor asemenea defecte este cauza pregătirii incorecte a capetelor, rostul prea mare, nerepectarea regimului de sudare. Defectul micșorează rezistența semifabricatelor sudate solícitate mecanic în exploatare, ceea ce face să nu fie acceptat.

Alte defecte de forma sunt **surgerea și străpungerea**. Datorită scurgerii materialului topit seversea pe suprafața metalului de bază în afară conturului rostului,.

Remedierea se face prin înlăturarea scurgerii prin polizare.

Dacă materialul se perforează se produce defectul numit “**străpungere**”. Zona cordonului este umplută parțial iar la rădăcina atârna picături solidificate.

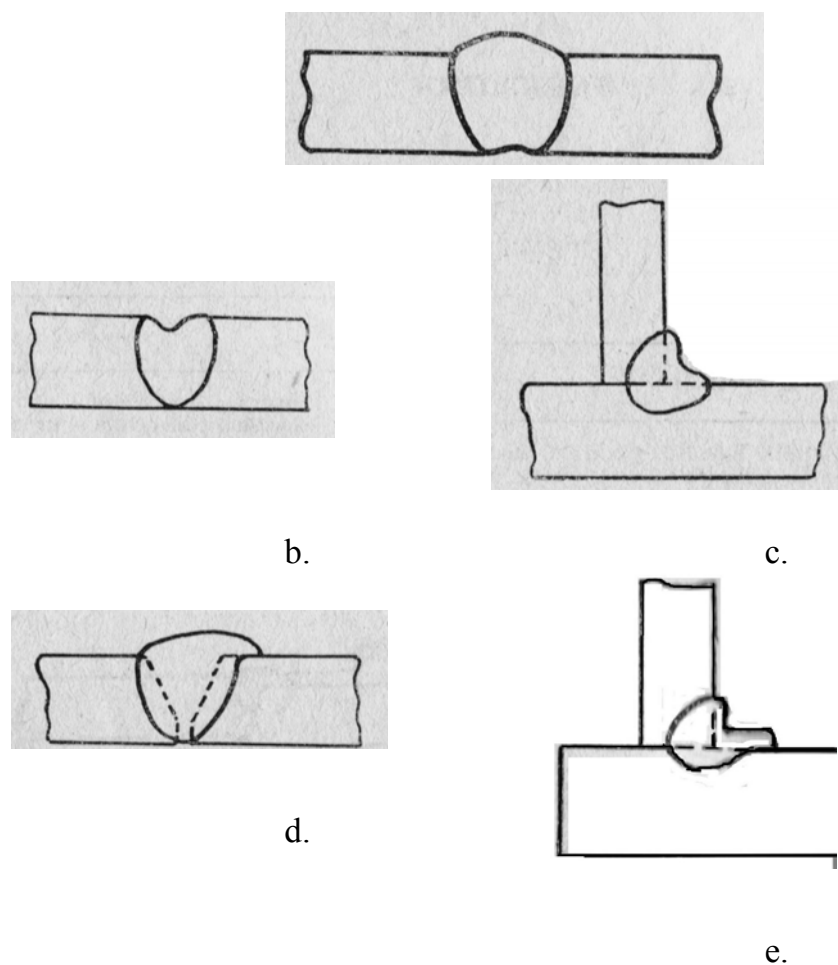


Fig. 2.4. Alte defecte de formă: a. rădăcina nesudată; b. Scobitură în cusătură cap la cap; c. Scobitură în cusătură de colț; d. Scurgere în cusătura cap la cap; e. Scurgere în cusătura de colț.

2.3. Defecte metalurgice

Fisuri

Cele mai periculoase defecte metalurgice sunt fisurile. Fisurile sunt discret ...

Crăpăturile sunt fisuri dezvoltate, ce capătă totdeauna calificativul de defect. Destrămarea lamelară este o fisură apărută în condiții specifice.

Clasificarea fisurilor se realizează pe mai multe criterii :

- după locul de formare (material de baza, cusătura)
- după orientarea față de cusătura
- după localizarea față de gra. (inter, intracristaline sau mixte)
- după momentul apariției (întarziată sau simultană procesului)
- după mecanismul de apariție

În fig. % sunt prezentate dispunerea fisurilor în conformitatea cu primele două criterii.

Tabel 2.5.

Clasificare fisuri după locul de apariție

FISURI			
Loc formare			
M.B.		Cusătura	
Orientare/ amplasare	Transversal, longitudinal în crater	Orientare/ amplasare	- transversal - sub cusătura - la margine - la radacina - linia de topire - longitudinal

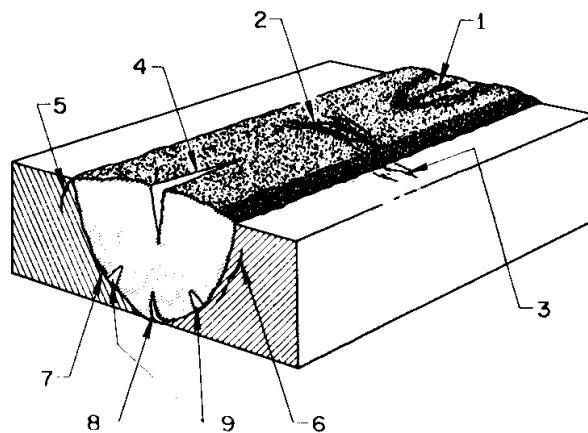


Fig. %. Fisuri într-o îmbinare sudată: 1. fisură în crater, 2. fisură transversală în cusătură; 3. fisură transversală în ZIT; 4. fisură longitudinală în cusătură; 5. fisură în ZIT la partea superioară a cusăturii; 6. fisură longitudinală sub cusătură, în ZIT; 7. fisură pe linia de fuziune; 8., 9. fisuri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

Aparitia fisurilor este asociata unor conditii locale sau de ansamblu speciale, respectiv existentei unor tensiuni reziduale importante, unei raciri mai rapide decat cea medie ce induce tensiuni suplimentare.

Fisurile transversale se dezvoltă în M.B. sau în cusătura dar pot evolua spre zonele învecinate :

- în cusătura : apar când tensiunile de contractie sunt orientate axial. Când eforturile locale depășesc G_r se dezvoltă intergranular. De obicei sunt crapături deschise, extinse pe toată cusătura și uneori patrund și în M.B.

- în M.B.: respective în ZIT. Tensiunile reziduale mari se suprapun unei durități mari, rigidizării excesive și prezenței hidrogenului. Se extind spre cusătura /M.B. până tensiunile sunt anulate.

Fisurile longitudinale sunt dispuse perpendiculare pe suprafața cusăturii, în planul axial al acesteia

- la suprafața : sunt discontinue, de obicei apar prin fisurare la cald în prezența tensiunii reziduale

- la rădăcina : este forma cea mai frecventă, se dezvoltă datorită dimensiunilor mici ale răndului de rădăcina (racire foarte rapidă). La sudarea multistrat trebuie obligatoriu corectate, deoarece la trecerile ulterioare se vor propaga în cusătura.

Fisurile sub cusătura sunt fisuri ce se dezvoltă ca cele transversale din M.B. dar orientarea lor este paralelă cu criteriul ZIT.

Fisurile în crater sunt înrudite cu fisurile longitudinale de suprafața. Se formează când la închiderea răndului nu se reușește umplerea corectă a craterului. În acest fel răcirea marginilor este foarte rapidă și este posibilă apariția fisurilor. În general sunt fisuri grupate sub formă de rozetă. Fisurile cu orientarea longitudinală se pot dezvoltă la trecerile ulterioare.

Pori

Porii sunt discontinuități de tip cavitate formați prin acumularea gazelor pe durata procesului de solidificare. Porii pot fi distribuiți uniform sau preferențial în cusătura, prezența lor fiind cel mai ales în zona superioară, pe suprafața sau sub suprafața cusăturii. Este important de amintit că anumite surse din literatură îi asociază defectelor tehnologice, deși au un mecanism specific de apariție.

Ca formă sunt cel mai frecvent sferici dar și sub formă de lacrimă. În fig 2.6. sunt prezentate variante de dispunere a porilor.

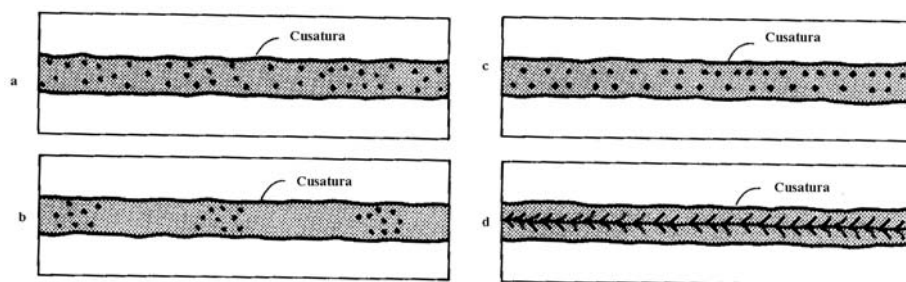


Fig. % Forme de amplasare a porozității: a. porozitate uniform distribuită; b. porozitate grupată; c. porozitate dispusă liniar; 4. porozitate alungită, continuă.

Incluziuni de zgură

Incluziunile de zgura sunt particule nemetalice prinse in cusatura, sau intre M.B. si cusatura sau intre straturi la sudarea multistrat. In functie de amplasarea in cusatura sunt incluziuni la suprafata sau la radacina. Amplasarea obisnuita a incluziunilor este prezentată in fig....

In functie de amplasarea incluziunilor in raport cu cristalele cusaturii exista.

Compozitia chimica a incluziunilor depinde de sursa de impurificare. Dimensiunea incluziunilor este dependenta de compozitia chimica :

- incluziunile acide sunt mici ;
- incluziunile bazice sunt relativ mari

Numarul si dimensiunea incluziunilor, pentru compozitii chimice identice (metal / zgura date) depind de :

- tendinta spre coagulare a particulelor de zgura ;
- viteza de decantare a incluziunilor (viteza ascensionala)

$$v = \frac{A \cdot r^2 \cdot (\gamma_1 - \gamma_2)}{\eta}$$

A – constanta

r - raza incluziunii (sfera asimilata)

γ_1 , γ_2 - greutatea specifica metal / zgura

η – viscozitatea metal

Situatia favorabila, viteza mare de decantare, corespunde unei particule mari, unei diferente de densitate cat mai mari si viscozitati cat mai mici.

Separarea incluziunilor este influentata de curentii din baie, de efectul de transport al gazelor ce se degaja. Efectul incluziunilor asupra caracteristicilor mecanice depinde de forma si dimensiunile acesteia.

Incluziunile mari, ascutite, actioneaza asemanator unui concentrator de tensiuni, afectand rezistenta la oboseala.

Incluziunile mici (< 5 μm) nu influenteaza majoritatea caracteristicilor mecanice, cu exceptia rezilientei.

Incluziunile fin disperse si stabile pot influenta pozitiv granulatia.

Indiferent de forma/dimensiuni, rezistenta la coroziune este afectata de prezenta incluziunilor.