

BODEA MARIUS



SUDURA

**ȘI
PROCEDEE CONEXE**

EDITURA UTCLUJ
ISBN 978-606-737-143-7

Page 1 / 1

UNIVERSITATEA TEHNICĂ CLUJ
FACULTATEA DE INGINERIA MATERIALELOR ȘI A MEDIULUI

BODEA MARIUS

SUDARE ȘI PROCEDEE CONEXE

**EDITURA UTPRESS
CLUJ-NAPOCA
2016**

PREFAȚĂ

Această carte se adresează în primul rând studenților de la Facultatea de Ingineria Materialelor și a Mediului, deoarece disciplina Sudare și Procedee Conexe face parte din programul de învățământ ciclul de licență a acestora, dar poate fi utilă și studenților de la alte facultăți care doresc să cunoască mai multe despre sudarea materialelor și a tehnologiilor de sudare. Deasemenea, în programele de masterat derulate de către Facultatea de Ingineria Materialelor și a Mediului, se regăsesc discipline din domeniul ingineriei sudării, fapt pentru care cartea de față sper că se va dovedi utilă.

Formarea viitorilor ingineri cu profil mecanic trebuie să asigure o multitudine de competențe care se bazează în principiu pe înțelegerea la un nivel avansat a informațiilor tehnice acumulate în anii studenției. Pornind de la această idee, mi-am propus să prezint informațiile necesare într-un mod succint și totodată la un nivel ridicat de complexitate, care să ofere toate condițiile pentru a asigura o pregătire superioară, la nivel european a absolvenților noștri. În acest scop, o serie de termeni de specialitate sunt prezentați în limba engleză, așa cum se utilizează în standardele RO EN sau ISO, din domeniul sudării.

Cu scopul de a ușura lectura și de a o face plăcută cititorului, aspect important de altfel, pentru a ne asigura că acesta o va lectura până la capăt, gradul de complexitate al informațiilor prezentate va crește treptat, încercând să satisfacă și pretențiile cititorilor care poate dețin cunoștințe mai avansate în domeniul sudării și care prin oarecare împrejurări, au ajuns să citească această carte.

În ultimul timp, companiile private din N-V Transilvaniei manifestă un interes tot mai ridicat față de tehnologiile de sudare și procedeele conexe sudării, căutând să recruteze tineri absolvenți cu competențe în aceste tehnologii de procesare. Acest curs, cred ca se va dovedi foarte util, atât acestor absolvenți, cât și inginerilor de profil mecanic, care se confruntă cu diverse probleme legate de sudarea materialelor.

Rezolvarea acestor probleme începe cu identificarea factorilor și a proceselor fizico-chimice care intervin în procesul de sudare și care determină în final microstructura și caracteristicile mecanice de rezistență ale îmbinărilor sudate. Odată identificată sursa problemelor, soluția va deveni simplă, elegantă și de cele mai multe ori, suficient de eficientă pentru aplicația dvs.

Nu în ultimul rând, doresc să mulțumesc colegilor de departament, Prof.dr.ing. Liviu Brândușan și Conf.dr.ing. Radu Mureșan, pentru sugestiile și observațiile făcute în urma recenziei acestei cărți, contribuind astfel, la creșterea calității acestui suport de curs.

*Ș.L.dr.ing.IWE Bodea Marius
Cluj-Napoca, 2016*

1. SUDAREA MATERIALELOR ÎN SEC. XXI

1.1 Impactul sudării materialelor asupra economiei

Țările cu economii puternic dezvoltate își pun amprenta asupra economiei globale și încearcă să-și consolideze poziția pe o piață foarte dinamică și puternic concurențială. Acest deziderat se poate realiza doar investind permanent în cercetare și printr-o eficientizare a producției industriale, care deține ponderea majoritară din venitul brut al țării. Un rol important în această competiție este și formarea specialiștilor, care să contribuie direct la creșterea calității produselor, în condiții de eficiență economică. Astfel, rezultă importanța evaluării contribuției economice și impactul asupra productivității sudării materialelor, în ramurile industriale unde sudarea reprezintă un element cheie în procesul de fabricație. Dacă mai există un scepticism asupra acestui lucru, putem menționa că la nivelul SUA, bunurile industriale de folosință îndelungată în care sudarea este o componentă critică în procesul de fabricație, aceste bunuri reprezintă 90% din totalul bunurilor industriale realizate¹. Conform aceluiași raport, ramurile industriale în care sudarea materialelor reprezintă un element cheie în procesul de fabricație, reprezintă 59% din totalul producției industriale [1].

Importanța calificării specialiștilor în domeniul sudării materialelor rezultă din costurile asociate cu operațiile de sudare, în care **manopera** reprezintă segmentul cel mai mare de cheltuieli. Peste 70% din totalul cheltuielilor de sudare este deținut de cheltuielile de manoperă. În acest context este ușor de înțeles că aceste domenii industriale dominate de tehnologiile de sudare, dețin o contribuție majoră asupra produsului intern brut (PIB) al țărilor dezvoltate industrial și sunt sectoare strategice care asigură o balanță comercială pozitivă. Este evident interesul acordat îmbunătățirii competitivității globale a acestor industrii cu impact major asupra economiei, acest lucru realizându-se în principal prin creșterea performanței și profitabilității companiilor, care se bazează pe tehnologiile de sudare.

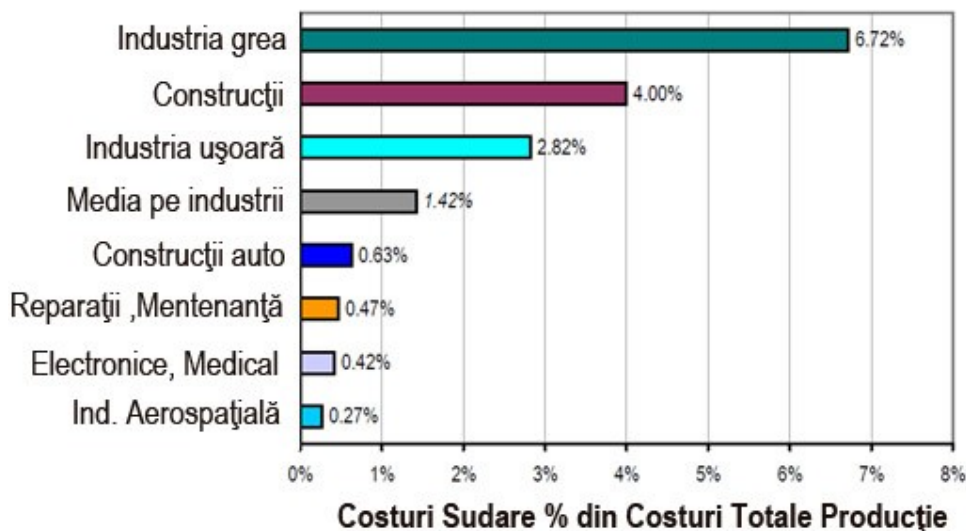


Fig.1.1 Ponderea costurilor de sudare din totalul costurilor de producție [1].

¹ Welding-Related Expenditures, Investments, and Productivity Measurement in U.S. Manufacturing, Construction, and Mining Industries, 2002.

În figura 1.1 este ilustrată ponderea cheltuielilor de sudare din totalul costurilor de producție, care includ costuri de material adaos și auxiliare, manoperă, proiectare, energie etc. Reținem ponderea ridicată a costurilor aferente sudării materialelor în industria grea, în mare parte, acest lucru datorându-se volumului ridicat al operațiilor de sudare, din totalul operațiilor de procesare din programul de fabricație. Industria grea ocupă poziția de leader în acest clasament, urmată de industria construcțiilor și cea ușoară. Ultima poziție din clasament este deținută de industria aeronautică și s-ar putea interpreta greșit că în acest sector, volumul operațiilor de sudare este redus. Ponderea redusă a cheltuielilor de sudare din prețul total al aeronavei se poate explica cel puțin prin două argumente ușor de înțeles: pe de o parte materialele utilizate în această industrie sunt foarte scumpe, aliaje avansate cu greutate specifică redusă, iar pe de altă parte operațiile de sudare se realizează pe echipamente automatizate de mare productivitate. Nu în ultimul rând, dotarea cu numeroase echipamente de măsură și control, echipamente computerizate și de comunicație a aeronavelor, face ca costul unui avion să depășească cu mult costul unui excavator de pildă, deși ponderea operațiilor de sudare să fie majoritară în cazul aeronavei.

Acest exemplu ilustrează că evaluarea impactului economic al tehnologiilor de sudare este o problemă complicată, iar de multe ori această evaluare poate fi înțeleasă mai bine, atunci când îmbinarea sudată cedează în timpul exploatării și conduce la pagube economice și sociale majore sau chiar la catastrofe ecologice, greu de cuantificat în termeni economici. Un exemplu în acest sens, pot fi platformele marine de exploatare a petrolului sau a gazelor naturale, tancurile petroliere, rafinării sau alte unități industriale din industria petro-chimică. Există numeroase cazuri în care datorită fisurării a unei îmbinări sudate, (vezi figura 1.2 și 1.3) s-au produs adevărate catastrofe, în care pe lângă pierderile materiale s-au înregistrat și pierderi de vieți omenești. Pagubele materiale se ridică la sute de milioane de dolari, fără să mai cuantificăm prejudiciile aduse mediului prin poluare sau indirect altor activități economice, precum turismul, pescuitul sau altele.



Fig.1.2 Explozie într-o rafinărie în SUA, datorită unei fisuri în ZIT în cusătura sudată la o conductă dintr-un recipient de alchilare, datorită conținutului ridicat de hidrogen dizolvat în cusătură.



Fig.1.3 Prăbușirea unei platforme marine de exploatare a petrolului ce aparține companiei BP: Thunder Horse Platform, 2005.

Construcțiile sudate funcționează adeseori în condiții de temperaturi extreme, presiuni ridicate, sunt expuse la acțiunea agenților corozivi care atacă chimic structura metalică, foarte frecvent în zona îmbinării sudate. Această zonă se caracterizează prin modificări structurale și chimice, datorită procedurii de sudare și prezintă astfel, o rezistență locală mai scăzută la corозиune. Aceste condiții se pot suprapune cu acțiunea unor fenomene naturale, furtuni, vânturi extrem de puternice sau cutremure. Înțelegem acum importanța asigurării calității îmbinărilor sudate, a controalelor nedistructive și a mentenanței construcției sudate, pe toată durata sa de exploatare. Despre aceste lucruri, ne vom ocupa însă în capitolele următoare.

1.2 Scurt istoric al dezvoltării procedeelor de sudare

Ultimele două secole au marcat o serie de descoperiri științifice, care au influențat profund societatea umană și au creat premisele dezvoltării unei ere tehnologizate, bazate pe producția de masă. Inventarea sudării și perfecționarea procedeelor de sudare a contribuit substanțial la atingerea nivelului tehnologic din prezent și rămâne o componentă esențială, pentru dezvoltarea tehnologică viitoare.

Companiile care în procesul de fabricație utilizează pe scară largă procedee de sudare au o pondere însemnată în economia țărilor dezvoltate și reprezintă elemente de securitate națională. Megastructurile realizate până în prezent: zgârie-norii, podurile gigant cu lungimi și deschideri impresionante, tunelurile subacvatice, platformele petroliere și navele maritime, trenurile de mare viteză, aeronavele sau navele spațiale etc. nu ar putea să existe astăzi, fără contribuția sudurii. Dintre evenimentele și personalitățile istorice care au marcat progresele importante din domeniul sudării, amintim:

- 1800 Realizarea arcului electric între doi electrozi de carbon, Sir Humphry Davy;
- 1836 Descoperirea acetilenei de către Edmund Davy of England;
- 1881 Sudarea plăcilor de Pb pentru acumulatori utilizând arcul electric ca și sursă termică, Auguste De Meritens;
- 1885 Brevetarea procedurii de sudare cu electrozi de carbon, Nikolai Bernados și Stanislaus Olszewski in Anglia și în 1887 în America;
- 1890 Brevetarea procedurii de sudare cu electrod metalic, Coffin și N.G. Slavianoff;
- 1885 Brevetarea sudării prin presiune și rezistență electrică, Elihu Thompson;
- 1903 Inventarea sudării cu termit a șinelor de cale ferată, Goldschmidt;
- 1907 Inventarea electrodului învelit, Oscar Kjellberg din Suedia;
- 1919 Descoperirea curentului alternativ C.J. Holslag;
- 1920 Introducerea sudării automatizate, P.O. Nobel;
- 1920 Cercetări pentru protejarea arcului și a băii metalice cu gaze de protecție, Langmuir și Alexander;
- 1926 Brevetarea procedurii de sudare cu arc electric cu electrod de W în atmosferă controlată, H.M. Hobart și P.K. Devers;
- 1920 Perfecționarea tehnologiei de sudare cu arc electric, elaborarea de electrozi înveliți prin extrudare, Langstroth și Wunder;
- 1930 Brevetarea procedurii de sudare sub strat de flux, Robinoff (Unionmelt®);
- 1941 Brevetarea procedurii Heliarc®, precursor al procedurii WIG pentru sudarea Al, Mg și oțelurilor inoxidabile, R. Meredith. Ulterior s-a acordat licența în favoarea Linde Air Products, care a inventat pistoletele răcite cu apă;
- 1953 Sudarea în mediu CO₂, Lyubavskii și Novoshilov;
- 1957 Brevetarea arcului de plasmă în sudare, Robert F. Gage;
- 1957 Dezvoltarea sudării cu fascicul de electroni, J.A. Stohr;
- 1958 Prezentarea sudării în baie de zgură la Târgul Internațional de la Bruxelles de către Uniunea Sovietică;
- 1958 Dezvoltarea procedurii de sudare MIG/MAG, perfecționarea mecanismelor de transfer: short-arc, spray-arc;
- 1965 Dezvoltarea procedurii de sudare WIG, Ucraina;
- 1970 Dezvoltarea procedurii de sudare în stare solidă prin frecare, Uniunea Sovietică
- 1980 Sudarea cu laser.

În prezent, companiile care produc echipamente și consumabile pentru sudare depun eforturi considerabile pentru creșterea performanței echipamentelor de sudare, prin modernizarea surselor de curent, combinarea mai multor procedee de sudare într-unul hibrid, creșterea gradului de mecanizare, automatizare etc.

1.3 Aplicații ale sudării materialelor pentru principalele sectoare industriale

Sunt poate importante de subliniat o serie de aplicații, în care sudarea materialelor reprezintă o operație critică în procesul de fabricație. Evident, nu vom putea enumera toate aceste aplicații, însă ne putem forma o idee asupra rolului deținut de procedeele de sudare în fabricația acestor produse, aspecte prezentate în tabelul 1.1 și figura 1.4.

Tab. 1.1. Sectoarele industriale și aplicațiile specifice în care sudarea materialelor reprezintă un element cheie în procesul de fabricație.

Sectorul industrial	Aplicații specifice
Construcții auto	Toate categoriile de vehicule. Autoturisme, camioane, buldozere, motocicletele, biciclete etc. Fabricația componentelor, întreținerea sistemelor de evacuare gaze, reparații etc.
Aeronautică/ Aerospațială	Fabricația aeronavelor, a componentelor acestora, rachete spațiale, stații orbitale, aeronave militare, tehnică de luptă etc.
Electronice/Medicală	Fabricarea componentelor electronice ¹ , a echipamentelor electronice, de comunicații, instrumente medicale și echipamente medicale.
Industria ușoară	Echipamente de grădinarit, scule industriale, sisteme de încălzire, ventilație, echipamente pneumatice, hidraulice, fitinguri și vane, țevi și tuburi, aparate electrocasnice, produse artisanale etc.
Industria grea	Construcția echipamentelor de minerit, echipamente agricole, construcția și reparația navelor maritime, șinelor de cale ferată, vehicule militare blindate, turbine și motoare de capacitate mare, echipamente de transmisie, cazane și schimbătoare de căldură industriale, recipiente și rezervoare, echipamente pentru industria extractivă a petrolului și gazelor etc.
Construcții civile	Clădiri și hale industriale, clădiri civile și birouri, construcția podurilor și tunelurilor, conducte și magistrale pentru gaz, petrol, infrastructura industrială, șarpante, grilaje metalice, poduri rulante, operații de reparații și întreținere a acestor construcții.
Reparații capitale și mentenanță	Pentru toate tipurile de sectoare industriale, recondiționarea componentelor uzate, placarea cu straturi speciale, industriile extractive, chimice, sectorul energetic, nuclear și de transporturi mentenanța tuturor echipamentelor de producție, ridicat etc.

¹ lipire, brazare, sudare cu ultrasunete



Fig. 1.4 Aspecte de pe șantierul naval de la Tulcea.

1.4 Avantaje și dezavantaje la sudarea materialelor

Proiectarea unei tehnologii de fabricație în condiții de competitivitate economică, necesită o bună cunoaștere a materialelor, a proprietăților lor și a posibilităților acestora de a putea fi procesate în condiții de eficiență economică, asigurând toți parametrii de calitate și siguranță. Realizarea de construcții sudate prezintă o serie de avantaje și dezavantaje, care trebuie evaluate pentru fiecare aplicație în parte.

Selectarea materialelor, a unui anumit procedeu de sudare în procesul de fabricație, trebuie să țină seama de avantajele\dezavantajele pe care acestea le implică. Pentru tehnologiile de sudare în general, sunt enumerate mai jos:

Avantaje:

- Reducerea consumului de metal (30-50%);
- Creșterea productivității (2-20 ori);
- Obținerea unor proprietăți mecanice superioare față de piesele turnate sau nituite;
- Realizarea unor structuri de complexitate practic nelimitată;
- Realizarea unor forme raționale adaptate solicitărilor mecanice;
- Se obțin îmbinări etanșe;
- Se utilizează semifabricate și elemente tipizate pentru realizarea construcțiilor sudate;
- Posibilitate de mecanizare, automatizare, robotizare;
- Utilizarea unor echipamente relativ ieftine pentru procedeele uzuale de sudare;
- Reducerea prețului de cost;
- Flexibilitate și mobilitate ridicată;
- Poluare redusă și consumuri energetice reduse;
- Lucrul în condiții deosebit de dificile: în spațiu, în apă la adâncime.

Dezavantaje:

- Pot să apară defecte greu identificabile;
- Generează tensiuni și deformații după sudare;
- Modificarea locală a proprietăților metalului de bază, a caracteristicilor de rezistență mecanică, rezistență la coroziune etc ;
- Calitatea construcțiilor sudate depinde de calificarea și conștiinciozitatea personalului de proiectare și execuție.

2. DEFINIȚII ȘI NOȚIUNI DE BAZĂ UTILIZATE LA SUDARE

Inginerul și personalul sudor trebuie să folosească un vocabular de specialitate, când fac referire la sudarea materialelor și a procedeelelor conexe sudării. Această condiție este absolut necesară pentru a putea comunica într-un cadru tehnic, în care informațiile trebuie să se transmită într-o manieră precisă, corectă și într-un mod eficient, dat fiind faptul că parametrii care afectează direct calitatea îmbinărilor sudate, sunt foarte numeroși.



Îmbinarea sudată reprezintă legătura metalică **nedemontabilă**, între două sau mai multe elemente metalice, realizată printr-un procedeu de sudare și care prezintă rezistență mecanică și siguranță în exploatare.

Rezultă în mod evident că proprietățile îmbinărilor sudate, depind esențial de **procesele fizico-chimice** care intervin la formarea legăturii metalice. Fenomenele metalurgice, influența elementelor chimice și a impurităților, transformările de faze și segregăția chimică, joacă un rol cheie pentru controlul proprietăților de rezistență ale îmbinărilor sudate. Înțelegem acum de ce diagramele de echilibru, de transformare temperatură timp (TTT) și la răcire continuă (CCT), atât de îndrăgite de către studenți, sunt extrem de importante pentru înțelegerea și controlul acestor procese.

În cele ce urmează, vom defini principalele elemente de vocabular cu care se va opera de acum înainte pe tot parcursul acestei cărți, urmând ca anumite elemente specifice unor procedee de sudare, să fie definite în capitolul în care sunt tratate.

- **Cusătura sudată** - este zona din îmbinarea sudată, care rezultă prin cristalizarea băii de sudură. Este delimitată de restul materialului prin liniile de topire și asigură legătura de rezistență dintre piesele îmbinate ;
- **Materialul de bază** - reprezintă partea metalică a elementelor care se îmbină prin sudare și care nu este afectată de modificări structurale și chimice datorită sudurii ;
- **Material adaos** - metalul sau aliajul sub formă de sârmă, vergea cu sau fără înveliș, bară sau pulberi, care se topește și completează baia de sudură. În general, este de aceeași calitate ca și materialul de bază ;
- **Rostul de sudare** – spațiul geometric lăsat liber între elementele metalice care se îmbină prin sudare, pentru a asigura pătrunderea cusăturii sudate, pe întreaga grosime a materialului;
- **Baia de sudură** – este topitura metalică formată prin topirea suprafețelor rostului de sudare din metalul de bază și eventual a materialului adaos ;
- **Metalul depus** – fracția din materialul adaos, care participă efectiv la formarea cusăturii sudate, o parte din materialul adaos trece în zgură, o parte se pierde prin stropire și o mică cantitate de metal se pierde prin vaporizare ;
- **Zgura** – strat de oxizi care se formează la sudarea prin topire, datorită proceselor de dezoxidare a băii de sudură și care datorită greutateii specifice mai reduse, se dispune deasupra băii de sudare, având un rol de protecție chimică și termică ;
- **Pătrunderea sudurii** – profunzimea de pătrundere a cusăturii sudate în metalul de bază. Depinde de procedeu de sudare și viteza de sudare ;
- **Linia de topire** – linia de delimitare dintre cusătura sudată și elementele îmbinate ;
- **Rădăcina cusăturii** – primul rând de sudură depus sau zona inferioară a cusăturii sudate, la sudarea dintr-o singură trecere ;
- **Suprafața cusăturii** – suprafața superioară vizibilă a cusăturii sudate ;
- **Zona influențată chimic** – zona de trecere între cusătura sudată și metalul de bază, în care s-au produs modificări ale compoziției chimice, datorate procesului de sudare ;

- **Zona influențată termic** – (ZIT) zona adiacentă zonei influențate chimic sau liniei de topire care a fost afectată de modificări structurale ;
- **Viteza de sudare** - (cm/min) parametru tehnologic, care caracterizează viteza cu care se realizează cusătura sudată sau stratul de sudare la sudarea multistrat ;
- **Stare de tensiuni** - datorită ciclului termic de încălzire-răcire care se derulează pe parcursul proceselor de sudare, în cusătura sudată și ZIT iau naștere tensiuni interne, care sunt responsabile de deformațiile post-sudare sau chiar de apariția unor defecte de sudare, precum fisurile ;
- **Segregație chimică** - în baia de sudare, dar și în ZIT pot apărea o serie de procese fizico-chimice, difuzia, evaporări de material, însă separarea unor elemente chimice, preferențial la limita de grăunți cristalini, a impurităților precum S, P, B poate deveni extrem de dăunătoare pentru îmbinarea sudată. Acest proces este favorizat de temperaturile foarte ridicate din baia de sudare și zona de material adiacentă ;
- **Diluție** - fenomen care apare când calitatea materialului de bază este diferită de cea a materialului adaos. Acestea participă în proporții diferite la realizarea cusăturii sudate, compoziția chimică a materialului din zona cusăturii sudate, având o compoziție chimică intermediară, raportat la materialul de bază și adaos ;
- **Sursă termică** - pentru realizarea legăturii metalice de rezistență între piesele îmbinate prin sudare este necesar introducerea de energie în zona îmbinării, care să aducă atomii de material în contact la distanțe atomice ;
- **Grosimea s** – reprezintă grosimea îmbinării sudate măsurată în axa cusăturii sudate, din secțiunea transversală a cusăturii ;
- **Supraînălțarea s'** – supraînălțarea cusăturii sudate măsurată în raport cu metalul de bază ;
- **Lățimea cusăturii** – lățimea cusăturii măsurată perpendicular pe direcția de sudare ;
- **Lungimea cusăturii** – lungimea măsurată la suprafața cusăturii în direcția de sudare ;
- **Unghiul cusăturii α_c** – unghiul măsurat între liniile de topire a cusăturii sudate.

Elementele componente ale unei îmbinări sudate sunt prezentate în figura 2.1, unde cusătura sudată este alcătuită din materialul de bază și materialul adaos. La procedeele de sudare prin topire, suprafețele rostului de sudare se topesc împreună cu materialul adaos, formând baia de sudare, care prin cristalizare formează legătura metalică de rezistență.

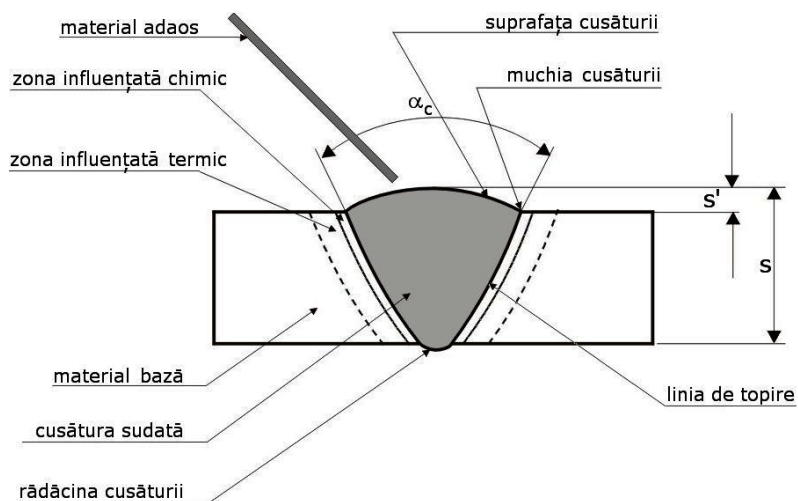


Fig. 2.1. Elementele componente ale unei îmbinări sudate.

Coeficientul de formă reprezintă raportul dintre lățimea și pătrunderea cusăturii sudate. Metalul depus la o singură trecere formează un **rând**, iar rândul sau rândurile situate la același nivel formează un **strat**. Depunerea multistrat este necesară în cazul îmbinărilor sudate cu grosime medie sau mare, când la o singură trecere baia de sudură nu asigură volumul de metal necesar, pentru a umple complet rostul de sudare.

2.1 Clasificarea îmbinărilor sudate

Datorită diversității foarte mari a construcțiilor sudate se impune clasificarea și folosirea unei terminologii specifice în acest domeniu, pentru a facilita comunicarea și schimbul de informații între proiectant, tehnolog și sudor. Clasificarea îmbinărilor sudate este ilustrată în schema prezentată în figura 2.2.

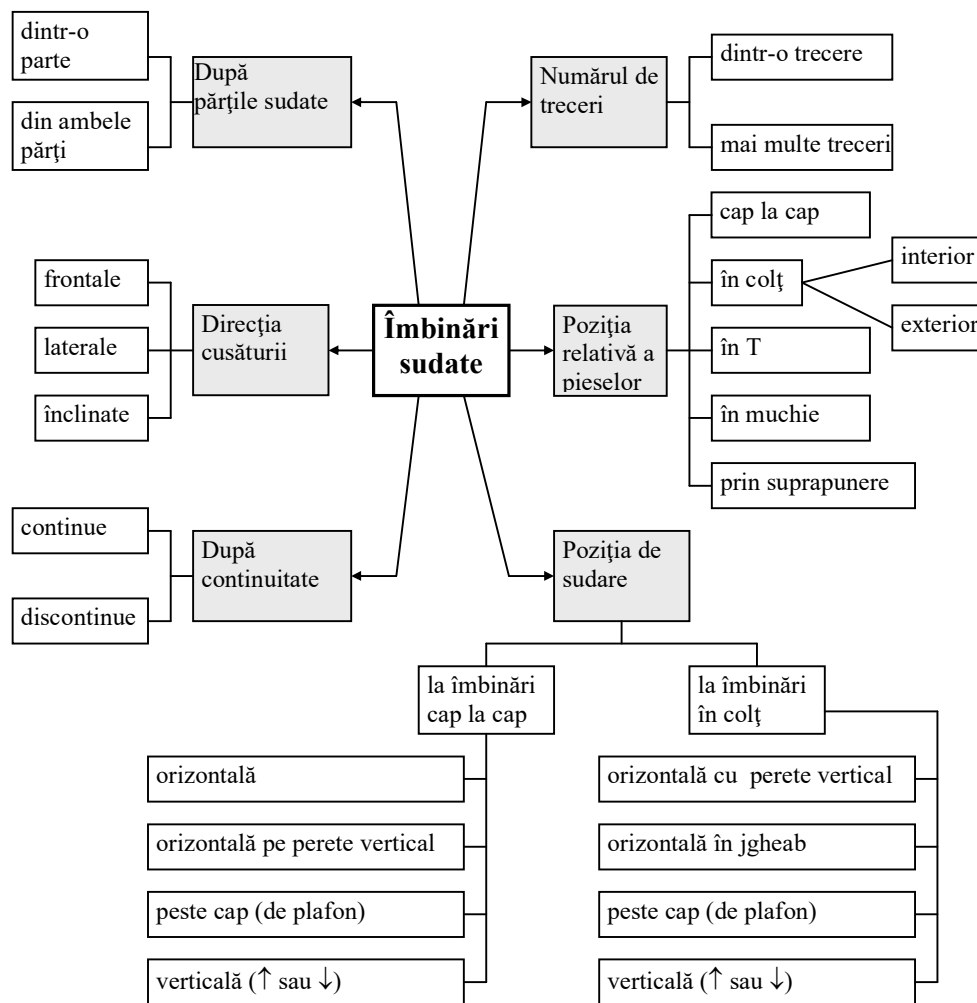


Fig. 2.2. Criterii de clasificare a îmbinărilor sudate.
(↑ sudare ascendentă; ↓ sudare descendentă)

Diversitatea construcțiilor metalice este practic nelimitată, însă orice structură sudată are la bază doar îmbinări sudate care din punct de vedere a poziției relative a pieselor, pot fi reduse la una din situațiile ilustrate în figura 2.3. Alegerea unei variante depinde de calitatea materialului de bază, grosimea lui, procedeul de sudare, precum și de condițiile de rezistență mecanică pe care trebuie să le satisfacă îmbinarea sudată.

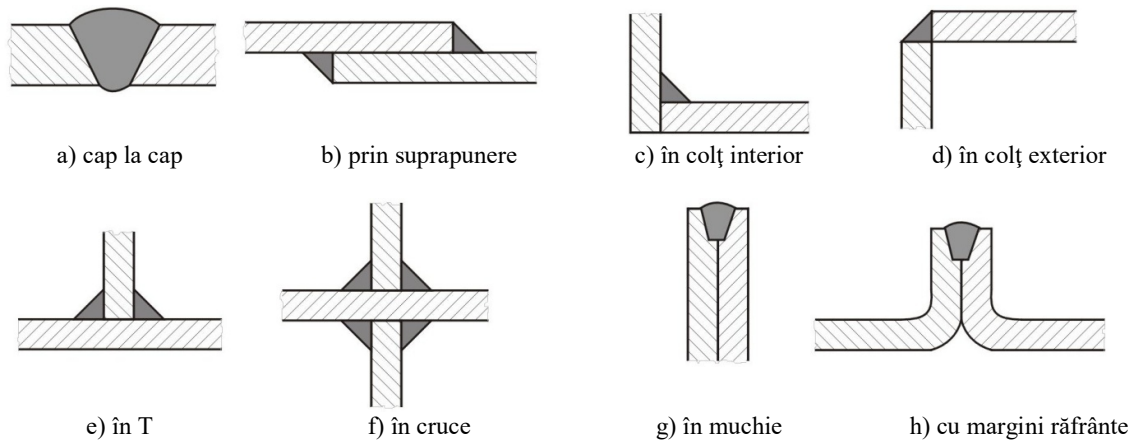


Fig. 2.3. Clasificarea îmbinărilor sudate după poziția relativă a pieselor.

În anumite situații particulare când se impune realizarea unor îmbinări sudate cu suprafața netedă, îmbinările sudate cap la cap sunt preferate celor de colț, datorită faptului că sunt mult mai ușor de prelucrat mecanic după sudare (de ex. la placarea unor recipienti cu bachelită). Suprafețele metalice netede, cu raze mai mari de racordare sunt mult mai favorabile acestui scop, figura 2.4.

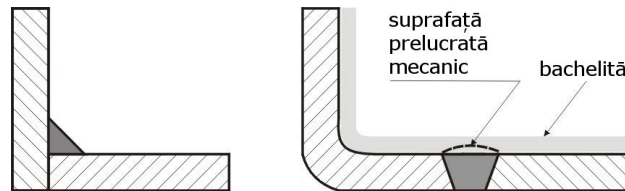


Fig. 2.4. Evitarea unor îmbinări de colț în favoarea îmbinărilor sudate cap la cap.

Îmbinările sudate în muchie sau cu margini răfrânte au proprietăți mai reduse de rezistență mecanică, prin urmare se vor putea utiliza doar în situațiile când elementele acestora nu sunt supuse unor sarcini mari de solicitare. Pentru a facilita pătrunderea sudurii, la aceste tipuri de îmbinări se pot prevedea rosturi în formă de I, V, Y sau U.

Îmbinările sudate cap la cap sunt frecvent folosite pentru realizarea vaselor de presiune, cazane, recipienti, țevi, învelitori plane etc. Realizarea lor necesită o atenție mai mare în raport cu alte tipuri de îmbinări, dar dacă sunt bine efectuate, prezintă o rezistență mecanică foarte bună. Pregătirea rosturilor de sudare în vederea asigurării dimensiunii și pătrunderii necesare a cusăturii sudate, poate să conducă la costuri suplimentare. Deformațiile post-sudare și tensiunile interne acumulate în cusătură și materialul de bază, pot ridica unele probleme de siguranță în exploatarea construcției sudate, dar efectul acestora poate fi redus printr-un tratament termic de detensionare.

În anumite situații la sudarea unor piese de grosime ridicată este necesară susținerea băii de sudură la rădăcina cusăturii, printr-una din variantele de mai jos:

- Utilizarea unui suport din cupru sau ceramic ;
- Utilizarea unei perne de flux, figura 2.5 ;
- Utilizarea unei folii adezive din aluminiu armată cu fibră de sticlă ;
- Utilizarea unui suport fuzibil din platbandă care poate rămâne în îmbinare sau este îndepărtat ulterior prin polizare;

- În cazul sudării cap la cap a țevilor se poate folosi un inel fuzibil, care îndeplinește un rol de distanțator, figura 2.6.

În cazul sudării automatizate sau robotizate se poate suda manual un strat de rădăcină pentru susținerea straturilor următoare, uneori fiind necesar prelucrarea mecanică a acestuia din partea opusă, pentru îndepărtarea eventualelor defecte localizate la rădăcina cusăturii.

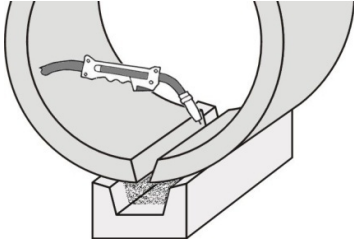


Fig. 2.5. Susținerea băii de sudură cu ajutorul unei perne de flux.

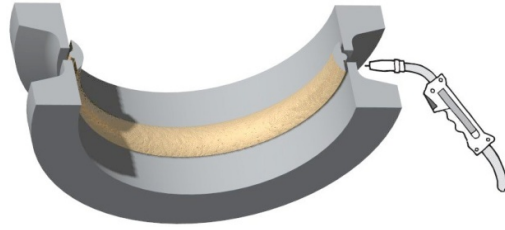


Fig. 2.6. Susținerea băii de sudură cu ajutorul unui inel fuzibil la sudarea țevilor.

Din punct de vedere al direcției cusăturii sudate în raport cu direcția de solicitare a îmbinării, se pot distinge trei situații, așa cum este ilustrat în figura 2.7. În figura 2.8 este prezentată clasificarea îmbinărilor sudate, după continuitatea cusăturii.

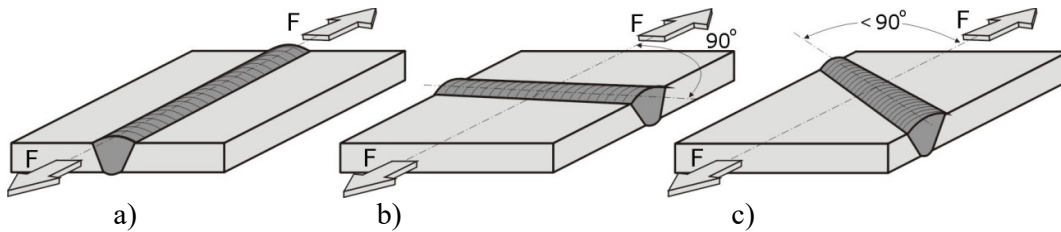


Fig. 2.7. Clasificarea îmbinărilor sudate după direcția de solicitare.
a) cusături laterale, b) cusături frontale c) cusături înclinate.

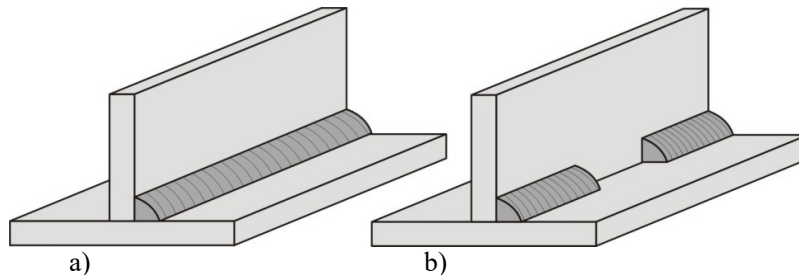


Fig. 2.8. Clasificarea îmbinărilor sudate după continuitatea cusăturii sudate.
a) cusături continue, b) cusături discontinue.

În figura 2.9, respectiv în figura 2.10 sunt ilustrate pozițiile de sudare pentru îmbinările sudate cap la cap, respectiv la cele sudate în colț. Standardul internațional ISO 6947 reglementează pozițiile de sudare, în funcție de orientarea axei mediane a cusăturii, conform figurii 2.11.

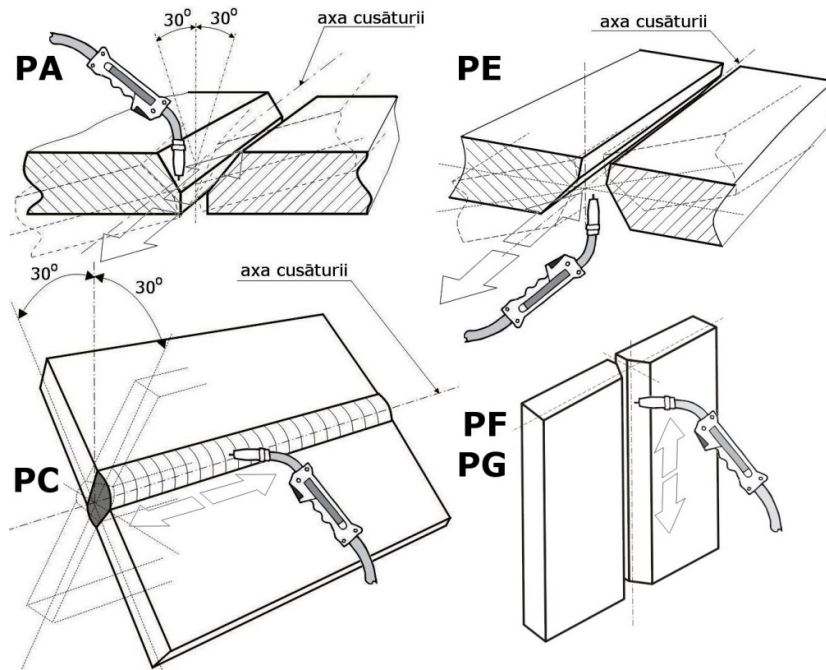


Fig. 2.9. Clasificarea îmbinărilor sudate cap la cap după poziția de sudare.
 PA - orizontală, PC - orizontală pe perete vertical (în cornișe), PE - peste cap (de plafon)
 PF - verticală ascendentă, sau PG - verticală descendentă.

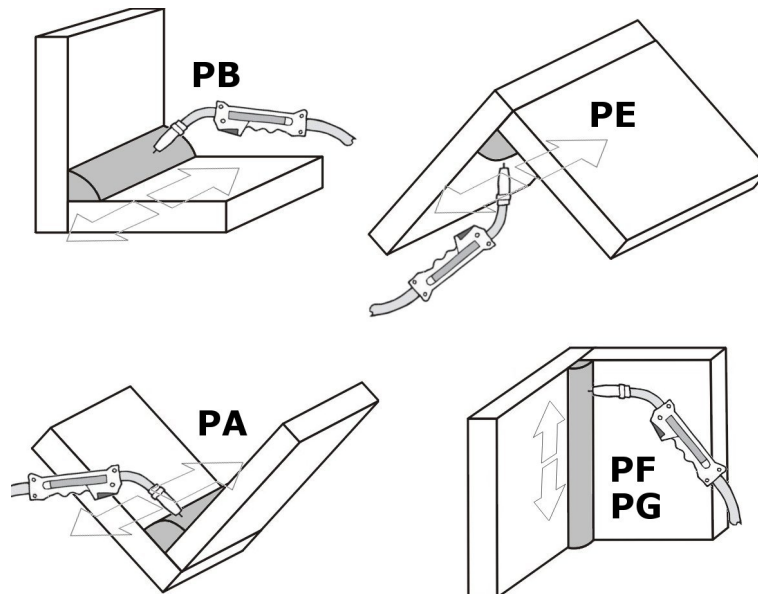


Fig. 2.10. Clasificarea îmbinărilor sudate în colț după poziția de sudare.
 PB - orizontală cu un perete vertical, PA - orizontală în jgheab, PE - peste cap (de plafon)
 PF - verticală ascendentă sau PG - verticală descendentă.

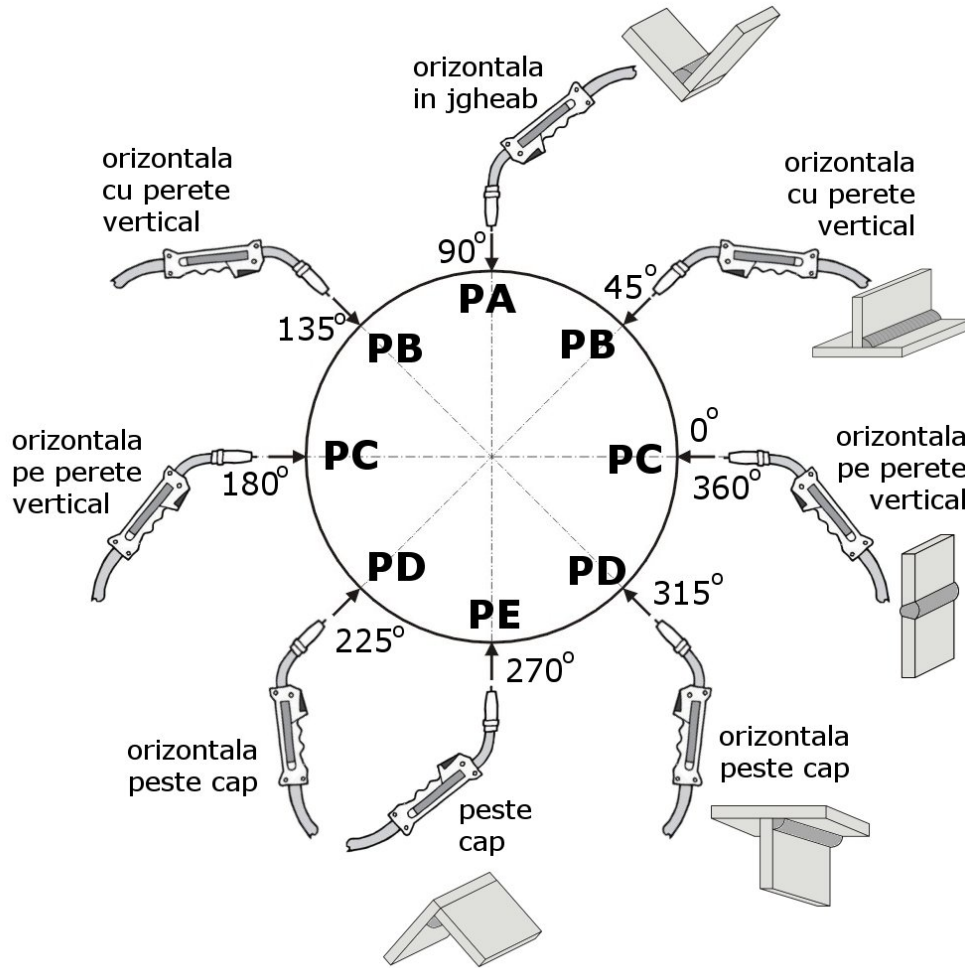


Fig. 2.11. Pozițiile de sudare conform SR-ISO 6947 în funcție de orientarea axei mediane a cusăturii sudate.

Din punct de vedere al ergonomiei de lucru, poziția optimă de sudare este cea orizontală, atât pentru îmbinările sudate cap la cap, cât și pentru cele sudate în colț (orizontală în jgheab). Destul de frecvent însă, acest lucru nu este posibil datorită constrângerilor de acces impuse de construcția sudată, în special la cele cu complexitate ridicată, accesul fiind permis doar din anumite direcții. Când situația o permite, se pot construi diferite dispozitive auxiliare care să aducă elementele îmbinării într-o poziție favorabilă sudării, de preferință cea orizontală.

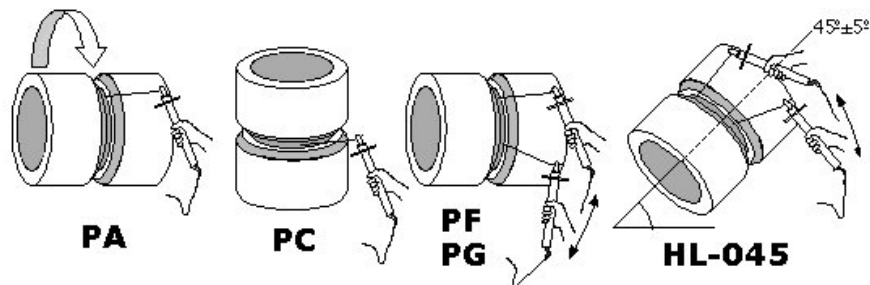


Fig. 2.12. Poziții de sudare la sudarea țevilor sau a virolelor.
 PA - orizontală prin rotirea piesei, PC - orizontală în cornișe, PF - verticală ascendentă,
 PG - verticală descendentă și HL-045- piesă înclinată $45^\circ \pm 5^\circ$ înainte.

2.2 Rostul de sudare



Rostul de sudare este spațiul liber de o anumită formă geometrică, care se lasă între piesele de îmbinat în vederea asigurării pătrunderii sudurii pe toată grosimea metalului de bază.

Forma și dimensiunile rosturilor de sudare depind de o serie de factori, dintre care îi amintim pe cei mai importanți:

- Calitatea și grosimea metalului de bază ;
- Calitatea materialului adaos;
- Poziția relativă a pieselor sudate ;
- Proprietățile de rezistență mecanică impuse îmbinării sudate ;
- Procedeele de sudare;
- Poziția de sudare și accesibilitatea locului de îmbinare.

Elementele rostului de sudare sunt prezentate în figura 2.13. Cotarea dimensiunilor caracteristice, forma și dimensiunile acestora sunt standardizate pentru diferite procedee de sudare, în funcție de calitatea metalului de bază.

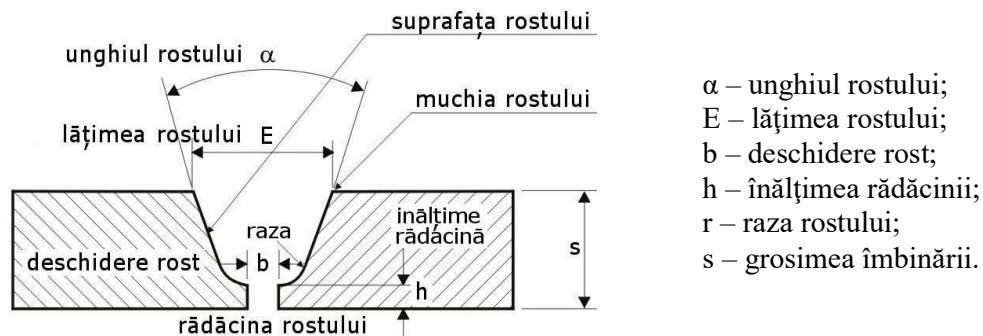


Fig. 2.13 Elementele geometrice ale rostului de sudare.

Clasificarea rosturilor de sudare se poate face în funcție de forma geometrică și de gradul de simetrie a secțiunii transversale, conform figurii 2.14.

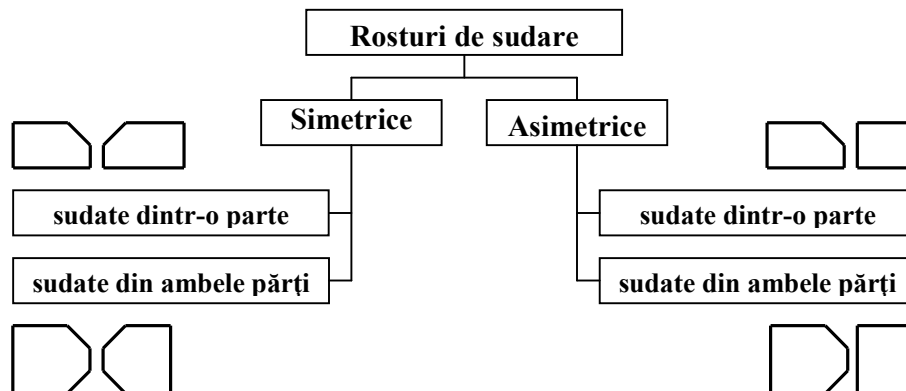


Fig. 2.14. Clasificarea rosturilor de sudare în funcție de gradul de simetrie a secțiunii transversale.

După forma geometrică a secțiunii transversale, rosturile pot fi prelucrate în: **I, V, Y, U, X, 2U** etc. Prelucrarea rosturilor se face prin metode, precum tăierea cu flacără, cu plasmă, arc electric sau laser sau prin metode mecanice de prelucrări prin așchiere, polizare sau forfecare.

2.2.1 Rosturile îmbinărilor sudate cap la cap

Rosturile cu secțiune minimă reprezintă soluția economică de pregătire și realizare a unei îmbinări sudate. Din punct de vedere al distribuției tensiunilor interne și al deformațiilor după sudare, sunt preferate rosturile simetrice.

Tab. 2.1 Rosturile îmbinărilor sudate cap la cap.

Nr	Grosime material s (mm)	Formă rost	2	4	6	8	10	15	20	25	30	35	40	45	50	60		
1.							$b \approx s$											
							$6 \leq b \leq 8$											
			cu suport la rădăcină permanent															
2.		V					$b \leq 4, 40^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$											
							dacă este cazul cu suport la rădăcină permanent											
3.		Y					$1 \leq b \leq 4, \alpha = 60^\circ, 2 \leq h \leq 4$											
							sudură în Y											
4.		U					$1 \leq b \leq 4, 16^\circ \leq \alpha \leq 24^\circ, 2 \leq h \leq 4, r \approx 6$											
							sudură în U											
5.		X					$1 \leq b \leq 3, 40^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$											
							sudură în V pe ambele părți (sudură în X)											
6.		Y					$1 \leq b \leq 4, 40^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$											
							sudură în Y pe ambele părți											
7.		U					$b \leq 3, 16^\circ \leq \alpha \leq 24^\circ$											
							sudură în U pe ambele părți											
8.		1/2 V					$2 \leq b \leq 4, 35^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$											
							sudură în 1/2 V											
9.		1/2 U					$2 \leq b \leq 4, 10^\circ \leq \alpha \leq 20^\circ, r \approx 8$											
							sudură în 1/2 U											
10.		K					$1 \leq b \leq 3, 40^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$											
							sudură în K											
11.		1/2 K					$1 \leq b \leq 3, 40^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$											
							sudură 1/2 U pe ambele părți											

În tabelul 2.1 sunt prezentate cele mai utilizate rosturi de sudare pentru îmbinările sudate cap la cap. Standardul SR EN 29692:1994 reglementează forma și dimensiunile rosturilor la sudarea pieselor din oțel. Îmbinările sudate din ambele părți, precum rosturile în X sau 2U, se realizează din mai multe treceri, la fiecare trecere structura metalică trebuie rotită cu 180° , deoarece astfel se asigură o compensare a deformațiilor și tensiunilor produse în urma sudării. Acest fapt poate necesita realizarea unui dispozitiv de întoarcere, iar operațiile de pregătire necesare în vederea sudării pot diminua productivitatea.

Rosturile asimetrice $\frac{1}{2}V$, $\frac{1}{2}Y$, $\frac{1}{2}U$ sunt utilizate mai rar, în general în cazul unor îmbinări sudate cu acces dificil din punct de vedere al poziției de sudare. Astfel, aceste rosturi pot fi întâlnite la sudarea în poziție orizontală pe perete vertical în poziția PC, rostul drept fiind în poziție inferioară în vederea susținerii băii de sudură. Deoarece doar un element al îmbinării este prelucrat, manopera de pregătire a îmbinării sudate este redusă, pierderea de material de bază prin prelucrarea rostului este redusă, iar consumul de material adaos este micșorat corespunzător.

Față de aceste avantaje trebuie luat în considerare riscul mărit al apariției deformațiilor după sudare, contracția băii de sudură acționează asimetric în raport cu elementele îmbinării, iar pentru a asigura o pătrundere corectă a cusăturii sudate în materialul de bază, este necesar utilizarea unor surse termice de putere ridicată. La îmbinările sudate într-o parte, se recomandă scobirea rădăcinii prin crăițuire, frezare sau polizare și resudarea acesteia. Această operație asigură evitarea unor defecte de sudare localizate la rădăcina cusăturii, ca urmare a lipsei de topire sau pătrundere insuficientă.

2.2.2 Rosturile îmbinărilor sudate în colț

Rosturile îmbinărilor sudate în colț sunt frecvent utilizate la realizarea construcțiilor sudate ce conțin elemente dispuse perpendicular sau cu o abatere de $\pm 15^\circ$ față de aceasta. Pentru a analiza diferitele tipuri de rosturi utilizate la îmbinările sudate în colț este important să definim elementele geometrice ale acestora, care sunt prezentate în figura 2.15.

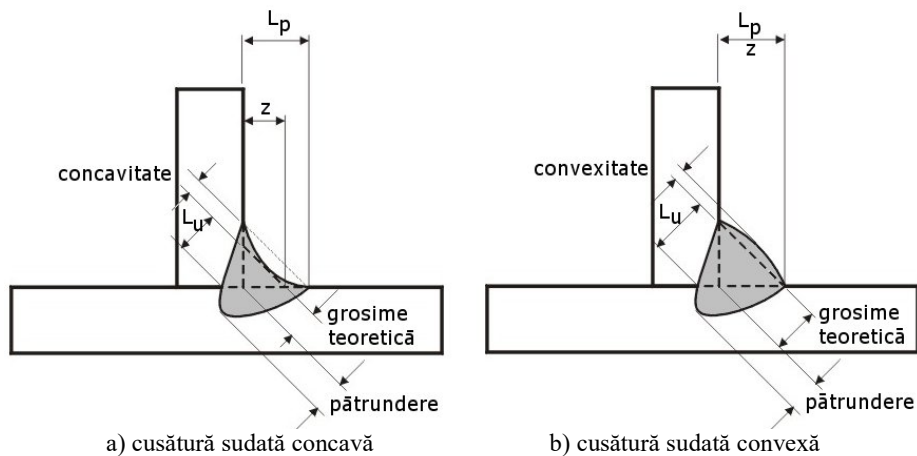


Fig. 2.15. Elementele geometrice ale îmbinărilor sudate în colț.

Mărimea teoretică a cusăturii sudate în colț este definită prin dimensiunea z , ce reprezintă cateta unui triunghi delimitat de muchiile elementelor sudate și înscris în profilul cusăturii. În funcție de tipul suprafeței cusăturii sudate, concave sau convexe, precum și de mărimea pătrunderii cusăturii sudate în metalul de bază, se disting următoarele elemente geometrice ce definesc profilul secțiunii cusăturii în colț, conform figurii 2.15:

- **Grosimea teoretică** a îmbinării sudate – egală cu înălțimea triunghiului înscris în cusătură (Δ). Nu ia în considerare pătrunderea cusăturii în metalul de bază;
- **Concavitățile** sau **convexitățile** suprafeței sudurii – abaterea profilului suprafeței cusăturii în secțiune transversală în raport cu ipotenuza triunghiului Δ ;
- **Pătrunderea cusăturii** - distanța măsurată între rădăcina cusăturii și punctul de convergență al liniilor (curbelor) de topire, situat teoretic pe axa mediană a cusăturii sudate;
- **Grosimea efectivă** (L_u) se măsoară între ipotenuza triunghiului Δ înscris în cusătură și punctul determinat de intersecția liniei de topire a cusăturii cu muchia piesei sudate. Această dimensiune reprezintă un element geometric important a cusăturii sudate, deoarece ia în considerare și pătrunderea cusăturii în materialul de bază.

Convexitatea suprafeței cusăturii sudate în colț este considerată de către mulți ca o ranforsare a îmbinării sudate. Totuși, o convexitate excesivă acționează în mod negativ asupra rezistenței mecanice a îmbinării sudate. Creșterea convexității suprafeței cusăturii, conduce la mărirea periculoasă a tensiunilor interne în zona muchiilor cusăturii și astfel, crește riscul de apariție a fisurilor, deoarece acționează ca și un concentrator de tensiuni.

Mărimea optimă a cusăturii pentru îmbinările sudate în colț, se obține în situația în care dimensiunea L_p este egală cu grosimea metalului de bază. Dacă piesele îmbinate au grosimi diferite, atunci dimensiunea L_p va fi diferită pentru fiecare element în parte și egală cu grosimea lui. Dacă această mărime se dublează, suprafața cusăturii sudate nu se dublează, dar volumul cusăturii sudate crește de trei ori. Prin urmare s-ar produce o risipă de material adaos, ar crește considerabil costurile operației de sudare, iar deformațiilor cauzate de efectul termic ar fi mai pronunțate.

La sudarea în poziție PB cu un perete vertical există riscul producerii unei pătrunderi asimetrice, cu pătrundere mai mare în piesa orizontală, ceea ce conduce la diminuarea rezistenței mecanice a îmbinării sudate. Din acest motiv, este recomandată sudarea în poziție PA orizontală în jgheab.

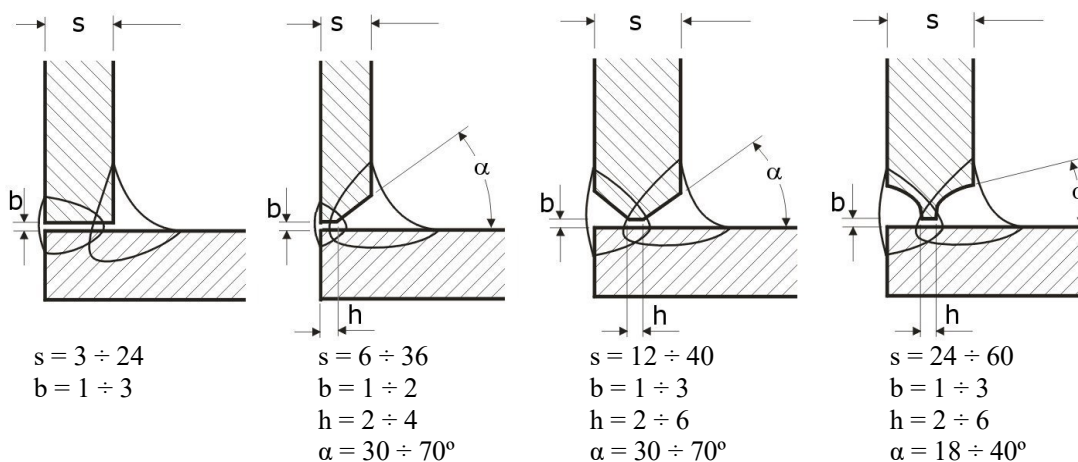


Fig. 2.16. Rosturile îmbinărilor sudate în colț interior (dimensiuni în mm).

Rezistența mecanică a îmbinărilor sudate în colț interior, prezentate în figura 2.16, este relativ scăzută, datorită faptului că piesa aflată în poziție orizontală nu participă pe întreaga grosime la formarea cusăturii sudate. Sunt cuprinse doar straturile superficiale ale materialului, în special la pătrunderi mai mici și apar adeseori defecte de structură și fisuri localizate la rădăcina îmbinării.

Aceste aspecte sunt mai evidente în special la rosturile în colț neteșite și deși sunt cele mai ieftine din punct de vedere al operațiilor de pregătire și sudare, se recomandă evitarea lor, în special pentru îmbinările sudate puternic solicitate. Creșterea grosimii pieselor sudate necesită utilizarea unor rosturi de formă mai complicată, asimetrice, care impun o pregătire a îmbinării mai atentă, recomandându-se realizarea cusăturilor din mai multe treceri.

În figura 2.17 sunt reprezentate mai multe variante de rosturi neprelucrate pentru îmbinările sudate în colț exterior. Spre deosebire de rosturile sudate în colț interior, cusătura sudată cuprinde în anumite situații ambele piese pe întreaga grosime, ceea ce conferă îmbinării sudate o rezistență mecanică superioară. O atenție deosebită trebuie acordată operațiilor de pregătire și poziționare relativă a pieselor sudate, iar la rădăcina cusăturii, baia de sudură trebuie susținută cu suport de cupru sau pernă de flux.

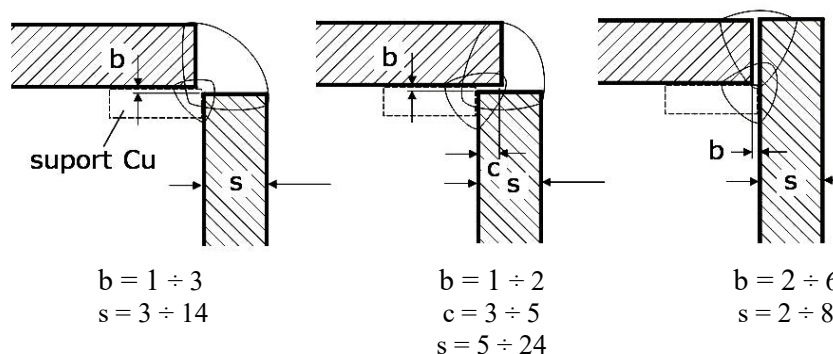


Fig. 2.17. Rosturile neteșite pentru îmbinările sudate în colț exterior (dimensiuni în mm).

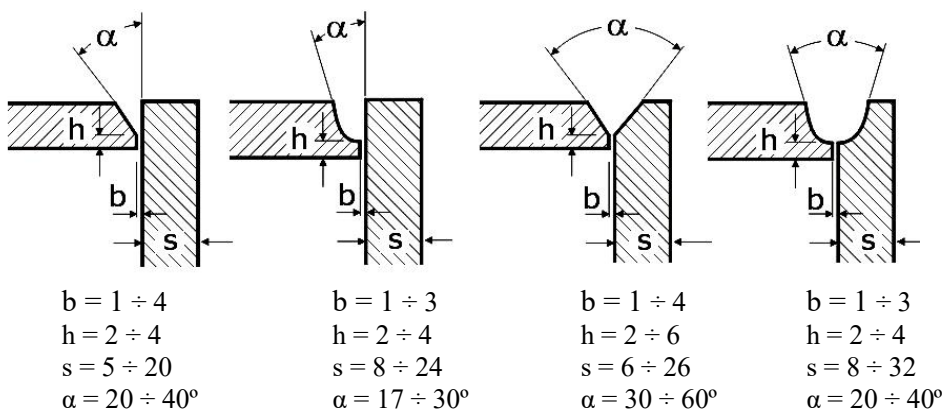


Fig. 2.18. Rosturile prelucrate pentru îmbinările sudate în colț exterior (dimensiuni în mm).

În cazul sudării în colț exterior a pieselor de grosime mai mare, se recomandă utilizarea unor rosturi cu deschidere mai mare, precum rosturile asimetrice $\frac{1}{2}Y$ sau $\frac{1}{2}U$ sau la grosimi și mai mari, a rosturilor simetrice Y sau U , așa cum este ilustrat în figura 2.18.

2.2.3 Rosturile îmbinărilor sudate prin suprapunere

Denumirea acestor îmbinări provine din poziția relativă a pieselor sudate, însă din punct de vedere al realizării sudurii se pot considera ca și îmbinări sudate în colț, figura 2.19.

Îmbinările sudate prin suprapunere au proprietăți de rezistență mecanică foarte reduse, datorită concurenței unor factori ce influențează în mod negativ aceste proprietăți:

- Solicitarea complexă a cusăturii, în special a rădăcinii acesteia, la sarcini de întindere, forfecare și răsucire ;
- Pătrunderea redusă a cusăturii pe grosimea metalului de bază;
- Distribuția neuniformă a sarcinilor mecanice în cusătură, se produce o concentrare a acestora, în zona rădăcinii cusăturii.

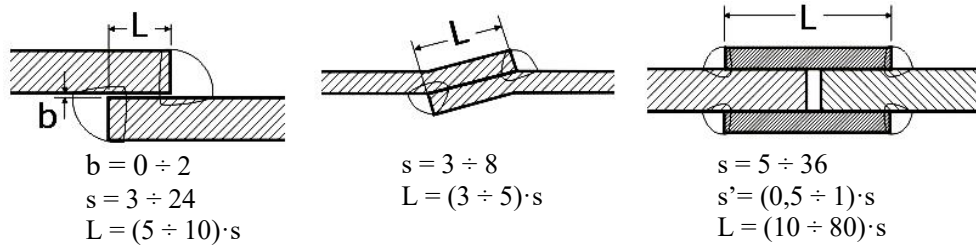


Fig. 2.19. Rosturile îmbinărilor sudate prin suprapunere (dimensiuni în mm).

Aceste caracteristici, împreună cu faptul că suprapunerile de material sporesc greutatea construcției sudate și măresc consumul de manoperă, precum și cel de materiale, limitează semnificativ aplicațiile la care sunt prevăzute aceste tipuri de îmbinări.

O altă categorie de îmbinări sudate prin suprapunere, însă la care sudura se efectuează în muchie, este ilustrată în figura 2.20, iar în figura 2.21 este ilustrată o îmbinare prin suprapunere, sudată în gaură prin sudură de colț, denumită **electronit**.

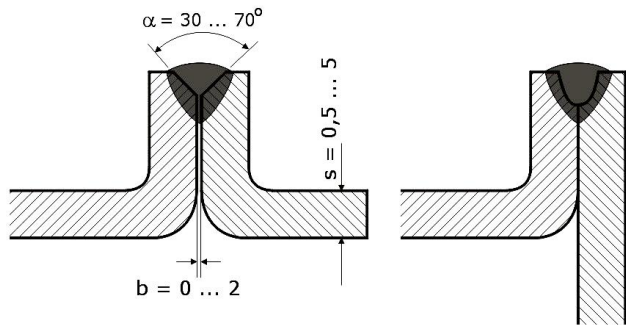


Fig. 2.20. Rosturile îmbinărilor prin suprapunere cu margini răsfrânte sudate în muchie

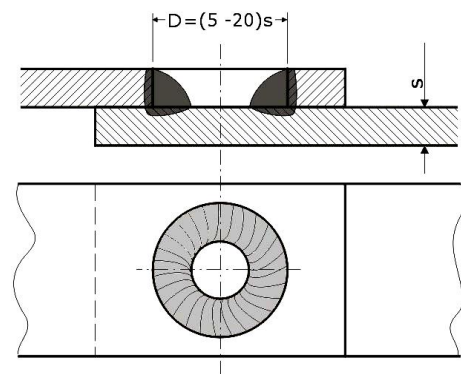


Fig. 2.21. Rosturile îmbinărilor prin suprapunere sudate în gaură, electronit.

Îmbinările cu margini răsfrânte sunt o categorie specială de îmbinări prin suprapunere, care se aplică uzual pentru tablele subțiri, cu grosime mai mică de 5 mm. Marginile sunt obținute prin îndoire sau ambutisare și sunt sudate în muchie. În funcție de grosimea metalului de bază se pot prelucra rosturi și cu deschidere mai mare, caz în care se va suda cu material adaos. Rezistența mecanică a acestor îmbinări este foarte redusă și asigură mai mult un rol de fixare a elementelor metalice, decât unul de rezistență. Îmbinările sudate în găuri sau o serie de decupaje efectuate în piesa superioară se realizează prin depunerea metalului adaos în aceste cavități în lungul conturului profilului decupat, până la închiderea completă a acestuia, figura 2.21. Cusătura astfel obținută se caracterizează prin proprietățile specifice îmbinărilor de colț interior. Uzual, se practică mai multe decupaje identice, pentru a asigura o rezistență mecanică satisfăcătoare.

2.3 Gradul de diluție

Cusătura sudată se formează prin deplasarea și cristalizarea băii de sudură în lungul direcției de sudare. La formarea băii de sudură participă atât materialul de adaos, cât și metalul de bază, prin topirea suprafețelor rostului de sudare, figura 2.22.

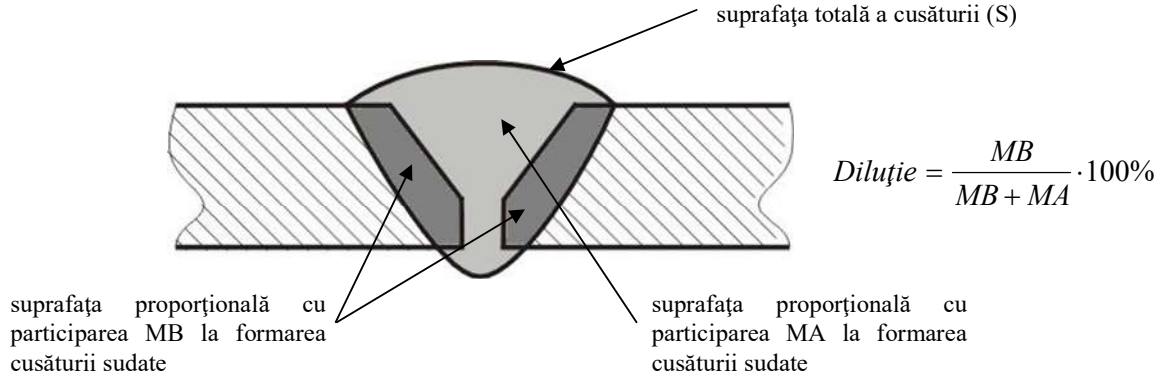


Fig. 2.22. Determinarea gradului de diluție în îmbinările sudate.

Procedeul de sudare, proprietățile sursei termice, mediul de sudare, calitatea materialului adaos și de bază, viteza de sudare, configurația geometrică a rostului de sudare și a îmbinării sudate, pătrunderea cusăturii în metalul de bază, determină proprietățile de rezistență mecanică a cusăturii sudate și a zonei influențate termic ZIT.



Gradul de diluție reflectă participarea metalului de bază la formarea cusăturii sudate și se exprimă în procente. Diluția se poate măsura experimental prin planimetrie sau prin efectuarea de analize chimice locale.

O valoare uzuală a gradului de diluție se situează în jurul valorii de 20% , iar diferența de 80% reprezintă participarea materialului adaos la formarea cusăturii sudate. Această valoare variază în funcție de procedeul de sudare, tipul rostului ales și parametrii tehnologici de sudare.

2.4 Alegerea formei rosturilor de sudare

Alegerea corectă a formei și dimensiunilor rosturilor de sudare, reprezintă un aspect important din faza de proiectare a unei construcții sudate. Principiile care stau la baza alegerii unui anumit rost de sudare, sunt ilustrate în diagrama din figura 2.23. Comportarea în exploatare și siguranța construcției sudate, depinde nemijlocit de această etapă a proiectării. Pentru a facilita munca proiectanților s-au elaborat o serie de standarde și normative, care stabilesc forma și dimensiunile rosturilor de sudare, în funcție de procedeul de sudare, grosimea și calitatea metalului de bază.

Terminologia de specialitate în ceea ce privește elementele rosturilor de sudare, în funcție de tipul îmbinării este prevăzută în norma EN 12345 :1998. Deasemenea, în EN 1993 Eurocod 3 sunt stabilite regulile de calcul a îmbinărilor elementelor și structurilor din oțel, mărcile S235, S275, S355 și S460 solicitate predominant static. Prevederile se aplică produselor cu grosimi $s \geq 4$ mm, realizate din mărci de oțel sudabile pentru construcții, conform EN 1993-1-1. Pentru suduri la piese cu grosimi < 4 mm se fac referiri la EN 1993 partea 1.3, iar pentru suduri la profile tubulare pentru construcții, cu grosimi de 2,5 mm și mai mari, sunt precizate indicații în articolul 7 al acestui standard. În mod obișnuit, dacă nu se precizează altfel, este cerut **nivelul de calitate C**, conform EN ISO 25817.

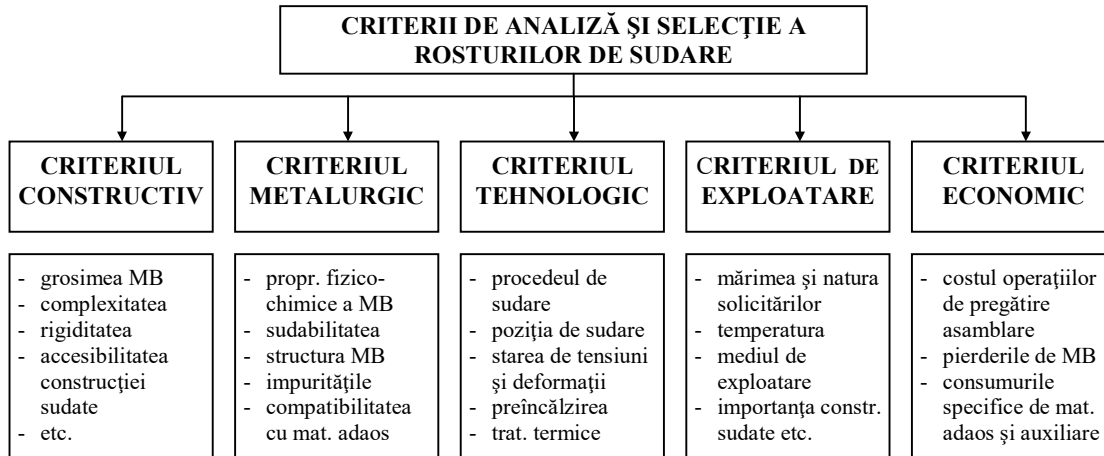


Fig. 2.23. Criterii de analiză și selecție a formei și dimensiunilor rosturilor de sudare.

2.4.1 Criteriul constructiv

Grosimea materialului de bază reprezintă factorul principal în alegerea tipului și dimensiunilor rosturilor de sudare. Creșterea grosimii materialului impune alegerea unor rosturi cu deschidere mai mare pentru asigurarea unei bune pătrunderi, în special la rădăcina cusăturii, unde accesul este redus prin geometria rostului de sudare. Din punct de vedere al deschiderii rostului, acestea pot fi ordonate în sens crescător, după cum urmează: **I, Y, V, U, X, 2U**.

Complexitatea și rigiditatea construcției sudate reprezintă un factor de risc în ceea ce privește pericolul fisurării îmbinărilor sudate. Elementele metalice de diferite mărimi și secțiuni orientate sub diferite unghiuri, favorizează apariția concentratorilor de tensiuni în cusăturile sudate care sunt supuse la solicitări complexe.

Starea de tensiuni și deformații în elementele sudate crește datorită constrângerilor de deplasare liberă a pieselor sudate, acestea fiind rigidizate împreună. Rosturile simetrice sudate din ambele părți (**X, 2U**) prezintă avantajul că reduc pericolul de tensionare, deformare și fisurare a îmbinării sudate, deoarece rândurile de sudură depuse alternativ pe cele două părți, compensează reciproc **tensiunile** generate ca urmare a **contractiei** produse la trecerea anterioară. Trecerile multiple realizează și un **tratament termic de recoacere** pentru straturile depuse anterior, care îmbunătățesc caracteristicile mecanice ale cusăturii sudate, în special tenacitatea materialului depus.

Accesibilitatea îmbinărilor sudate caracterizează posibilitatea realizării operațiilor de sudare prin prisma îndeplinirii sau nu a condițiilor corecte de lucru, cum ar fi:

- Accesul corect al electrodului sau capului de sudare pe toată lungimea cusăturii;
- Repartizarea fluxului termic în mod egal între suprafețele rostului de sudare ;
- Îndeplinirea unor condiții specifice de sudare, dirijarea fluxului, ventilarea spațiului de lucru, susținerea băii de sudură etc ;
- Urmărirea procesului de sudare, a băii de sudură etc.

2.4.2 Criteriul metalurgic

Proprietățile fizico-chimice ale materialului de bază influențează în mod direct calitatea îmbinărilor sudate, caracterizată prin:

- Proprietăți mecanice de rezistență ;

- Plasticitatea, tenacitatea și duritatea materialului depus ;
- Transformările structurale din cusătura sudată și ZIT ;
- Tensiunile interne acumulate datorită tensiunilor de contracție sau a coeficienților de dilatare termică mari sau diferiți, în cazul sudării a două materiale diferite ;
- Coeficientul de conductivitate termică a materialului influențează pătrunderea cusăturii în MB și determină puterea sursei termice de sudare;
- Conținutul de incluziuni nemetalice din cusătura sudată și din metalul de bază.

Oțelurile carbon și slab aliate cu conținut redus de carbon suportă viteze mari de încălzire-răcire, fără pericolul apariției structurilor de supraîncălzire sau de călire. Prin urmare, se pot prevedea rosturi economice cu deschidere mică (**I, Y, K**), când riscul apariției deformațiilor după sudare și a fisurilor este mai redus.

Oțelurile aliate conțin o serie de elemente care măresc călibilitatea (Cr, Mo, Mn etc.), astfel că participarea materialului adăos la formarea băii de sudură trebuie să fie mai importantă, fapt ce determină un grad de diluție și pătrundere în metalul de bază mai redus. Deasemenea, sunt recomandate depunerile multistrat în rosturi mai deschise (**V, U ½ 2U**), cu regimuri de sudare mai puțin intense, aceste oțeluri având o susceptibilitate mărită la deformații, datorită coeficienților mari de dilatare liniară și a coeficienților mici de conductivitate termică.

Materialele neferoase (Cu, Al, Ti și aliajele acestora) se caracterizează prin coeficienți de conductibilitate termică ridicată și prezența unor straturi superficiale de oxizi aderenți pe suprafața metalică, datorită afinității foarte mari față de oxigen a acestor elemente. Peliculele de oxizi acționează ca și o barieră fizică ce împiedică formarea legăturilor metalice în baia de sudare pe durata procesului de cristalizare. Mai mult, oxizii acestor metale au temperaturi foarte ridicate de topire (exemplu : oxidul Al_2O_3 are punctul de topire la 2050 °C față de 660 °C cât are Al, oxidul Cu_2O se topește la 1235 °C față de Cu la 1083 °C etc.). Datorită acestor particularități, la sudarea materialelor neferoase, se recomandă utilizarea unor rosturi mai deschise și sudarea cu viteze mari, utilizând surse termice puternice și concentrate.

Impuritățile nemetalice endogene și exogene, prezența segregățiilor, structura grosolană rezultată ca urmare a unor tratamente termice neadecvate sau starea de tensiuni datorată deformațiilor plastice efectuate anterior operațiilor de sudare, influențează în mod negativ calitatea îmbinărilor sudate. Defectele structurale, cum ar fi vacanțele din rețeaua atomică, favorizează procesele de difuzie a elementelor nedorite pe durata cristalizării, cu efecte negative asupra comportării în exploatare a îmbinării sudate. Impuritățile se separă cu predilecție la limita grăunților, pe o grosime de câteva plane atomice și afectează în special comportarea la oboseală a structurii sudate, micșorând reziliența materialului în zona afectată termic. Proprietățile mecanice precum rezistența la tracțiune sau duritatea, sunt afectate într-o măsură mai mică.

2.4.3 Criteriul tehnologic

Procedeele de sudare ales pentru realizarea unei îmbinări sudate influențează alegerea rostului de sudare, pe baza următoarelor considerente:

- Caracteristicile fizice și grosimea metalului de bază;
- Puterea sursei și concentrarea fluxului termic;
- Protecția și susținerea băii de sudură ;
- Poziția de sudare.

În cazul procedeelor de sudare caracterizate prin pătrundere mare a cusăturii în metalul de bază, cum este cazul sudării sub strat de flux, cu plasmă, flux de electroni și laser, se utilizează rosturi mai închise (**I, Y, X**), iar în cazul sudării în baie de zgură topită, sudarea alumino-termică și sudarea cap la cap prin procedee de sudare în stare solidă, se utilizează exclusiv rosturi neteșite în **I**.

Procedeele de sudare care produc cantități mari de zgură sau zgură vâscoasă trebuie să utilizeze rosturi cu deschidere mărită, pentru a permite zgurei să se ridice la suprafața băii de sudură. Sudarea orizontală în cornișă și cea orizontală cu un perete vertical, necesită utilizarea unor rosturi asimetrice ($\frac{1}{2}Y$, $\frac{1}{2}V$, $\frac{1}{2}U$, **K**, $\frac{1}{2}2U$) cu tabla inferioară neteșită, pentru susținerea băii de sudură. În cazul sudării în poziția PE peste cap, se va alege rostul în **V** și cu unghiul rostului cuprins între 60° și 120°.

2.4.4 Criteriul de exploatare

Condițiile de exploatare a îmbinării sudate iau în considerare mărimea și natura sarcinilor preluate de construcția sudată, temperatura și mediul de exploatare, gradul de risc în exploatare. Mediul în care construcția sudată este exploatată poate prezenta anumite caracteristici, precum: acțiuni corozivă, radiații nucleare, vibrații, temperaturi foarte ridicate sau scăzute de lucru, presiuni ridicate, ceea ce impune alegerea unor rosturi care asigură rezistență mecanică superioară. În aceste situații se impune realizarea exclusiv de îmbinări sudate cap la cap, cu utilizarea unor rosturi cu deschidere mare (**Y, U, X, 2U**), sudate în mai multe treceri și utilizând doar procedee de sudare de calitate superioară. Posibilele defecte localizate la rădăcina sudurii sunt eliminate prin crăițuire și resudarea rădăcinii cusăturii. Este interzisă utilizarea îmbinărilor sudate în colț, prin suprapunere sau cu margini răsfrânte, datorită rezistenței mecanice inferioare a acestora.

2.4.5 Criteriul economic

Întotdeauna a existat tendința agenților economici de a reduce cheltuielile de fabricație și de a deveni mai competitivi. Deși este un criteriu important de alegere a rosturilor de sudare, prin prisma reducerii costurilor determinate de volumul operațiilor de pregătire-asamblare-sudare, acest lucru este posibil doar după îndeplinirea criteriilor de importanță majoră, cum ar fi: criteriul de exploatare sau criteriul metalurgic. Nu orice economie realizată prin adoptarea unor rosturi de formă mai economică, produce o economie în termeni reali. Costurile de realizare a unei îmbinări sudate sunt reflectate de următoarele considerente:

- Volumul operațiilor de prelucrare a rosturilor de sudare;
- Pierderea din metalul de bază prin pregătirea rosturilor ;
- Consumul de material adaos și materiale auxiliare (gaze, flux etc.) ;
- Consumurile energetice;
- Cantitatea de manoperă necesară la realizarea îmbinării sudate;
- Productivitatea de sudare;
- Costuri legate de controlul calității îmbinărilor sudate.

Din punct de vedere economic, se poate stabili următorul șir al rosturilor de sudare aranjate în ordinea creșterii cheltuielilor de fabricație: **I, $\frac{1}{2}Y$, Y, $\frac{1}{2}V$, V, $\frac{1}{2}U$, U, K, X, $\frac{1}{2}2U$, 2U**.

2.4.6 Concluzii privind alegerea rosturilor de sudare

Se poate spune că cele cinci criterii enunțate stabilesc condițiile de analiză și factorii de influență care trebuie considerate, pentru **alegerea optimă** a rosturilor de sudare. Ca și recomandări finale cu caracter general, putem aminti:

- Utilizarea preferențială a îmbinărilor sudate cap la cap caracterizate prin rezistență mecanică superioară;
- Alegerea unor rosturi cu deschidere mai mică și cu suprafețe plane (economice);
- Asigurarea pătrunderii pe toată grosimea metalului de bază;
- Adoptarea unor rosturi simetrice sudate din ambele părți, doar în cazuri bine justificate (costuri mai mari);
- Prevederea operațiilor de crăițuire și resudare a rădăcinii, doar în cazurile îmbinărilor puternic solicitate;
- Susținerea băii de sudură, doar în cazul unei băi cu fluiditate ridicată sau la rosturile cu deschidere mare;
- Prevederea operațiilor de control nedistructiv, doar pentru construcțiile sudate cu un factor de risc ridicat (cazane sub presiune, structuri de rezistență în obiective cu importanță ridicată etc.).

2.5 Reprezentarea îmbinărilor sudate pe desenele tehnice

Desenul de execuție conține o serie de informații privind realizarea construcțiilor sudate pe care proiectantul le transmite inginerului sudor sau executantului care realizează nemijlocit construcția sudată. Informațiile din desenul tehnic trebuie să fie clare, precise și complete și să stabilească în mod univoc toate condițiile și datele tehnologice de sudare. Pe baza acestor considerente este ușor de înțeles necesitatea utilizării unor standarde, care să reglementeze simbolizarea îmbinărilor sudate pe desenele tehnice. Astfel, reprezentarea îmbinărilor sudate pe desenele tehnice se face în conformitate cu standardul ISO 22553:2013, figura 2.24.

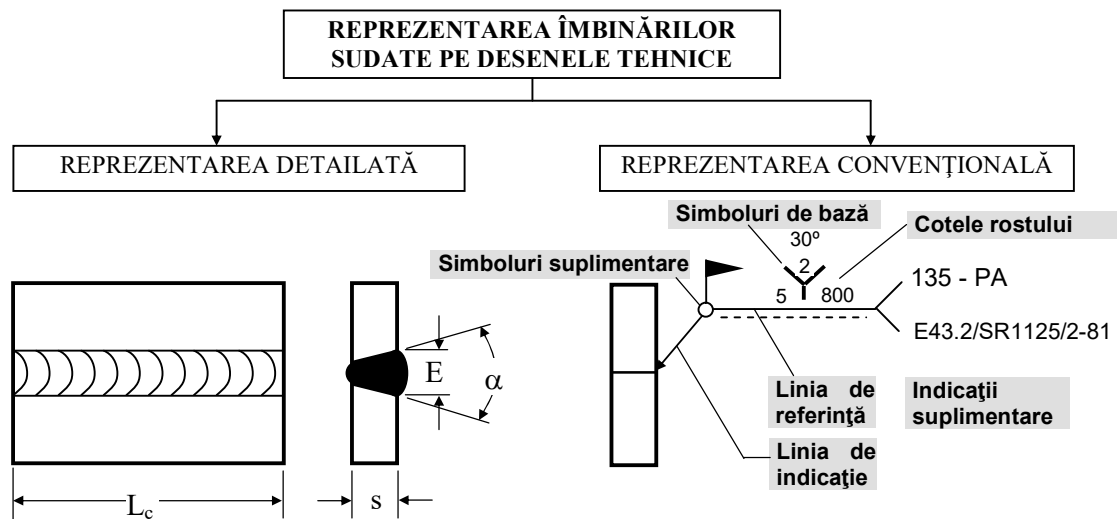


Fig. 2.24. Reprezentarea îmbinărilor sudate pe desenele tehnice.

Reprezentarea detaliată constă în desenarea îmbinărilor sudate în vedere de sus sau în secțiune frontală, perpendicular pe direcția de sudare. Aspectul cusăturii sudate, în vedere se reprezintă prin linii curbe care pun în evidență suprafața cusăturii, iar în secțiunea frontală cusătura se înnegrește, cu excepția desenelor unde sunt cotate dimensiunile rostului de sudare. Toate informațiile referitoare la forma și dimensiunile rostului, precum și a cusăturii sudate sunt trecute pe desen, datele tehnologice fiind specificate la observații sau în caietul de sarcini. În general, reprezentarea detaliată a îmbinărilor sudate pe desenele tehnice se utilizează mai rar, fiind utilizată cu precădere în cărțile didactice sau în unele publicații de specialitate.

Reprezentarea convențională are un caracter mai abstract și se bazează pe o reprezentare simplificată a îmbinărilor sudate care sunt indicate printr-o linie mai subțire sau de aceeași grosime ca și liniile de contur ale desenului. Linia respectivă indică axa mediană a cusăturii sudate, reprezentarea fiind însoțită și de o serie de linii și simboluri, după cum urmează:

- **Linia de indicație** - este o linie subțire înclinată de aceeași grosime ca și liniile de cotă, prevăzută cu o săgeată în vârf orientată spre axa mediană a cusăturii sudate. Dacă numai una dintre piesele sudate este prelucrată, linia de indicație va fi orientată obligatoriu spre aceasta, conform cu figura 2.25 ;
- **Linia de referință** - constă din două linii paralele, una este continuă și de aceeași grosime ca și linia de indicație și este trasată în prelungirea acesteia, după o direcție orizontală paralelă cu baza desenului sau cu axa cusăturii. A doua linie este întreruptă și indică poziția rădăcinii cusăturii sudate, în raport cu vârful săgeții liniei de indicație, figura 2.25. Linia de referință întreruptă este omisă doar în cazurile îmbinărilor sudate din ambele părți cu rosturi simetrice ;

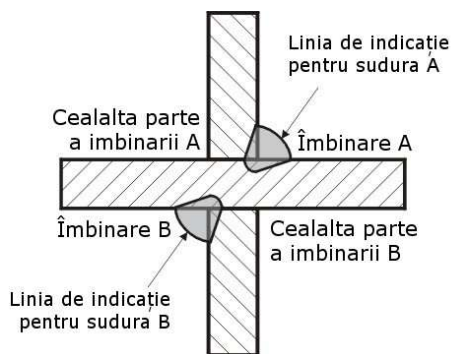


Fig. 2.25. Definierea părților sudate.

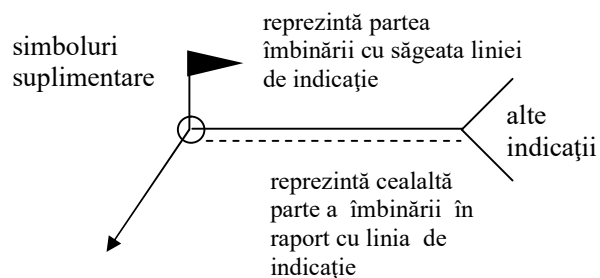
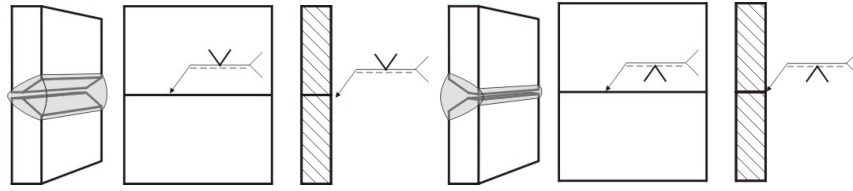


Fig. 2.26. Structura simbolizării îmbinărilor sudate.

- **Simbolurile de bază** – indică cu ajutorul unor semne convenționale forma rostului de sudare, tabelul 2.2. Aceste simboluri se plasează relativ la mijlocul liniei de referință, deasupra sau dedesubtul acesteia, în funcție de ce parte este situată rădăcina îmbinării în raport cu linia de indicație. Simbolurile de bază pot fi interpretate ca și o reprezentare simplificată a secțiunii transversale a îmbinării;
- **Simbolurile suplimentare** – sunt atașate simbolurilor de bază oferind informații despre forma și starea suprafeței cusăturii după sudare (prelucrări mecanice, resudarea rădăcinii etc.), tabelul 2.2;
- **Alte indicații** – sunt trecute în continuarea liniei de referință și cuprind următoarele tipuri de informații:
 - **în dreptul liniei oblice superioare:** codificarea numerică a procedurii de sudare (SR ISO 4063-2010), abaterile limită a dimensiunilor cusăturii, clasa de execuție, poziția de sudare, dacă diferă de cea orizontală (SR ISO 6947:2011), tabelul 2.3 ;
 - **în dreptul liniei oblice inferioare:** calitatea electrodului sau a materialului adaos.
- **Înscrierea cotelor** – se face în jurul simbolului de bază. La stânga acestuia este trecută grosimea cusăturii s , iar în dreapta se trece lungimea cusăturii. Dimensiunile rostului de sudare (b -deschiderea, α -unghiul rostului, h -înălțimea rădăcinii, E -lățimea rostului) se trec în spațiul disponibil deasupra sau dedesubtul simbolului de bază. La îmbinările cap la cap dacă cusătura cuprinde toată grosimea îmbinării sudate, grosimea s nu se mai trece. La îmbinările sudate în colț interior se trece fie înălțimea triunghiului înscris în cusătura sudată a , fie lungimea catetei z a acestuia. În cazul în care catetele sunt inegale, de exemplu în cazul unor grosimi diferite ale pieselor sudate, se trec dimensiunile celor două catete sub formă de produs $z_1 \times z_2$.



a) simbolul de bază deasupra liniei de referință

b) simbolul de bază sub linia de referință

Fig. 2.27. Exemplu de reprezentare convențională a unei îmbinări sudate cap la cap cu rost în Y.

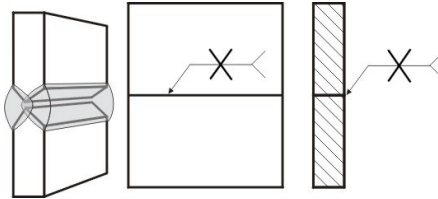


Fig. 2.28. Exemplu de reprezentare convențională a unei îmbinări sudate cap la cap cu rost în X.

Tab. 2.2. Simbolurile de bază pentru reprezentarea convențională a îmbinărilor sudate.

Rost cu margini răsfrânte			Sudură în colț		
Rost în I			Sudură în muchie cu o margine răsfrântă		
Rost în V			Sudură în muchie		
Rost în 1/2V			Sudare pe suport		
Rost în U			Sudură în puncte		
Rost în 1/2U			Sudură în gaură		
Rost în Y			Sudură în linie		
Completare la rădăcină					

Tab. 2.3. Simbolurile suplimentare pentru reprezentarea convențională a îmbinărilor sudate.

Suprafață plană		Prelucrarea cusăturii pentru trecere lină	
Suprafață convexă		Prelucrarea supraînălțării cusăturii până la nivelul tablei	
Suprafață concavă			
Sudare la montaj		Sudare pe contur	

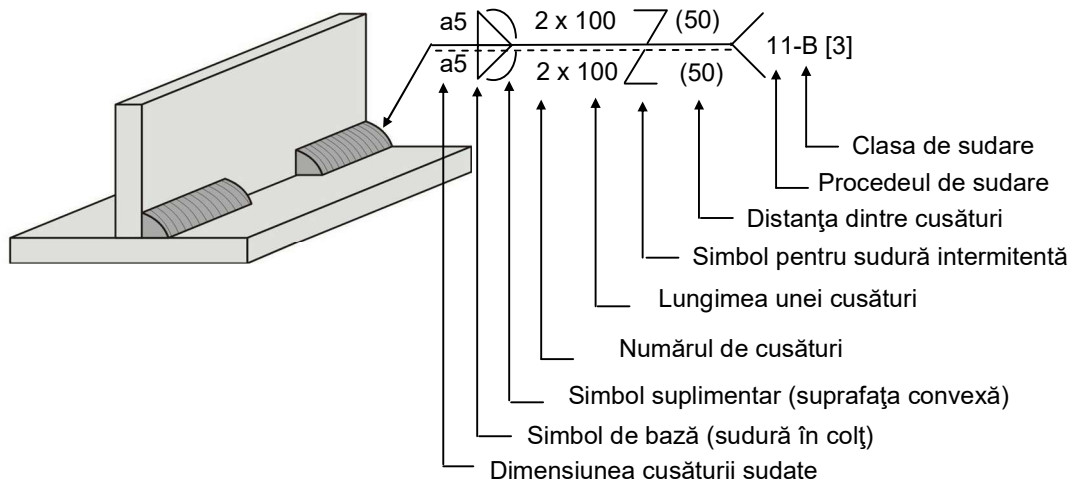


Fig. 2.29. Exemplu de reprezentare convențională a unei îmbinări sudate în colț.

3. BAZELE FIZICO-METALURGICE ALE SUDĂRII MATERIALELOR

3.1 Surse termice pentru sudare

Pentru realizarea unei legături metalice de rezistență între piesele pe care dorim să le sudăm, este necesar să apropiem atomii ce aparțin pieselor respective, la distanțe la care forțele de interacțiune atomică pot forma legături stabile. Forțele de interacțiune dintre atomi devin semnificative, doar dacă distanța dintre aceștia este comparabilă cu dimensiunea atomilor, figura 3.1.

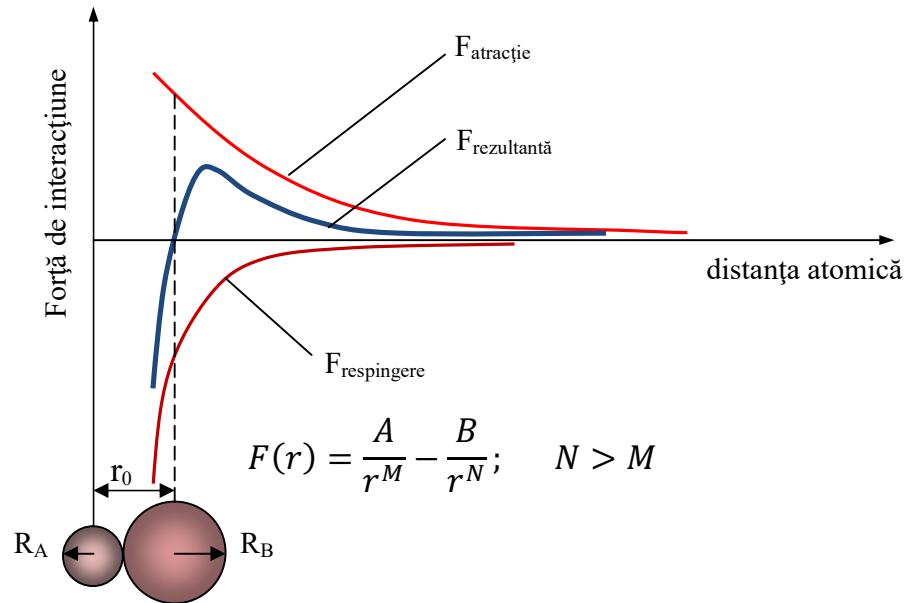


Fig. 3.1 Forțele de interacțiune atomică.

Ca să ilustrăm aceste informații, putem considera două piese metalice dispuse cap la cap și aduse în contact. Să presupunem că suprafețele de contact ale acestora sunt rectificată și prezintă o rugozitate extrem de mică, R_a 0,6 μm . Chiar dacă am aplica forțe de apăsare pe capetele pieselor pentru a obține un contact cât mai bun, distanța care separă atomii ce aparțin celor două suprafețe ar avea o diferență de patru ordine de mărime față de dimensiunea atomilor, respectiv față de distanța r_0 din figura 3.1. Cu alte cuvinte, dacă atomii din figură ar fi reprezentați la scara 1:1, distanța dintre aceștia ar fi de 100 metri, mult prea mare pentru a se putea forma o legătură metalică. Acum, înțelegem de ce piesele nu se sudează, doar dacă le aducem în contact.

În aceste condiții, trebuie să introducem energie în zona materialului pe care dorim să o sudăm, să creăm condițiile necesare pentru ca să atomii să intre în contact la distanțe atomice și să formeze legături metalice de rezistență. În funcție de cantitatea de energie furnizată îmbinării, avem **procedee de sudare prin topire** cu formarea unei băi lichide de metal, denumită baie de sudare, sau mai putem avea **procedee de sudare în stare solidă**, unde mai trebuie să asigurăm suplimentar și forțe de presare asupra materialelor, pentru a compensa mobilitatea mai redusă a atomilor. Amplitudinea de vibrație a atomilor este funcție de temperatură. Cu cât crește temperatura, cu atât mobilitatea atomilor va fi mai mare. În standardul EN 14610:2005 este definit procesul de sudare și se face o clasificare a proceselor de sudare în **procese de sudare prin topire**, respectiv **procese de sudare în stare solidă**.

În funcție de caracteristicile sursei termice utilizate la sudare, ciclul de încălzire-răcire sau pe scurt **ciclul termic**, va prezenta o serie de particularități care alături de proprietățile materialelor sudate vor determina proprietățile mecanice de rezistență ale îmbinării sudate, starea de tensiuni din material și deformațiile induse de procesul sudare. Acest aspect este extrem de important pentru alegerea unui anumit procedeu de sudare pentru o aplicație dată. În cazul procedeelor de sudare prin topire, cusătura sudată este obținută prin cristalizarea băii de sudură, formată prin topirea locală a metalului de bază, respectiv a materialului adaos. Caracteristicile surselor termice utilizate în procesul de sudare, trebuie să îndeplinească următoarele cerințe:

- Să dezvolte o temperatură mult mai mare decât temperatura de topire a materialelor care se sudează;
- Să concentreze fluxul de căldură pe o suprafață cât mai redusă ;
- Să fie reglabilă și să-și păstreze caracteristicile pe toată durata sudării ;
- Să prezinte siguranță în exploatare;
- Costul energiei termice produse să fie redus.

Materialele metalice prezintă în general o conductibilitate termică ridicată, unele dintre acestea Cu, Al având chiar o conductibilitate termică foarte bună. Această caracteristică îngreunează procesul de sudare, datorită disipării foarte rapide a căldurii din zona de sudare. Crește astfel riscul apariției defectelor de sudare, precum lipsa de topire sau pătrunderea insuficientă a cusăturii în metalul de bază. În cazul sudării materialelor metalice a căror coeficient de dilatare liniară este mare, cum este cazul oțelurilor inoxidabile, crește riscul apariției deformațiilor sau a fisurării materialului.

Concentrarea fluxului termic pe o suprafață cât mai redusă asigură o pătrundere ridicată a cusăturii în metalul de bază și reduce la minimum riscul apariției deformațiilor după sudare. Este extrem de important controlul căldurii asimilate de material pe durata procesului de sudare, deoarece determină transformările structurale care se produc în cusătura sudată și în ZIT. Ca urmare, sunt afectate microstructura cusăturii și a ZIT, proprietățile mecanice ale îmbinării, în special tenacitatea și reziliența, dar și rezistența la oboseală. Sursele termice utilizate în cadrul **procedeelor de sudare prin topire** sunt prezentate în figura 3.2.

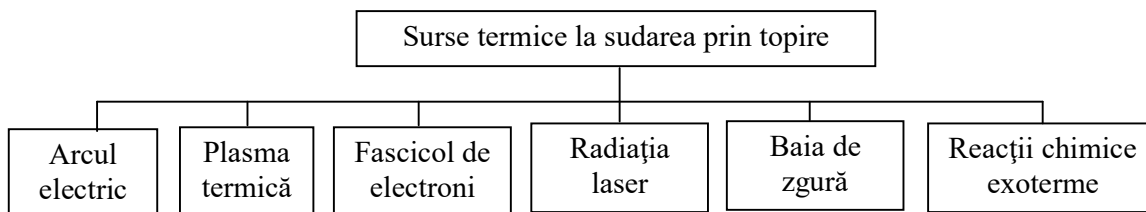


Fig. 3.2. Tipuri de surse termice utilizate la procedee de sudare prin topire.

Procedeele de sudare în stare solidă utilizează o varietate mare de surse de energie, care este transformată în energie termică, iar prin combinarea acestora cu energie mecanică prin aplicarea unor forțe de presare/refulare, se asigură condițiile necesare realizării îmbinării sudate:

- **Energia electrică** - prin intermediul unei rezistențe electrice de contact prin efect Joule sau prin curenți de inducție Foucault, dezvoltă o cantitate importantă de căldură ;
- **Energia ultrasunetelor** - este convertită în căldură datorită absorbției de către material a vibrațiilor mecanice de mare frecvență ;

- **Energia mecanică** - prin intermediul forțelor de frecare dintre două suprafețe aflate în contact și aflate în mișcare relativă, generează efectul termic necesar realizării sudării ;
- **Energia degajată prin explozie** - produce o undă de șoc ce deformează materialul cu viteză foarte mare și aduce în contact piesele care se sudează fără material adaos.

3.1.1 Arcul electric



Arcul electric este o descărcare electrică printr-o coloană de gaz ionizat și incandescent a unui flux de electroni liberi, care sunt accelerați de la catod (-) spre anod (+), sub influența câmpului electric exercitat între cei doi electrozi conectați la bornele unei surse de curent, figura 3.3.

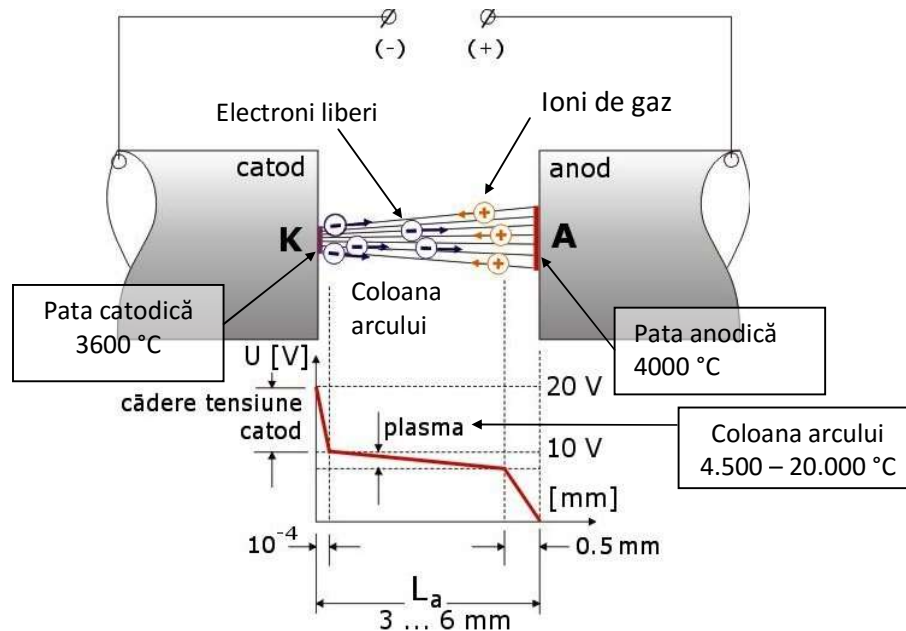


Fig. 3.3. Elementele arcului electric.

Potențialul electric scade foarte rapid în imediata vecinătate a suprafeței catodului cu cca. 10^8 V/m, în coloana arcului rata de scădere se micșorează la cca. 10^3 V/m, pentru ca în vecinătatea anodului aceasta să crească din nou la o valoare de 10^6 V/m, figura 3.3. Electronii liberi care parăsesc suprafața incandescentă a catodului prin fenomenul de **termoemisie** sunt accelerați spre anod, iar prin coliziune cu moleculele de gaz din arc electric, produc disocierea și ionizarea acestora. În procesul de ionizare a atomilor de gaz, electronii acestora din stratul de valență devin liberi și participă la fenomenul de conducție electrică prin coloana arcului. **Pata anodică** se formează prin bombardarea suprafeței anodului cu electronii din arc electric, energia lor cinetică fiind transformată în căldură, temperatura locală ajungând la valori de 4000°C .

Excitarea atomilor de gaz la ciocnirea lor cu electronii de conducție din arc, produce cuante luminoase în spectrul vizibil și ultraviolet, iar în urma bombardării suprafeței catodului de către ionii de gaz, se va forma **pata catodică**, având o temperatură de cca. 3600°C , așa cum este ilustrat în figura 3.3. Ciclul se închide prin sursa de curent care menține în echilibru fluxul necesar de electroni, pentru ca procesul din arc electric să se desfășoare stabil.

Emisia termoionică, cunoscută și sub denumirea de efect Edison, reprezintă emisia de electroni printr-o suprafață metalică sau acoperită de oxid. Emisia se produce datorită creșterii energiei termice vibraționale a atomilor, electronii având astfel energia necesară ca să părăsească suprafața metalică și să învingă forțele electrostatice de atracție. Efectul crește semnificativ cu creșterea temperaturii, iar electronii liberi sunt denumiți **termoioni**.

În materialele metalice electronii de valență se pot deplasa între atomi, formând norul de electroni. Viteza electronilor prezintă o distribuție statistică și ocazional, unii electroni primesc suficientă energie cinetică ca să părăsească suprafața metalului. Energia minimă pe care un electron trebuie să o dețină pentru ca să poată părăsi suprafața metalului, trebuie să fie egală sau mai mare cu o energie specifică fiecărui metal în parte. Această energie, corespunde lucrului de extracție a electronului din metalul respectiv. Densitatea de curent J a fluxului de termoioni, este descrisă de legea lui Richardson-Dushman, relația (3.1):

$$J = A \cdot T^2 \cdot e^{-\frac{W}{kT}} \quad (\text{A/m}^2) \quad (3.1)$$

unde: $A = \frac{4\pi m k^2 e}{h^3} = 1.20173 \times 10^6 \quad \left(\frac{\text{A}}{\text{m}^2 \text{K}^2} \right) \quad (3.2)$

k = constanta lui Boltzman ($1.3806505 \times 10^{-23}$ J/K)

e = sarcina electronului ($1.60217653 \times 10^{-19}$ C)

m = masa unui electron ($9.1093826 \times 10^{-31}$ kg)

h = constanta lui Planck ($6.6260693 \times 10^{-34}$ J·s)

W = lucrul de extracție pentru metalul respectiv (A/m^2)

T = temperatura suprafeței metalice (K)

Pata catodică se formează în urma bombardării suprafeței catodului de către fluxul de ioni de gaz, iar pata anodică se formează prin bombardarea suprafeței anodului de către fluxul de electroni de conducție. Datorită diferențelor de viteză și energie cinetică, suprafețele electrozilor se încălzesc diferențiat, influențând regimul termic la sudare în funcție de polaritatea aleasă: **directă** (cc^-) sau **inversă** (cc^+).

În cazul sudării cu polaritate directă electrodul se conectează la polul negativ, iar piesa de sudat la polul pozitiv al sursei de curent. În cazul sudării cu polaritate inversă, conexiunile se efectuează invers. Reținem că polaritatea curentului de sudare determină temperaturi diferite la electrozi, deci putem controla fie rata de topire a electrozilor, fie adâncimea de pătrundere a cusăturii în MB. Nu trebuie să uităm însă, că arcul electric se formează într-un mediu gazos. Devine evident atunci, că proprietățile gazului dintre electrozi vor influența proprietățile arcului electric. Astfel, potențialul de ionizare a gazului, conductivitatea termică, presiunea/debitul gazului vor determina stabilitatea arcului electric, transferul termic către piesele sudate sau chiar elemente mai subtile precum transferul de material prin arcul electric, aspecte care vor fi discutate mai în detaliu în cadrul capitolului de sudare în mediu de gaz protector.

Proprietățile băii de sudare precum : temperatura, volumul băii de sudare, turbulența băii, reacțiile chimice care au loc în baie vor fi influențate direct de proprietățile arcului electric și implicit se vor reflecta în caracteristicile mecanice ale îmbinării sudate realizate. Electrocul de sudare îndeplinește o funcție dublă. Pe de o parte asigură metalul de adaos necesar pentru formarea băii de sudare, iar pe de altă parte, are rol de conductor electric. Orice conductor electric parcurs de curent generează în jurul său un câmp magnetic, a cărui linii de câmp sunt închise și orientate perpendicular pe suprafața conductorului, concentrându-se în zona proeminențelor, muchiilor sau vârfulor ascuțite.

Componentele radiale ale forței Lorentz ale câmpului magnetic acționează perpendicular pe axa conductorului, respectiv pe electrod, aspecte ilustrate în figura 3.4. Asupra picăturii de metal topit formate la vârful electrodului, acționează simultan mai multe forțe. Raportul dintre aceste forțe, determină mărimea picăturii, precum și frecvența cu care aceasta se desprinde de electrod și este proiectată în baia de sudare. Forțele principale care concură la mecanismul de transfer de material prin arcul electric, sunt: forța gravitațională (F_g), forța datorată tensiunii superficiale (F_s), forța electromagnetică (F_m) și forțele datorate presiunii de vapori metalici. Forța gravitațională acționează asupra picăturii de metal topit prin accelerația gravitațională și este proporțională cu masa picăturii. La sudarea de plafon, forța gravitațională acționează în sens contrar deplasării picăturilor de metal topit.

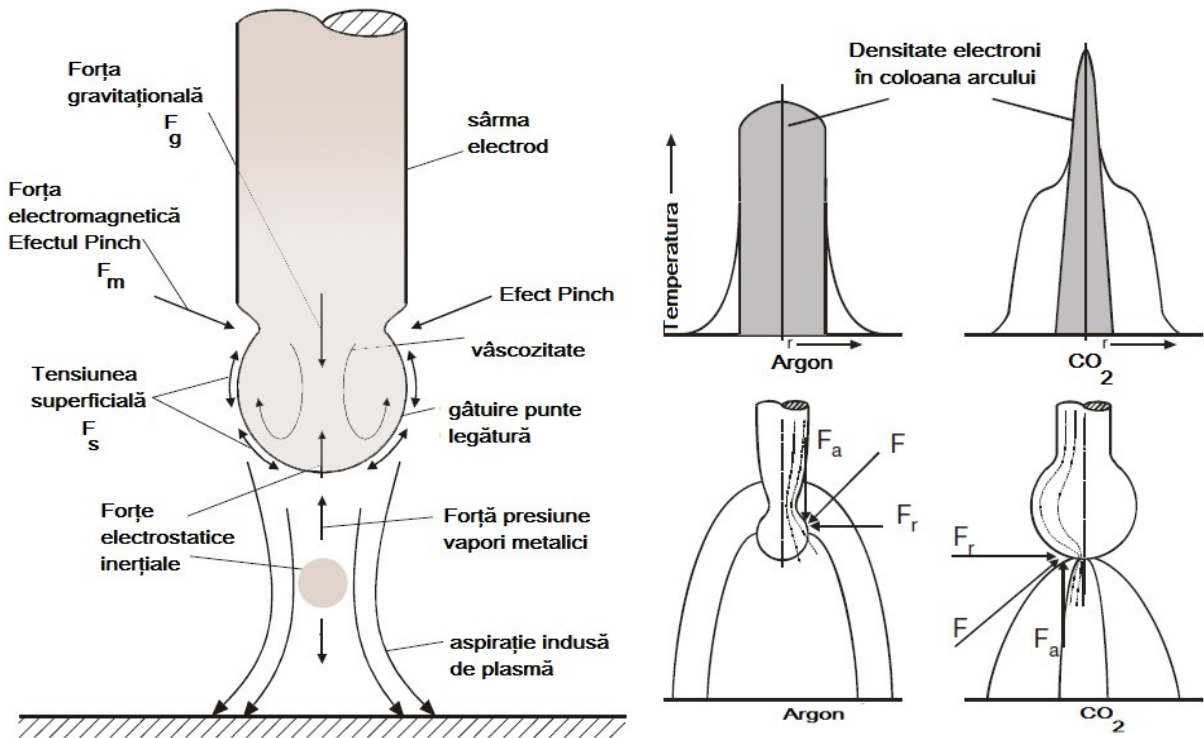


Fig. 3.4 Efectul Pinch [48].

Forța datorată tensiunii superficiale se opune desprinderii picăturii de capătul topit al electrodului. Dacă tensiunea superficială a picăturii crește, cresc și dimensiunile picăturilor transferate prin arcul electric. De aceea, uneori se adaugă mici cantități de oxigen în atmosfera de protecție, sau elemente superficial active în compoziția materialului adăos, pentru a reduce tensiunea superficială a metalului topit și prin aceasta, se micșorează mărimea picăturilor de metal topit, precum și forțele necesare pentru desprinderea lor de electrod.

Forța electromagnetică este esențială pentru transferul de material prin arcul electric. Câmpul magnetic indus de curentul din electrod, generează forțe orientate perpendicular pe suprafața conductorului, efectul Pinch. Acesta, conduce la fenomenul de ștrangulare a punții de metal topit care face legătura dintre picătura topită și capătul electrodului. În acest fel, se poate controla momentul detașării picăturii de metal topit, precum și impulsul pe care-l primește, figura 3.4. Prin controlul parametrilor de sudare, I , U , inductanța circuitului, se controlează de fapt mecanismul de transfer de material prin arcul electric.

Prin creșterea bruscă a intensității curentului de sudare, modificând inductanța circuitului, crește brusc forța electromagnetică Lorentz (efectul Pinch), conform relației 3.3, unde S reprezintă secțiunea conductorului prin care trece curentul I și se realizează desprinderea picăturii, concomitent cu proiectarea acesteia către baia de sudare.

$$F_{pinch} = \frac{I^2}{S} \quad [A^2/m^2] \quad (3.3)$$

Forța datorată presiunii de vapori metalici este rezultatul acțiunii ascendente a vaporilor metalici, care exercită o presiune asupra suprafeței picăturii metalice. Temperaturile foarte mari în axa coloanei arcului electric, determină vaporizarea elementelor metalice de la suprafața băii de sudare. La presiunea vaporilor metalici se adaugă și acțiunea gazelor rezultate în urma interacțiunilor chimice dintre baia de sudare, zgură și gazele de protecție. Raportat la aceste forțe se poate considera și acțiunea forțelor de frecare aerodinamice, precum și efectul de aspirație al plamei din coloana arcului electric, figura 3.4.

În atmosferă protectoare de argon, coloana arcului electric cuprinde capătul electrodului, figura 3.4, iar forțele electromagnetice determină proiectarea picăturii de metal topit către baia de sudare, sub forma unor picături fine. În cazul atmosferei formate din dioxid de carbon, forma coloanei arcului electric este alungită și mai îngustată în partea superioară, astfel încât forța Pinch este orientată în sens opus forței gravitaționale și are ca efect creșterea mărimii picăturii topite, până în momentul în care forța gravitațională învinge forța electromagnetică. Transferul de material în acest caz se face cu picături topite foarte mari și cu un fenomen de stropire accentuat.

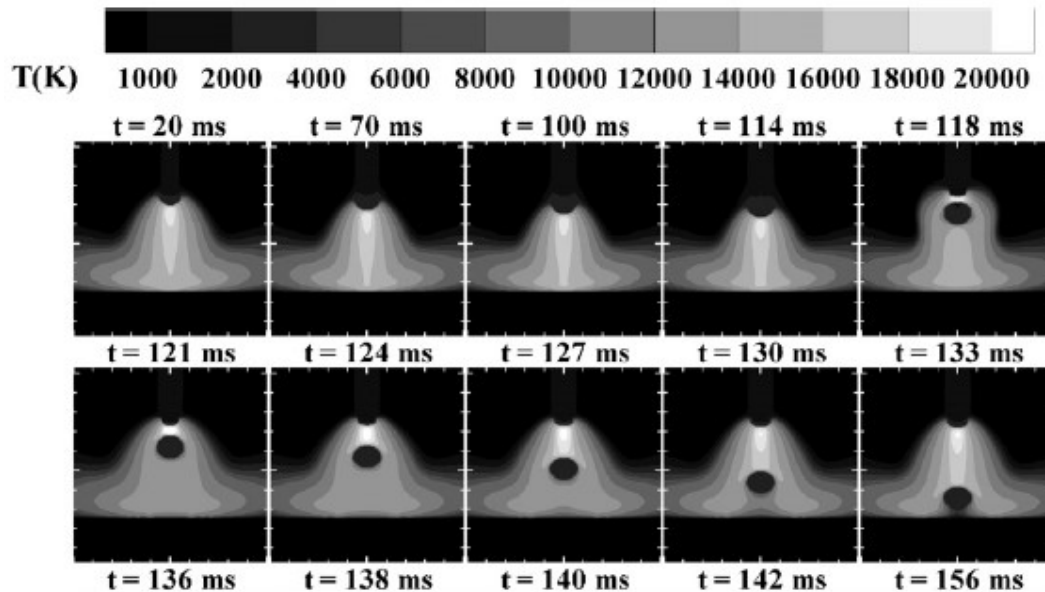


Fig.3.5 Distribuția de temperaturi și transferul de material prin arcul electric, GMAW [54].

Pătrunderea cusăturii sudate în metalul de bază reprezintă un aspect foarte important pentru asigurarea caracteristicilor de rezistență mecanică ale îmbinării. Un parametru tehnologic important care controlează pătrunderea cusăturii în metalul de bază este **viteza de sudare**. La viteze mari de sudare volumul băii de sudare și supraînălțarea cusăturii sudate sunt reduse, iar adâncimea de pătrundere în metalul de bază este mică. La viteze mici de sudare, se mărește supraînălțarea cusăturii sudate, crește volumul băii de sudare, iar adâncimea de pătrundere este iarăși mică.

Prin urmare, există un interval optim al vitezei de sudare pentru care se obține adâncimea de pătrundere maximă în metalul de bază. Un aspect foarte important în această situație este asigurarea de materialul de bază, prin caracteristicile de conductivitate termică pe care le deține. Desigur, adâncimea de pătrundere mai poate fi influențată prin preîncălzirea materialului sau prin atmosfera de protecție. Adăugarea în atmosfera de sudare a unor gaze cu coeficient de conductivitate termică ridicată, precum este heliul sau hidrogenul vor mări substanțial adâncimea de pătrundere. Aici însă vor trebui considerate și alte efecte metalurgice, reacții chimice ce pot avea loc între atmosfera de protecție și MB, riscul de fisurare etc.

În momentul în care arcul electric se amorsează, tensiunea în arc descrisă prin ecuația (3.4) scade rapid pe măsură ce gazul dintre electrozi se ionizează și devine conducător electric, figura 3.6. Constantele a , b , c și d sunt determinate empiric în funcție de natura materialului electrozilor între care arde arcul electric de lungime L_a , iar I este intensitatea curentului din coloana arcului. Această zonă se numește zona Ayrton, după numele cercetătoarei britanice Hertha Ayrton, care a studiat descărcările arcului electric în aer la începutul sec. XX, utilizând electrozi de carbon.

$$U_a = a + b \cdot L_a + \frac{c + d \cdot L_a}{I} \quad [\text{V}] \quad (3.4)$$

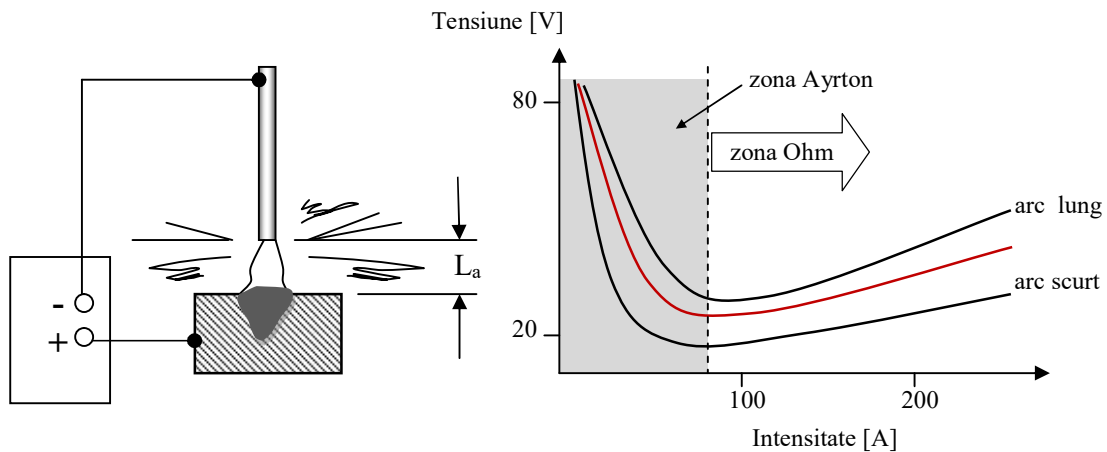


Fig. 3.6 Caracteristica arcului electric.

Ecuția (3.4) a fost obținută empiric de către Ayrton și are o aplicabilitate limitată, doar pentru momentul amorsării arcului electric. La amorsarea arcului electric într-un timp foarte scurt, caracteristica arcului prezintă o cădere rapidă a tensiunii în arc în zona Ayrton. Temperatura crește foarte rapid și conduce la o creșterea numărului electronilor de conducție prin ionizarea gazului, ceea ce înseamnă o creștere a conductibilității electrice a coloanei de gaz dintre electrozi. Creșterea conductibilității electrice a coloanei de gaz conduce la micșorarea rezistenței electrice, respectiv produce micșorarea tensiunii în arcul electric, conform figurii 3.6, iar coloana arcului crește în mărime. Pentru ca arcul electric să ardă stabil este nevoie de o sursă de curent care să furnizeze un flux de electroni la intensități de curent ce depășesc uzual 60-80 A, ceea ce ne plasează în zona rezistivă a diagramei, unde se poate aplica legea lui Ohm.



Pentru aceeași valoare a curentului de sudare, la **creșterea lungimii arcului electric** este nevoie de o tensiune mai ridicată pentru a menține stabilitatea arcului, respectiv de o putere mai ridicată a sursei de curent.

În regim de lucru staționar, caracterizat prin arderea stabilă a arcului, energia/căldura furnizată de sursa de curent trebuie să fie egală cu căldura cedată de arc pieselor sudate, respectiv mediului înconjurător, prin radiație în principal. Din această condiție, rezultă două situații posibile din caracteristica arcului, dintre care doar una este stabilă, conform relației (3.5) și figurii 3.7.

$$U_{\text{arc}} = U_{\text{sursă}} - R \cdot I_{\text{arc}} \quad (\text{V}) \quad (3.5)$$

$$P_{\text{arc}} = U_{\text{arc}} \cdot I_{\text{arc}} \quad (\text{VA}) \quad (3.6)$$

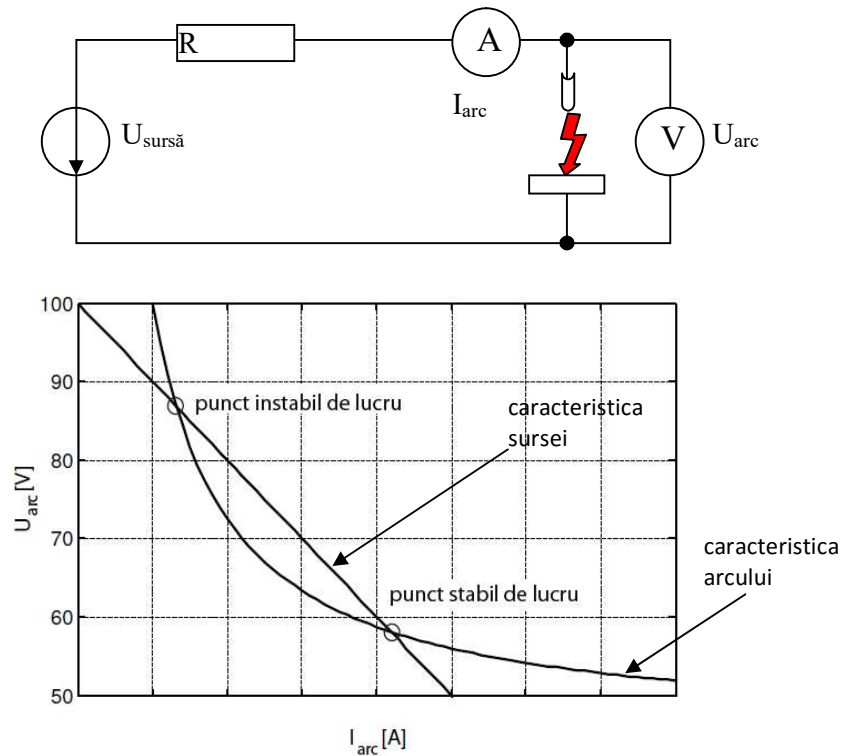


Fig. 3.7 Regimul staționar al arcului electric și punctul de lucru.

În punctul instabil de lucru, dacă scade intensitatea curentului, trebuie să crească tensiunea în arc, însă sursa de curent nu poate asigura această creștere de tensiune și arcul se stinge. Dacă în schimb crește intensitatea curentului, crește conductibilitatea electrică în arc și tensiunea scade sub tensiunea pe care o poate furniza sursa de curent, ceea ce va declanșa creșterea intensității curentului până la atingerea punctului de lucru stabil. **Efectul termic** produs de arcul electric în **curent continuu** se calculează pe baza legii Joule-Lenz, cu ajutorul relației (3.7).

$$Q = I_s^2 \cdot R \cdot \tau \quad [\text{J}] \quad (3.7)$$

unde:

I_s – intensitatea curentului electric [A] ;

R – rezistența electrică [Ω] ;

τ – timpul de menținere a arcului [sec].

Din căldura generată de arcul electric, doar o parte va fi preluată de materialul de bază, o fracțiune va fi pierdută prin radiație și convecție în mediul înconjurător.

În curent alternativ intensitatea curentului electric, respectiv tensiunea arcului electric variază după o lege sinusoidală. Sursele moderne de sudare pot modula forma de variație a intensității curentului electric și a tensiunii arcului după diverse legi, astfel încât să se obțină un efect controlat al căldurii degajate, respectiv al forțelor electromagnetice, cu scopul îmbunătățirii performanțelor sursei termice și implicit a procedurii de sudare. Aceste aspecte vor fi tratate în detaliu în cadrul fiecărui procedeu de sudare cu arc electric.

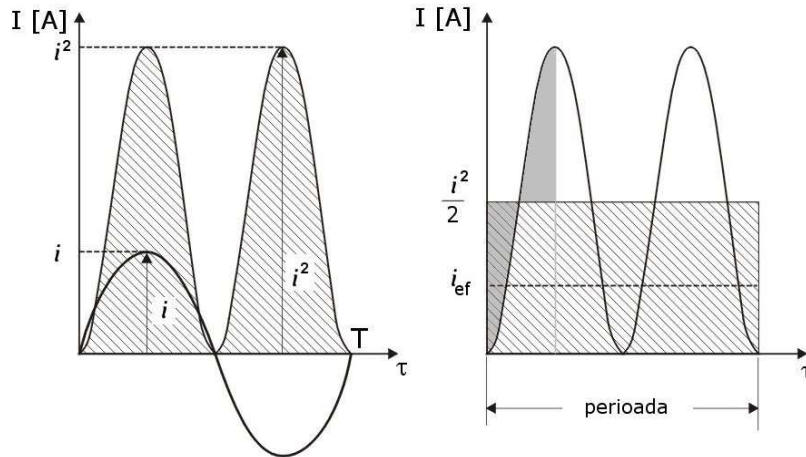


Fig. 3.8. Intensitatea de curent efectivă care produce un efect termic echivalent unui curent continuu.

Valoarea efectivă a curentului alternativ se calculează pe baza legii de variație a intensității curentului electric, de obicei sinusoidală, cu ajutorul relației (3.8).

$$i_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T i^2 d\tau} \quad [\text{A}] \quad (3.8)$$

Datorită alternanței polarității curentului de sudare, în cazul curentului alternativ căldura degajată de arcul electric se poate considera repartizată în mod egal între electrod și piesă. Alternanța în care electrodul are polaritatea pozitivă produce un efect de sablare a suprafeței metalice a piesei, ceea ce favorizează îndepărtarea peliculelor aderente de oxizi, iar în alternanța următoare se asigură efectul termic necesar pentru a asigura o pătrundere bună a cusăturii în metalul de bază. Cu ajutorul unui osciloscop se poate observa că în semiperioada în care electrodul are polaritate pozitivă, intensitatea curentului arcului electric este mai mică decât în semiperioada în care electrodul are polaritate negativă, în special la sudarea materialelor neferoase, precum aluminiul, aspect ilustrat în figura 3.9.

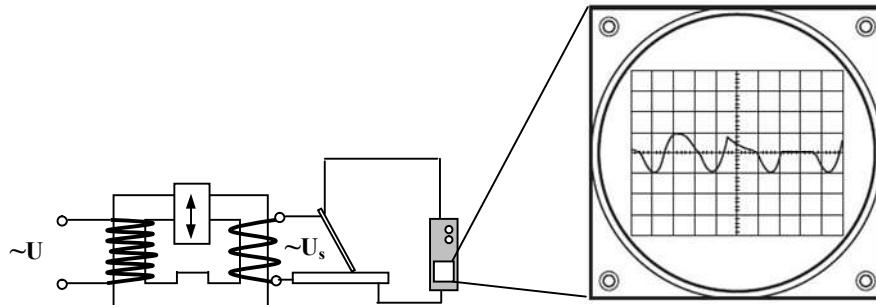


Fig. 3.9. Aspectul variației curentului de sudare la sudarea WIG a aluminiului.

Acest fenomen poate fi explicat în două moduri. Primul, consideră că pelicula de oxid ce acoperă metalul de bază acționează ca și un filtru, electronii deplasându-se mai ușor dinspre electrod spre piesă, decât dinspre piesă spre electrod. În a doua variantă, se consideră că efectul de termoemisie electronică este mai pronunțat la electrod, decât la baia topită de Al metalic. Forma ascuțită a vârfului electrodului favorizează efectul de termoemisie, datorită concentrării liniilor de câmp electric pe o suprafață redusă, electronii părăsind mai ușor suprafața respectivă. Se poate lua în discuție și valoarea diferită a lucrului mecanic de extracție a electronilor, care este mai mică în cazul electrodului de wolfram utilizat la sudarea aluminiului. Sursele moderne de curent alternativ pot modifica lărgimea alternanțelor pozitive, separat de lărgimea alternanțelor negative ale curentului de sudare, controlând astfel cantitatea de căldură transferată piesei sudate, respectiv forma și mărimea pătrunderii cusăturii în metalul de bază.

3.1.2 Plasma termică

Plasma este cunoscută ca fiind cea de-a patra stare de agregare a materiei. Deși este cea mai răspândită stare în univers este cel mai puțin cunoscută și înțeleasă de către majoritatea oamenilor. Acest fapt se datorează proprietăților deosebite pe care le prezintă și condițiilor mai speciale în care poate fi obținută, raportat la parametrii de stare pe care îi considerăm normali în viața cotidiană. Stelele sunt uriașe reactoare termonucleare de fuziune, în care hidrogenul în stare de plasmă se combină, pentru a forma heliu eliberând mari cantități de energie. În miezul reactorului temperatura ajunge la valori de 15.000.000 °C, iar în straturile superficiale ale soarelui, temperatura scade la 6000 °C. Spre comparație, temperatura plasmei utilizate în procesele de sudare și conexe atinge valori cuprinse între 10.000 și 30.000 °C.

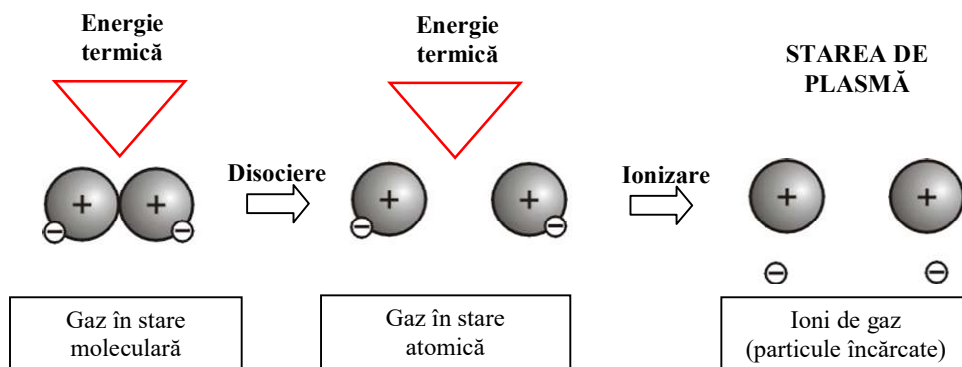


Fig. 3.10. Principiul formării plasmei termice.

Orice gaz dacă primește suficientă energie termică, poate fi adus în stare de plasmă. Astfel, conform figurii 3.10, atomii de gaz se transformă în ioni pozitivi datorită pierderii electronilor de pe stratul de valență, care devin electroni de conducție. Gazul în stare de plasmă conduce curentul electric și este influențat de câmpuri magnetice.



Plasma termică este o stare disociată, ionizată, incandescentă și sub presiune a gazelor, caracterizată prin temperaturi foarte înalte.

Pentru a obține starea de plasmă, un gaz denumit *plasmagen* este constrâns să traverseze coloana unui arc electric, după care este strangulat sub presiune într-un orificiu de secțiune redusă, obținându-se astfel jetul de plasmă.

Temperatura în jetul de plasmă crește odată cu creșterea temperaturii în arcul electric, a presiunii gazului plasmagen, respectiv a constricției acestuia în secțiunea de ieșire. Dispozitivul în care se realizează jetul de plasmă, este denumit generator de plasmă și este prezentat în figura 3.11.

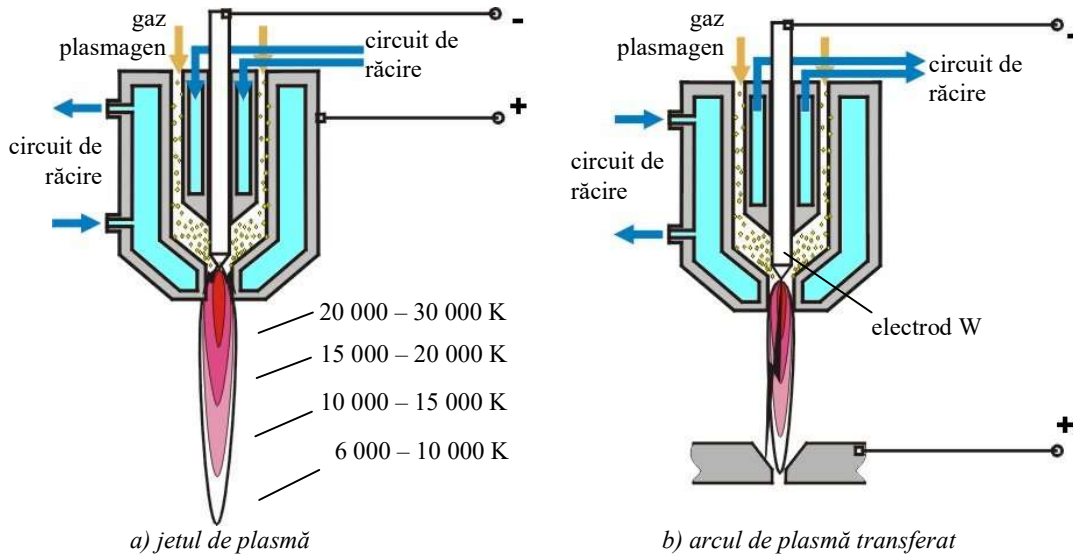


Fig. 3.11 Schema generatorului de plasmă termică.

Conform figurii 3.11, dacă arcul electric se realizează între electrodul de wolfram și ajutorul de cupru al generatorului de plasmă, obținem **jetul de plasmă** prezentat în varianta a), iar dacă arcul electric se realizează între electrodul de wolfram și piesa metalică, se obține **arcul de plasmă transferat** prezentat în varianta b). **Plasma combinată** reprezintă combinarea celor două variante. În ultimii ani s-au dezvoltat o serie de variante îmbunătățite ale generatoarelor de plasmă, în special pentru operațiile de tăiere: cu gaz secundar¹, cu apă², cu injecție radială de apă³, cu perdea de apă⁴, sub apă⁵, cu oxigen⁶, cu injecție de oxigen⁷, sub apă la adâncime mare⁸, cu plasmă de înaltă densitate⁹ etc.

Amorsarea procesului de formare a plasmă se realizează cu ajutorul curenților de înaltă frecvență (1-5 MHz), care generează o serie de descărcări electrice între electrod și pereții interiori ai generatorului de plasmă, preionizând gazul plasmagen. Curentul de alimentare a plasmă menține stabil procesul odată amorsat și asigură energia necesară arcului electric, ce ionizează continuu gazul plasmagen ce curge prin ajutor și care absoarbe o mare cantitate de energie din arcul electric. În contact cu suprafața rece a pieselor metalice, ionii de gaz se recombina cu electronii liberi și cedează sub formă de căldură energia absorbită din arcul electric. Gazele monoatomice au pragul de ionizare mai ridicat, (Ar = 15.8V, He = 24.6V), spre deosebire de gazele biatomice, care au valori mai mici (N₂ = 13.6V, H₂ = 14.6V).

¹ dual flow plasma cutting – lb. eng. (1962)

² water shield plasma cutting – lb. eng. (1965)

³ water injection plasma cutting – lb. eng. (1968)

⁴ water muffler plasma cutting – lb. eng. (1972)

⁵ underwater plasma cutting – lb. eng. (1977)

⁶ oxygen plasma cutting – lb. eng. (1983)

⁷ oxygen injection plasma – lb. eng. (1985)

⁸ deep water plasma cutting – lb. eng. (1990)

⁹ high density plasma cutting – lb. eng. (1990)

Considerând modelul atomic al lui Bohr, energia de legătură a unui electron de pe nivelul energetic n într-un atom cu numărul atomic Z , poate fi aproximată cu relația (3.9):

$$W_e = -13.61 \text{ eV} \cdot \frac{Z^2}{n^2} \quad [\text{eV}] \quad (3.9)$$

Aceasta este valoarea de energie minimă necesară pentru a ioniza atomul de gaz aflat în stare normală. Dacă ionul de gaz și electronul se recombina, această energie este emisă sub formă de radiație electromagnetică, adică este emisă lumină în spectrul vizibil și ultraviolet și produce un efect termic. Practic, în plasma termică se produc o serie de excitări și reveniri la starea de bază a atomilor de gaz, iar pentru a menține procesul stabil este nevoie de o sursă de curent care asigură energia necesară menținerii procesului activ. Gradul de ionizare se poate exprima prin ecuația Saha-Langmuir, relația 3.10, care exprimă dependența dintre starea ionizată a unui gaz de temperatură și presiune. Din această ecuație, se poate observa că gradul de ionizare χ , variază puternic non-linear cu temperatura gazului [13].

$$\frac{\chi^2}{1-\chi^2} = 0.182 \cdot \frac{\sqrt{T^5}}{p} \cdot e^{-\frac{W}{kT}} \quad (3.10)$$

unde :

- χ – grad de ionizare ;
- T – Temperatura gaz (K) ;
- p – presiune gaz ;
- k – constanta Boltzman ;
- W – energia de extracție electroni (eV);

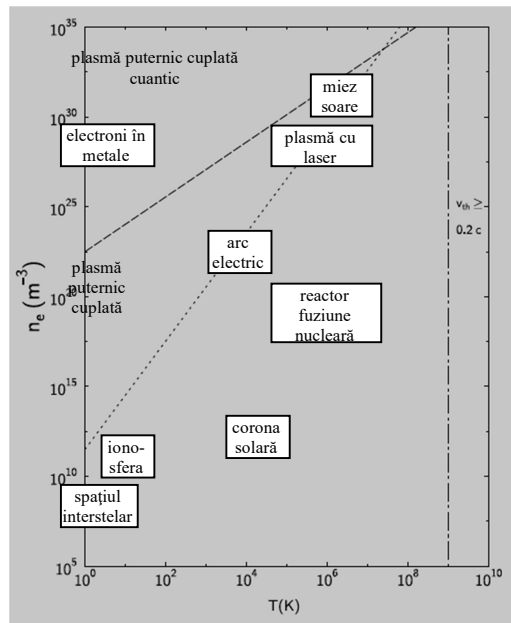


Fig. 3.12 Exemple de plasmă în funcție de densitatea particulelor și temperatură [13].

Cele mai utilizate gaze plasmagen sunt argonul, azotul, heliul, hidrogenul și aerul. Debitul de gaz plasmagen trebuie corelat cu puterea arcului electric care menține plasma stabilă. Alegerea gazului plasmagen depinde de mai mulți factori, cum ar fi: tipul electrodului, entalpia gazului, coeficientul de conductivitate termică a gazului, reactivitatea materialelor sudate și costul gazului. Este important de observat variația rapidă sau gradientul mare de temperatură în jetul de plasmă, atât radial, cât și longitudinal pe axa jetului, aspecte relevate în figura 3.11.



Temperatura maximă în jetul de plasmă depinde de : puterea arcului electric, tipul, debitul și presiunea gazului plasmagen, caracteristicile generatorului de plasmă, mărimea secțiunii de ștrangulare din capul plasmagen.

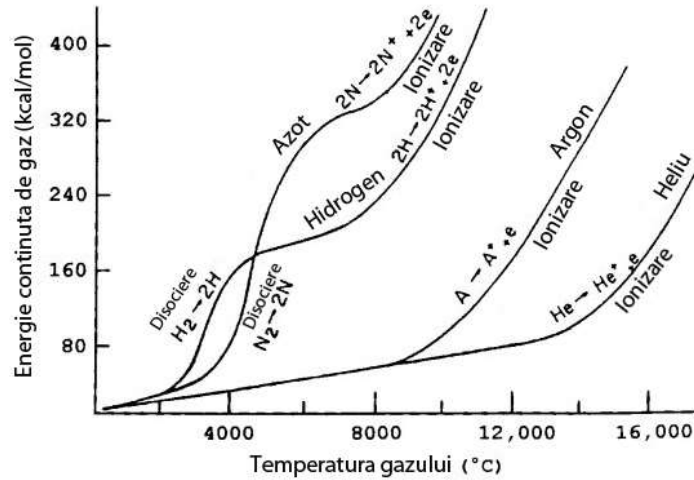


Fig. 3.13 Energia atomilor de gaz în funcție de temperatură [2].

În figura 3.13 este prezentat nivelul de energie din gazele plasmagene uzuale, în funcție de temperatură. Dependența este aproximativ liniară, însă există abateri de la liniaritate produse datorită procesului de ionizare și disociere, marcate prin creșterea energiei absorbite din arcul electric. Gazele monoatomice, precum argonul sau heliul trebuie doar ionizate pentru a intra în starea de plasmă. Gazele moleculare precum azotul, hidrogenul sau oxigenul la început disociază și astfel se înregistrează o creștere a ratei de absorbție a energiei, marcată prin modificarea pantei de pe curbele de variație prezentate în diagrama din figura 3.13. La energii mai ridicate se ionizează și acestea, iar pentru o temperatură dată, entalpia plamei este mai ridicată în cazul gazelor moleculare. Acest lucru va conduce la creșterea randamentului de transfer termic către material.

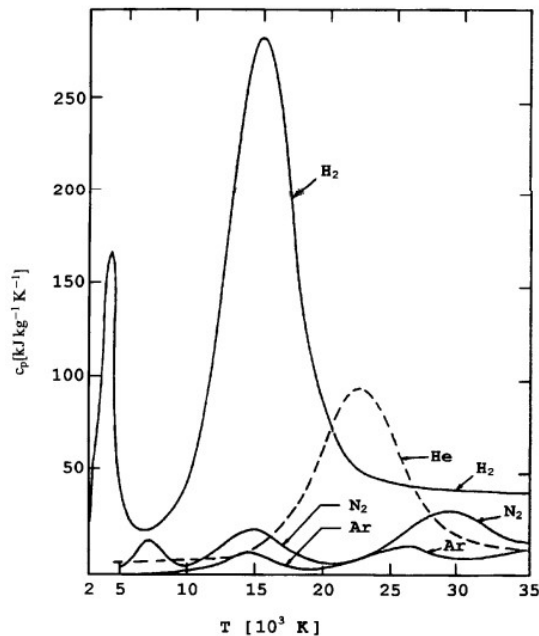


Fig. 3.14 Căldura specifică pentru gazele plasmagene în funcție de temperatură [2].

În figura 3.14 este ilustrată variația căldurii specifice pentru gazele plasmagene uzuale, la presiune constantă și în funcție de temperatură. Valori semnificativ mai mari ale căldurii specifice, pot fi observate în cazul hidrogenului și heliului la temperaturi cuprinse între 15.000 și 20.000°C, adică la temperaturile uzuale din jetul sau arcul de plasmă transferat.

Acum, putem înțelege de ce prezența acestor gaze în atmosfera ionizată conduce la un transfer termic superior, necesar în procese foarte rapide, precum metalizarea termică. Timpul de rezidență a particulelor de pulbere în jetul de plasmă este extrem de scurt, jetul de plasmă este evacuat din capul plasmagen cu viteze foarte mari și atunci transferul termic în jetul de plasmă trebuie să fie foarte eficient și rapid, pentru a asigura topirea parțială a particulelor de pulbere într-un timp extrem de redus.

3.1.3 Fascicolul de electroni

Efectul termic este produs de un fascicol foarte concentrat de electroni accelerați într-un câmp electrostatic de înaltă tensiune, iar la impactul electronilor cu piesa metalică energia lor cinetică este cedată materialului, generând un efect termic important. În punctul de impact se dezvoltă temperaturi ce depășesc 10.000 °C, producându-se vaporizarea locală a metalului de bază.

Formarea fascicolului de electroni începe cu procesul de termoemisie electronică realizat de către un filament de wolfram incandescent, încălzit într-o cameră vidată cu ajutorul unui curent cu intensitate de 3-10 A și cu o tensiune de cca. 5-12 V. Accelerarea electronilor se face cu ajutorul anodului, un cilindru Wehnelt conectat la borna pozitivă a unei surse de curent continuu de înaltă tensiune de 30-200 kV, figura.3.15.

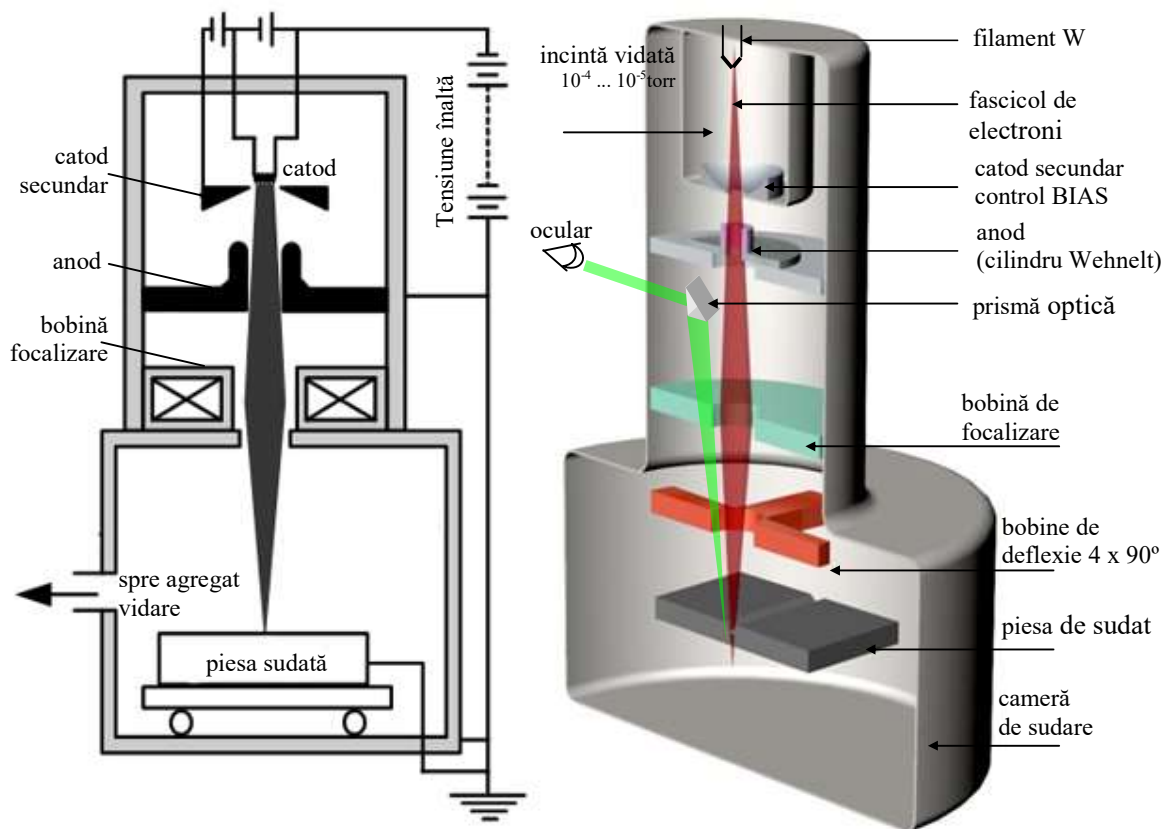


Fig. 3.15 Schema de principiu a unui tun electronic utilizat la sudare cu electroni.

Electronii sunt accelerați la viteze ce ating 60-70% din viteza luminii, relația 3.11, iar controlul fluxului de electroni se face cu ajutorul unui potențial negativ, aplicat pe un catod secundar care acționează ca un element de reglaj, printr-un circuit de control în buclă închisă.

$$V_e = \sqrt{\frac{2e}{m_e} \cdot U_e} \quad [\text{m/s}] \quad (3.11)$$

Fascicolul de electroni este focalizat într-un punct situat pe suprafața metalului de bază unde energia cinetică a acestuia este convertită în energie termică. Focalizarea electronilor se realizează cu ajutorul unei bobine de focalizare, care joacă rolul unei lentile optice, aceștia fiind puternic deviați de câmpurile magnetice. Adâncimea de pătrundere a electronilor în material este foarte redusă, de cca. 20-150 μm , însă prin vaporizarea locală a materialului se creează un efect de tunel prin care fascicolul de electroni pătrunde tot mai adânc în material, până la străpungerea acestuia. Orificiul¹ creat în material se menține pe toată durata sudării și prezintă o înclinație de la normală, datorită vitezei de sudare. Stabilitatea orificiului respectiv este critică pentru procesul de sudare. Suprafața laterală a orificiului keyhole, este formată dintr-un film lichid de metal ce este menținut dinamic și împiedicat să colapseze, datorită vaporilor metalici supraîncălziți la o temperatură de cca. 2500 °C.



Fenomenul de străpungere și sudare pe întreaga grosime a materialului dintr-o singură trecere de către un fascicol concentrat de energie, se numește **sudare în gaură de cheie** în traducere din **key hole welding** (lb.eng.).

Tensiunea superficială acționează în sensul închiderii găurii de cheie, asemenea presiunii hidrostatice ce tinde să producă colapsarea coloanei de metal topit și să închidă gaura de cheie. În sens contrar, acționează presiunea de vapori a metalului vaporizat și eventual gazul din coloana de plasmă în cazul utilizării arcului de plasmă ca sursă termică. Arcul electric exercită o presiune asupra găurii de cheie, contribuind la dinamica procesului, figura 3.16.

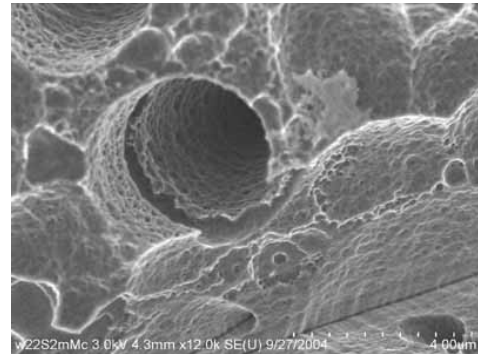
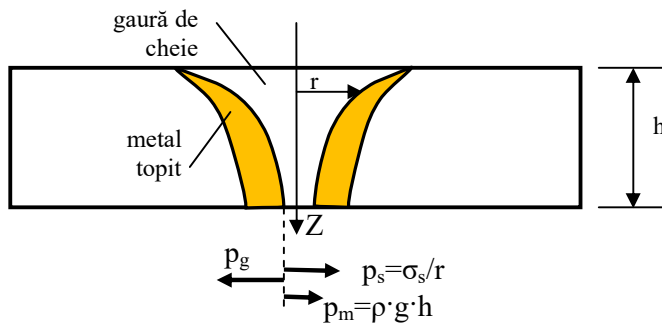


Fig. 3.16 Elemente de presiune ce acționează în gaura de cheie și aspectul microscopic al acesteia, microscopie SEM.



Stabilitatea pereților materialului topit din gaura de cheie depinde de parametrii procesului, care sunt specifici fascicolului de înaltă energie, precum : fascicolul de electroni, laserul, arcul de plasmă sau variante modificate ale acestor procese.

La deplasarea sursei termice, gaura de cheie se va deforma, asemănându-se cu o pâlnie înclinată a cărui unghi depinde de viteza de deplasare a fascicolului de electroni în direcția de sudare, respectiv de curenții de convecție din masa topită de metal, figura 3.17.

¹ keyhole (lb. eng.)

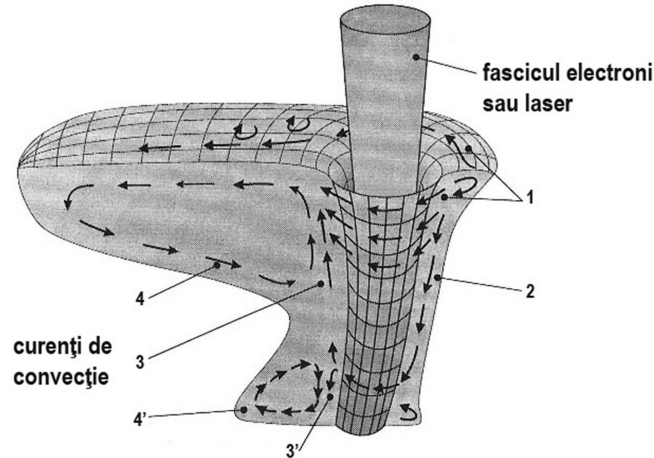


Fig. 3.17 Mișcarea curenților de convecție în metalul topit din gaura de cheie.

Electronii accelerați suferă ciocniri cu moleculele de gaz aflate în calea fascicolului, pierd energie și sunt deviați, manifestându-se un efect de împrăștiere. Acesta este motivul pentru care spațiul de lucru trebuie să fie vidat. În punctul de contact al fascicolului de electroni cu materialul, se produce o excitare în volum a atomilor din material pe o adâncime foarte redusă, fenomenele care se petrec în zona respectivă fiind ilustrate în figura 3.18. Volumul de material excitat depinde de pierderile de energie a electronilor prin ciocniri inelastice și a împrăștierii electronilor datorită ciocnirilor elastice. Adâncimea de pătrundere a electronilor în material depinde de : unghiul de incidență a electronilor, tensiunea de accelerare, densitatea fluxului de electroni și de numărul atomic Z al materialului. Dintre aceștia, tensiunea de accelerare și densitatea fluxului de electroni sunt critice pentru adâncimea de pătrundere a electronilor în material.

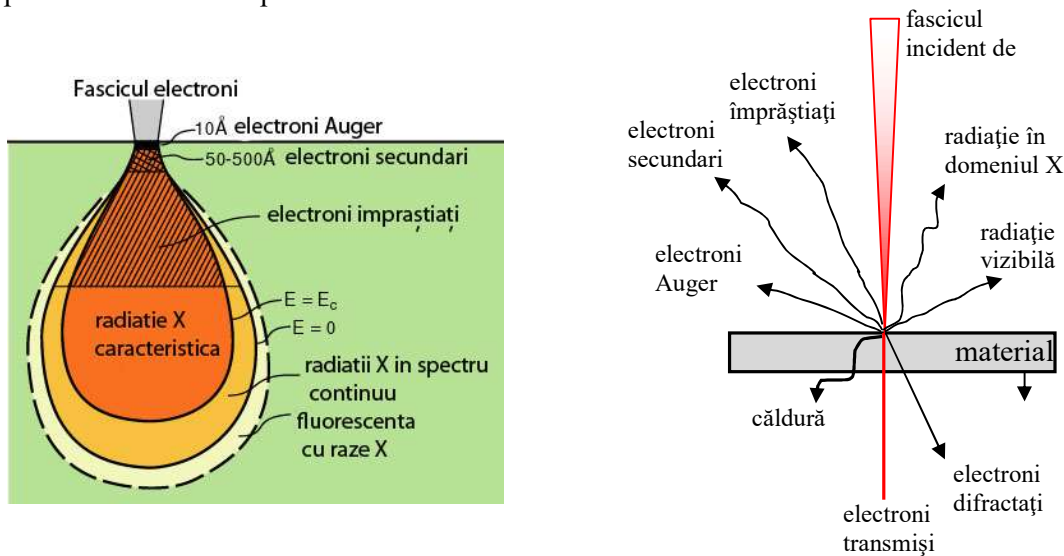


Fig. 3.18 Interacțiunea fascicolului de electroni cu materialul.

Electronii Auger sunt emiși de pe un strat foarte subțire de material, respectiv de câteva plane atomice și au o energie foarte scăzută ce ușor poate fi reabsorbită. Pentru sudare nu prezintă interes, ci doar pentru analizele chimice care se pot efectua asupra materialului, oferind informații asupra distribuției atomilor pe o grosime de câteva plane atomice în grăunții cristalini. Aceste informații sunt extrem de importante mai ales în cazul determinării distribuției impurităților în zona limitelor de grăunți, cu efect major asupra rezistenței la oboseală și asupra rezilienței.

Fenomenul de segregare a impurităților la limita de grăunte este foarte dificil de controlat la sudare și poate afecta semnificativ proprietățile de rezistență ale îmbinărilor sudate. Electronii secundari sunt produși în urma coliziunii electronilor incidenți cu atomii de material care se excită, primesc energie și în acest proces pot pierde unii dintre electronii care se deplasează către suprafața materialului, suferind ciocniri elastice și inelastice, unii dintre aceștia reușind să părăsească suprafața materialului având energie ridicată.

Radiația X caracteristică a fost descoperită de C.Glover Barkla în 1909, pentru care a primit premiul Nobel în 1917. Această radiație se produce când un atom este bombardat cu electroni de înaltă energie și în urma procesului un electron efectuează un salt pe un nivel energetic superior al atomului, lăsând în urma un nivel vacant de energie, un gol. Această stare este instabilă și un electron de pe un nivel superior energetic revine pe golul vacant, în procesul de tranziție a electronului, fiind emis un foton cu o energie egală cu diferența dintre cele două stări energetice ale electronului. Fiecare element are un set unic de nivele energetice și astfel, această tranziție de la un nivel de energie ridicată la un nivel de energie mai joasă, produce radiații X cu frecvențe caracteristice fiecărui element. Dacă în loc să fie emis fotonul cu radiație X caracteristică, este emis un electron cu energie mai joasă, electronul respectiv este de tip Auger, iar efectul se numește **efectul Auger**.

Radiația X continuă se produce când electronii incidenți sunt frânați în mod variabil de câmpurile forțelor electromagnetice din nucleul atomilor cu care interacționează. Datorită tuturor modurilor de interacțiune, radiația X emisă are un interval larg de energii diferite. Această radiație se mai numește *bremstrahlung*, din limba germană și înseamnă "radiație frânată".

Radiația X prin fluorescență se produce când absorbția unei radiații cu energie specifică se finalizează cu un proces de re-emisie a radiației, însă în general la o energie mai scăzută decât cea inițială. Se produce o excitare a atomilor învecinați de material din zona radiației X caracteristice.

Pe lângă procesele de absorbție și emisie de energie în domeniile menționate, materialul absoarbe o cantitate mare de energie eliberată sub formă de căldură prin mecanisme de radiație, conducție și convecție. O parte din energie este consumată pentru vaporizarea atomilor de material, care absorb cantitatea de energie cea mai ridicată din fascicolul de electroni.

3.1.4 Radiația laser

Radiația laser este un fascicol de fotoni de înaltă energie și din acest punct de vedere este asemănător cu fascicolul de electroni. Cu excepția acestei trăsături, radiația laser este complet diferită de fascicolul de electroni, de la modul de formare, la transport, proprietăți și aplicații. Ochiul uman percepe doar o mică parte din spectrul electromagnetic prezentat în figura 3.19, respectiv spectrul vizibil, care corespunde unui interval de lungimi de undă cuprins între 400 nm (violet) și 700 nm (roșu). Lumina în general, este o radiație electromagnetică cu lungimi de undă cuprinse în tot spectrul electromagnetic, omul având însă o percepție limitată.

Diferitele tipuri de radiații electromagnetice se caracterizează prin frecvență ν și lungimea de undă λ , produsul lor fiind egal cu viteza luminii în vid ($c = 299\,792\,458$ m/s). Pentru diferite intervale ale lungimii de undă, așa cum este ilustrat în figura 3.19, lumina se clasifică în : infraroșu, vizibilă, ultravioletă etc. însă trebuie să reținem că toate fac parte din aceeași familie, radiația electromagnetică. Din relația dintre lungimea și frecvența undei, respectiv din faptul că viteza luminii este constantă în vid, rezultă că odată cu scăderea lungimii de undă, energia transportată de undă crește, respectiv este egală cu produsul dintre constanta lui Plank h și frecvența undei ν .

Astfel, la lungimi de undă foarte mici, radiația este puternic ionizantă și prin urmare dăunătoare tuturor formelor de viață cunoscute. Pentru sudare prezintă interes radiația X și Γ (gama), care datorită efectului penetrant în materiale, pot fi folosite în scopul detectării defectelor interioare din material, cusătura sudată sau din ZIT, așa cum vom vedea mai târziu la capitolul destinat defectelor de sudare.

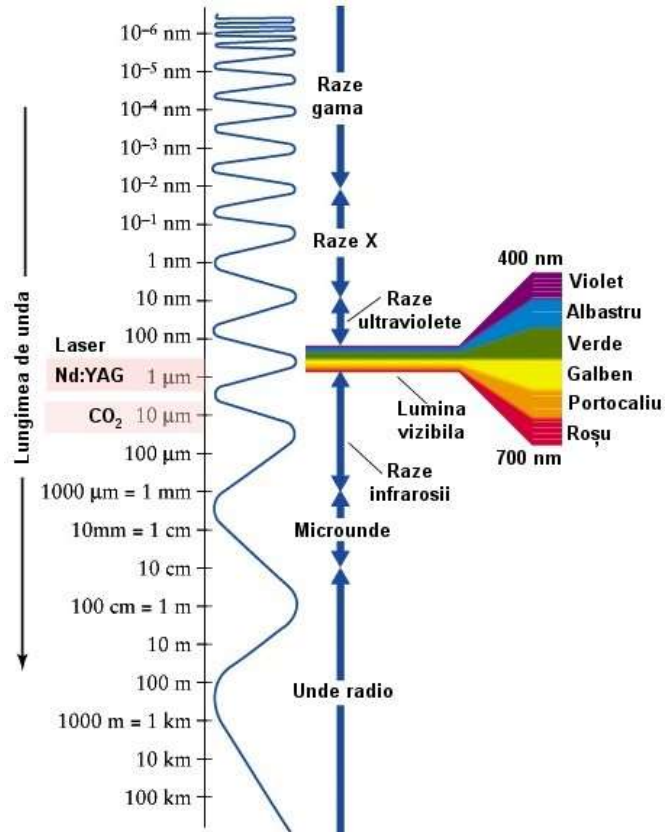


Fig. 3.19. Spectrul electromagnetic al luminii.

Radiația LASER¹ este un fascicol coerent și monocromatic de înaltă densitate energetică obținut într-un oscilator optic prin pompaj optic și care poate fi concentrat pe o lățime egală cu lungimea de undă a radiației. Undele electromagnetice variază în fază și sunt paralele, ceea ce asigură coerența razei laser, chiar pe distanțe foarte mari, spre deosebire de lumina obișnuită, care este divergentă.

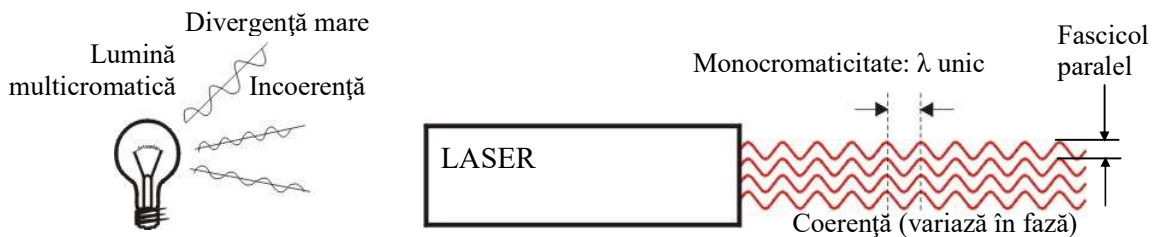


Fig. 3.20. Caracteristicile radiației generate de un bec cu incandescență comparativ cu cele ale radiației laser.

¹ LASER – Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation

Energia absorbită din exterior de către atomii unui material este transmisă electronilor din învelișul electronic, care pot efectua salturi sau tranziții pe nivele energetice superioare, după ce au absorbit o cantitate specifică de energie. Atomii intră într-o stare excitată și la revenirea în starea de bază emit o cantitate de energie, întotdeauna egală cu cea absorbită, sub forma unui **foton**. Această energie este caracteristică elementului chimic a cărui atomi au fost excitați și are asociată o lungime de undă proporțională cu energia eliberată. Fotonii eliberați prin emisie spontană se deplasează în mod aleator prin spațiu cu viteza luminii, având asociată aceeași lungime de undă λ , deoarece la emisia lor s-a eliberat întotdeauna aceeași cantitate discretă de energie.



Fenomenul de revenire la starea inițială a atomului din starea excitată prin emisia unui foton, poartă denumirea de **emisie spontană**.

Dacă un foton trece prin vecinătatea unui electron excitat cu aceeași energie asociată fotonului, se declanșează fenomenul de emisie spontană și electronul excitat efectuează un salt pe un nivel energetic inferior, emițând însă un alt foton cu energia identică cu a primului care se va deplasa în aceeași direcție cu primul foton, având aceeași lungime de undă. Fenomenul se numește **emisie stimulată**.



Fenomenul de emisie a unui foton de către un atom aflat în stare excitată datorită interacțiunii sale cu un alt foton, se numește **emisie stimulată**.

Se produce astfel o amplificare a numărului de fotoni care se deplasează în aceeași direcție, în fază și cu aceeași lungime de undă. Energia transportată de fotonii emiși este proporțională cu frecvența undei electromagnetice asociate fotonilor. În funcție de natura materialului care este excitat pentru emisia fotonilor, laserii pentru sudare sunt de două tipuri:

- laseri cu mediu solid (Nd: YAG) – granat de ytriu și aluminiu dopat cu neodim, figura 3.21;
- laseri cu gaz (CO_2), figura 3.22.

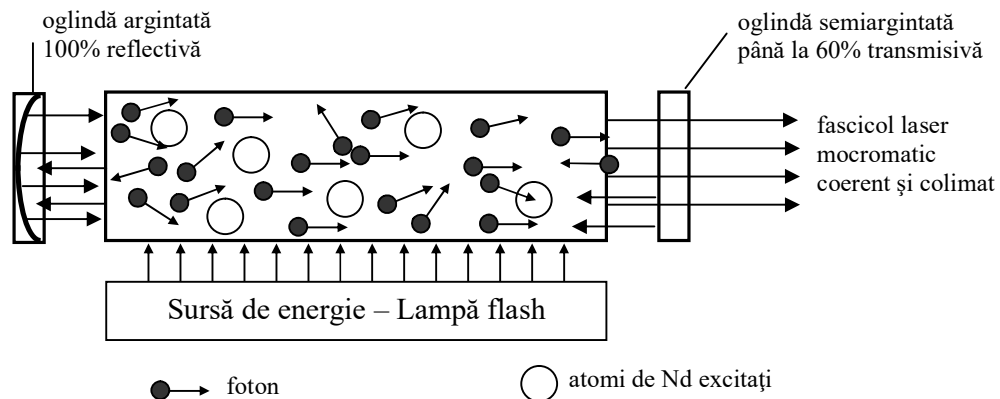


Fig. 3.21. Schema de principiu a unui laser solid cu Nd: YAG ($\lambda = 1.06 \mu\text{m}$).

Radiația electromagnetică este absorbită în mod diferit de materiale, în funcție de caracteristicile materialului (aurul, argintul au un coeficient de reflexie ridicat), iar oțelurile carbon au acest coeficient redus. Prin urmare, anumite aplicații necesită laseri cu frecvențe specifice care să asigure o absorbție ridicată a radiației electromagnetice, pentru a putea dezvolta un efect termic cu randament ridicat.

Cu laser se pot suda o gamă foarte variată de materiale. Prin focalizare într-un punct, energia absorbită poate vaporiza chiar și materialele ceramice. Instalațiile de sudare sunt prevăzute cu sisteme optice rigide (oglinzi, prisme etc.) sau cu elemente optice flexibile (fibra optică), asigurând astfel o flexibilitate foarte mare a procesului, fiind perfect adaptabil automatizării sau robotizării.

O atenție deosebită trebuie acordată sistemului optic, deoarece orice murdărie, praf depus pe suprafețele reflectorizante, modifică coeficientul de reflexie a acestora și poate conduce la deteriorarea lor iremediabilă de către radiația laser. Costul echipamentelor este foarte ridicat, însă se obțin suduri de înaltă calitate și puritate, prin controlul vaporizării selective a unor elemente chimice.

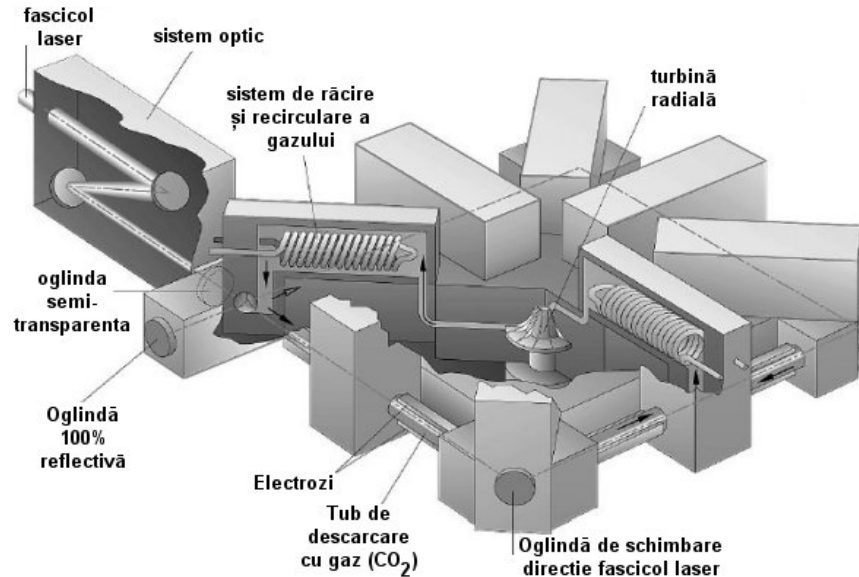


Fig. 3.22. Schema de principiu a unui laser cu CO₂ ($\lambda = 10.6 \mu\text{m}$) [15].

În cazul laserilor cu gaz, puritatea gazului sau a amestecului de gaze reprezintă un factor critic, precum și calitatea sistemelor auxiliare de păstrare și livrare a gazului în instalație. Cele mai dăunătoare impurități sunt vaporii de apă și hidrocarburile. Laserul cu CO₂ utilizează un amestec de gaze ce conține 60-85% He, 13-55 N₂ și 1-9% CO₂ și este utilizat pentru tăiere, sudare și în ingineria suprafețelor. Puterea laserului cu CO₂ poate ajunge până la 50 kW, frecvent fiind utilizați laseri cu puterea cuprinsă între 3-12 kW în industria construcțiilor de autovehicule, la sudarea caroseriilor sau pentru tăierea cu laser.

Puterea laserului cu CO₂ este dată de lungimea tubului de descărcare, respectiv a rezonatorului. O lungime a tubului de descărcare de 1 m, poate furniza o putere de cca. 1 kW. Ca să atingă puteri de zeci de kW, laserii cu CO₂ trebuie să desfășoare o lungime totală a tuburilor de descărcare de zeci de metri. Pentru a realiza o construcție mai compactă a laserului, tuburile de descărcare sunt dispuse după direcții ortogonale pe mai multe nivele, trecerea de la un nivel la altul sau schimbarea direcției razei laser efectuându-se cu ajutorul unor sisteme optice rigide. În timpul procesului de formare a radiației laser, gazul trebuie circulat și reîmprospătat, respectiv este necesară răcirea continuă a acestuia pe toată durata de funcționare a instalației, figura 3.22. În primă fază sunt excitați atomii de gaz N₂ care prin coliziune transferă energia lor moleculelor de gaz CO₂ și care pe urmă revin la starea energetică inițială. Emisia spontană a atomilor de CO₂ eliberează fotoni cu lungimea de undă de 10,6 μm , diferența de energie după tranziția electronului și eliberarea fotonului până la starea energetică normală este eliberată sub formă de căldură.

În acest punct, intervine rolul heliului care este un excelent agent de transfer termic, asigurând preluarea și disiparea căldurii în sistemul de răcire a instalației. În tabelul 3.1 se prezintă comparativ caracteristicile celor două fascicule de înaltă energie : cu electroni și cu fotoni.

Tab.3.1. Principalele diferențe dintre fascicolul de electroni și radiația laser.

Caracteristici	Sudare cu fascicol de electroni	Sudare cu laser
Particula ce transportă energia	electronul	fotonul
Fascicul/rază influențat de câmp magnetic	da	nu
Tipuri de materiale care pot fi sudate	metalice	orice tip
Atmosfera de sudare	vidul	mediul ambiant
Generează radiații X	da	nu
Distanțe parcurse fără pierdere energetică	mici	mari
Flexibilitate de dirijare a fascicolului/razei	redușă	nelimitată

3.1.5 Baia de zgură

În procedeele de sudare se folosesc o serie de fluxuri minerale și ceramice care participă activ la reacțiile metalurgice din procesul de sudare, protejând baia de sudare împotriva contaminării, în special cu oxigenul din mediul ambiant. În stare topită, fluxurile conduc curentul electric caracterizându-se printr-o rezistență electrică mare. Pornind de la această idee, baia de flux topit sau baia de zgură parcursă de un curent electric, dezvoltă prin efect Joule căldura necesară în vederea menținerii băii topite, respectiv pentru a topi metalul de bază și cel de adaos, preluând căldura necesară prin convecție de la baia de zgură.

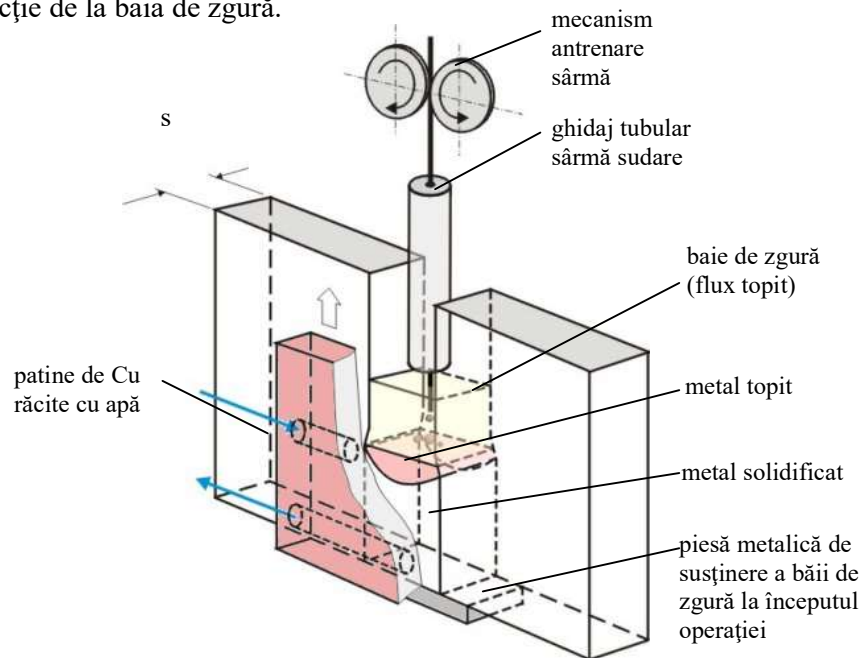


Fig. 3.23. Principiul de sudare în baie de zgură.

Procedeul se caracterizează printr-o rată de depunere foarte înaltă și se aplică exclusiv la sudarea în poziție verticală cap la cap, a unor table de grosime medie și mare ($s > 20$ mm). Durata procesului de sudare este mult redusă față de procedeele convenționale de sudare, figura 3.23.

Temperatura băii de zgură se situează la cca. 2000°C. Pe măsură ce sârma electrod se topește, patinele de cupru răcite cu apă se deplasează în paralel cu baia de zgură în direcție verticală ascendentă. Sârma electrod nu are voie să atingă pereții piesei pentru a nu produce scurt-circuitarea și oprirea procesului. Prin urmare, sârma este izolată electric și ghidată de un tub care se consumă pe măsură ce baia se ridică spre capătul pieselor.

3.1.6 Reacții chimice exoterme

La sudare și în special la procedeele conexe sudării precum: tăierea, lipirea, brazarea sau metalizarea cu flacără se utilizează energia termică eliberată prin reacții chimice exoterme. Arderea gazelor combustibile sau a unor materiale pulverulente asigură necesarul de căldură pentru a topi metalul de bază, respectiv metalul adaos. Prezența oxigenului în amestec cu gazele combustibile mărește considerabil viteza de ardere și ridică foarte mult temperatura flăcării obținute.



Datorită pericolului de producere a unor explozii, incendii etc. se impun reguli stricte de protecția muncii la operațiile de sudare și conexe care utilizează gaze combustibile. **Manipularea și transportul recipientelor sub presiune, făcându-se doar de către personal autorizat și instruit.**

Cele mai frecvente gaze combustibile utilizate în procesele de sudare și conexe sunt acetilena, propanul, metanul, hidrogenul, metilacetilena-propadiena (MAPP) și propilena (gaz petrolifer lichefiat). În tabelul 3.2 sunt prezentate principalele caracteristici ale acestor gaze.

Tab.3.2. Principalele caracteristici ale gazelor combustibile utilizate la sudare.

Gaz combustibil	Temperatura max. flacără [°C]	Raport oxigen/gaz comb.	Distribuția căldurii [kJ/m ³]	
			ardere primară	ardere secundară
Acetilena	3 160	1,2 : 1	18 890	35 882
Propan	2 810	4,3 : 1	10 433	85 325
MAPP	2 927	3,3 : 1	15 445	56 431
Propilenă	2 872	3,7 : 1	16 000	72 000
Hidrogen	2 834	0,42 : 1	-	-
Metan	2 770	1,8 : 1	1 490	35 770

Flacăra oxiacetilenică se formează prin aprinderea amestecului gazos compus din acetilenă și oxigen, la ieșirea din ajutorul arzătorului. În secțiune longitudinală, flacăra oxiacetilenică neutră prezintă trei zone distincte, prezentate în figura 3.24:

- Nucleul luminos;
- Zona de ardere primară;
- Zona de ardere secundară.

Zona I – nucleul luminos a flăcării corespunde disocierii acetilenei și începutul arderii carbonului. Nucleul are forma unei jumătăți de elipsoid de rotație și este delimitat la exterior de un strat de carbon liber incandescent, care produce o luminozitate mărită. În tabelul 3.3 sunt prezentate reacțiile chimice care au loc la arderea acetilenei în funcție de zona caracteristică a flăcării.

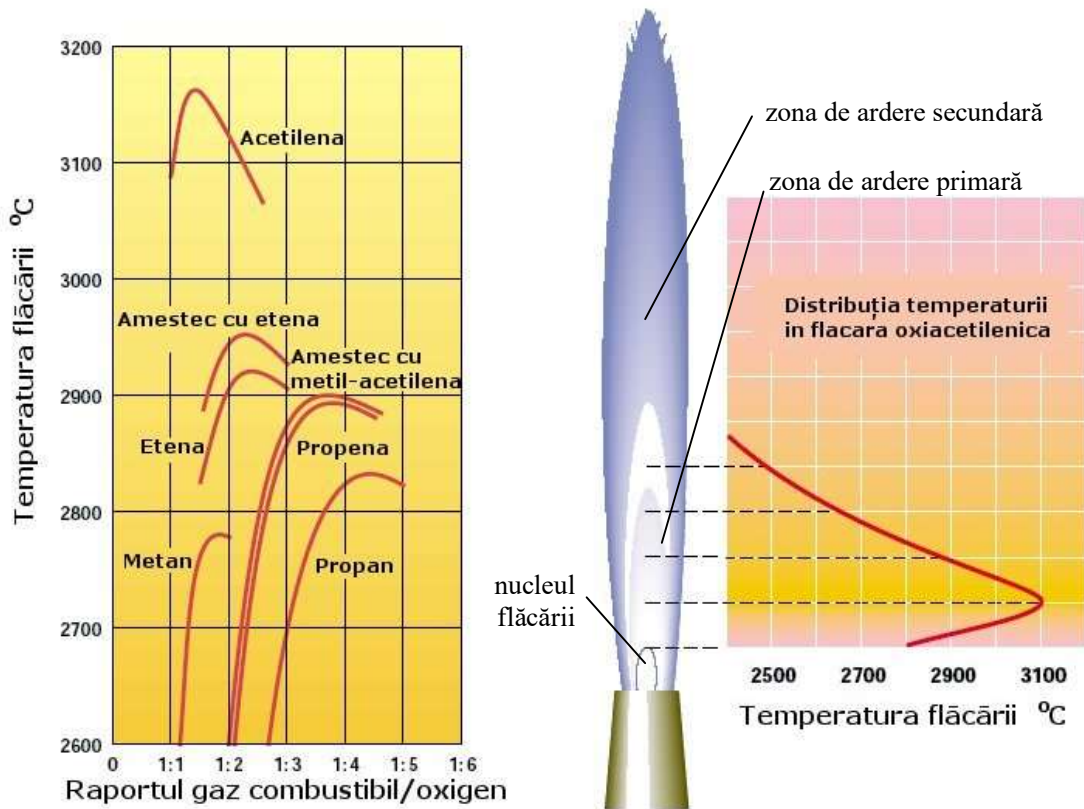


Fig. 3.24. Zonele flăcării oxiacetilenice și distribuția temperaturii pe lungimea flăcării neutre, [23].

Tab.3.3 Reacțiile chimice care au loc la arderea acetilenei.

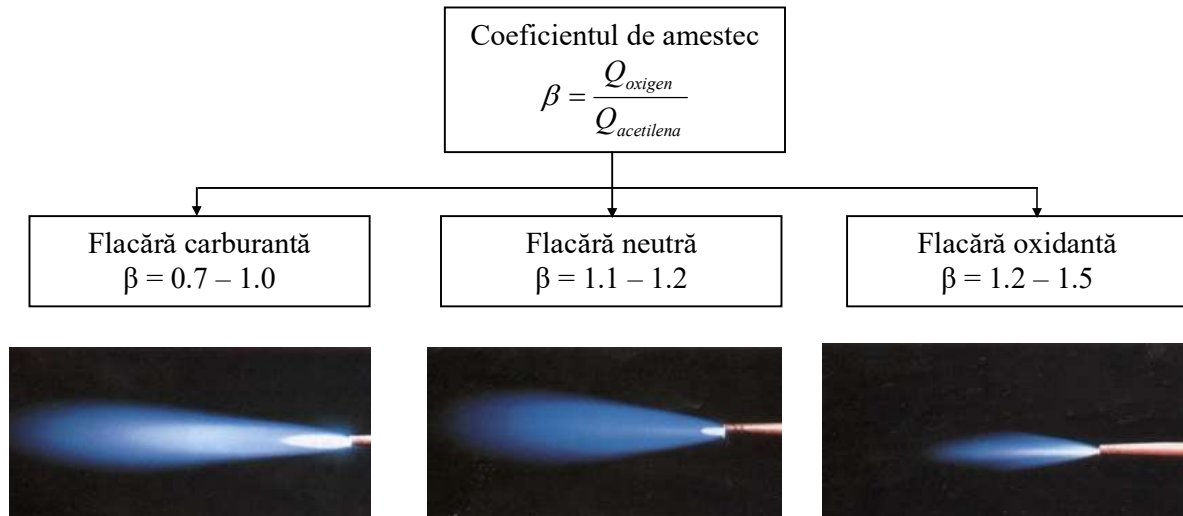
Tipul reacției	Reacția chimică	Zona
Reacția de disociere a acetilenei	$C_2H_2 + O_2 \rightarrow 2C + H_2 + O_2$	Zona I
Reacția de ardere primară	$2C + H_2 + O_2 \rightarrow 2CO + H_2 + 450\,000 \text{ kJ/kmol}$	Zona II
Reacția de ardere complete	$2CO + H_2 + O_2 \rightarrow 2CO_2 + H_2O + 850\,000 \text{ kJ/kmol}$	Zona III

Zona II – are o formă conică ce înfășoară nucleul flăcării (zona I) și se caracterizează printr-o transparență mărită. În această zonă se produce arderea primară cu formarea monoxidului de carbon și degajarea unei importante cantități de căldură, gazele rezultate având caracter chimic reducător. Temperatura maximă apare la cca. 5 – 20 mm față de extremitatea nucleului, în funcție de debitul și puritatea gazelor și variază între 3100-3160°C. Cu toate acestea, randamentul termic al flăcării este foarte redus ($\eta = 0,11 - 0,80$), datorită dispersiei pronunțate a căldurii flăcării.

Zona III – este zona cea mai dezvoltată, având un caracter chimic oxidant și turbulent, datorită pătrunderii unui volum important de aer în flacără, antrenat de straturile superficiale de gaze ejectate cu viteză din arzător. Are loc arderea completă a monoxidului de carbon și a hidrogenului, producții de reacție fiind CO_2 și H_2O sub formă de vapori, ceea ce va conferi flăcării de sudare din această zonă o luminozitate mai mare. Temperatura flăcării din această zonă este mai mică decât cea corespunzătoare arderii primare, datorită schimbului termic mai intens cu mediul înconjurător și datorită dezvoltării mari a flăcării, ceea ce va reduce din concentrarea câmpului termic.



Structura și forma flăcării depinde de raportul volumetric al componentelor amestecului gazos. Se definește **coeficientul de amestec** β , ca fiind raportul dintre debitul de oxigen și cel de acetilenă din amestecul gazos.



Zonele flăcării nu sunt clar delimitate, flacăra este lungă și cu nuanță ușor roșiatică datorită acetilenei în exces. Se utilizează pentru sudarea Al, fontelor, Pb și la încărcarea prin sudare.

Zonele flăcării sunt foarte bine delimitate, flacăra primară are un caracter reducător și se utilizează la sudarea metalelor feroase și neferoase Cu, Zn, Ni etc.

În primele două zone ale flăcării predomină oxigenul care este în exces, flacăra este redusă ca și dimensiuni, arde zgomotos și are o nuanță albastră spre violet. Se utilizează pentru sudarea alamelor și bronzurilor.

Fig. 3.25. Coeficientul de amestec al gazelor de sudare.

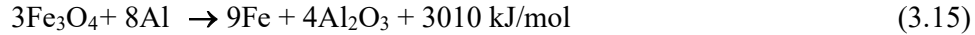
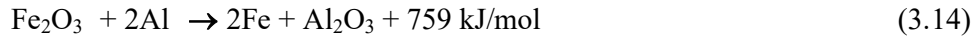
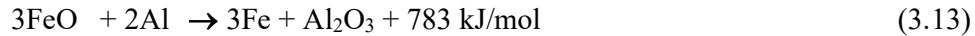
Efectul termic produs prin arderea acetilenei se calculează în funcție de debitul acetilenei Q_a exprimat în (litri/h) și randamentul flăcării, relația 3.12. Randamentul flăcării scade cu creșterea debitului de acetilenă, datorită arderii incomplete și a pierderilor termice în straturile exterioare turbulente ale flăcării.

$$q_{\text{termic}} = \frac{\overbrace{18890}^{\text{kJ/m}^3}}{3600} \cdot \overbrace{Q_a}^{\text{litri/h}} \cdot \eta \quad [\text{J/sec}] \quad (3.12)$$

În relația 3.12 a fost introdusă distribuția căldurii în zona de ardere primară, respectiv valoarea de 18.890 kJ/m^3 care s-a raportat la 3.600 de sec. pentru a obține efectul termic în J/sec. Dacă se dorește efectuarea calculului pentru alt gaz combustibil sau pentru o altă zonă a flăcării, valorile pentru distribuțiile de căldură a celor mai uzuale gaze utilizate la sudare, sunt indicate în tabelul 3.2.

O altă reacție chimică exotermă folosită la sudare este arderea **termitului**. Acesta se utilizează aproape exclusiv, la sudarea cap la cap a șinelor de cale ferată. Reacția mai este cunoscută și sub denumirea de **reacție aluminotermică**. Termitul este un amestec pulverulent format din oxizi de metale fier sau cupru în amestec cu pulbere de aluminiu, de unde provine și denumirea acestuia: termit pe bază de fier sau pe bază de cupru. Termitul este folosit în tehnica militară pentru fabricarea bombelor și grenadelor incendiare, sau pentru demolări controlate.

Prin reacțiile exotermice de ardere a termitului se dezvoltă temperaturi cuprinse între 2500 și 3000°C. Fierul redus aluminotermic rezultă în stare lichidă într-un creuzet, de unde se scurge într-o formă ceramică preîncălzită ce aparține de dispozitivul de sudare. Reacția de ardere este foarte violentă și se amorsează prin aprinderea unei benzi de magneziu¹ deoarece temperatura de aprindere a termitului este înaltă, respectiv de 1550 °C și nu are nevoie de oxigen din atmosferă pentru continuarea reacției de ardere. Odată inițiată, reacția continuă în orice mediu, oxigenul necesar reacțiilor, fiind preluat din oxidul metallic. Reacțiile aluminotermice sunt:



Pulberea de aluminiu este cu cca. 10-15 % în exces față de valorile calculate stoechiometric, particulele având dimensiuni cuprinse între 3 și 500 μm. În amestec se mai pot adăuga și aditivi care au rolul de a facilita separarea zgurei de metalul redus. Termitul utilizat în România conține 7 kg oxid de fier și 2 kg pulbere de aluminiu, iar în urma arderii unei cantități de 1 kg de termit astfel preparat, rezultă cca. 550 gr oțel topit și 450 gr de zgură.

3.2 Aspecte metalurgice la sudarea prin topire

La procedeele de sudare prin topire este necesar să încălzim local materialul de bază până la formarea unei băi de sudare. În ciclul de încălzire-răcire sursa termică se deplasează cu o viteză constantă în direcția de sudare, ceea ce conduce la deplasarea băii de sudare, respectiv a frontului de solidificare în aceeași direcție.

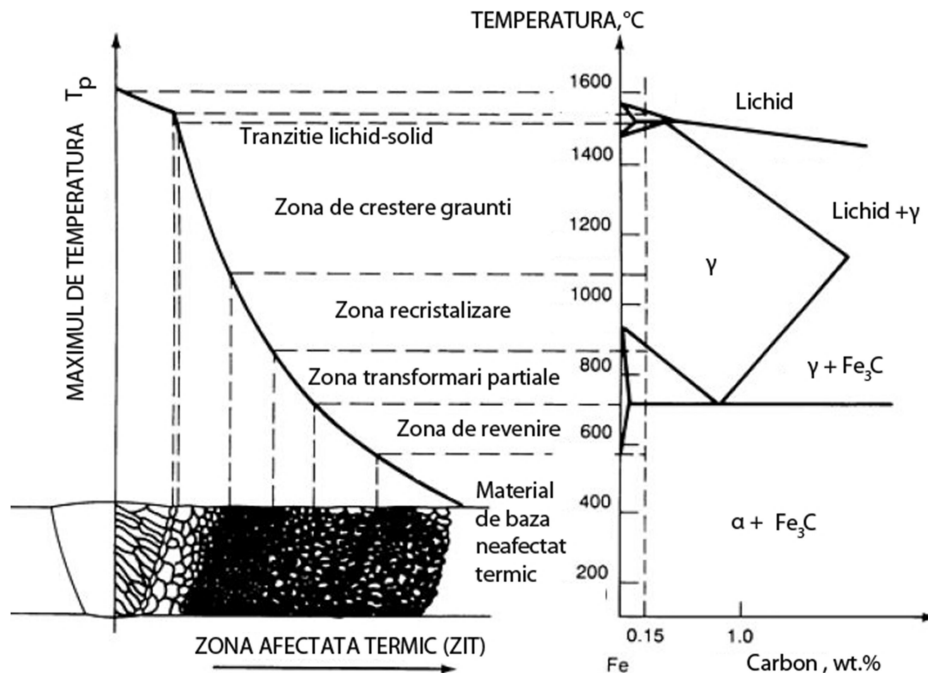


Fig. 3.26 Zonele de transformări structurale la sudarea oțelurilor.

¹ germanul Goldschmidt este inventatorul acestei metode (procedeul de sudare fiind cunoscut și sub numele de metoda Goldschmidt).

În zona cusăturii sudate se petrec o serie de transformări și reacții fizico-chimice, care pentru oțelurile carbon sunt ilustrate în funcție de temperatură în figura 3.26. Reținem că particularitățile microstructurale ale fiecărei zone specifice din zona cusăturii sudate, sunt esențiale pentru comportarea îmbinării sudate în exploatare.

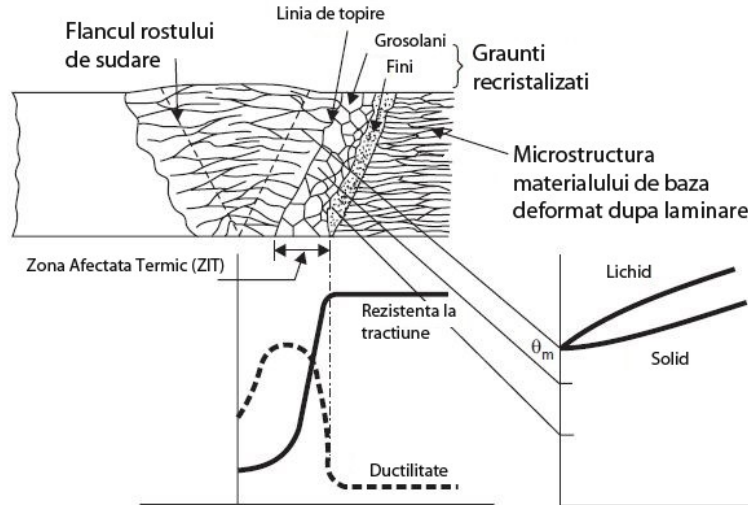


Fig. 3.27 Variația proprietăților mecanice în îmbinarea sudată la oțelurile carbon [9].

Compoziția chimică și microstructura inițială a materialului sudat sunt elemente care vor influența considerabil evoluția proprietăților mecanice din îmbinarea sudată. Starea metalurgică a materialului, distribuția și natura incluziunilor, cantitatea acestora, tratamentul termic sau starea de tensiuni din material, vor juca un rol foarte important la formarea și proprietățile microstructurii îmbinării sudate, așa cum este ilustrat în figura 3.27. În lipsa unor incluziuni care să frâneze fenomenul de creștere a grăunților în zona supraîncălzită, microstructura în ZIT și cusătura sudată va fi formată din grăunți grosolani, cu rezistență mecanică și tenacitate scăzută. Pe măsură ce grăunții cristalini devin mai fini, caracteristicile de rezistență mecanică ale îmbinării cresc.

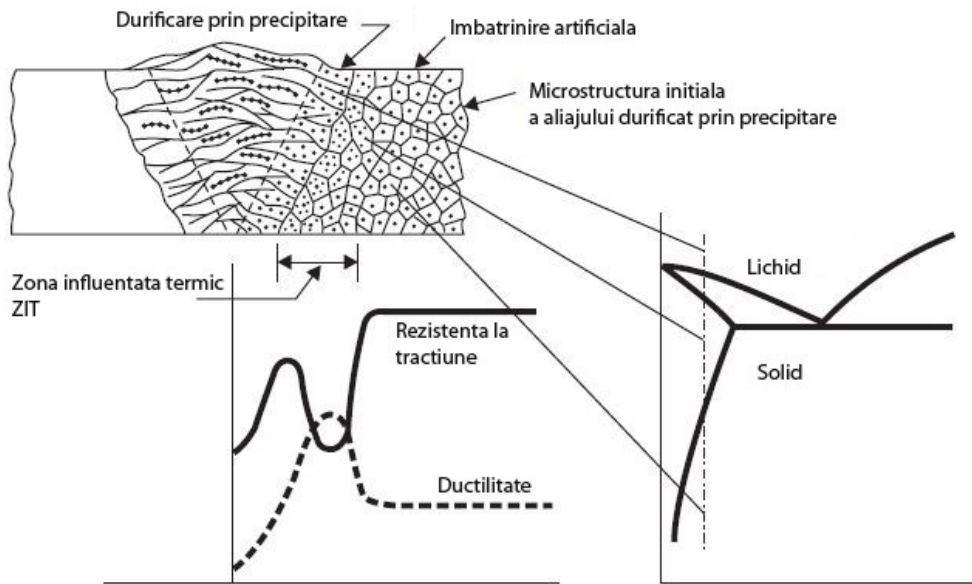


Fig. 3.28 Variația proprietăților mecanice în îmbinarea sudată la materiale durificate prin precipitare [9].

Deoarece conținutul de carbon și alierea este limitată la oțelurile destinate sudării, creșterea rezistenței mecanice este preferabil să se producă prin rafinarea microstructurii în cusătura sudată și ZIT. Acest lucru poate fi realizat printr-o dozare precisă a conținutului de oxigen și a elementelor de microaliere în baia de sudare, precum: Nb, Ti, V sau Al, care formează compuși chimici stabili. La temperaturile înalte din ZIT este stabilizată creșterea grăuntelui de austenită la încălzire și astfel sunt asigurate premisele obținerii unei microstructuri fine cu bune proprietăți mecanice.

Dacă analizăm figura 3.28, observăm o creștere atât a proprietăților mecanice de rezistență, cât și a celor de plasticitate din cusătura sudată. Acest lucru se datorează prezenței precipitatelor care apar în microstructura materialului și care acționează ca și o barieră în calea deplasării dislocațiilor, deoarece se plasează preferențial pe planele de alunecare a matricei metalice.

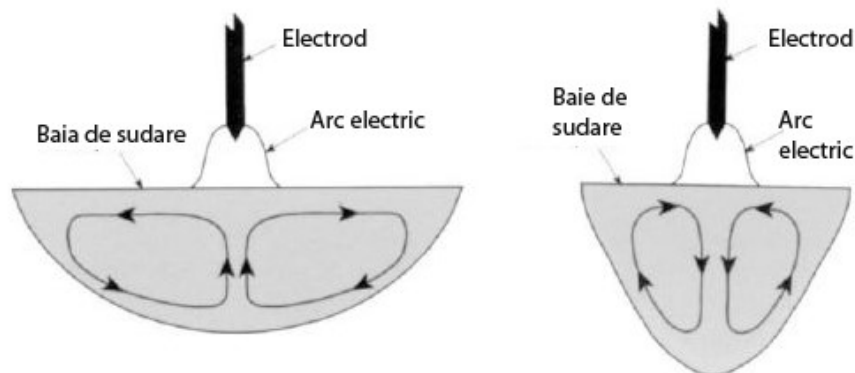


Durificarea prin precipitare se datorează reducerii solubilității unui element chimic dizolvat în soluția solidă, datorită scăderii temperaturii. Cu timpul, soluția solidă suprasaturată evoluează către o stare termodinamică mai stabilă și prin difuzie se elimină elementul dizolvat, care formează o serie de precipitate dispersate foarte fine în matricea metalică. Datorită efectului de durificare decalat în timp, fenomenul se mai numește îmbătrânire.

În cusătura sudată, structura va fi formată de grăunți cristalini puternic alungiți după gradientul de temperatură, factorii esențiali pentru controlul microstructurii sunt: viteza de sudare, transferul termic prin conducție în materialul de bază și timpul t_{8-5} . Sub influența ciclului termic de la sudare, în baia de sudare rezultă un gradient de temperatură și a tensiunii superficiale, ce determină convecția unor curenți de curgere ascendenți/descendenți, denumit **efectul Marangoni** (se mai numește și efect Gibbs-Marangoni). Curenții convectivi antrenează impuritățile fie spre suprafața cusăturii sudate, fie în adâncimea băii de sudare, în funcție de raportul forțelor electromagnetice și a celor datorate gradientului de tensiune superficială, figura 3.29. Efectul Marangoni este activat termic de ciclul termic la sudare și în esență constă în convecția termo-capilară din baia de sudare, datorată gradientului de tensiune superficială.



Fenomenul de convecție poate fi activat și prin adăugarea în baia de sudare a unor elemente active precum oxigenul, sulfurul, borul etc. care pot schimba sensul curenților de convecție, controlând astfel adâncimea de pătrundere a cusăturii sudate.



a) efect forță ascensională

b) efect forță electromagnetică

Fig. 3.29 Efectul forței ascensionale și electromagnetice asupra agitației băii de sudare.

Procesul de germinare din baia de sudare joacă un rol extrem de important asupra procesului de formare a microstructurii în cusătura sudată, figura 3.30. Mai multe centre de cristalizare vor acționa favorabil pentru obținerea unei microstructuri rafinate cu grăunți cristalini fini, care așa cum s-a văzut, sunt o condiție esențială pentru atingerea unor valori ridicate de rezistență mecanică. În etapa nucleației omogene, prezența unor compuși chimici stabili termic la temperatura ridicată, precum Ti_2O_3 sau NbO_2 vor avea o influență majoră. Totuși cantitatea acestora trebuie să fie limitată.

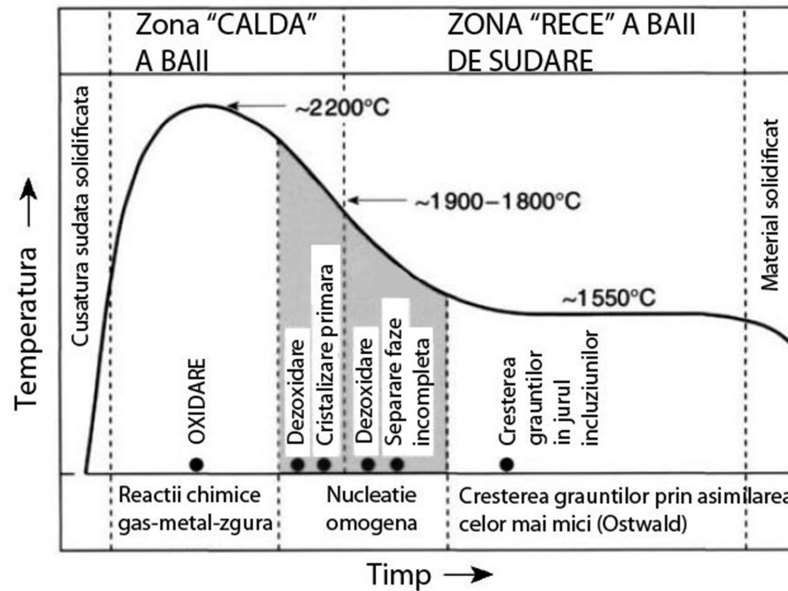


Fig. 3.30 Procesele fizico-chimice din baia de sudare [9].

Studiile efectuate până în prezent, au arătat că conținutul optim de oxigen se situează la cca. 120 ppm, iar cel de titan la cca. 80 ppm. Mici cantități de bor sau vanadiu pot avea o influență asemănătoare, însă peste aceste limite reduc foarte rapid reziliența materialului, iar în general pentru îmbinările sudate această proprietate mecanică este esențială în exploatare.

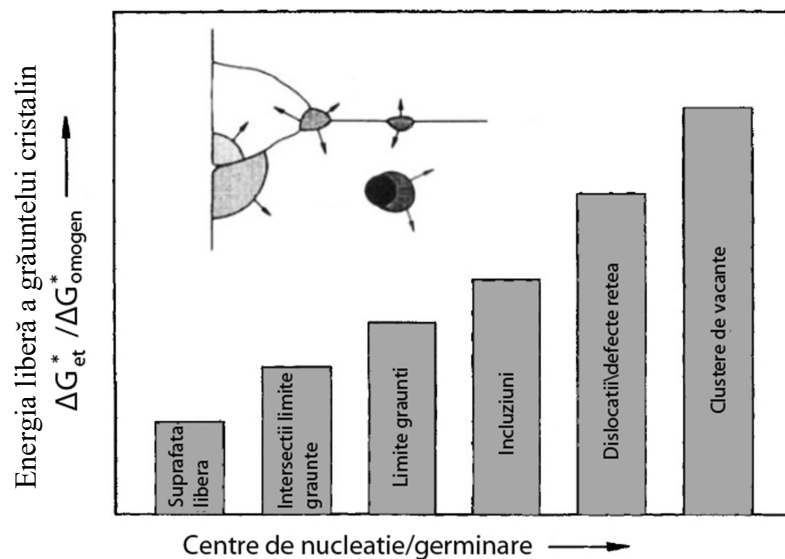


Fig. 3.31 Influența unor elemente microstructurale asupra procesului de germinare [14].

În figura 3.31 este ilustrat efectul pe care anumite elemente microstructurale îl manifestă asupra procesului de germinare din baia de sudură. Energia liberă corespunzător germinării eterogene crește în raport cu defectele din rețeaua cristalină. Pentru obținerea unei microstructuri optime din punct de vedere al caracteristicilor mecanice, trebuie dirijat procesul de sudare prin parametrii tehnologici, respectiv materialul de bază și adaos ales, astfel încât să se obțină o cantitate maximală de ferită aciculară, figura 3.32.

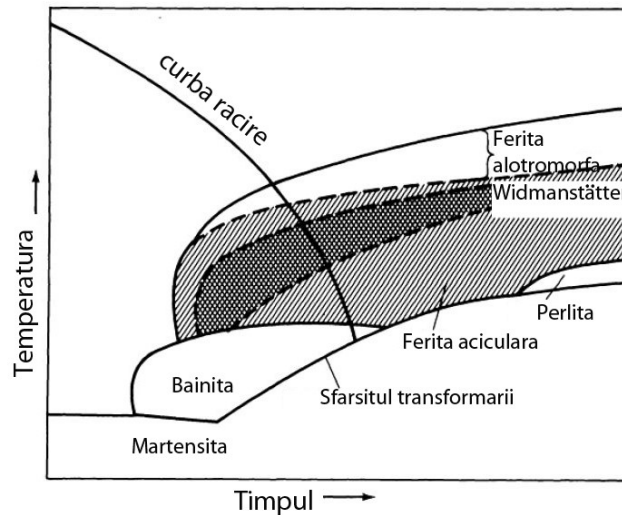


Fig. 3.32 Diagrama TTT la răcire continuă pentru sudarea oțelurilor [14].

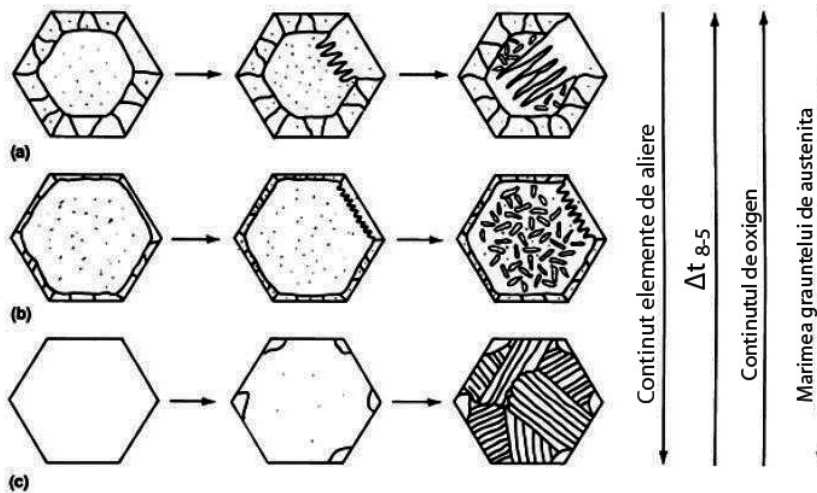


Fig. 3.33 Mecanismul formării microstructurii la cristalizarea băii de sudare și influența unor elemente asupra procesului de formare a feritei aciculare în oțelurile feritice [14].

Acest lucru se dovedește o problemă complicată datorită multitudinii de factori implicați în procesul de cristalizare a băii de sudare. În figura 3.33 este ilustrat mecanismul transformărilor structurale care se produc în cusătura sudată. Secțiunile hexagonale reprezintă secțiuni prin grăunții columnari de austenită. La limita grăunților de austenită apar centrele de nucleație pentru ferita alotromorfă sau proeutectoidă, respectiv ferita care se separă din austenită înaintea reacției eutectoide prin care se formează perlita, amestecul mecanic de ferită și cementită.

- a) Formarea unui strat de ferită alotromorfă este prima etapă din secvența de transformări structurale care urmează. Această transformare se produce prin difuzie și modifică

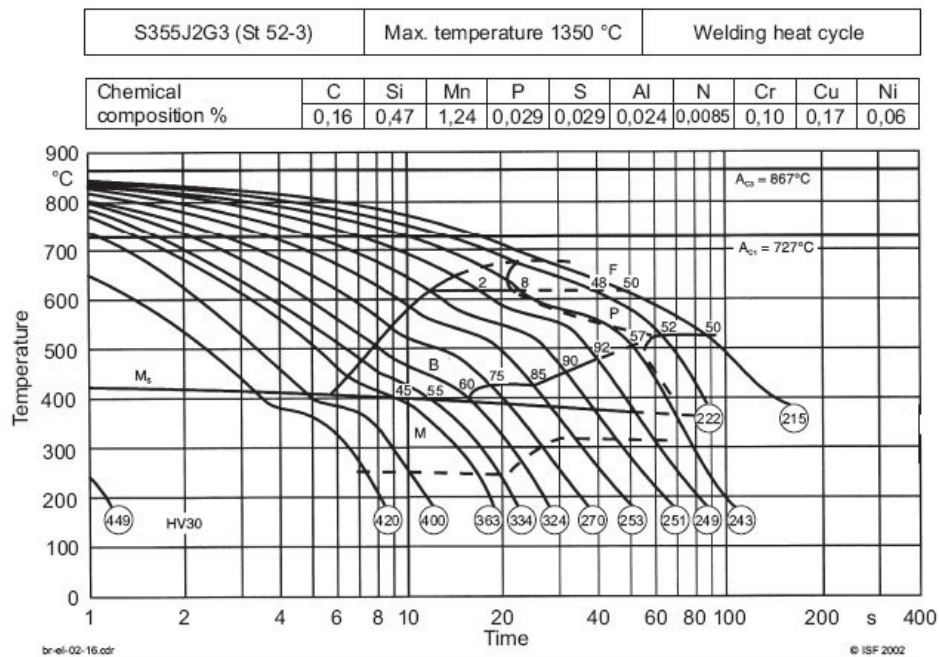
limitele grăunților de austenită din care se separă. Tot la limita grăunților de austenită se produce o transformare fără difuzie, prin care se formează pachete de ferită Widmanstätten, care nu pot depăși limitele grăunților de austenită din care se separă. Aspectul morfologic este sub formă de pachete grosolane aciculare alungite în direcția de creștere. Ferita Widmanstätten este suprasaturată în carbon, deoarece se formează fără difuzie. În această variantă, cantitatea de ferită aciculară este redusă ;

- b) Pentru valori optime ale conținutului elementelor de aliere, ale timpului Δt_{8-5} , a conținutului de oxigen și pentru dimensiuni moderate ale grăunților de austenită, cantitatea de ferită aciculară este maximă. Ferita aciculară este ultima fază care se separă și este în competiție cu formarea feritei Widmanstätten. Trebuie remarcat faptul că este nevoie inițial de formarea unui strat subțire de ferită alotromorfă și o cantitate optimă de incluziuni, care servesc ca și centre de nucleație pentru ferita aciculară ;
- c) La viteze mici de răcire și conținut redus de incluziuni, structura austenitică este grosolană și se produc cantități foarte mici de ferită aciculară, structura fiind mai apropiată de cea de echilibru.

Molibdenul în cantități de până la 0,5% are o influență pozitivă asupra blocării segregăției impurităților la limita de grăunte, fenomen care afectează negativ rezistența la oboseală a oțelurilor, dar și reziliența.

Manganul are un efect pozitiv pentru creșterea rezistenței mecanice și totodată are un puternic efect dezoxidant, motiv pentru care se găsește și în compoziția materialelor de adaos.

Cromul în procente de până la 1,5% are efect pozitiv asupra caracteristicilor mecanice și îmbunătățește comportarea la coroziune a oțelurilor.



**Welding TTT-Diagram
of Steel S355J2G3 (St 52-3)**

Fig. 3.34 Efectul vitezei de răcire asupra structurii și proprietăților mecanice ale materialului din îmbinările sudate [48].

În diagrama TTT din figura 3.34, pentru sudarea oțelului structural S355J2G3 se poate remarca modificarea structurii din cusătura sudată, respectiv creșterea durtății de la valori de 215 HV pentru structuri apropiate de cele de echilibru, la valori ce depășesc 400 HV în cazul vitezelor mari de răcire, ce se corespund unor timpi Δt_{8-5} sub 10 secunde.

Trebuie menționat faptul că diagramele TTT pentru sudare, nu sunt identice cu diagramele TTT cunoscute de la tratamentele termice. Diferențele apar datorită particularităților procesului de sudare, care se deosebesc de condițiile întâlnite la tratamente termice, prin elementele prezentate în tabelul 3.4.

Tab.3.4 Diferențe între diagramele TTT la sudare și tratamente termice.

	Diagrama TTT tratamente termice	Diagrama TTT la sudare	Modificări în diagrama TTT la sudare
Viteza de încălzire	5°C/sec.	300-500°C/sec.	Ridicarea punctului A_{c3} cu cca. 150°C
Temperatura de austenitizare	900°C	Crește până la temperatura solidus 1400-1500°C	Deplasarea transformărilor spre timpi mai lungi
Procesul de răcire	Controlat de convecție	Controlat de fluxul termic din piesă	Δt_{8-5}



Intervalul de timp Δt_{8-5} în care se produce răcirea cusăturii sudate între 800 și 500°C este considerat critic, deoarece în acest interval de timp și temperatură se produc transformările structurale cu efecte majore asupra proprietăților de rezistență mecanică a îmbinărilor sudate.

În final trebuie menționat că o creștere a conținutului de carbon și a elementelor de aliere conduce la scăderea sudabilității oțelurilor, cuantificată prin conținutul de carbon echivalent. Despre aceste lucruri, vom discuta însă mai pe larg în capitolul destinat sudabilității materialelor.

4. PROCEDEE DE SUDARE PRIN TOPIRE

4.1 Sudarea cu arc electric

În capitolul anterior au fost prezentate sursele termice utilizate la procedeele de sudare prin topire. Dintre acestea, arcul electric este una din sursele termice foarte frecvent utilizate la sudarea prin topire a materialelor. În standardul internațional ISO 4063-2011, este reglementată simbolizarea numerică a procedeelelor de sudare și a procedeelelor conexe sudării. În tabelul 4.1 este extrasă simbolizarea numerică pentru procedeele de sudare cu arc electric. În anexele cărții această codificare este prezentată integral.

Tab. 4.1. Codificarea numerică a procedeelelor de sudare cu arc electric, ISO 4063-2011.

1	Sudare cu arc electric
11	Sudarea cu arc electric fără gaz de protecție
111	Sudarea cu electrod învelit
112	Sudarea cu electrod învelit prin procedeul gravity-arc
113	Sudarea cu vergea metalică
114	Sudarea cu electrod din sârmă tubulară și cu miez de flux
115	Sudarea cu sârmă învelită
118	Sudarea prin procedeul firecracker
12	Sudarea sub strat de flux
121	Sudarea sub strat de flux cu electrod de sârmă
122	Sudarea sub strat de flux cu electrod sub formă de bandă
13	Sudarea în atmosferă protectoare
131	Sudarea MIG (Metal Inert Gas)
135	Sudarea MAG (Metal Active Gas)
136	Sudarea cu electrod de sârmă tubulară și miez de flux în atmosferă protectoare activă
14	Sudarea în atmosferă protectoare și cu electrod neconsumabil
141	Sudarea TIG (Tungsten Inert Gas)
149	Sudarea în hidrogen atomic (Atomic-hydrogen welding)
15	Sudarea în arc de plasmă
18	Alte procedee de sudare cu arc electric
181	Sudarea cu electrod de carbon
185	Sudarea cu arc electric rotitor

4.1.1 Sudarea cu electrod învelit

Sudarea cu electrod învelit schematizată în figura 4.1 face parte din grupa procedeelelor de sudare cu arc electric fără gaz de protecție și este codificată conform ISO 4063-2010 cu codul 111, care se indică pe desenele de execuție. Este unul dintre cele mai răspândite procedee de sudare, datorită următoarelor avantaje pe care le prezintă:

- **flexibilitate ridicată**, permite sudarea în orice poziție și se poate aplica la o gamă largă de materiale și grosimi ale elementelor sudate;
- **costul redus** al echipamentului de sudare, întreținere ușoară a echipamentului de sudare, investiții reduse în echipament ;
- **diversitate** mare a materialelor adaos și costuri reduse ale acestora;
- **calitate bună** a îmbinărilor sudate;
- **mănuire** relativ ușoară.

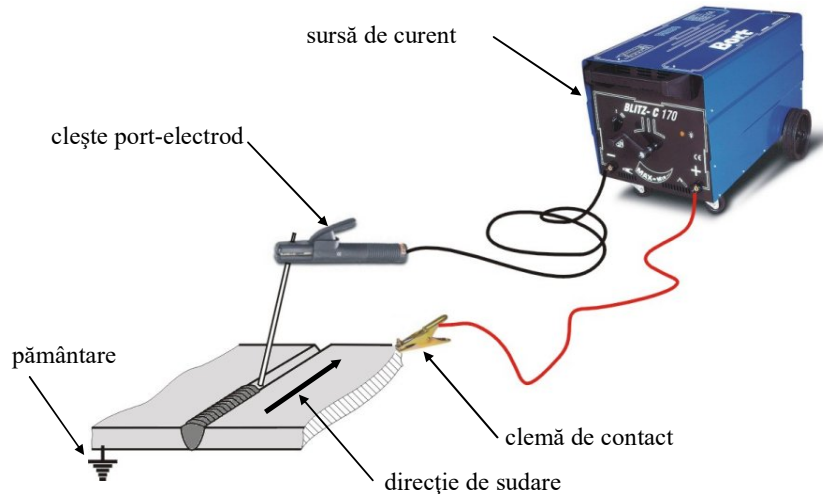


Fig. 4.1. Principiul sudării cu electrod învelit.

Arcul electric se formează între un electrod învelit și metalul de bază, procedeul de sudare fiind manual. Baia de sudare este protejată de gazele produse prin arderea învelișului electrodului și de zgura fluidă care interacționează chimic cu baia de sudare. Totodată, zgura formată în timpul procesului de sudare îndeplinește și un rol de protecție termică, micșorează viteza de răcire a cusăturii sudate, având o influență directă asupra transformărilor structurale din ZIT.

Electrodul de sudare joacă un rol determinant în procedeul de sudare cu electrod învelit. Acesta este compus dintr-o vergea metalică și un înveliș a cărui proprietăți fizico-chimice influențează în mod direct calitatea îmbinării sudate. Învelișul electrodului de sudare îndeplinește o serie de funcții la sudare, după cum urmează:

- **Protejarea băii de sudură** este una dintre cele mai importante funcții ale electrodului învelit. Prin coloana arcului electric, oxigenul și azotul din atmosfera ambiantă pot să pătrundă în baia de sudură care la temperaturi ridicate dizolvă o cantitate importantă de gaze. Odată dizolvate aceste gaze în baia de sudură, participă la o serie de reacții chimice cu metalul de bază, formând oxizi și nitruri care fragilizează metalul depus. Concentrația azotului din baia de sudură este mult mai dificil de controlat, comparativ cu cea a oxigenului care poate fi relativ ușor îndepărtat cu ajutorul unor dezoxidanți corespunzători, cu afinitate mai mare față de oxigen decât față de metalul de bază. Degazarea băii de sudură este foarte importantă, deoarece gazele rămase dizolvate în baia lichidă produc porozitate în metalul depus, cu efecte negative asupra caracteristicilor mecanice ale îmbinării sudate. Sub efectul căldurii radiate de arc electric, învelișul electrodului se topește și prin vaporizarea elementelor gazeifiante se formează o atmosferă de protecție a băii de sudură, prevenind astfel pătrunderea elementelor contaminante din atmosferă în baia de sudare, figura 4.2.
- **Stabilizarea arcului electric**, care odată amorsat prin scurt-circuitare, este menținut stabil chiar și la densități reduse de curent, precum și la variații ale lungimii arcului electric.
- **Concentrarea arcului electric**. Forma coloanei arcului electric influențează profilul și pătrunderea cusăturii în metalul de bază. La vârful electrodului se formează un crater în învelișul electrodului, care concentrează coloana arcului, cu efecte asupra transferului termic dintre arc și materialele sudate.
- **Alierea băii de sudură** – învelișul electrodului poate să conțină o serie de elemente de aliere precum Cr, Ni, Mo, V, Cu care compensează pierderile produse prin ardere și vaporizare. Elementele de aliere **îmbunătățesc caracteristicile mecanice** ale metalului depus.

- **Protecție termică.** Zgura solidificată la suprafața cusăturii asigură o răcire lentă a cusăturii sudate și în ZIT, prevenind formarea structurilor metastabile și reducerea deformațiilor post-sudare.
- **Izolează electric** vergeaua metalică la sudarea în rosturi înguste și adânci, în cazul atingerii accidentale a electrodului cu partea laterală de suprafețele rostului, precum și la protecția sudorului la schimbarea electrodului în cleștele port-electrod.

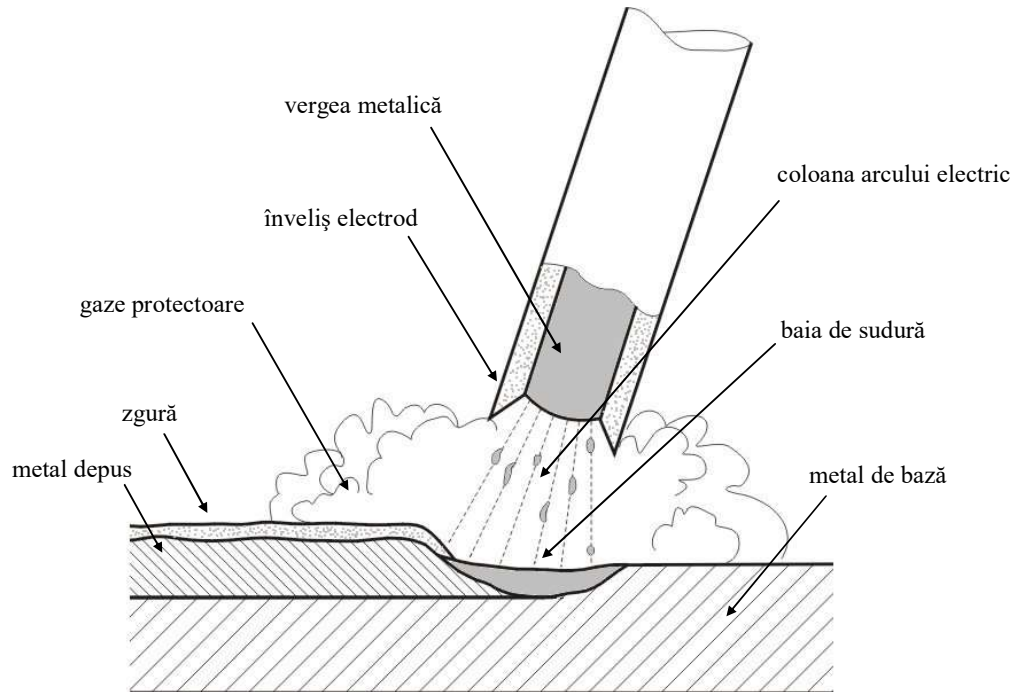


Fig. 4.2. Formarea atmosferei de protecție la sudarea cu electrod înveliș.

Învelișul electrodului de sudare conține șase grupe de elemente caracteristice, prezentate în figura 4.3 care sunt dozate în anumite cantități și granulații, în funcție de tipul și proprietățile cerute pentru electrod. Aceste elemente sunt preparate sub formă de pastă care pe urmă se extrudează peste vergeaua metalică pe mașini speciale de fabricație a electrozilor înveliși de sudare. Învelișul trebuie să fie de grosime uniformă și dispus concentric în raport cu vergeaua metalică și poate conține pulberi de fier, pentru creșterea randamentului de depunere.

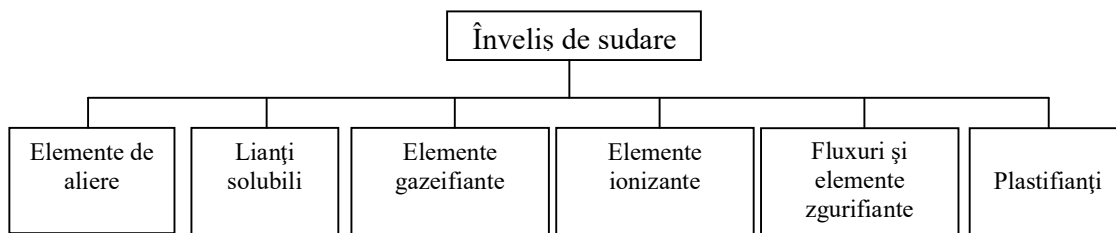


Fig. 4.3. Elementele componente din învelișul electrozilor de sudare.

Lianții se adaugă la compoziția învelișului, pentru a asigura o masă plastică ce poate fi extrudată și care după sinterizare să asigure consistența mecanică necesară manipulării electrozilor de sudare, fără riscul deteriorării mecanice a învelișului. Ca și lianți se folosesc silicați de sodiu și potasiu.

Elementele gazeifiante – sunt o serie de compuși cum ar fi : carbohidrații, hidrații și carbonații de calciu și magneziu. Celuloza $(C_6H_{10}O_5)_n$ este un compus organic ce se formează în plante și arbori printr-un proces de biosinteză fotochimică și care prin ardere degajă o cantitate importantă de gaze CO_2 , CO și vapori de H_2O .

Elementele ionizante – sunt necesare în special la sudarea în curent alternativ, când arc electric se stinge pentru scurte perioade de timp. Prezența acestor elemente (Na_2O , CaO , MgO și TiO_2) în compoziția învelișului, asigură o amorsare ușoară și o stabilitate ridicată a arcului electric.

Fluxurile și elementele zgurifiante sunt formate din : silică - SiO_2 , magnetită - Fe_3O_4 , fluorură de calciu - CaF_2 , dioxidul de mangan - MnO_2 , spineli $FeO.Al_2O_3$. Acestea asigură valorile optime pentru vâscozitate, tensiune superficială și temperatura de topire a zgurei, care absoarbe impuritățile și controlează conturul suprafeței cusăturii sudate, în special la sudurile de colț.

Plastifiantii – au rolul de a asigura proprietățile de curgere a masei extrudate, prin controlul tipului și concentrației lubrefianților adăugați în compoziția învelișului, sodiu și carbonat de potasiu K_2CO_3 .

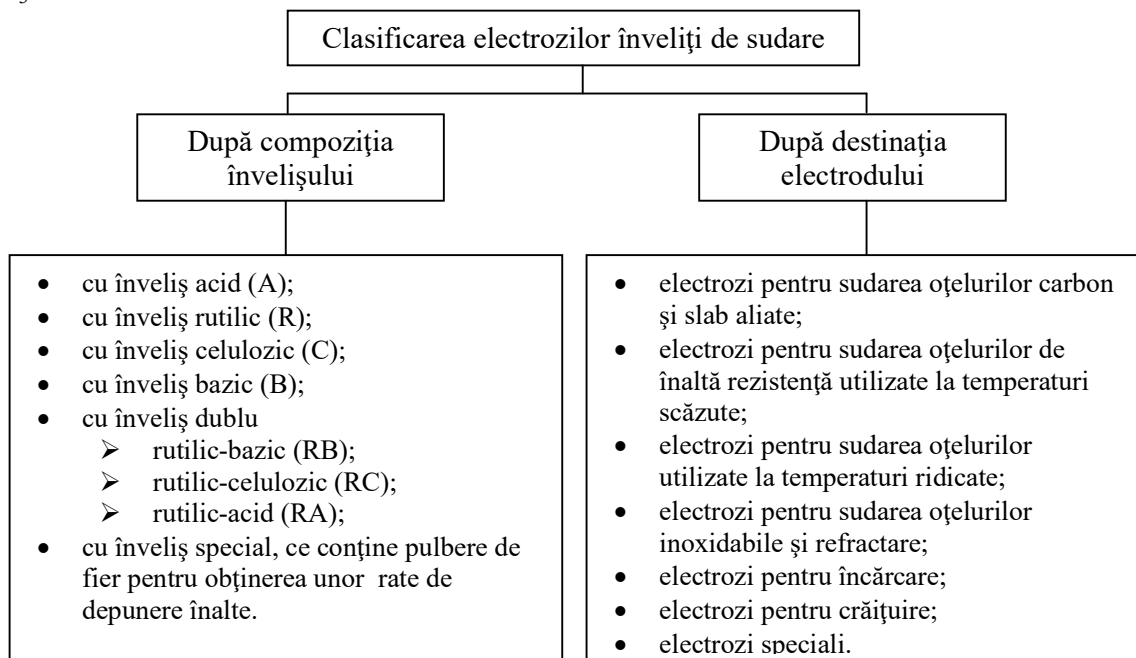


Fig. 4.4. Clasificarea electrozilor înveliți de sudare, conform ISO 2560:2009.

Alegerea unui anumit tip de electrod se efectuează în funcție de: tipul materialului de bază, caracteristicile mecanice dorite pentru metalul depus, poziția de sudare, riscul de fisurare, tipul curentului de sudare continuu sau alternativ, vezi tabelul 4.2, tabelul 4.3 și figura 4.4.

Dacă baia de sudură conține o cantitate ridicată de oxigen, acesta va interacționa cu carbonul din material și va determina formarea de bule de monoxid de carbon (relația 4.1), care rămân captive în materialul cusăturii sudate, generând porozitate. Alți factori importanți ce controlează porozitatea în cusătura sudată, sunt viteza de sudare și cantitatea de energie liniară.



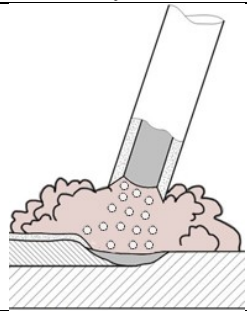
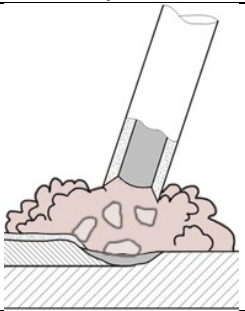
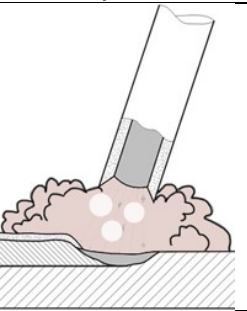
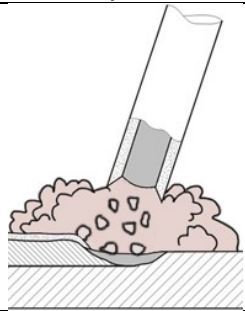
Acest lucru conduce și la reducerea cantității de carbon în materialul depus, cu efecte negative asupra rezistenței mecanice a cusăturii sudate. Pentru a preveni acest efect nedorit, se adaugă în învelișul electrodului elemente dezoxidante, precum Si sau Mn.

Tab. 4.2 Caracteristicile electrozilor de sudare înveliți.

Tipul învelișului	Rată de topire	Fluiditate a băii de sudare	Polaritate curent sudare	Calitatea suprafeței cusăturii	Observații
A (acid)	ridicată	înaltă	directă	foarte bună, netedă și curată	Conține cantități mari de oxid de fier și feromangan. Prezintă risc de fisurare la cald și sunt utilizați mai rar.
B (bazic)	bună	redușă	inversă	bună, convexă	Conțin cantități mari de elemente bazice: CaCO_3 și CaF_2 . Se sudează în cc. ⁺ iar H_2 este 5-15 ml/100g valoarea cea mai redusă dintre toți electrozii. Prezintă riscul cel mai redus la fisurare, iar reziliența materialului din cusătura sudată este maximă.
C (celulozic)	bună	redușă	directă	slabă, cu solzi inegali	Se sudează exclusiv în cc. ⁻ Prezintă conținut mare de H_2 . Se utilizează la sudarea în poziție verticală descendentă.
R (rutilic)	bună	ridicată	directă (alternativ)	bună, netedă	Conținutul de H_2 este de 25-30 ml/100g. Se utilizează la sudarea tablelor subțiri.

În afara celor patru tipuri de bază de electrozi înveliți, se mai produc electrozi cu înveliș dublu care combină proprietățile învelișurilor prezentate în tabel. Astfel, mai sunt electrozi RA cu înveliș rutilic-acid, RB cu înveliș rutilic-bazic, RC cu înveliș rutilic-celulozic și RR cu înveliș rutilic gros.

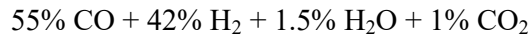
Tab. 4.3 Compoziția învelișului electrozilor de sudare și caracteristicile de rezistență ale cusăturilor sudate.

A - înveliș acid		B - înveliș bazic		C - înveliș celulozic		R - înveliș rutilic	
							
Magnetită	50% Fe_3O_4	Fluorina	45% CaF_2	Celuloză	40% $(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n$	Magnetită	10% Fe_3O_4
Cuarț	20% SiO_2	Cuarț	10% SiO_2	Cuarț	25% SiO_2	Cuarț	20% SiO_2
Piatră de var	10% CaCO_3	Piatră de var	40% CaCO_3	Rutil	20% TiO_2	Rutil	45% TiO_2
Feroaliaj	20% FeMn	Feroaliaj	5% FeMn	Feroaliaj	15% FeMn	Feroaliaj	15% FeMn
						Piatră de var	10% CaCO_3
Interval de solidificare a zgurii mare		Interval de solidificare a zgurii mic		Zgură redusă cu interval de solidificare mic		Interval de solidificare a zgurii mediu	
Dimensiuni fine ale picăturilor de metal		Dimensiuni medii spre mari ale picăturilor de metal		Dimensiuni medii ale picăturilor de metal		Dimensiuni fine spre medii ale picăturilor de metal	
Rezistență mecanică bună a cusăturii sudate		Rezistență mecanică excelentă a cusăturii sudate		Rezistență mecanică bună a cusăturii sudate		Rezistență mecanică bună a cusăturii sudate	

Reacția chimică prin care oxigenul este extras din baia de sudare cu ajutorul siliciului, este prezentată în relația (4.2). Produsul de reacție SiO_2 având o greutate specifică mai redusă decât cea a metalului de bază, se va ridica la suprafața băii de sudare și va participa la formarea zgurii. În mod asemănător, decurge și reacția de dezoxidare cu Mn.



Electrozii celulozici, conțin cantități mari de compuși organici, celuloza $(C_6H_{10}O_5)_n$ depășind 30% greutate din învelișul electrodului. Arderea celulozei în arcul electric produce o cantitate însemnată de gaze, având aproximativ următoarea compoziție:



Prezența hidrogenului în gazele formate la arderea celulozei, mărește tensiunea în arcul de sudare și adâncimea de pătrundere a cusăturii în materialul de bază. Pentru un curent de sudare dat, electrozii celulozici asigură creșterea cu 70% a adâncimii de pătrundere, față de oricare alt tip de electrod. Zgura formată este subțire și ușor de îndepărtat. Datorită conținutului mai ridicat de hidrogen dizolvat în cusătură, nu se recomandă sudarea cu electrozi celulozici a construcțiilor metalice puternic solicitate mecanic. Acest tip de electrozi se utilizează aproape în exclusivitate pentru sudarea în poziție verticală descendentă sau pentru sudarea magistralelor de gaz, petrol, țevi de diametru mare, în care această poziție de sudare nu poate fi evitată.

Electrozii de sudare sunt fabricați la dimensiuni standardizate, astfel că diametrul vergelei metalice poate fi de: 1.6, 2, 2.5, 3.25, 4, 5 și 6 mm, iar lungimea lor de 200, 250, 300, 350 și respectiv de 450 mm. Înainte de utilizare, electrozii înveliși trebuie calcinați (uscați) la o temperatură care, uzual este prescrisă de producător pe ambalaj. Dacă aceste informații lipsesc, atunci calcinarea electrozilor se va face la temperaturi cuprinse între:

- 100 – 150 °C timp de 1-2 h pentru electrozii rutilici sau acizi ;
- 300 – 400 °C timp de 1-2 h pentru electrozii bazici.

În cazul în care calcinarea nu se efectuează sau este incorect realizată, vor apărea dificultăți la amorsarea arcului electric și se va înregistra în cusătura sudată o creștere a conținutului de hidrogen dizolvat și a porozității. Calcinarea electrozilor bazici înainte de utilizare este **obligatorie**.

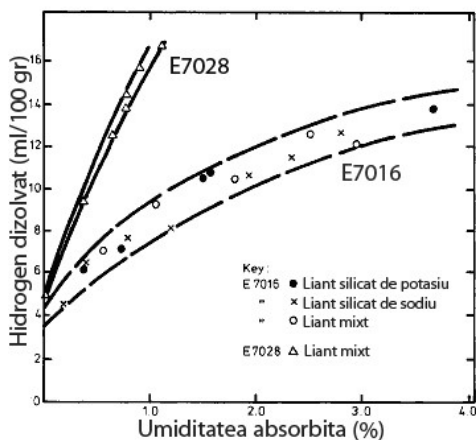


Fig. 4.5. Dependenta dintre cantitatea de H_2 dizolvat în cusătura sudată și umiditatea din învelișul de sudare [9, 40].

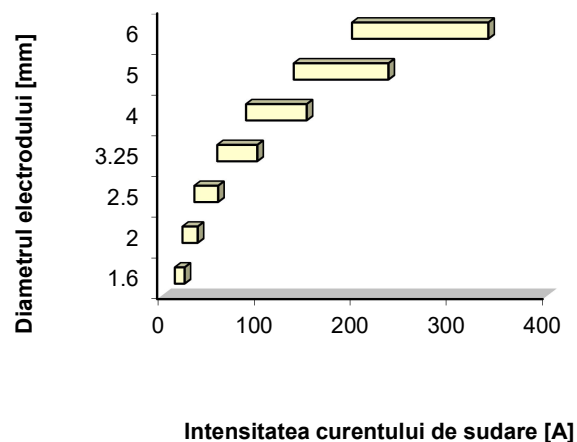


Fig. 4.6. Valorile uzuale ale curentului necesar la sudarea cu electrod învelit. Densitatea de curent cuprinsă între 7-15 A/mm².

Procesul de fisurare la rece a cusăturii sudate este legat direct de conținutul de hidrogen dizolvat în cusătura sudată. Principala sursă de proveniență a hidrogenului în baia metalică este umiditatea provenită din învelișul electrozilor de sudare. Învelișul electrozilor este higroscopic, adică prezintă o absorbție a umezelii din aer, în funcție de umiditatea relativă a mediului, timpul de expunere și componentele din înveliș, în special lianții aspect relevat în figura 4.5.

Se recomandă setarea curentului de sudare conform indicațiilor imprimare de către producătorul electrodului pe ambalajul de livrare, însă valorile limită se pot calcula considerând valoarea densității de curent cuprinsă între 7 și 15 A/mm², conform figurii 4.6. La sudarea în poziție verticală sau de plafon, curentul de sudare se va micșora cu cca. 15-25 % față de valorile recomandate la sudarea în poziție orizontală.

Un calcul rapid al curentului de sudare se poate face în funcție de diametrul electrodului de sudare și de calitatea metalului de bază. Astfel, pentru sudarea oțelurilor carbon: $I_s = 40 \cdot d_e$ iar pentru sudarea oțelurilor aliate $I_s = 30 \cdot d_e$ [A]. Sudarea cu un curent de intensitate prea mică conduce la instabilitatea arcului electric și la apariția unor defecte de sudare precum lipsa de pătrundere și lipsa de topire, iar valorile prea mari ale intensității curentului electric produc o stropire excesivă, pierderi prin vaporizare a unor elemente de aliere și porozitate în metalul depus.



Tensiunea curentului de sudare este un parametru care controlează aspectul cusăturii sudate. Valori mai ridicate ale tensiunii de sudare conduce la **creșterea lățimii cusăturii**, reducerea **adâncimii de pătrundere** și a **supraînălțării** cusăturii sudate. Crește fenomenul de stropire.

Tab. 4.4 Principalele caracteristici ale sudării cu electrod învelit.

Parametrul	Domeniul de valori
Diametrul electrodului	1.6 - 6 mm
Curentul de sudare	25 - 400 A
Densitatea de curent	7 - 15 A/mm ²
Tensiunea arcului electric	15 - 30 V
Viteza de sudare	6 - 20 cm/min
Rata de depunere	1.8 - 5.4 kg/h
Grad de diluție	15 - 20 %

Aspectul economic al operațiilor de sudare reprezintă un interes deosebit, datorită impactului ridicat al acestora asupra costurilor de producție. Cantitățile de material adaos și auxiliare necesare în procesele de sudare se calculează cu ajutorul indicatorilor de consum și de productivitate. Calculul economic constă în determinarea costurilor legate de material, energie și manoperă pentru realizarea unui metru liniar de cusătură sudată. Astfel, se pot întocmi devize de calcul detaliate la realizarea unei construcții sudate.

Se definesc randamentul nominal R_N , randamentul global R_G și coeficientul de depunere D prin relațiile (4.3) - (4.5), unde M_{md} = masa metalului depus, M_v = masa vergelei metalice, M_{ec} = masa electrodului consumat, iar τ = timpul de sudare.

$$R_N = \frac{M_{md}}{M_v} \cdot 100 \% \quad (4.3)$$

$$R_G = \frac{M_{md}}{M_{ec}} \cdot 100 \% \quad (4.4)$$

$$D = \frac{M_{md}}{I_s \cdot \tau} \quad (\text{g/A} \cdot \text{s}) \quad (4.5)$$

Valorile uzuale pentru randamentul nominal R_N se încadrează între 75 și 90%, dar pentru electrozii cu înveliș ce conțin pulberi de fier randamentul nominal poate ajunge între 100 și 200%, datorită aportului de material din învelișul de sudare.

Datorită avantajelor pe care le prezintă, procedeul de sudare cu electrod învelit se utilizează cu precădere în lucrări de întreținere, reparații și construcții metalice, în special în ateliere mici de confecții metalice. Calitatea îmbinării sudate depinde esențial de calificarea și îndemnarea sudorului, iar productivitatea este relativ scăzută, comparativ cu procedeele de sudare semi-mecanizate, automatizate sau robotizate.

La sudarea în curent continuu este posibilă apariția fenomenului de deviere a arcului electric datorită interacțiunii câmpurilor magnetice din jurul piesei sudate, arcului electric și a clemei de contact. Arcul electric se comportă ca și un conductor electric și generează un câmp propriu de inducție magnetică în jurul acestuia, proporțional cu valoarea intensității curentului electric. În mod similar, toate elementele parcurse de curent induc câmpuri magnetice care interacționează între ele.

Devierea arcului de sudare, figura 4.7, este un fenomen nedorit, deoarece reduce pătrunderea în metalul de bază și poate conduce la apariția unor defecte de sudare. Efectul termic este direcționat către piesă în mod diferit, fiind posibilă topirea asimetrică a rosturilor de sudare sau chiar lipsa de topire. Fenomenul este mai pronunțat la capetele îmbinărilor sudate, în vecinătatea clemei de contact, precum și la sudarea muchiilor rosturilor teșite. Dacă metalul de bază este feromagnetic (Fe, Ni, Co), arcul este deviat spre interiorul piesei, iar la sudarea metalelor paramagnetice (Al, Cu) devierea arcului se produce în afara piesei. Prezența unor mase metalice în vecinătatea cusăturii, poate modifica deasemenea forma liniilor de câmp magnetic și în consecință devierea arcului.

Pentru atenuarea efectului devierii magnetice, se recomandă următoarele măsuri:

- sudarea cu arc scurt;
- utilizarea electrozilor cu înveliș gros;
- înclinarea electrodului în sens opus devierii magnetice ;
- aplicarea de contacte mobile la piesă ;
- sudarea în curent alternativ.

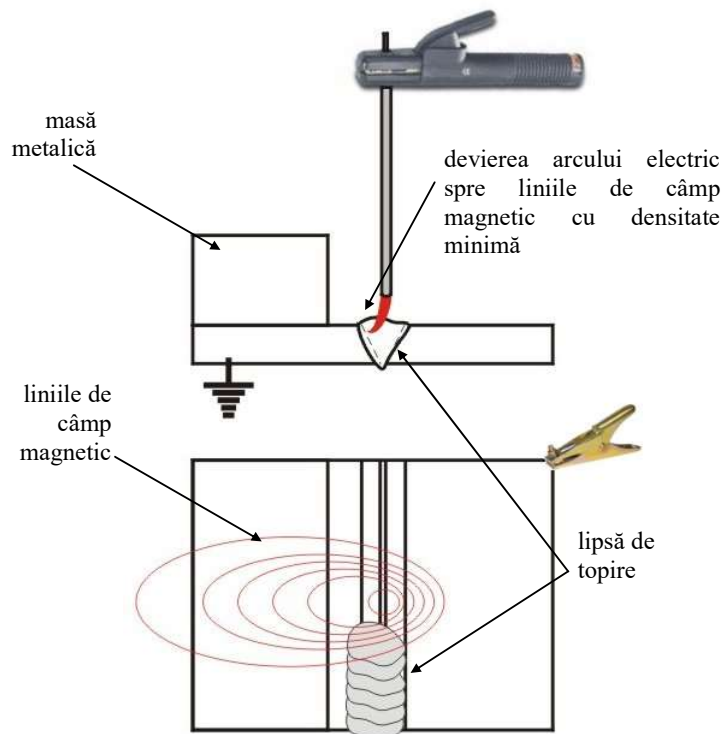


Fig. 4.7. Deviarea arcului electric.

Datorită distribuției asimetrice a liniilor de câmp magnetic în jurul piesei, arcul de sudare va fi deviat întotdeauna spre zone cu densitate mai redusă a liniilor de câmp magnetic, care întotdeauna sunt linii închise. Prin urmare, la capetele pieselor sudate apare o densitate mărită a liniilor de câmp magnetic sau în zonele unde se produc variații de secțiune, grosime etc.



Devierea arcului afectează mecanismul de transfer a materialului depus, picăturile topite de metal sunt deviate de la direcția inițială și pot cădea în zone alăturate băii de sudare, provocând defecte de sudare, precum stropirea.

La amorsarea arcului electric, figura 4.8, intensitatea curentului de sudare crește brusc, producând topirea capătului electrodului de sudare, care în momentul următor trebuie retras față de suprafața piesei, la o distanță aproximativ egală cu valoarea diametrului electrodului. Sudorul experimentat recunoaște această distanță după sunetul produs de arcul electric, care este uniform și ascuțit.

a) prin mișcare tangențială

b) prin lovire de suprafața piesei

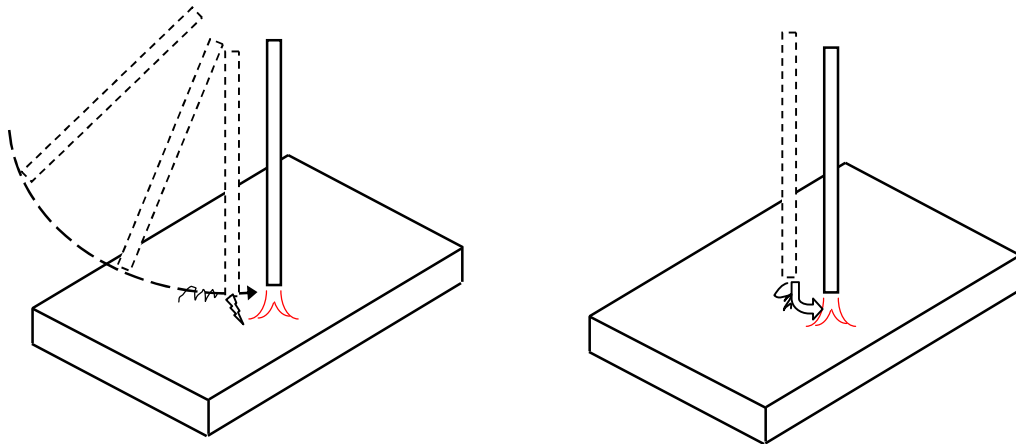


Fig. 4.8. Amorsarea arcului electric la sudarea cu electrod învelit.

O distanță prea mică produce un zgomot înfundat și mai moale, iar o distanță prea mare produce un zgomot dur cu intermitențe. Sudarea cu o lungime a arcului nepotrivită conduce la apariția unor defecte de sudare, creștături marginale, porozitate, lipsă de topire sau de pătrundere etc. Amorsarea arcului electric se face prin scurt-circuitarea electrodului de piesă, fie printr-o mișcare tangențială la suprafața piesei, fie prin lovire directă și retragerea electrodului după stabilirea arcului electric, așa cum este ilustrat în figura 4.8.

După realizarea contactului electrodului cu piesa metalică este posibilă apariția fenomenului de sudare a electrodului de piesă, caz în care trebuie efectuată o manevră de desprindere a acestuia prin mișcări laterale alternante, sau dacă manevra nu reușește se eliberează electrodul din cleștele port-electrod. Acest fenomen se datorează retragerii prea lente sau insuficiente a electrodului de piesa metalică și are ca și efect stingerea arcului electric și scurt-circuitarea sursei. Aceasta trebuie protejată imediat, prin manevrele de desprindere a electrodului descrise anterior. O altă cauză posibilă pentru acest fenomen este uscarea insuficientă a electrozilor înainte de utilizare, în special la electrozii bazici care prezintă o sensibilitate mărită la umezeala higroscopică.

Imediat după amorsarea arcului electric, la suprafața piesei se produce un crater care trebuie acoperit prin menținerea electrodului câteva momente deasupra acestei zone. Pe măsură ce electrodul de sudare se consumă este nevoie de o mișcare de apropiere a acestuia de piesa metalică pentru a menține lungimea arcului constantă. Simultan cu această mișcare trebuie asigurată o mișcare de avans constantă în lungul rostului de sudare, combinată cu mișcări pendulare care au menirea de a asigura o lățime adecvată a cusăturii sudate.

Prin urmare, după combinarea acestor mișcări rezultă o mișcare complexă de avans a electrodului care poate să urmeze o serie de traiectorii ilustrate în figura 4.9. Echipamentul de sudare este în general simplu, robust, ieftin și poate fi unul dintre variantele prezentate în figura 4.10.

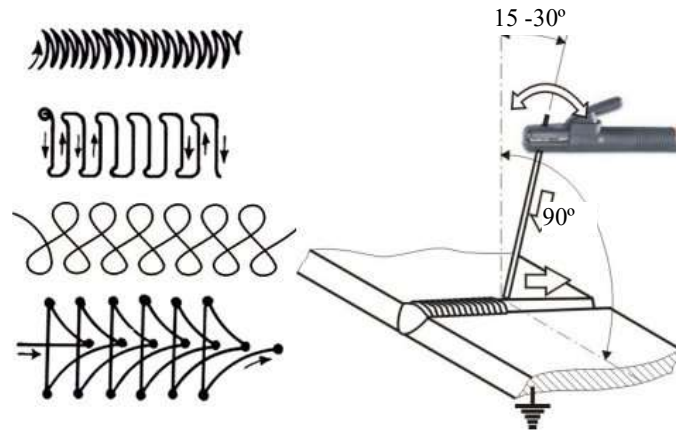


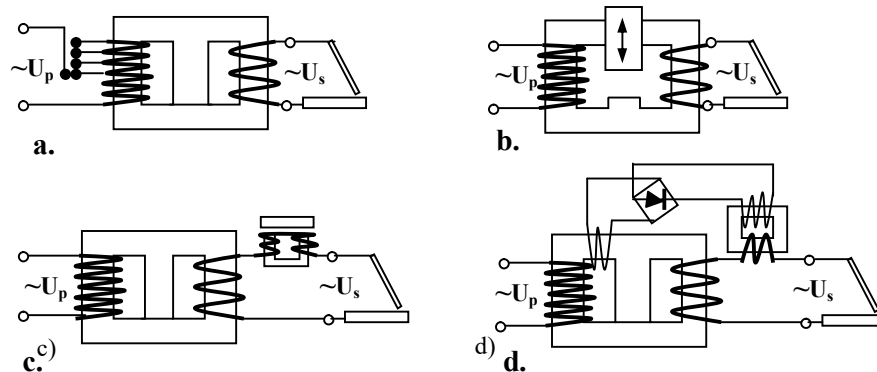
Fig. 4.9. Mișcările electrodului de sudare la sudarea cu electrod învelit.



Fig. 4.10. Tipuri de surse de curent utilizate la sudarea cu electrod învelit.

Transformatorul de sudură, figura 4.11, se compune dintr-un transformator, un drosel de defazaj și dispozitivul de reglare a curentului de sudare care poate fi:

- prin schimbarea numărului de spire din înfășurarea primară ;
- prin modificarea poziției miezului de fier mobil ;
- prin comanda unei bobine de reacție tip drosel, legată în serie cu înfășurarea secundară;
- prin comanda unui transductor alimentat cu curent continuu.



a) cu prize în înfășurarea primară, b) cu miez mobil, c) cu bobină de reacție, d) cu transductor

Fig. 4.11. Schema unor transformatoare de sudură.

Redresorul de sudură este compus dintr-un transformator trifazic și un grup redresor cu 6 diode de putere din siliciu. Pentru a regla curentul de sudare se poate realiza o comandă electronică ce acționează 3 tiristoare redresoare sau 6 tiristoare în cazul redresării complete, figura 4.12. Datorită încălzirii puternice a diodelor sau tiristoarelor redresoare este necesară protecția acestora prin răcirea forțată, cu ajutorul unui ventilator montat în interiorul carcasi utilajului, figura 4.10 d).

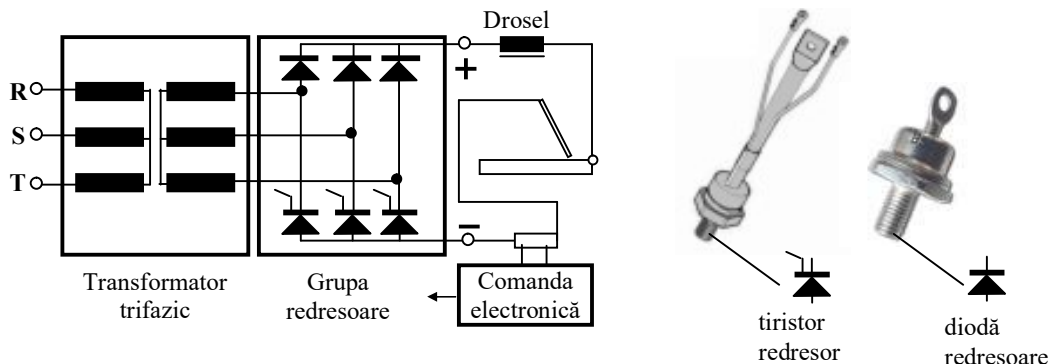


Fig. 4.12. Schema redresorului de sudură comandat prin tiristoare.

Invertorul este cea mai modernă sursă de curent (figura 4.10.e și figura 4.13) și are următoarele caracteristici:

- randament ridicat (80-90 %), consum redus de energie ;
- control mult mai fin al parametrilor curentului de sudare care este modulat ;
- sistem de reacție feedback foarte sensibil, ceea ce permite un control excelent al procesului de sudare ;
- permite viteze mari de sudare;
- reduce cantitatea de căldură transmisă piesei și minimizează deformațiile;
- gabarit mult redus (30-90 kg), portabilitate ridicată;
- poate fi utilizat la mai multe procedee de sudare: cu electrod învelit, MIG, TIG, sudarea cu sârmă tubulară.

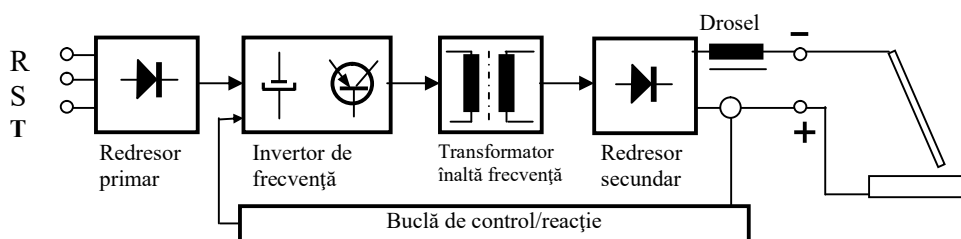


Fig. 4.13. Schema bloc a unui inverter de sudură.

În blocul de redresare primară, curentul alternativ de la rețea este redresat în curent continuu care pe urmă este trecut printr-un filtru electronic pentru a înlătura modulațiile de frecvență înaltă introduse la redresare. Curentul continuu filtrat alimentează o punte unde este întrerupt periodic cu ajutorul unor tranzistoare de putere comandate de un sistem electronic cu circuit integrat, simulând un curent alternativ cu frecvență ridicată, uzual peste 1 kHz. Curentul alternativ de frecvență ridicată este trecut printr-un transformator de înaltă frecvență cu miez de ferită. În secundarul acestuia se obține un curent de sudare cu tensiune redusă (cca. 13 V) și intensitate foarte mare (până la 12500 A), iar în ultimul bloc curentul de sudare este redresat din nou și filtrat.

Randamentul transformatoarelor crește în cazul curenților de înaltă frecvență și din acest motiv gabaritul lor este mult redus comparativ cu cel al transformatoarelor care operează la frecvența curentului din rețeaua de alimentare de 50 Hz. Acest fapt, permite construcția unor surse compacte cu consum redus de energie și foarte performante, deoarece permit un control mult mai sensibil al curentului de sudare.

Transferul materialului adaos prin arc electric are loc sub forma unor picături fine, ce asigură proprietăți mecanice foarte bune de rezistență a îmbinării sudate, tensiuni termice și deformații mult reduse. Sistemul feedback de control în cazul invertoarelor este performant, deoarece operează cu o frecvență de peste 1000 cicluri/sec față de cele 50 cicluri/sec pe care le are curentul alternativ de la rețea, efectul termic obținut fiind precis controlat. Reglajul sensibil al parametrilor curentului de sudare este foarte important la sudarea materialelor foarte subțiri, unde viteza de sudare trebuie să fie mare pentru a reduce cantitatea de căldură acumulată de piesă, respectiv deformațiile și tensiunile termice induse de operația de sudare.

Grupul electrogen, figura 4.10.a) se compune dintr-un motor cu ardere internă diesel sau cu benzină, ce antrenează un generator de curent continuu sau alternativ și care poate furniza un curent care uzual se încadrează între 150 și 200 A. Pentru aplicații mobile, reparații navale, în cazul sudării sub strat de flux sau tăierii cu arc electric, grupul electrogen poate furniza un curent de până la 600 A. Aceste surse de curent se utilizează în exclusivitate pentru aplicații mobile, pe șantiere sau alte locații, unde nu există o sursă de curent adecvată pentru operațiile de sudare sau tăiere cu arc electric.

Convertizorul de sudură, figura 4.10.b) funcționează pe același principiu ca și grupul electrogen, cu deosebirea că în locul motorului cu ardere internă pentru antrenarea generatorului de curent, utilizează un motor electric trifazat cu pornire în stea-triunghi. Datorită randamentului scăzut, a pierderilor mari de energie la mersul în gol, a zgomotului mare pe care îl produce în funcționare etc. convertizoarele de sudare sunt din ce în ce mai puțin utilizate.

În cadrul capitolului anterior, au fost introduse noțiunile legate de caracteristica arcului, conform figurii 3.6. Din această caracteristică studiată de Ayrton, ne interesează în mod deosebit zona Ohm, deoarece parametrii curentului de sudare I , U se situează în acel domeniu. **Caracteristica arcului electric** de sudare, reprezintă variația tensiunii arcului în funcție de intensitatea curentului și lungimea arcului electric. Pentru funcționarea stabilă a arcului electric este necesară îndeplinirea simultană a tuturor condițiilor determinate de caracteristica sursei de curent, respectiv de caracteristica arcului. Această condiție se traduce prin existența unui punct de coordonate (I , U) comun, ce aparține simultan celor două diagrame caracteristice de curent: ale sursei, respectiv ale arcului electric.



Caracteristica externă a sursei de curent reprezintă variația tensiunii sursei în funcție de curentul pe care îl furnizează.

Matematic, condiția de funcționare a arcului electric se exprimă prin intersecția caracteristicii sursei de curent cu caracteristica arcului electric, **pentru o anumită lungime a arcului electric**. Punctul de intersecție, de coordonate U , I se numește **punct de lucru**.



Sursele de curent trebuie să asigure caracteristicile specifice arcului electric în funcție de procedeul de sudare. Din acest motiv **portabilitatea** surselor de curent în funcție de procedeul de sudare este **limitată**.

În figura 4.14 este ilustrată caracteristica coborâtoare a sursei de curent care se utilizează la sudarea cu electrod învelit, corectarea lungimii arcului revenind sudorului.

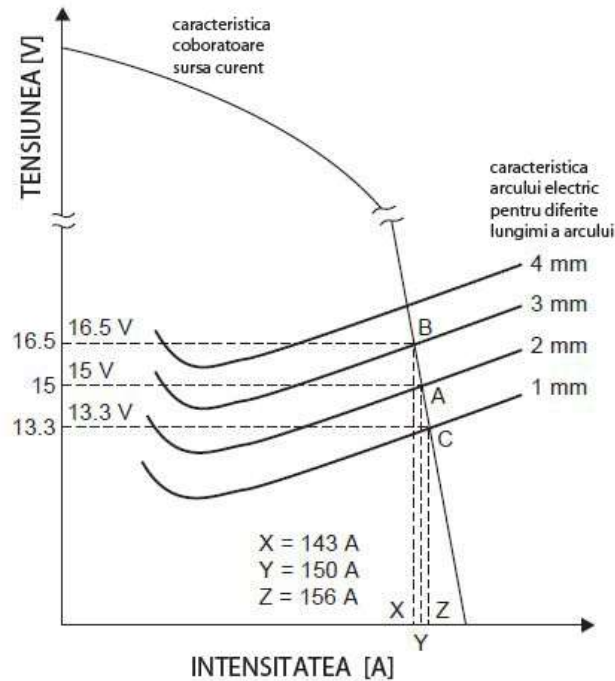


Fig. 4.14. Punctele de lucru în cazul sudării cu electrod învelit.

Pentru a înțelege cum se realizează procesul de reglare a efectului termic în funcție de variația lungimii arcului electric, să urmărim figura 4.14 și să considerăm ca punct de lucru inițial, punctul A, de coordonate $I=150$ A și $U=15$ V, pentru o lungime a arcului de 2 mm. Creșterea lungimii arcului electric la o lungime de 3 mm, punctul de lucru A se va deplasa în punctul B, unde parametrii curentului de sudare devin: $I=143$ A și $U=16.5$ V. Deasemenea, la o scădere a lungimii arcului de la 2 mm la 1 mm, punctul de lucru A se va deplasa în punctul C, cu parametrii curentului de sudare $I=156$ A și $U=13.3$ V. Puterea arcului în cele trei variante va fi produsul dintre U și I , obținând următoarele valori:

- punctul A, puterea $P = 15,0 \cdot 150 = 2,25$ kVA;
- punctul B, puterea $P = 16,5 \cdot 143 = 2,35$ kVA;
- punctul C, puterea $P = 13,3 \cdot 156 = 2,07$ kVA.

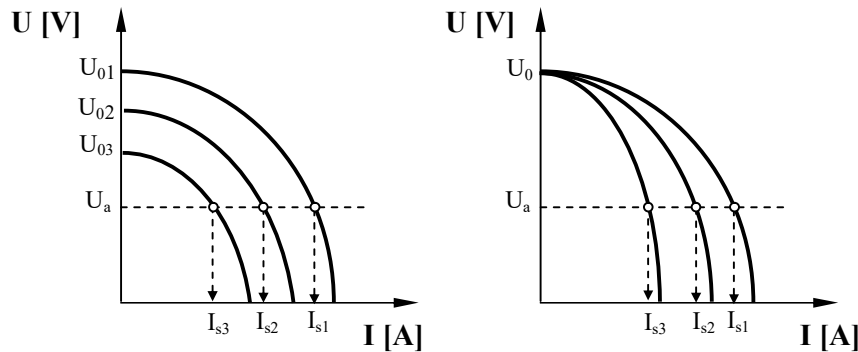
Se constată câteva fenomene care au loc la variația lungimii arcului electric și anume:

- Creșterea lungimii arcului electric necesită o putere mărită furnizată de sursa de curent. Acest lucru este ușor de înțeles, deoarece în coloana arcului avem o cantitate mai mare de gaz care trebuie ionizată și care prin urmare absoarbe o cantitate mai mare de energie ;
- Deși lungimea arcului variază în limite largi, cu $\pm 50\%$, puterea în arcul electric și implicit efectul termic transmis pieselor sudate este relativ constant ;
- Pentru a menține un efect termic relativ constant, tensiunea variază în limite largi și intensitatea curentului de sudare în limite înguste. De aici provine și numele acestor surse de sudare : **de curent constant** sau cu **caracteristică coborâtoare**.



În cazul sudării cu electrod învelit se utilizează surse de curent ce asigură un curent de intensitate relativ constantă, denumite **surse de curent constant sau cu caracteristică coborâtoare**.

Lungimea arcului electric la sudarea cu electrod învelit trebuie să fie aproximativ egală cu valoarea diametrului electrodului de sudare. Prin urmare, valorile uzuale ale lungimii arcului electric trebuie să fie cuprinse între 3-5 mm. Deoarece procedeul este manual, lungimea arcului depinde de abilitatea sudorului de a o menține constantă pe toată durata procesului, în timp ce execută și cele trei mișcări: de apropiere a electrodului de piesă pe măsură ce se consumă, de avans longitudinal și mișcarea de pendulare a electrodului, pentru a asigura o lățime constantă a cusăturii sudate. Reglarea curentului sursei se poate realiza prin două metode: prin schimbarea tensiunii de mers în gol a sursei, respectiv prin modificarea impedanței circuitului de alimentare a arcului electric, figura 4.15. Modificarea tensiunii de mers în gol este o variantă mai dificil de aplicat, deoarece tensiunea de mers în gol este limitată prin normative, din motive de securitatea muncii, pentru prevenirea pericolului de electrocutare a sudorului.



a) modificarea tensiunii de mers în gol

b) modificarea impedanței circuitului de alimentare

Fig. 4.15. Reglarea curentului la sursele de curent cu caracteristică coborâtore.

În plus față de controlul tensiunii arcului electric, este foarte importantă reacția sursei de curent în cazul scurt-circuitului, caracteristică cunoscută și sub numele de **caracteristică dinamică a sursei de curent**. Scurt-circuitul intervine în momentul amorsării arcului electric, tensiunea coboară rapid la zero, iar curentul crește cu viteză foarte mare. La creșteri rapide sau necontrolate ale intensității curentului de sudare, vârful electrodului se topește exploziv, ca și la topirea unei siguranțe electrice și produce o stropire excesivă cu material adaos. Viteza de creștere a intensității curentului de sudare este definită de panta la caracteristica de curent statică și devine extrem de importantă la procedeele de sudare MIG-MAG, care utilizează surse de curent cu caracteristică rigidă.

Din aceeași grupă a procedeelor de sudare cu arc electric fără gaz de protecție, conform SR ISO 4063-2011 mai fac parte:

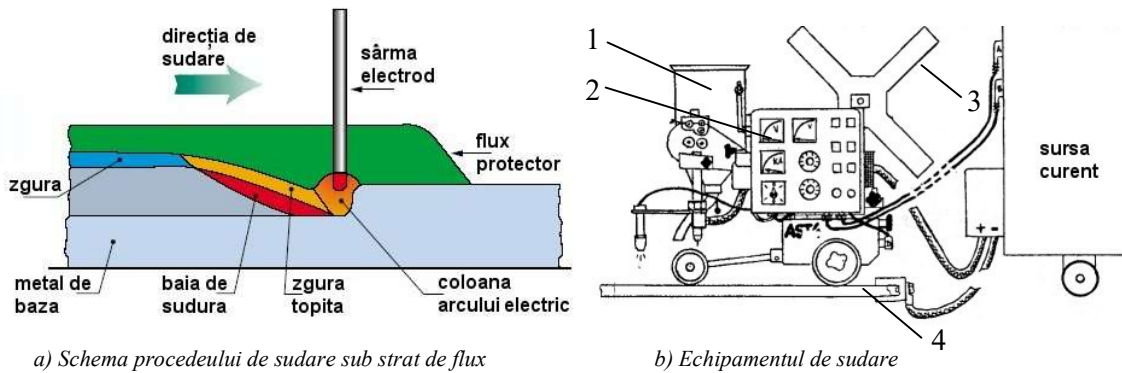
- Procedeul de **sudare gravitațională** cu electrod învelit, care este o variantă mecanizată de sudare ce utilizează un dispozitiv simplu de poziționare a electrodului care alunecă într-un ghidaj înclinat, pe măsură ce acesta se consumă ;
- Procedeul de sudare cu **electrod din sârmă tubulară și cu miez de flux**, care este recomandat în cazul sudării elementelor metalice de grosime mare. Procedeul are o productivitate ridicată, miezul de flux conține pulberi metalice, elemente de aliare, dezoxidanți, elemente zgurifiante și ionizante, pentru îmbunătățirea stabilității arcului electric ;
- Procedeul de sudare **firecracker (Elin-Hafergut)** care utilizează un electrod acoperit staționar plasat în rostul de sudare, arcul electric deplasându-se în lungul electrodului pe măsură ce o rolă de contact este rulată peste acesta.

4.1.2 Sudarea sub strat de flux

Electrodul de sudare poate fi sub formă de sârmă sau bandă, ceea ce determină tipul variantei de sudare, conform clasificării ISO 4063-2011, tabelul 4.5. Arcul electric este realizat între electrod și piesa metalică, fiind protejat de un strat de flux. Toate variantele de sudare sunt mecanizate, elementele principale ale procesului de sudare, fiind ilustrate în figura 4.16.

Tab. 4.5. Codificarea numerică a procedeelor de sudare sub strat de flux, ISO 4063-2011.

12	Sudarea sub strat de flux
121	Sudarea sub strat de flux cu electrod de sârmă
122	Sudarea sub strat de flux cu electrod sub formă de bandă



a) Schema procedurii de sudare sub strat de flux

b) Echipamentul de sudare

1) recipient pentru flux, 2) pupitrul de comandă, 3) tambur rolă sârmă de sudare, 4) ghidaj de rulare

Fig. 4.16. Sudarea sub strat de flux.

Sârma electrod este antrenată de un mecanism cu role acționat de un motor electric cu turație reglabilă. Viteza de avans a sârmei electrod este corelată cu tensiunea din arc electric, prin **mecanismul de reglare extern** al sursei de curent. Arcul electric se inițiază la atingerea piesei metalice de către sârma electrod, după care arde stabil sub stratul protector de flux granulat, figura 4.17. În coloana arcului electric se degajă gaze ce formează o cameră stabilă sub stratul de flux, dar care sunt evacuate ușor datorită permeabilității ridicate la gaze a stratului de flux. Granulația fluxului determină controlul degazării băii metalice, în funcție de tipurile de flux utilizate la sudare.

Parametrii de productivitate a acestui procedeu de sudare depind în principal de parametrii curentului de sudare, de viteza de avans a sârmei electrod și de caracteristicile fluxului de sudare utilizat. Fluxul de sudare poate să conțină elemente de aliere, iar densitatea de curent este cuprinsă între 25 și 100 A/mm², figura 4.18. Sudarea este posibilă atât în curent continuu, cât și în curent alternativ. Deasupra băii metalice se formează un strat de flux topit, care interacționează metalurgic cu baia de sudare, realizându-se concomitent dezoxidarea și alierea băii metalice.



Fig. 4.17 Sudarea sub strat de flux.

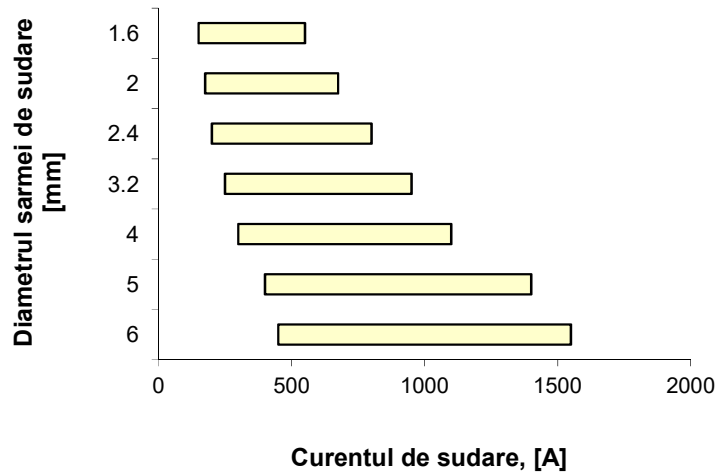


Fig. 4.18 Curentul de sudare în funcție de diametrul sârmei, la sudarea sub strat de flux.

Procedeul de sudare sub strat de flux se aplică în cazul sudării recipientelor sub presiune, în industria navală, a construcțiilor civile, poduri, zgârie-nori, în industria grea, în general la fabricarea elementelor structurale cu portanță ridicată. Avantajele procedeului de sudare sub strat de flux sunt enumerate mai jos:

- rată de depunere înaltă;
- calitate a sudurii foarte bună, independentă de îndemânarea operatorului;
- posibilitatea de aliere a cusăturii sudate prin sârmă și/sau flux;
- grad de utilizare înalt al materialului de adaos;
- posibilitatea de automatizare a procesului;
- lipsa necesității de protecție a vederii operatorului;
- degajare de fum foarte redusă.

Ca dezavantaje ale procedeului de sudare, se poate aminti:

- riscul de contaminare a cusăturii sudate prin flux (impurități, umezeală);
- limitarea sudării în poziție orizontală, datorită necesității de menținere a fluxului în poziție și datorită fluidității mai mari a băii de sudare.

Granulația fluxului determină controlul degazării băii metalice, o granulație mare asigurând o degazare rapidă necesară la viteze mari de sudare. Calitatea și aspectul cusăturii sudate este favorizată de utilizarea unui flux cu granulație mai fină, însă aceste fluxuri prezintă o sensibilitate mărită la absorția de umezeală higroscopică. Fluxurile de sudare sunt clasificate conform EN 760, figura 4.19.

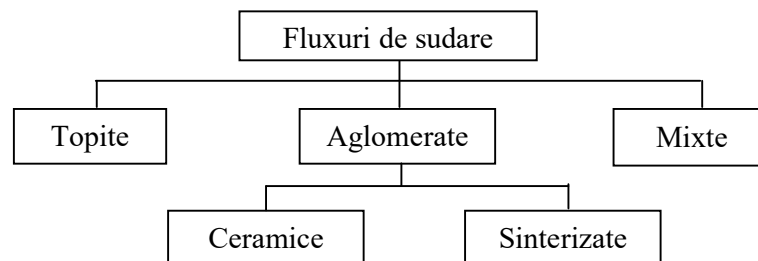


Fig. 4.19 Clasificarea fluxurilor de sudare după modul de fabricație.

Fluxurile topite se obțin prin topirea în cuptoare electrice a componentelor fluxului, obținându-se un produs omogen, care după solidificare este măcinat la granulația dorită. Fluxurile aglomerate sunt compuse din componente uscate în cuptoare electrice, măcinate la diferite granulații și amestecate în diferite proporții, utilizând silicat de sodiu ca și liant pentru a asigura legarea particulelor între ele și formarea unui amestec omogen. În funcție de temperatura la care se face uscarea în procesul de fabricație, fluxurile aglomerate pot fi ceramice (300-400°C) sau sinterizate (800-900°C).

Compoziția chimică a fluxului de sudare determină proprietățile cusăturii sudate, condițiile specifice de sudare și consumurile specifice. În funcție de compoziția chimică a principalelor componente ale fluxurilor de sudare, este prezentată clasificarea din tabelul 4.6. Fluxul poate prezenta diferite granulații, mărimea granulelor fiind plasată în domeniul 0,08-2,5 mm. O granulație fină se folosește atunci când se urmărește obținerea unei cusături cu suprafața netedă sau când se sudează cu curenți de intensitate ridicată. Aceste fluxuri prezintă însă un pericol crescut de contaminare cu umezeală. O granulație mare a fluxului permite o degazare mai bună a băii de sudare, ceea ce este un avantaj în cazul sudării cu viteză mare sau la sudarea pieselor cu suprafață impurificată.

Tab. 4.6 Clasificarea fluxurilor de sudare în funcție de compoziția chimică.

Nr.	Compoziția chimică	Recomandări de utilizare
1.	Flux silico-manganos (MS) $MnO + SiO_2 > 50 \%$	Produc alierea cu Mn a cusăturii și îmbunătățește caracteristicile mecanice ale acesteia.
2.	Flux silico-calcic (CS) $CaO + MgO + SiO_2 > 55 \%$	Îmbunătățește pătrunderea cusăturii și se recomandă la sudarea cu curenți de intensitate mare într-o singură trecere.
3.	Flux silico-zirconic (ZS) $ZrO_2 + SiO_2 + MnO > 45 \%$	Se utilizează la sudarea materialelor refractare.
4.	Flux silico-rutilic (RS) $TiO_2 + SiO_2 > 50 \%$	Conținutul ridicat de Si reduce sensibilitatea la fisurare și la rugină, îmbunătățește pătrunderea cusăturii.
5.	Flux alumino-bazic (AB) $Al_2O_3 + CaO + MgO > 45 \%$	Cusătura sudată are excelente proprietăți de rezistență mecanică. Se recomandă la sudarea vaselor sub presiune.
6.	Flux alumino-rutilic (AR) $Al_2O_3 + TiO_2 > 40 \%$	Sunt favorabile sudării cu viteze mari și la sudările de colț datorită desprinderii ușoare a stratului de zgură.
7.	Flux fluoro-bazic (FB) $CaO + MgO + MnO + CaF_2 > 50 \%$	Mărește tenacitatea cusăturii și micșorează tendința la fisurare. Cu cât caracterul fluxului este mai bazic crește conținutul de Mn din cusătură.

Caracterul chimic al unui flux de sudare se determină cu ajutorul relației lui Boniszewski:

$$B_0 = \frac{CaO + MgO + BaO + SiO_2 + K_2O + Li_2O + CaF_2 + 0.5(FeO + MnO)}{SiO_2 + 0.5 \cdot (Al_2O_3 + TiO_2 + ZrO_2)} \quad (4.6)$$

În funcție de valoarea indicelui de bazicitate B_0 fluxurile de sudare sunt clasificate:

- acide ($B_0 < 0.9$), $O_2 > 700$ ppm în metalul depus;
- neutre ($0.9 < B_0 < 1.3$), O_2 cuprins între 500 - 700 ppm în metalul depus;
- bazice ($1.3 < B_0 < 2.0$), O_2 cuprins între 350 - 500 ppm în metalul depus;
- înalt bazice ($B_0 > 2.0$), $O_2 < 350$ ppm în metalul depus.

Cu cât caracterul fluxului este mai acid, cu atât crește cantitatea de siliciu introdusă în materialul depus. La polul opus, cu creșterea caracterului bazic al fluxului de sudare, crește activitatea materialului depus față de Mn, iar materialul depus va fi mai bogat în Mn. Acesta micșorează însă, vâscozitatea băii de sudare și rata de depunere, reducând productivitatea.

Alegerea unui tip de flux de sudare trebuie să se facă în funcție de următoarele elemente:

- caracteristicile metalului de bază;
- tipul îmbinării (în colț, cap la cap);
- caracteristicile de rezistență urmărite ale cusăturii;
- pătrunderea cusăturii;
- după numărul de treceri;
- parametrii de sudare (intensitatea și tensiunea curentului de sudare, viteza de sudare).

Pentru prevenirea contaminării cu hidrogen a băii de sudare, fluxurile trebuie depozitate în încăperi cu umiditate controlată (max. 80%), fiind ambalate în saci sau bidoane închise ermetic. Înainte de utilizare, fluxurile trebuie uscate la o temperatură recomandată de producător care este trecută uzual pe ambalajul produsului. Orientativ, uscarea fluxurilor topite se face la o temperatură de cca. 250°C timp de 2 ore, iar a celor aglomerate la o temperatură mai înaltă de cca. 300-350°C, timp de 2-3 ore. Printr-o manipulare atentă a fluxurilor pe durata procesului de sudare, acestea pot fi refolosite în amestec cu flux neutilizat, după îndepărtarea bucăților topite. În acest scop, instalația de sudare trebuie să fie prevăzută cu sistem de colectare și sortare a fluxului. Trebuie acordat o atenție și duratei de valabilitate a fluxului, deoarece în timp proprietățile fluxului se degradează, în special calitatea liantului - silicatul de sodiu. Datorită acestui considerent, fluxurile trebuie utilizate într-o perioadă de maxim 2-3 ani de la fabricare, conform specificației producătorului.

La sudarea tablelor de grosime mare, rosturile de sudare trebuie să asigure deschideri mai mari pentru a asigura pătrunderea stratului de rădăcină. Datorită acestui fapt, este necesară susținerea băii de sudare pe suport de cupru sau pe pernă de flux. O altă soluție ar fi sudarea stratului de rădăcină prin procedeul MAG, urmând ca straturile de umplere să fie realizate prin sudare sub strat de flux.

Tab. 4.7 Parametrii principali la sudarea sub strat de flux.

Parametrul	Domeniul de valori
Diametrul electrodului	2 - 6 mm (uzual 4 mm)
Curentul de sudare	200 - 1400 A
Densitatea de curent	25 - 100 A/mm ²
Tensiunea arcului electric	25 - 45 V
Viteza de sudare	15 - 200 cm/min
Rata de depunere	3 - 40 kg/h
Grad de diluție	60 - 70%

Este esențială alegerea unor parametri de sudare corespunzători, tabelul 4.7, deoarece stratul de flux împiedică vizualizarea cusăturii sudate în timpul procesului de sudare, cusătura devenind vizibilă abia după îndepărtarea fluxului și a zgurei solidificate de pe suprafața cusăturii. Prin urmare, corectarea parametrilor de sudare în timpul operației de sudare nu este recomandată, deoarece nu avem o confirmare vizuală a efectelor produse de această corecție. Protejarea arcului electric de fluxul de sudare elimină necesitatea utilizării măștilor de protecție, reduce cantitatea de gaze degajate în timpul operației de sudare și nu prezintă risc de iradiere a sudorului și a personalului din vecinătatea postului de sudare.

Alegerea materialului adaos se face în funcție de calitatea și grosimea materialului de bază, de proprietățile mecanice de rezistență ale cusăturii sudate și foarte important, de calitatea fluxului de sudare utilizat. Condițiile de calitate pentru materialul adaos sunt standardizate și pot fi consultate în SR EN ISO 544:2011, Materiale consumabile pentru sudare. Principalele efecte ale elementelor de aliere prezente în compoziția sârmei trefilate pentru sudare, sunt ilustrate în tabelul 4.8.

Tab. 4.8 Influența elementelor de aliere din compoziția sârmei de sudare.

Elementul chimic	Concentrația % greutate		Principalul efect
Carbon	0.05	0.25	↑ rezistenței la rupere, ↑ durității
Siliciu	0.05	0.45	Dezoxidarea băii de sudare
Mangan	0.50	3.0	↑ rezistenței la rupere, ↑ durității, dezoxidare
Molibden	0.50	1.0	↑ tenacitate, ↑ rezistenței la temperaturi înalte
Crom	1.0	2.9	↑ rezistenței la temperaturi înalte, ↑ durității
Aluminiu	urme		Dezoxidare
Cupru	urme		Protecție anticorozivă, ↓ rezistență electrică de contact
Nichel	1.0	2.0	↑ tenacitate (în special la temperaturi scăzute)
Vanadiu	urme		Rafinarea microstructurii, grăunți fini
Titan	urme		Rafinarea microstructurii, grăunți fini

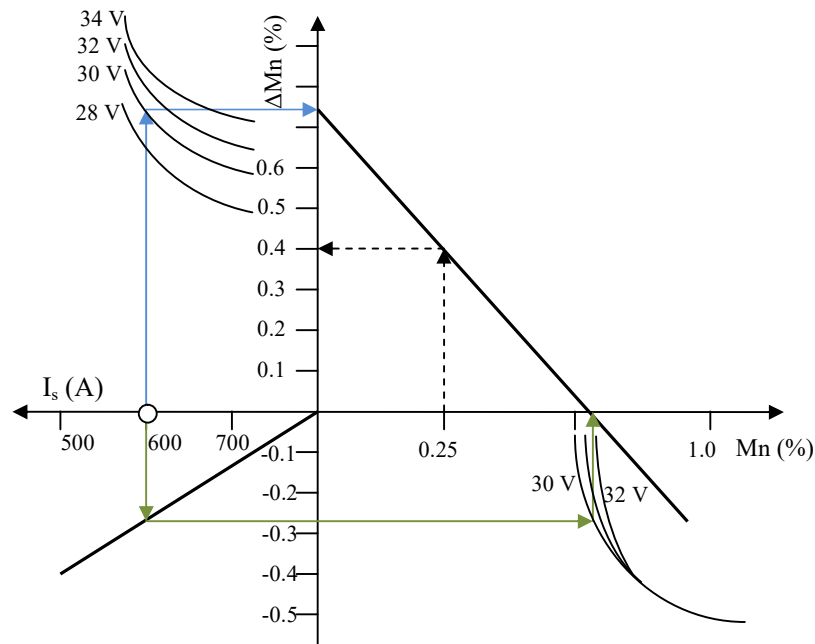


Fig. 4.20 Diagrama caracteristică a fluxului de sudare.

În figura 4.20 este ilustrat un exemplu prin care metalul depus se îmbogățește în Mn datorită fluxului și regimului de sudare ales. La un curent de sudare de 600 A și un arc cu o tensiune de 30 V se obțin cele două puncte de intersecție cu axa orizontală (Mn %) și cea verticală (Δ Mn %). La o compoziție a sârmei de sudare de 0.25% Mn, metalul depus va avea o concentrație finală de 0.4% Mn, datorită aportului de aliere din partea fluxului de sudare.

Modificând regimul de sudare (I_s și U_a) se poate ajunge la micșorarea conținutului de Mn din metalul depus, funcție de caracteristicile fluxului de sudare, respectiv în funcție de parametrii curentului de sudare.

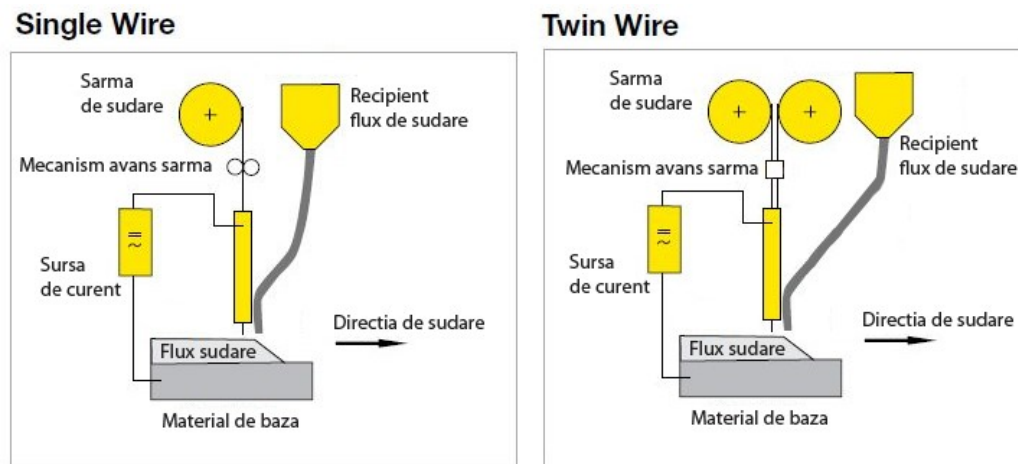
Prin **creșterea tensiunii arcului electric** se mărește cantitatea de flux consumată și scade pericolul apariției porozității în cusătura sudată, ca urmare a prezenței unor oxizi pe suprafața piesei. O creștere exagerată a tensiunii arcului de sudare, poate conduce la apariția unor fisuri în cusătura sudată, cu punct de amorsare în linia de topire. Un alt parametru care influențează bilanțul termic la sudare este **lungimea liberă a sârmei**. Valori mai ridicate pentru lungimea liberă a sârmei contribuie la o încălzire mai pronunțată a capătului acesteia și astfel, la o creștere a ratei de depunere. Pierderile de energie din arc electric ca urmare a energiei consumate pentru încălzirea sârmei pot conduce la o instabilitate a arcului, cu efect de oscilație a lățimii și pătrunderii cusăturii în metalul de bază. Lungimea liberă a capătului de sârmă este cuprinsă între 20 și 65 mm, în funcție de diametrul sârmei electrod.

Datorită **energiei liniare mari** utilizate la sudare, se manifestă o tendință de creștere a grăunților cristalini în cusătura sudată și în special în ZIT, cu efecte negative asupra caracteristicilor de rezistență a îmbinării sudate. Acest aspect, poate fi controlat într-o anumită măsură prin microalierea materialului adăos cu V și Ti sau Nb. Aceste elemente cu afinitate mare față de oxigen sau carbon, formează o serie de compuși chimici stabili termic, care împiedică creșterea grăunților de austenită în zonele supraîncălzite ale îmbinării sudate și astfel este posibil obținerea unor structuri cu grăunți fini și caracteristici mecanice superioare.

Cuprul are un efect de protecție anticorozivă a sârmei de sudare și asigură în același timp un contact electric bun cu duza de contact. Acest fapt este important, deoarece există mișcare relativă între sârmă și duza de contact electric, prin care circulă curenți de intensitate foarte ridicată. Contactele electrice imperfecte, conduc la creșterea rezistenței de contact și implicit la creșterea căderii de tensiune pe contact și la încălzirea locală a acestuia, cu risc major de sudare a sârmei în duza de contact. În plus, contribuie la mărirea stabilității arcului electric și a procesului de sudare în general.

În vederea creșterii ratei de depunere fără a afecta proporțional energia liniară la sudare, evitând neajunsurile unui efect termic pronunțat asupra materialului de bază, s-au dezvoltat diferite variante ale sudării sub strat de flux, figura 4.21:

- sudarea cu arc geamă (*twin wire*) ;
- sudarea cu mai multe sârme (sudare în *tandem* sau *multi wire*) ;
- sudarea cu sârmă caldă (*hot wire*).

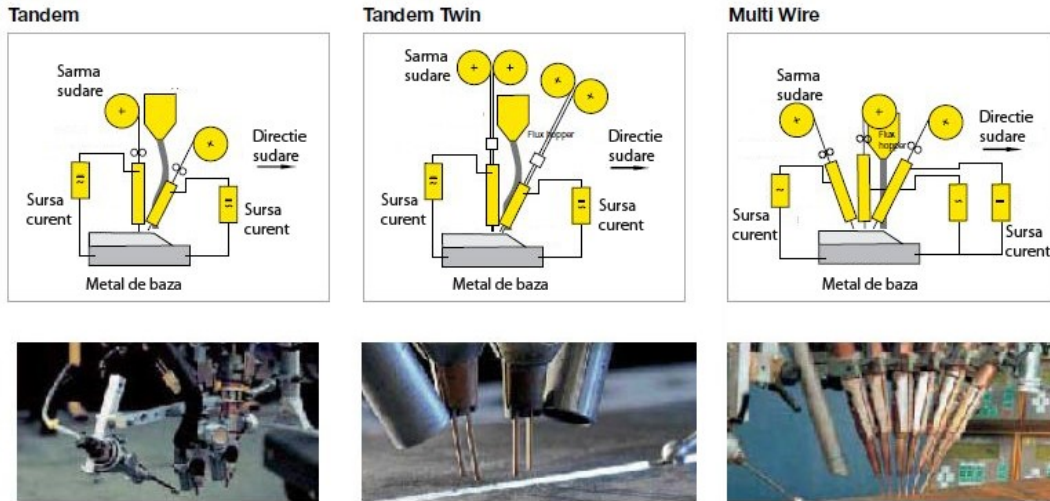


a) cu o singură sârmă

b) cu arc geamă

Fig. 4.21 Variante de sudare sub strat de flux [19].

La **sudarea cu arc geamăn**, două sârme de sudare sunt legate în paralel la aceeași sursă de curent și avansează spre baia de sudare cu aceeași viteză. Se reduce gradul de diluție, arcul electric fiind distribuit pe o suprafață mai mare și astfel, are un efect pozitiv în special la sudurile de încărcare unde dorim să păstrăm proprietățile materialului adaos, figura 4.21.b.



a) sudare în tandem b) sudare în tandem cu arc geamăn c) sudare cu mai multe sârme
Fig. 4.22 Variante de sudare sub strat de flux cu mai multe sârme de sudare [19].

La **sudarea în tandem**, sârmele sunt alimentate separat de la două surse de curent și pot forma o baie de sudare comună (cazul uzual) sau separată, figura 4.22.a. În această variantă este importantă polaritatea surselor de curent datorită suflajului magnetic, fiind astfel posibil mai multe scheme de alimentare. Procedul de sudare în tandem conduce la creșterea vitezei de sudare (max. 200 cm/min) și reduce pericolul de apariție a porozității în metalul depus.

La **sudarea în tandem cu arc geamăn** se combină variantele de sudare în tandem cu cea de sudare cu arc geamăn, fiecare cap de sudare având două sârme, practic se alătură două capete de sudare cu arc geamăn, figura 4.22.b.

La **sudarea cu mai multe sârme** se pot adăuga până la 6 capete de sudare, figura 4.22.c, fiecare alimentat de la propria sursă de curent, sârmele conducătoare fiind alimentate în curent alternativ, iar restul în curent continuu cu polaritate inversă. În această variantă se pot atinge rate de depunere de până la 90 kg/h la sudarea longitudinală a țevilor de grosime mare.

În figura 4.23 este ilustrată o variantă de sudare sub strat de flux cu adaos de pulbere metalică, pentru creșterea ratei de depunere. Pulberea metalică poate fi alimentată în amestec cu fluxul de sudare sau poate fi depusă în rostul de sudare, în fața punctului de alimentare cu flux de sudare. Pătrunderea cusăturii sudate în metalul de bază este influențată de unghiul capului de sudare cu direcția de sudare, respectiv avem varianta trasă ($\alpha < 90^\circ$), neutră ($\alpha = 90^\circ$), sau împinsă ($\alpha > 90^\circ$). Pătrunderea maximă a cusăturii sudate se realizează în cazul în care $\alpha < 90^\circ$, adică în varianta în care axa capului de sudare face un unghi ascuțit cu direcția de sudare. Acest efect poate fi explicat prin bilanțul energetic al arcului de sudare. În cazul în care arcul este orientat în fața băii de sudare, produce o preîncălzire a materialului de bază și o cantitate mai redusă de energie din arc este disponibilă pentru baia de sudare, respectiv pentru a obține o adâncime de pătrundere ridicată. În funcție de geometria cusăturii sudate în secțiune transversală pe care o dorim să o obținem, se alege un unghi adecvat pentru capul de sudare, figura 4.24.

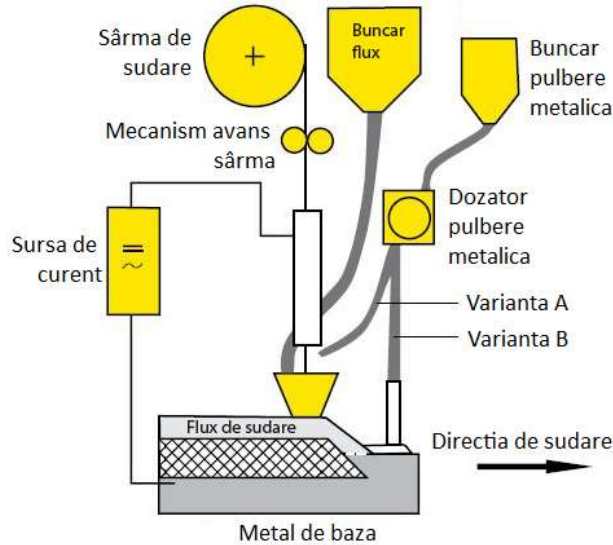


Fig. 4.23 Varianta de sudare sub strat de flux cu adaos de pulbere metalică [19].

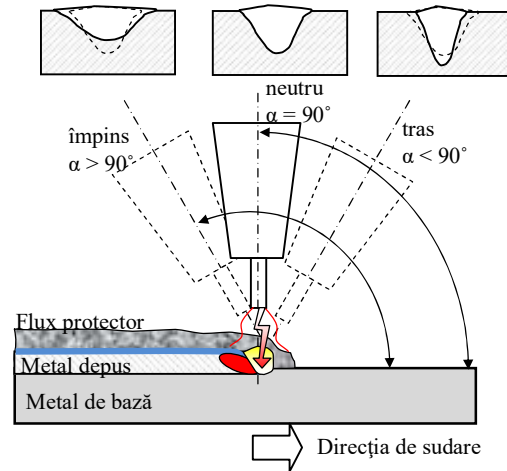
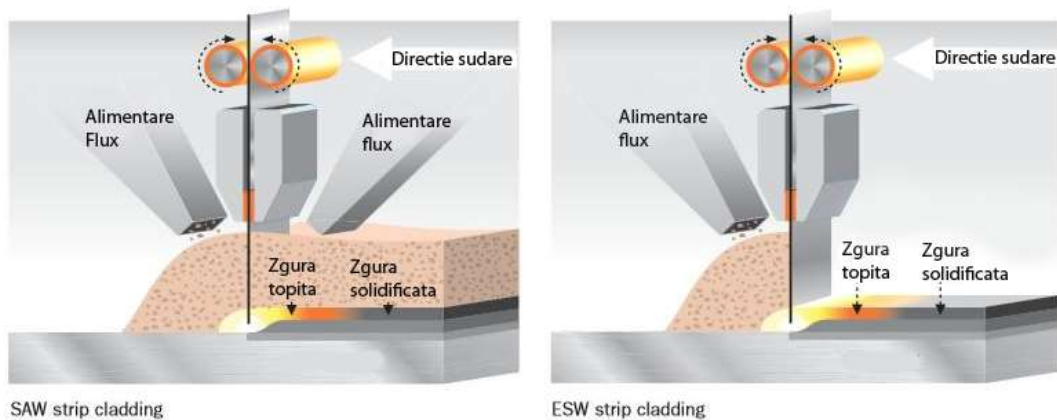


Fig. 4.24 Influența orientării capului de sudare asupra adâncimii de pătrundere a cusăturii sudate.



a) cu arc electric
b) în baie de zgură
Fig. 4.25 Sudarea sub strat de flux cu electrod sub formă de bandă [20].

Sudarea sub strat de flux cu electrod sub formă de bandă este utilizată pentru realizarea prin încărcarea unor straturi rezistente la coroziune sau uzură depuse pe un substrat din oțel carbon sau slab aliat. Aceste proprietăți ale unor componente metalice sunt necesare în industria chimică, petrochimică, nucleară sau în etapele de procesare ale unor materii prime care necesită tratarea cu medii activ chimice. Este o soluție eficientă economic care înlocuiește varianta utilizării oțelurilor inoxidabile rezistente la coroziune ce presupun un cost ridicat al materialului.

Electrodul este sub formă de bandă cu lățime uzuală de 30, 60 sau 90 mm, dar sunt și benzi cu lățime de 120 mm și cu o grosime de 0.5 mm. Procesul de sudare poate fi realizat în două variante:

- varianta SAW, cu arc electric, unde fluxul de sudare îndeplinește funcțiile din procesul de sudare standard sub strat de flux, figura 4.25 a);
- varianta ESW, fără arc electric între electrodul bandă și metalul de bază, iar fluxul se alimentează doar dintr-o parte. Zgura topită este conductoare electric, iar căldura necesară topirii electrodului și metalului de bază se obține prin efect Joule, la trecerea curentului de sudare prin fluxul topit și baia de sudare, figura 4.25 b).

Transferul controlat de căldură prin baia de sudare, în varianta cu baie de zgură ESW¹ asigură o diluție și pătrundere a materialului depus mai redusă și astfel, o rezistență mărită la coroziune în funcție de proprietățile materialului adăos sub formă de bandă. Și în aceste aplicații, proprietățile fluxului de sudare sunt esențiale în determinarea proprietăților stratului de încărcare depus prin sudare sub strat de flux.

4.1.3 Sudarea MIG/MAG în atmosferă de gaze protectoare

Flexibilitatea procedurii de sudare, calitatea ridicată a materialului depus, controlul precis și rapid al mecanismului de transfer prin arcul electric au făcut ca sudarea MIG/MAG să fie foarte răspândită pentru o gamă largă de materiale și aplicații. În tabelul 4.9 este prezentată codificarea procedurilor de sudare în atmosferă protectoare, conform ISO 4063-2011.

Tab. 4.9. Codificarea numerică a procedurilor de sudare în atmosferă protectoare.

13	Sudarea în atmosferă protectoare
131	Sudarea MIG (Metal Inert Gas)
135	Sudarea MAG (Metal Active Gas)
136	Sudarea cu electrod de sârmă tubulară și miez de flux în atmosferă protectoare activă

Procedura de sudare MIG/MAG reprezintă în prezent, unul dintre cele mai răspândite procedee de sudare prin topire în mediu protector de gaze. Arcul electric se amorsează între electrozodul fuzibil sub forma unei sârme de sudare și piesa metalică, arcul electric fiind protejat de o coloană de gaz cu proprietăți speciale. Alegerea corectă a atmosferei protectoare reprezintă un factor critic, având un impact esențial asupra aspectului, calității și proprietăților mecanice ale îmbinării sudate. Gazele de protecție au o influență directă asupra transferului termic și de material prin arcul electric, determinând proprietățile băii de sudare, pătrunderea cusăturii în metalul de bază, respectiv caracteristicile de formă și de rezistență mecanică ale îmbinării sudate.

Cele mai importante proprietăți ale atmosferei de protecție sunt:

- potențialul de ionizare;
- conductivitatea termică;
- activitatea chimică față de baia de sudare (gaze inerte sau activ chimice).

În funcție de proprietățile atmosferei de protecție, se disting două metode de sudare:

- sudarea MIG (Metal Inert Gas), în cazul utilizării unei atmosfere compusă dintr-un gaz sau amestecuri de gaze inerte;
- sudarea MAG (Metal Active Gas), în cazul utilizării unor gaze active chimic.

Procedurile de sudare MIG/MAG se caracterizează printr-un grad ridicat de utilizare a materialului adăos, se pretează ușor la automatizare, asigură o calitate foarte bună a cusăturii sudate, concomitent cu o productivitate ridicată. Varianta MIG este utilizată la sudarea oțelurilor aliate și a metalelor neferoase, iar varianta MAG este utilizată cu precădere, la sudarea oțelurilor carbon și slab aliate. Robotizarea operațiilor de sudare constituie o soluție modernă de sudare, aplicată cu succes în cazul fabricației de serie mare a unor componente metalice. Exemple de astfel de componente, pot fi întâlnite în industria construcției de mașini la fabricarea caroseriilor, figura 4.26 sau în industria construcțiilor de utilaje grele, transport, maritimă etc. unde se sudează cu regim dur, iar sudarea manuală, mecanizată nu mai poate fi aplicată.

¹ ESW - electroslag strip welding (lb. eng.)

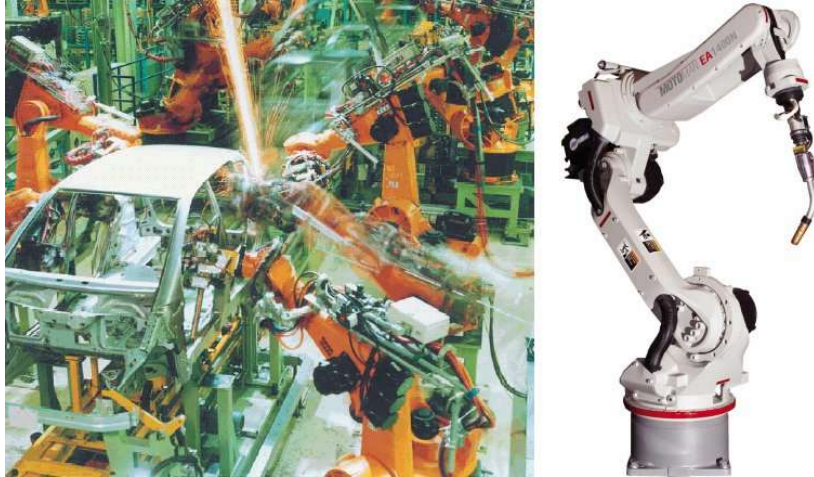


Fig. 4.26. Sudarea MAG robotizată a caroseriilor de autoturisme.

Prin automatizare se elimină timpii morți de poziționare a pistolului de sudură, mutarea echipamentului destul de complex în jurul unor astfel de structuri metalice și se câștigă în precizie și productivitate. Totodată, sunt eliminate posibilitățile de producere a unor erori datorate factorului uman de intervenție. În timp, s-au dezvoltat o serie de variante de sudare, care au însă la bază principiile sudării MIG/MAG, spre exemplu: sudarea TIME¹, RAPID ARC, RAPID MELT, sudarea în tandem ș.a care au fost brevete și înregistrate de o serie de firme producătoare de echipamente de sudare. **Utilajul de sudare** pentru MIG/MAG este mai complex în comparație cu cel de la sudarea cu electrod învelit, deoarece trebuie să asigure avansul semiautomat al sârmei de sudură și suflarea gazului protector în zona de sudare. Ca urmare, instalația se compune din patru unități distincte: sursa de curent, dispozitivul de avans al sârmei, pistolul de sudare, sistemul de alimentare cu gaz protector, elemente ilustrate în figura 4.27.

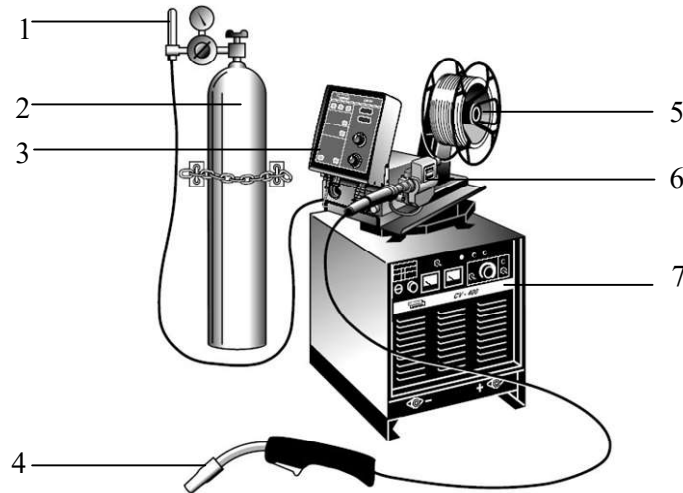


Fig. 4.27 Utilajul de sudare pentru procedeul MIG/MAG [21].

1) regulator de presiune, 2) butelie gaz, 3) pupitru de comandă avans sârmă, 4) pistol de sudare, 5) bobină cu sârmă de sudare, 6) mecanismul de avans al sârmei de sudare, 7) sursa de curent.

¹ TIME – Transferred Ionized Molten Energy, lb.eng.

Sursa de curent trebuie să furnizeze un curent continuu cu polaritate inversă, la o tensiune reglabilă între $U_a=15-45$ V și la o intensitate de $I_s=50-500$ A. Caracteristica externă a sursei trebuie să fie rigidă, pentru *autoreglarea lungimii arcului electric de sudare*, figura 4.28.

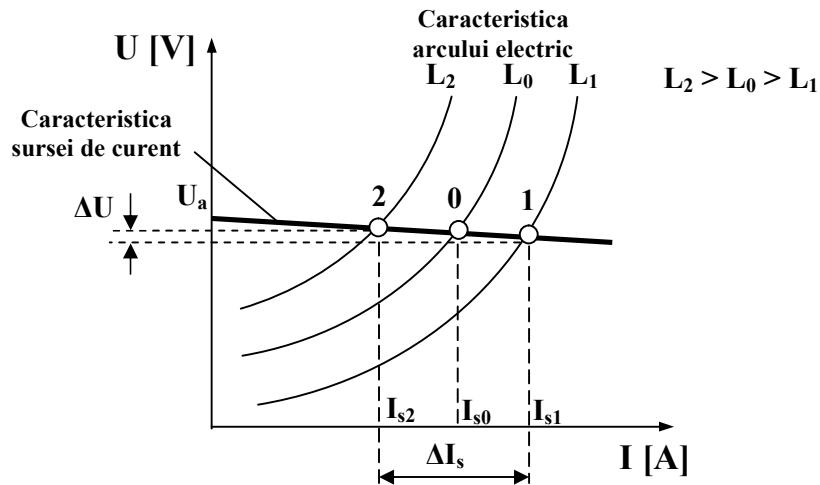


Fig. 4.28 Diagrama de autoreglare a lungimii arcului electric de sudare.

Tensiunea în arcul electric este menținută aproximativ constantă la valoarea U_a , iar la lungimea optimă L_0 a arcului rezultă un curent de sudare I_{s0} . În cazul scăderii lungimii arcului la valoarea L_1 apare pericolul de scurtcircuitare, însă acest lucru este evitat prin creșterea intensității curentului electric la valoarea I_{s1} și astfel, crește efectul termic al arcului care este proporțional cu puterea a doua a curentului de sudare. Ca urmare, va crește viteza de topire a sârmei electrod care avansează cu viteză constantă, restabilindu-se lungimea nominală a arcului de sudare. Dacă lungimea arcului crește la valoarea L_2 , apare pericolul întreruperii acestuia, însă intensitatea curentului electric va scădea la I_{s2} micșorând efectul termic al arcului. Acesta va conduce la micșorarea vitezei de topire a sârmei, iar lungimea arcului revine din nou la cea nominală. În prezent, la procedeele de sudare MIG/MAG, pentru alimentarea arcului electric se folosesc redresoare sau invertoare digitale, dar pot fi utilizate și grupuri generatoare sau convertizoare care prezintă o caracteristică externă rigidă a curentului de sudare.

Dispozitivul de avans al sârmei, de regulă se compune dintr-un motor electric cu turație variabilă, alimentat cu curent continuu reglabil, reductor de turație și mecanism de împingere cu două sau patru role striate. Aspectul unui mecanism de antrenare cu patru role este prezentat în figura 4.29. Dispozitivele de avans trebuie să asigure reglarea continuă și programabilă a vitezei de avans a sârmei electrod (V_e), ce este cuprinsă uzual între limitele de 2-16 [m/min]. Sârma electrod este condusă printr-un tub spiralat până la pistolul de sudare. La extremitatea acestuia are loc contactul electric prin intermediul duzei de contact cu conductorul electric de putere, care vine de la sursa de curent, figura 4.30. Difuzorul de gaz asigură o distribuție uniformă a gazului de protecție în jurul sârmei electrod, protejând baia de sudură de contaminarea atmosferică.

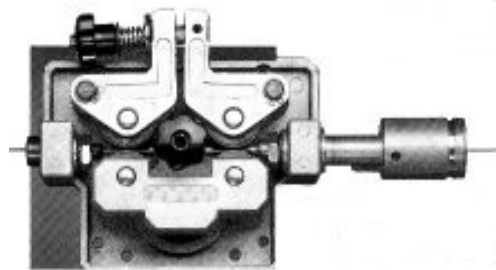


Fig. 4.29 Mecanism de avans cu patru role a sârmei electrod fuzibil

Pistoletul de sudare servește la introducerea în zona de sudare a sârmei electrod fuzibilă, realizarea contactului electric dintre sârma electrod cu sursa de curent și insuflarea în jurul sârmei a gazului protector. Pistoalele pot fi de tip lebădă, figura 4.30 sau de tip pistol. În ambele cazuri, acestea sunt prevăzute cu duze de contact electric din cupru schimbabile în funcție de diametrul sârmei electrod, respectiv cu duze din cupru pentru formarea coloanei de gaz protector, figura 4.31. Pistoalele care funcționează cu curent de sudare de peste 250 [A], sunt prevăzute cu circuit intern de răcire cu apă. Toate pistoalele au o clapetă de contact cu care sudorul inițiază procesul de sudare. La acționarea clapetei se deschide fluxul de gaz protector, se cuplează sursa de curent și se pornește avansul sârmei electrod.

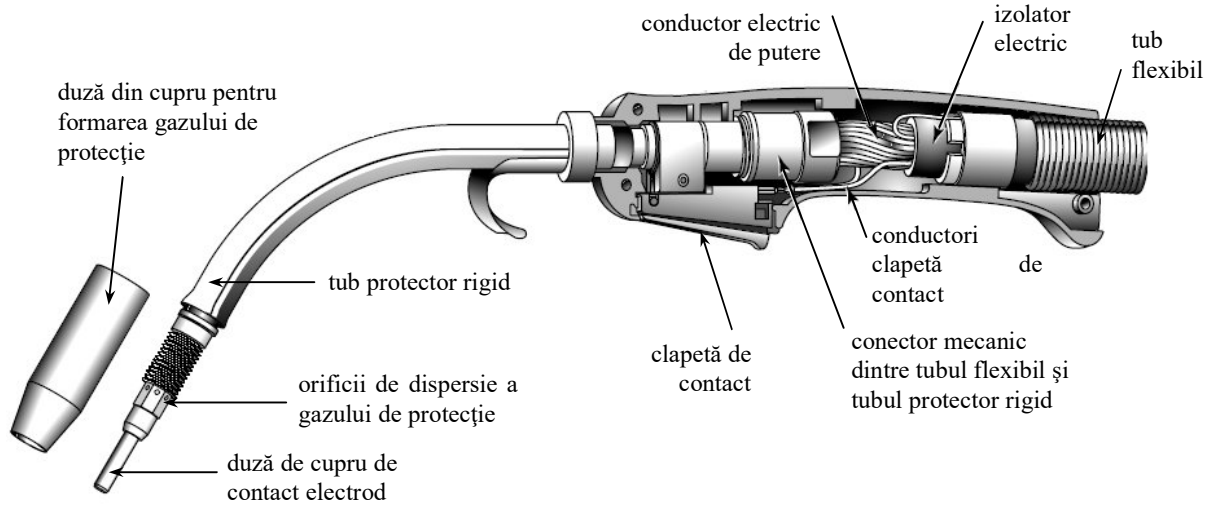


Fig. 4.30 Elementele componente principale ale unui pistol de sudare tip lebădă [21].

Selectarea unui anumit pistol de sudare se face în principal pe baza curentului maxim de sudare. Durabilitatea de exploatare a pistolului depinde de regimul de sudare, dar și de condițiile specifice: stropiri intense, întreținere, manipulare etc.

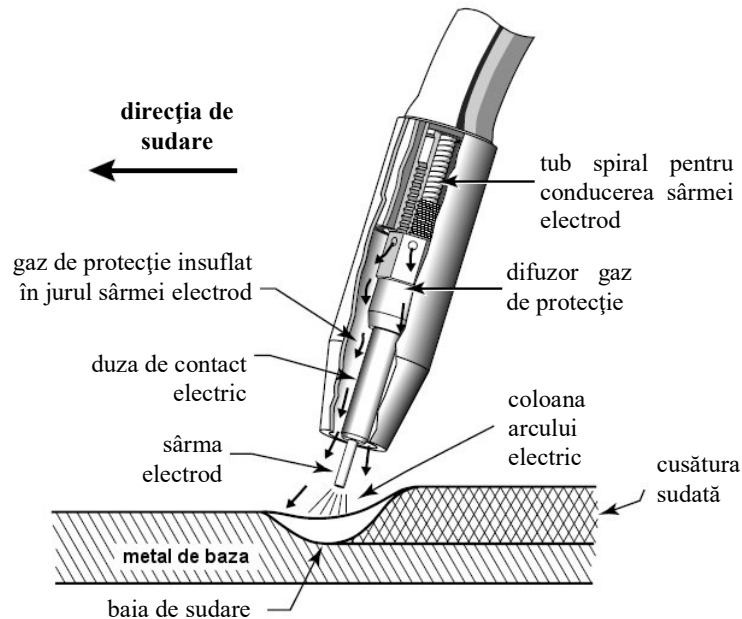


Fig. 4.31 Detaliu constructiv al pistolului lebădă [21].

Echipamentele moderne de sudare permit memorarea parametrilor de sudare setați de la consola aparatului și selectarea unui anumit program de sudare în funcție de metalul de bază, materialul adaos, viteza de sudare, gazul de protecție, parametrii de curent, inductanță, tip curent - continuu sau în impulsuri etc. În acest fel, sudorul câștigă timp prin selectarea unui anumit program de sudare, fără a mai fi nevoie de selectarea individuală a parametrilor de sudare. Echipamentele dotate cu linie sinergică asigură o corelație între parametrii setați, sursa de curent funcționând în plaja de valori optime pentru sudare, valorile uzuale fiind prezentate în tabelul 4.7.

Tab. 4.7 Principalele caracteristici ale sudării MIG/MAG.

Parametrul	Domeniul de valori
Diametrul electrodului	0.8 - 2.4 mm (uzual 1.2 mm)
Curentul de sudare	60 - 500 A
Densitatea de curent	25 - 100 A/mm ²
Tensiunea arcului electric	20 - 30 V
Viteza de sudare	20 - 150 cm/min
Rata de depunere	3 - 10 kg/h
Grad de diluție	30 - 40%
Debit gaz protecție	8 - 20 l/min

Sistemul de gaz protector se compune din butelia de oțel cu gaz protector, regulatorul de presiune care reduce presiunea gazului din butelie la cea de lucru ($p_g=0.5-3$ bar), rotamtru pentru măsurarea debitului de gaz, figura 4.32, care asigură un debit $Q_g=5-20$ l/min. și un ventil electromagnet care se deschide numai pentru perioada efectivă de sudare. La sudarea în mediu de CO₂ se mai utilizează un sistem de încălzire cu rezistență electrică a gazului. Acesta este alimentat la o tensiune de 24-36 V, în vederea preîncălzirii gazului CO₂ pentru ca la destinderea acestuia în regulatorul de presiune să nu se formeze zăpadă carbonică, care l-ar putea obtura.

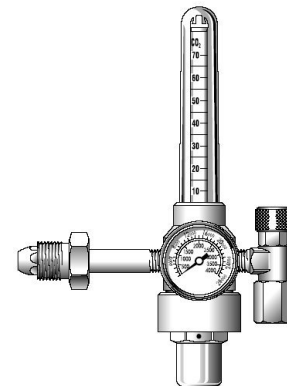


Fig. 4.32 Regulator de presiune cu rotamtru.

Sârmele de sudură pentru sudarea MIG/MAG sunt trefilate din oțeluri elaborate îngrijit, fiind calmate superior, având un conținut redus de carbon ($C<0,12\%$) și de impurități (S, P< 0,03%). De regulă, sârmele sunt cuprate la suprafață pentru reducerea rezistenței de contact în duza de cupru a pistolului și pentru a asigura o mai bună protecție împotriva coroziunii atmosferice. Alierea cu 0,9-2,2% Mn și 0,4-1,2% Si a sârmei electrod, asigură dezoxidarea băii de sudură la sudarea MAG a oțelurilor carbon, cât și la sudarea MIG a oțelurilor aliate. Dimensiunile uzuale ale sârmelor de sudare pentru procedeele de sudare MIG/MAG sunt prezentate în tabelul 4.8. Dintre acestea, cele mai utilizate sunt sârmele cu diametre de 0,8; 1,0 și 1,2 mm. Simbolizarea mărcilor sârmelor de sudură cuprind litera S urmată de conținutul de carbon în sutimi de procente, simbolurile chimice ale elementelor principale de aliere, urmate de conținutul lor procentual. În tabelul 4.9 sunt indicate o serie de mărci de sârme de sudură, recomandate pentru sudarea MIG/MAG a diferitelor oțeluri carbon și aliate.

Tab.4.8 Diametrul și rezistența minimă de rupere a sârmelor de sudură MIG/MAG.

Diametrul sârmei d_e (mm)	0,6	0,8	1,0	1,2	1,6	2,0	2,4
Rezistența minimă R_m (MPa)	1000	900	850	800	700	650	600

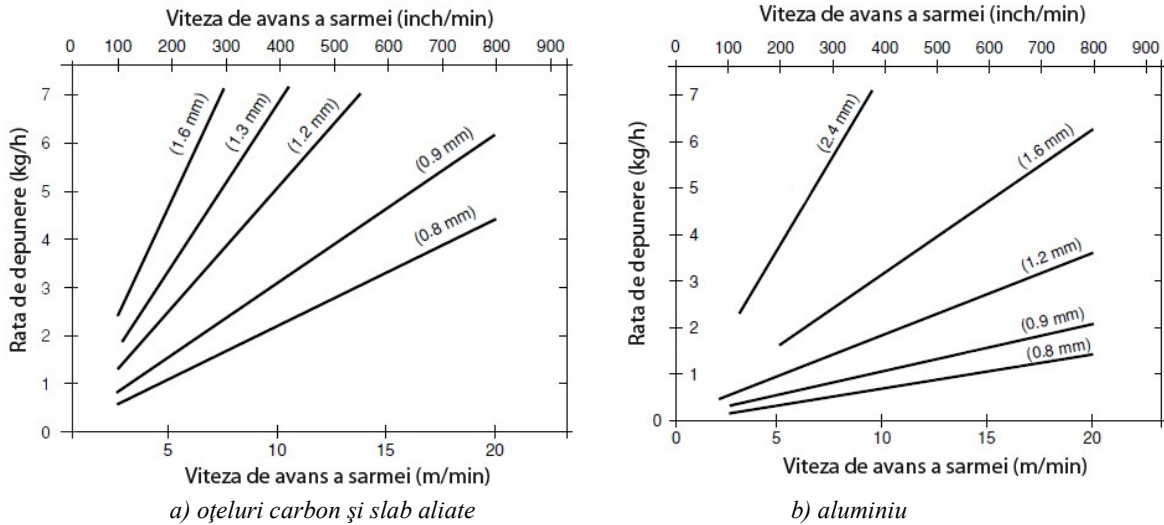


Fig. 4.33 Rata de depunere în funcție de viteza de avans a sârmei la sudarea MIG/MAG [21].

Tab. 4.9 Mărci de sârme pentru sudarea în mediu de gaz protector a oțelurilor, STAS 1120/87.

Marca sârmei	Domeniul de utilizare
S12Mn2Si S07Mn1,4Si	Sudare MAG a oțelurilor carbon de construcții precum și a oțelurilor cu granulație fină.
S12Mn1SiNi1Ti	Sudarea oțelurilor cu granulație fină, a oțelurilor pentru construcții navale cu limită de curgere ridicată.
S12SiMoCr1	Sudarea oțelurilor pentru cazane și recipiente sub presiune, exploatate la temperaturi inferioare de 450°C.
S10Mn1SiMo S10Mn1SiVMoCr1 S10MnSiMo1Cr2,5	Sudarea oțelurilor termorezistente.
S10Mn1SiNiCu	Sudarea oțelurilor rezistente la coroziune atmosferică.
S10Cr19Ni9 S03Cr19Ni12MoNb S12Mo1Cr17 S20Mn1Cr12Mo1V	Sudarea oțelurilor inoxidabile, solicitate mecanic, exploatate până la temperatura de 450-600°C.
S12Cr26Ni2 S14Cr25Ni20	Sudarea oțelurilor înalt aliate rezistente la coroziune, la cald, refractare și sudarea îmbinărilor eterogene

Tab. 4.9 continuare. Simbolizarea și compoziția chimică a unor mărci de sârme pentru sudarea în mediu de gaz protector a oțelurilor, conform SR EN 440/97.

Simbol	Compoziția chimică (%)								
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Mo	Al	Ti și Zr
G0	Orice compoziție chimică convenită, care nu este specificată în standard								
G2Si	0,06-0,14	0,5-0,8	0,9-1,3	0,025	0,025	0,15	0,15	0,02	0,15
G3Si1	0,06-0,14	0,7-1,0	1,3-1,6	0,025	0,025	0,15	0,15	0,02	0,15
G4Si1	0,06-0,14	0,8-1,2	1,6-1,9	0,025	0,025	0,15	0,15	0,02	0,15
G3Si2	0,06-0,14	1,0-1,3	1,3-1,6	0,025	0,025	0,15	0,15	0,02	0,15
G2Ti	0,04-0,14	0,4-0,8	0,9-1,4	0,025	0,020	0,15	0,15	0,05-0,2	0,05-0,25
G3Ni1	0,06-0,14	0,5-0,9	1,0-1,6	0,020	0,020	0,8-1,5	0,15	0,02	0,15
2Ni2	0,06-0,14	0,4-0,8	0,8-1,4	0,020	0,020	2,1-2,7	0,15	0,02	0,15
G2Mo	0,08-0,12	0,3-0,7	0,9-1,3	0,020	0,025	0,15	0,4-0,6	0,02	0,15
G4Mo	0,06-0,14	0,5-0,8	1,7-2,1	0,025	0,025	0,15	0,4-0,6	0,02	0,15
G2Al	0,08-0,12	0,3-0,5	0,9-1,3	0,025	0,025	0,15	0,15	0,35-0,7	0,15

Alegerea calității și diametrului sârmei de sudare se face în principiu în funcție de calitatea materialelor sudate, grosimea lor, dar și în funcție de compatibilitatea chimică a sârmei cu metalul de bază, riscul asociat de fisurare la cald sau la rece, performanțele urmărite etc. Datorită controlului extrem de precis și rapid al curentului de sudare, este posibil în prezent sudarea unor materiale foarte subțiri ($s = 0.8 \text{ mm}$) și până la grosimi foarte mari, în cazul sudării în rost îngust. Nu se produce zgură pe suprafața cusăturii sudate, ceea ce simplifică foarte mult sudarea multistrat și reduce riscul apariției unor defecte de sudare datorate incluziunilor rămase din zgură. Fenomenul de stropire este redus, iar ciclul termic la sudare poate fi controlat mult mai precis prin setul de parametrii de sudare: intensitate, tensiune, inductanță, frecvență impulsuri, forma de undă a curentului de sudare, viteza de avans a sârmei etc. Datorită posibilității de reglare a ciclului termic într-o manieră foarte precisă, adecvată materialelor sudate, se pot suda materiale reactive sau pretențioase din punct de vedere al energiei liniare la sudare și care prezintă risc de fisurare mărit sau susceptibilitate ridicată la deformații.

Gazele de protecție utilizate la sudarea MIG/MAG sunt livrate la presiune ridicată în butelii de oțel fabricate în acest scop. Se folosesc gaze pure: CO_2 , Ar, He sau amestecuri de gaze realizate pe baza acestora. Acestea, trebuie să asigure o bună protecție a băii de sudare, să reducă fenomenul de stropire, să asigure amorsarea ușoară și stabilitatea arcului electric de sudare, să nu fie explozive, să nu producă zgură, să asigure un bun transfer termic, să evite arderea carbonului și a elementelor de aliere, să prezinte o solubilitate redusă în baia de sudare, să aibă efect de intoxicare redus. Gazele reactive (CO_2 ; O_2 ; H_2 ; N_2) interacționează chimic cu baia de sudură și influențează caracteristicile mecanice ale metalului depus, respectiv dețin un rol activ în transferul termic prin arc electric. Gazele inerte (Ar, He) se folosesc la sudarea materialelor reactive Al, Cu, Ti, Mg și a oțelurilor înalt aliate, rolul principal al acestora este de a asigura protecția băii de sudare și a zonelor supraîncălzite din vecinătatea cusăturii sudate.

Dioxidul de carbon (CO_2) pentru sudare trebuie să fie de puritate ridicată ($>99,5\%$) și să fie cât mai uscate, umiditatea trebuie să fie inferioară valorii de $\text{H}_2\text{O} < 0,04\%$. Se transportă și se depozitează și în stare lichefiată, la o presiune de 60 bar, în butelii de oțel de 40 l capacitate. Buteliile ce conțin CO_2 sunt vopsite în culoarea verde sau neagră. Este cel mai ieftin gaz protector, mai greu ca și aerul, este activ din punct de vedere metalurgic, în arc electric disociază și prezintă un efect de stropire pronunțat. Pe suprafața cusăturii se formează un strat subțire de zgură, poate apărea porozitate în metalul depus, iar aspectul cusăturii este rugos cu solzi. Se utilizează la sudarea cu arc scurt a oțelurilor carbon având $\text{C} < 0,5\%$. Dioxidul de carbon este inactiv la temperatura ambiantă, dar la temperaturi ridicate cum sunt cele din coloana arcului, moleculele de CO_2 disociază eliberând CO, C și oxigen atomic care pătrund parțial în baia de sudură și participă la o serie de reacții chimice. În cursul procesului de disociere și ionizare a atomilor de gaz, gazul absoarbe o cantitate de energie din arc electric, pe care o eliberează la nivelul băii de sudare, ca urmare a procesului de recombinare chimică. În acest fel, participă la mecanismul de transfer termic prin arc electric, influențează agitația băii de sudare, vâscozitatea acesteia, reacțiile metalurgice și procesul de degazare a băii de sudare. Aceste procese sunt determinante pentru a asigura o pătrundere adecvată a cusăturii în metalul de bază, aspectul cusăturii și indicatorii de productivitate a procesului de sudare.

Oxigenul ce pătrunde în baia de sudură interacționează chimic cu elementele cu afinitate ridicată față de oxigen, precum Si și Mn formând o serie de oxizi (SiO_2 , MnO și FeO_2), care se ridică la suprafața băii și formează insule pe suprafața cusăturii sudate sau se localizează la muchia cusăturii, figura 4.34. Concentrațiile ridicate de CO_2 conduc la formarea unei cantități mai importante de oxizi, necesitând utilizarea unor electrozi cu concentrații mai mari în elemente dezoxidante sau utilizarea unor electrozi tubulari și cu miez de flux.

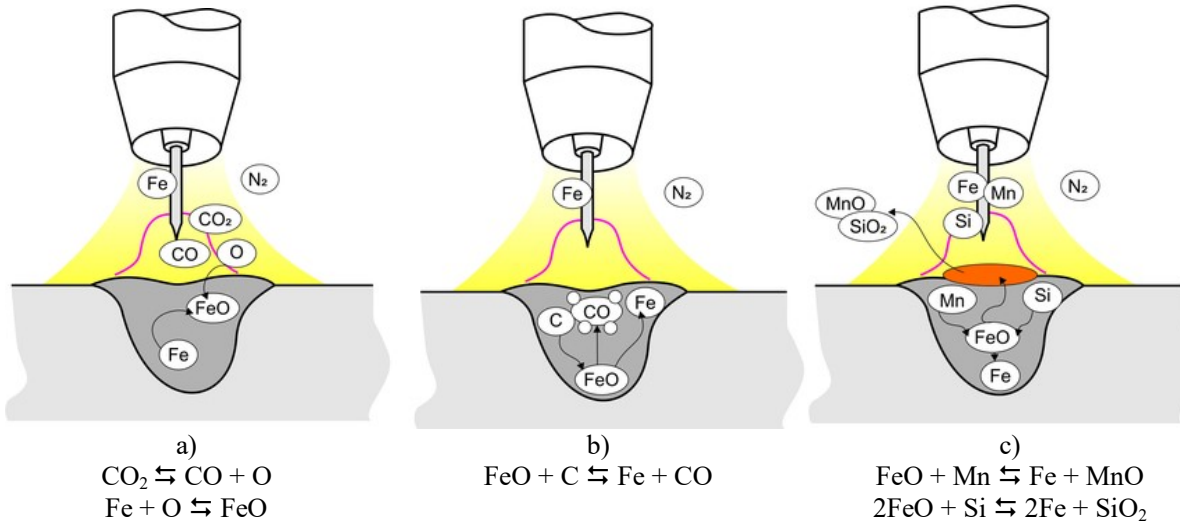


Fig. 4.34 Reacțiile chimice dintre atmosfera de protecție și baia de sudare.

Oxigenul poate fi prezent în cantități mici (1-5 % vol.) în amestecuri de gaze, alături de argon și asigură o bună stabilitate a arcului electric, o formă excelentă a profilului pătrunderii, precum și un aspect neted al suprafeței cusăturii sudate. Prezența oxigenului în gazul de protecție impune alegerea unui electrod cu conținut ridicat de dezoxidanți pentru a compensa efectul de oxidare al oxigenului. Este de remarcat efectul de oxidare mai pronunțat la sudarea în atmosferă de CO_2 decât la sudarea în amestecuri de argon și oxigen.

Hidrogenul se adaugă în cantități mici (1-5 % vol.) alături de argon, amestecul de gaz fiind folosit cu precădere, la sudarea oțelurilor inoxidabile și aliajelor de nichel. Coeficientul ridicat al conductivității termice asigură o baie de sudură fluidă cu o bună capacitate de umectare și permite atingerea unor viteze mari de sudare. Deasemenea, hidrogenul are un puternic caracter reducător și participă la reacțiile de dezoxidare a băii de sudură, însă mărește riscul de fisurare la rece.

Azotul se folosește aproape exclusiv ca și gaz de formare, pentru protecția rădăcinii sudurii la materialele care necesită acest lucru (ex. oțelurile inoxidabile – asigurarea rezistenței la coroziune), sau poate fi utilizat în același scop dar în amestec cu cantități reduse de hidrogen (5-20 % vol.). Dacă azotul pătrunde în baia de sudură se formează nitruri care micșorează substanțial plasticitatea materialului depus, iar hidrogenul generează porozitate, ceea ce limitează domeniul de utilizare a acestor gaze, precum și proporțiile volumice în care participă la atmosfera de formare.

Argonul (Ar) este un gaz inert, mai greu ca și aerul, care protejează bine baia de sudare, este ușor ionizabil, asigură un transport bun al căldurii, o amorsare ușoară și stabilitate ridicată a arcului electric. Argonul se obține prin procedeul Linde, prin distilare fracționată din aerul filtrat, comprimat și lichefiat, obținându-se totodată oxigen și azot. Argonul captat este comprimat și depozitat pentru transport în butelii de oțel cu capacitatea de 5-60 l, la o presiune de 150-200 bar. Butelia este vopsită în culoarea gri sau argintie. Argonul trebuie să fie de mare puritate (>99,998%), fiind utilizat mai mult la sudarea MIG a metalelor și aliajelor neferoase, precum : Al, AlMn, AlMg, Cu, CuZn, CuSn, CuAl, Ti, TiAl, TiAlV etc. În cazul sudării oțelurilor înalt aliate Cr-Ni, inoxidabile sau refractare, arcul este mai puțin stabil, iar baia de sudură rezultă mai vâscoasă. Argonul are o conductivitate termică de cca. 10% din cea a hidrogenului și heliului, însă o energie de ionizare mult mai redusă în comparație cu acestea. Amorsarea arcului electric devine mult mai ușoară în atmosfere bogate în argon, adâncimea de pătrundere a cusăturii în metalul de bază este ridicată, însă doar pe o lățime mică (*finger print, lb. eng.*), așa cum este ilustrat în figura 4.35.

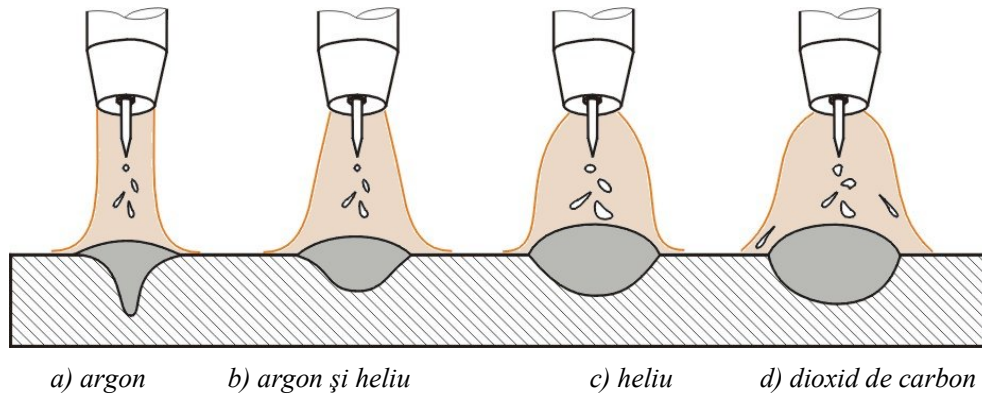


Fig. 4.35 Influența conductivității termice a gazelor de protecție asupra pătrunderii și a profilului cusăturii sudate în metalul de bază.

Datorită acestor proprietăți argonul este cel mai utilizat gaz inert de sudare și asigură o creștere a vitezei de transfer a particulelor topite de metal prin arc electric. Se utilizează la sudarea nichelului, cuprului, aluminiului, magneziului și a aliajelor acestora. În amestec cu alte gaze inerte este componentul principal, datorită potențialului de ionizare mai redus al acestuia.

Heliul se utilizează în aplicații care necesită o cantitate mare de căldură transferată metalului de bază, datorită conductivității termice excelente a acestuia. Coloana arcului este mai lată, îmbunătățește capacitatea de umectare a băii de sudare și permite creșterea vitezei de sudare. Materialele metalice cu conductivitate termică ridicată, precum Al sau Cu, disipă foarte rapid căldura absorbită de la arc electric și necesită un transfer termic cu eficiență ridicată, ceea ce recomandă utilizarea heliului ca și gaz de protecție. Heliul mai este utilizat la sudarea laser cu CO_2 în special dacă se dorește obținerea unei plame induse termic, care determină o pătrundere mare a cusăturii în metalul de bază. Amestecuri bogate în heliu (90% He + 7.5% Ar + 2.5% CO_2) sunt utilizate la sudarea oțelurilor inoxidabile, în special unde sunt necesare viteze mari de sudare.

În concentrații mai reduse, heliul se utilizează în amestec cu Ar și CO_2 în aplicații care necesită o pătrundere mai ridicată, sau viteze mai ridicate la sudare. Datorită densității foarte mici a heliului, sunt necesare debite mai mari de gaz pentru a asigura protecția băii de sudură și pentru a obține efectele dorite.

Amestecuri de gaze de tip Ar- CO_2 , Ar- O_2 , Ar-He etc. sunt folosite tot mai frecvent, deoarece fenomenul de stropire este mai redus, permit viteze de sudare ridicate, cusătura are calitate mai bună, porozitatea este redusă, suprafața cusăturii rezultă mai netedă, stabilitatea arcului va fi mai mare, se formează zgură în cantități mici. Amestecurile de argon și dioxidul de carbon se depozitează ca și argonul pur, însă butelia este vopsită în culoarea roz. Cele mai folosite amestecuri de gaze sunt prezentate în tabelul 4.10. Sub influența căldurii radiate de arc electric, gazele se comportă în mod diferit. Intensitatea curentului din arc electric are o influență determinantă asupra mecanismului de transfer de material prin arc. Forma coloanei arcului electric, precum și cantitatea de căldură transferată metalului de bază au un efect profund asupra proprietăților metalului depus, respectiv asupra tensiunilor termice și deformațiilor produse în metalul de bază. Proprietățile esențiale ale gazelor de protecție sunt prezentate în figura 4.36, figura 4.37 și în tabelul 4.11. Pentru viteze de sudare mari, trebuie utilizate atmosfere de protecție cu un coeficient ridicat al conductivității termice, însă trebuie avut în vedere și reactivitatea chimică a materialelor sudate. Alegerea unui regim de sudare trebuie corelat cu proprietățile atmosferei de protecție, dar și cu caracteristicile metalului de bază, grosimea materialelor sudate, respectiv cu tipul de transfer de material dorit prin arc electric.

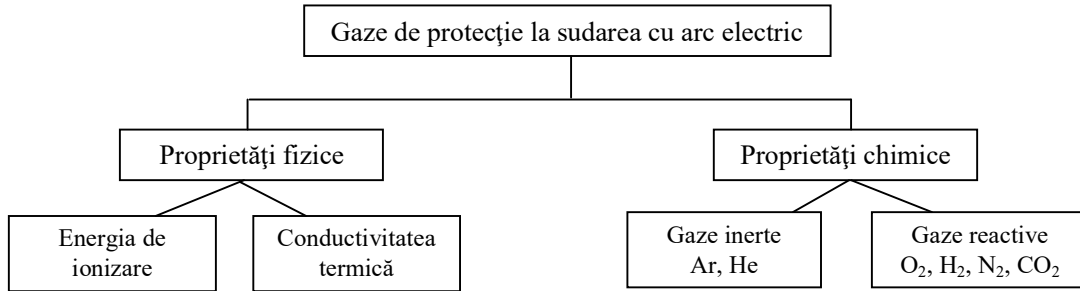


Fig. 4.36. Proprietățile gazelor de protecție la sudarea cu arc electric și atmosferă protectoare.

Tabelul 4.10 Amestecuri de gaze utilizate la sudarea MIG/MAG a diferitelor oțeluri.

Amestecul de gaz	Metalul de bază	Domeniul de utilizare
Ar+18%CO ₂	Oțeluri carbon și slab aliate cu Mn și Si	Cel mai utilizat pentru construcții de mașini și utilaje, construcții metalice
Ar+12%CO ₂		Construcții de autovehicule
Ar+25%CO ₂	Oțeluri carbon	Sudarea tablelor ruginite
Ar+40%CO ₂		Construcții navale
Ar+(3-15%)CO ₂ +(3-12%)O ₂		Sudarea cu viteză mare a tablelor subțiri unsuroase, ruginite, cu țunder
Ar+(5-10%)O ₂		Sudarea tablelor subțiri ruginite
Ar+(1-5%)CO ₂	Oțeluri inoxidabile	Viteză mare de sudare, porozitate redusă
Ar+(1-3%)O ₂		Aport redus de căldură, arc stabil

Selecția gazului sau amestecurilor de gaze utilizate pentru protecția sudării reprezintă un element cheie din tehnologia de sudare și influențează direct calitatea îmbinării sudate. Criteriile principale care stau la baza selecției atmosferei de protecție sunt:

- compoziția chimică a electrodului;
- tipul metalului de bază;
- calitatea suprafeței rostului de sudare și a metalului de bază (suprafețe oxidate, neregulate ca urmare a tăierii termice etc.);
- grosimea metalului de bază și tipul rostului;
- valorile propuse a fi obținute pentru proprietățile mecanice ale metalului depus: R_m , KCU, A – plasticitatea materialului trebuie să fie cât mai ridicată. Ruperea îmbinării sudate să fie însoțită de deformații plastice mari, prin mecanismul de rupere ductilă;
- tipul mecanismului de transfer de material;
- viteza de sudare;
- poziția de sudare;
- stabilitatea arcului electric;
- adâncimea și profilul de pătrundere a cusăturii în metalul de bază;
- capacitatea de umectare a cusăturii, eliminarea creștăturilor marginale;
- aspectul suprafeței cusăturii: neted, convex, concav;
- costurile de sudare.

Pentru ca să conducă curentul electric gazul trebuie ionizat și în acest scop absoarbe o cantitate importantă de energie termică din arcul electric. Cantitatea de energie necesară pentru a ioniza gazul este specifică fiecărui gaz în parte și este denumită **energia de ionizare** (prima treaptă de ionizare, tabelul 4.11). Cu cât energia de ionizare este mai mică, gazul respectiv conduce la o amorsare mai ușoară a arcului electric, tensiunea necesară pentru a menține stabil arcul fiind mai mică.

Tabelul 4.11. Energia de ionizare a gazelor de protecție utilizate la sudare [23].

Nr.	Tipul gazului	Simbol	Energia de disociere eV/moleculă	Energia de ionizare eV/moleculă
1.	Hidrogen	H ₂	4.5	13.6
2.	Oxigen	O ₂	5.1	13.6
3.	Dioxid de carbon	CO ₂	4.3	14.4
4.	Azot	N ₂	9.8	14.5
5.	Heliu	He	-	24.6
6.	Argon	Ar	-	15.8
7.	Kripton	Kr	-	14.0

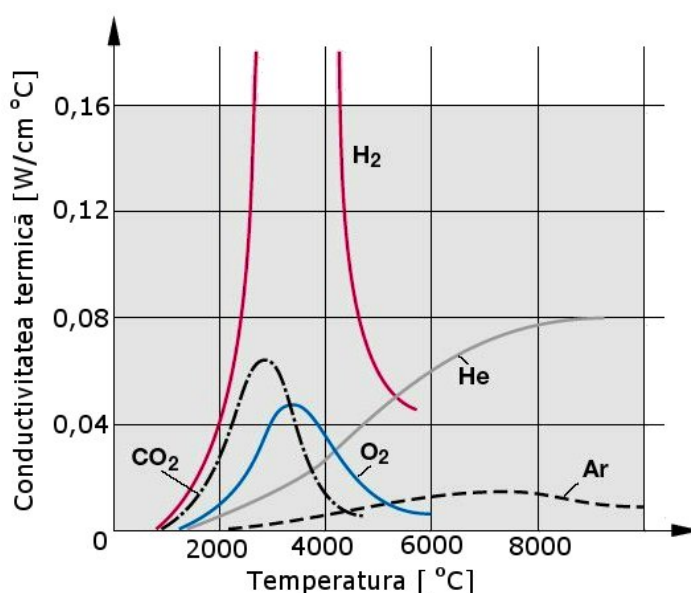


Fig. 4.37 Conductivitatea termică a gazelor de protecție la sudarea cu arc electric [23].

Gazele moleculare (H₂, O₂, CO₂ și N₂) disociază datorită căldurii absorbite de la arcul electric și la contactul cu suprafața băii de sudare, se recombina eliberând o cantitate importantă de energie termică. Prin acest mecanism, îmbunătățește transferul de căldură de la arcul electric către metalul de bază. Conductivitatea termică a gazelor de protecție, figura 4.37, controlează transferul termic spre metalul de bază și influențează proprietățile băii de sudură, în special capacitatea de degazare și fluiditatea acesteia, dar și forma coloanei arcului electric cu influență directă asupra profilului pătrunderii cusăturii sudate în metalul de bază.

La sudarea oțelurilor carbon, concentrația azotului în baia de sudare este mai dificil de controlat și conduce la fragilizarea metalului depus, motiv pentru care baia de sudare este protejată cu o coloană de gaz față de atmosfera înconjurătoare, care conține 78% azot. În coloana arcului electric, dioxidul de carbon din atmosfera de protecție se descompune în monoxid de carbon și oxigen, iar oxigenul rezultat se combină cu fierul din baia de sudare formând oxidul de fier FeO. În condițiile unei sârme de sudare nealiată, carbonul care există în baia de sudură se va combina cu oxigenul disponibil în baia de sudură, în detrimentul combinării cu Fe, astfel că are loc o reducere a oxidului FeO cu carbon, generându-se CO în baie, care conduce la porozitate în metalul depus.

Pentru a preveni această situație, sârma de sudare conține Si și Mn care au afinitate mai ridicată față de oxigen decât carbonul, astfel că oxigenul din oxidul de fier FeO nu se va combina cu carbonul, ci cu Si și Mn, formându-se SiO_2 și MnO . Acești oxizi se vor ridica la suprafața băii de sudare și vor forma o peliculă subțire de zgură de culoare închisă, prevenind formarea porozității în metalul depus. Suplimentar, sârma de sudare poate să conțină elemente de aliere sau elemente active superficial care să controleze fluiditatea băii de sudare și să determine un anumit tip de mecanism de transfer prin arc electric. Caracteristicile mecanice de rezistență, tenacitatea, rezistența la coroziune a metalului depus depind direct de compoziția chimică a materialului adăos și a celui de bază, de microstructura din cusătura sudată, de diluție, motiv pentru care și tehnologia de sudare poate să contribuie semnificativ la atingerea criteriilor de performanță urmărite. Pentru anumite calități de material, funcție de grosimea elementelor metalice, de tipul de îmbinare este necesar să se aplice o preîncălzire a materialului de bază și să se asigure anumite valori ale temperaturii între treceri, la sudarea multistrat. Ordinea de sudare, utilizarea dispozitivelor de fixare, tratamentele termice post-sudare etc. pot să asigure reducerea tensiunilor și a deformațiilor din îmbinările sudate.

Transferul de material prin arc electric de la electrod spre baia de sudare, determină proprietățile de rezistență ale îmbinării sudate, aspectul și profilul cusăturii în metalul de bază, microstructura și caracteristicile de productivitate ale procedeei de sudare, figura 4.38.

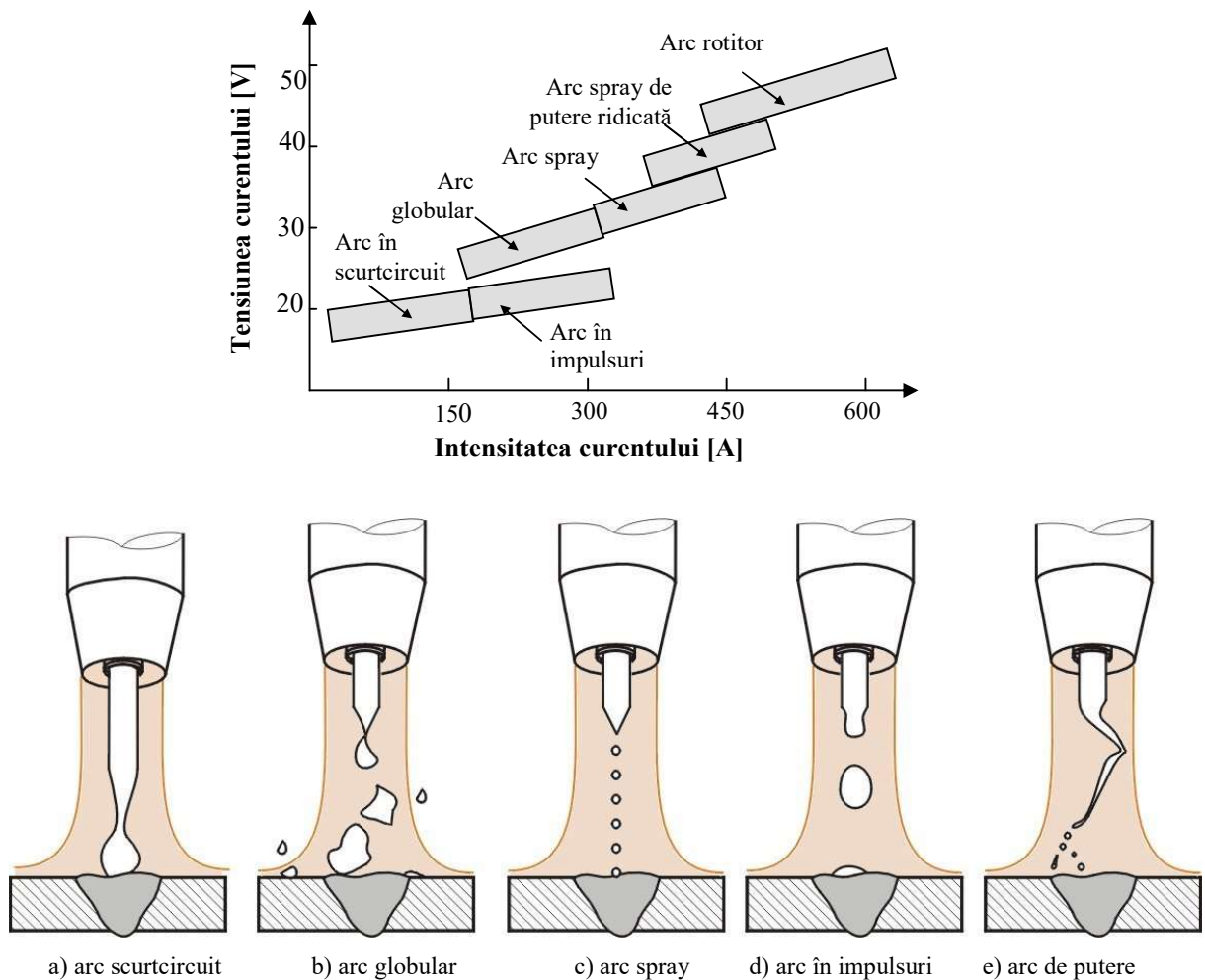


Fig. 4.38 Mecanisme de transfer al materialului prin arc electric și parametrii curentului de sudare.

În funcție de puterea arcului electric, transferul de material prin arc poate fi clasificat în cinci categorii, după cum urmează:

- **arcul scurt** cu transfer prin scurt-circuit;
- **arcul globular** (intermediar) la care transferul se face prin picături mari, parțial prin scurt-circuit și parțial gravitațional;
- **arcul spray** se face prin picături fine aliniat axial cu arc electric, transferul efectuându-se fără scurt-circuit;
- **arcul în impulsuri** este un arc spray avansat la care transferul se face sub forma unei singure picături topite pe un ciclu curent de sudare;
- **arcul de putere ridicată** care poate fi rotațional sau nu.

Arcul în scurtcircuit¹ (sau arcul scurt, figura 4.39) se utilizează pentru sudarea tablelor subțiri sau a rădăcinii, cu puteri reduse ale arcului electric. Transferul de material are loc prin scurtcircuitarea electrozudului de baie metalică și se realizează cu o anumită periodicitate, în funcție de caracteristicile curentului de sudare.



Fig. 4.39 Arc scurt [23].

Transferul unei singure picături de metal topit se produce în intervalul foarte scurt de timp al unei perioade al curentului de sudare, care la rândul său poate fi descompusă în cinci secvențe, ilustrate în figura 4.4, după cum urmează:

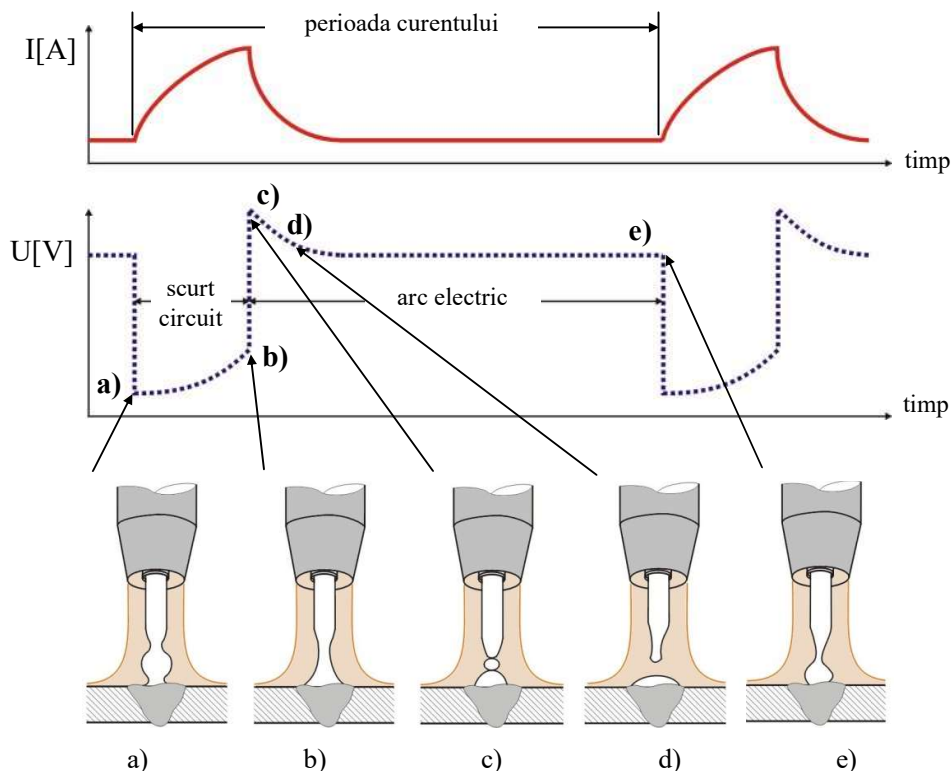


Fig. 4.40. Mecanismul de transfer cu arc în scurtcircuit.

¹ alte denumiri: short arc, fine wire welding, dip transfer (lb.eng.)

- a) Electrocul face contact electric cu baia de sudură lichidă, tensiunea arcului se apropie de zero și intensitatea curentului începe să crească în funcție de valoarea inductanței circuitului;
- b) Datorită curentului electric se generează forțe electrodinamice și se manifestă efectul Pinch, care tinde să reducă secțiunea electrocului. Tensiunea arcului crește ușor iar curentul de sudare este în creștere ;
- c) Este momentul în care intensitatea curentului a atins valoarea maximă și picătura metalică formată este forțată să se desprindă de capătul electrocului. Forțele electrodinamice sunt maxime și împiedică reatașarea picăturii desprinse de electrocul;
- d) După desprinderea picăturii arcul electric se restabilește (nu mai este în scurtcircuit) și începe formarea unei noi picături, curentul electric scade la o valoare de bază;
- e) Electrocul în acest punct face din nou contact cu baia de sudare, arcul electric intră în scurtcircuit și începe un nou ciclu de transfer al materialului adaos.

Frecvența scurtcircuitărilor cu baia de sudare poate să ajungă la valori de 250 ori/secundă, în funcție de caracteristicile sursei de curent. Transferul de material prin arc în scurtcircuit introduce în piesa sudată o cantitate de căldură minimă, datorită intermitenței arcului de sudare, transferul efectiv de material efectuându-se în perioada când electrocul este în contact fizic cu baia de sudare. Factorii de influență ai procesului sunt: diametrul electrocului, tipul gazului de protecție și parametrii curentului de sudare. Nu toate sursele de curent sunt prevăzute cu reglaj pentru inductanță. Dacă sursa de curent nu are inductanța arcului reglabilă, fabricantul a presetat o valoare optimă pentru aceasta în funcție de puterea sursei. **Inductanța** controlează viteza de creștere a curentului electric și prin aceasta modifică frecvența scurtcircuitelor produse de electrocul de sudare. Dacă inductanța crește, numărul de scurtcircuite scade, iar picăturile topite de metal acumulează o energie mai ridicată și vor fi proiectate cu viteză mărită spre baia de sudură. Obiectivul inductanței este de a realiza un transfer de material cu picături cât mai fine, cu pierderi prin stropire minime, picăturile având totuși suficientă energie pentru a realiza o bună pătrundere a cusăturii.

Arcul globular conduce la un transfer combinat prin scurtcircuit și gravitațional a unor picături de dimensiuni mari, intensitatea curentului de sudare fiind intermediară între cea a arcului în scurtcircuit și a arcului spray. Picăturile formate au dimensiuni cuprinse între 2-4 ori diametrul electrocului de sudare. Gazul de protecție este format uzual din 100% CO₂, dar se poate utiliza și un amestec de argon cu CO₂. Datorită concentrării axiale a coloanei arcului electric la sudarea în CO₂ și a presiunii de vapori ridicate, picăturile formate sunt menținute mai mult timp la capătul sârmei, favorizând creșterea dimensiunilor acestora. Desprinderea picăturilor de electrocul se face datorită greutateii lor sau prin scurtcircuit, figura 4.41.



Fig. 4.41 Arc globular [23].

Fenomenul de stropire este intens, picăturile au forme neregulate și pot urma traiectorii situate în afara rostului de sudare. Stropii sunt aderenți și necesită costuri suplimentare pentru îndepărtarea lor, iar aspectul suprafeței cusăturii sudate este convex. În funcție de grosimea metalului de bază și de puterea arcului, sudarea cu arc globular poate fi:

- Sudare cu **arc intermediar** (arc de putere medie și grosime medie a materialelor sudate în amestecuri de gaze cu baza argon și cu adaos de CO₂);
- Sudare cu **arc lung** (sudarea MAG de mare putere a tablelor de grosime mare în atmosferă de 100 % CO₂).

Arcul spray este cel mai energetic mecanism de transfer, picăturile de metal topit au dimensiuni fine și sunt proiectate pe direcție axială spre baia de sudură care este foarte fluidă, motiv pentru care se sudează doar în poziție orizontală. Rata de depunere este ridicată, viteza de sudare este mare, iar transferul de material se desfășoară cu stropi fini fără scurtcircuitare și cu stropire redusă. Trecerea de la arcul globular la arcul spray se realizează prin creșterea intensității curentului de sudare, care la limita de tranziție dintre arcul globular și arcul spray poartă denumirea de **curent de tranziție**. La curenți de sudare cu intensitate mică, sârma electrod se topește mai lent și permite formarea unor picături de formă sferică cu dimensiuni mai mari (figura 4.42). Forțele predominante ce controlează desprinderea picăturii de capătul electrodului sunt forța gravitațională și cea datorată tensiunii superficiale.

Creșterea curentului de sudare modifică raportul dintre forțele ce acționează asupra picăturii de metal topit în favoarea forțelor electromagnetice, care devin predominante. Rata de depunere crește datorită creșterii frecvenței de formare și desprindere a picăturilor metalice. Coloana arcului electric, la intensități mici de curent are o formă semisferică sau de clopot și luminozitate relativ scăzută, iar la arcul spray se concentrează și capătă o formă conică cu un nucleu foarte luminos, figura 4.42.



Fig. 4.42 Arc spray [23].

Arcul în impulsuri este o variantă avansată a arcului spray la care curentul de sudare este modulată între o valoare maximă și una de bază¹. Transferul de material se realizează sub forma unei singure picături când curentul de sudare atinge amplitudinea maximă, figura 4.43 și figura 4.44, respectiv pe un impuls de curent. Această variantă perfecționată a arcului spray s-a dezvoltat datorită necesității controlului fenomenului de stropire și pentru a elimina defectele de sudare, precum lipsa de topire și de pătrundere insuficientă a cusăturii sudate în metalul de bază, fenomene ce apar frecvent la sudarea cu arc globular.



Fig. 4.43 Arc în impulsuri [23].

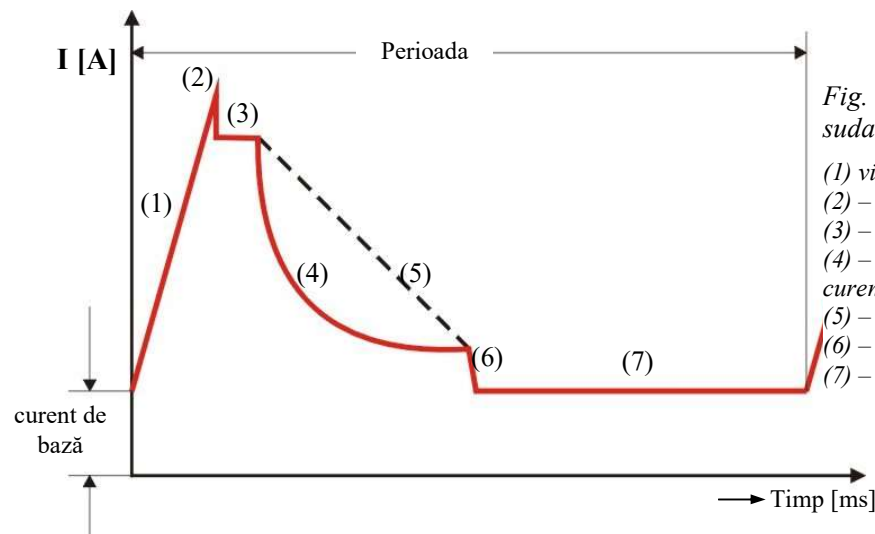


Fig. 4.44 Variația curentului de sudare la arcul în impulsuri.

- (1) viteza de creștere a curentului,
- (2) – vârf de curent,
- (3) – nivelul maxim al curentului,
- (4) – scădere exponențială a curentului,
- (5) – viteza de scădere a curentului,
- (6) – întreruperea curentului modulat,
- (7) – curent de bază (nominal).

¹ background current (lb.eng).

Nivelul maxim al curentului de sudare depășește curentul de tranziție al arcului globular-spray, iar curentul de bază este inferior curentului arcului în scurtcircuit, media curentului fiind mai mică decât curentul de sudare de la arcul spray. În mod ideal, picătura este desprinsă de electrod în momentul când curentul atinge valoarea maximă, iar valoarea scăzută a intensității curentului de bază asigură stabilitatea/continuitatea arcului de sudare, respectiv reduce cantitatea de căldură transferată piesei sudate. Prin aceasta se menține un nivel scăzut al tensiunilor termice și al deformațiilor după sudare.

Viteza de creștere a curentului de sudare, secvența (1) din figura 4.44, determină timpul de formare a picăturii de metal și poate atinge valori de 1000 amperi/milisecundă. Cu cât intensitatea curentului variază mai rapid, arcul electric devine mai dur și sunetul produs de acesta este mai zgomotos. Vârful de curent (2), se exprimă în procente din curentul maxim și determină creșterea rigidității arcului electric și a forțelor electromagnetice (efectul Pinch). Acestea contribuie substanțial la mecanismul de detașare a picăturii metalice de capătul electrodului. Nivelul maxim al curentului (3) se reglează la o valoare semnificativ mai mare decât a curentului de tranziție al arcului globular-spray și determină mărimea picăturii formate și pătrunderea cusăturii în metalul de bază. În intervalul foarte scurt de timp cât este menținut nivelul maxim al curentului de sudare, picătura se detașează de electrod și este proiectată spre baia de sudură de către forțele electromagnetice.

Legea de variație a curentului de sudare (4), scăderea de la valoarea maximă la cea de bază (nominală), este de obicei exponențială și are efect asupra fluidității particulei desprinse de electrod, precum și asupra fluidității băii de sudare care primește o cantitate de căldură mai redusă. Micșorarea rapidă a intensității curentului (6) are influență asupra stabilității arcului de sudare, respectiv asupra cantității de căldură transmisă piesei de arcul electric prin radiație termică. Valoarea curentului de bază controlează cantitatea de căldură primită de piesa sudată, precum și mărimea pătrunderii cusăturii sudate. Cu cât crește frecvența ciclului de transfer (o picătură detașată pe un ciclu de variație a curentului de sudare sau pe un impuls de curent), picăturile devin mai mici și arcul este mai concentrat, transferul de material efectuându-se mai energic.

Arcul de putere ridicată se utilizează când se dorește atingerea unor rate de depunere înalte și viteze mari de sudare. În funcție de tipul atmosferei și regimul de sudare, se disting două variante ale arcului de putere ridicată:

- Arcul spray de putere ridicată;
- Arcul rotitor.

Lungimea mare a electrodului în extensie formează un filament topit de material în coloana arcului electric de putere ridicată, care datorită forțelor electromagnetice generate de curentul de înaltă densitate, imprimă acesteia o mișcare de rotație, figura 4.45.

Intensitatea curentului electric de sudare la care se manifestă tendința arcului de a se roti, este denumită **intensitatea curentului de tranziție a arcului rotitor**.



Fig. 4.45 Arc rotitor [23].

Informațiile prezentate până în acest moment, conturează importanța regimului de sudare și a tipului de atmosferă protectoare alese, pentru controlul proprietăților de rezistență ale îmbinării sudate. În acest context, sursa de putere a echipamentului de sudare deține un rol esențial, motiv pentru care ne vom opri puțin asupra acestui aspect, pentru a detalia parametrii și caracteristicile acestora. Setarea parametrilor de sudare, reglarea vitezei de avans a sârmei, alegerea unui tip de transfer, programarea sursei, sunt aspecte esențiale pentru a obține o sudură de calitate.

Un aspect esențial care influențează adâncimea de pătrundere a cusăturii în metalul de bază, respectiv rata de depunere, îl reprezintă lungimea liberă a electrodului. Aceasta se mai numește extensia electrodului, figura 4.46 și reprezintă distanța de la duza de contact până la capătul sârmei electrod. Uzual, această distanță se ia în funcție de diametrul sârmei electrod, aproximativ de 10-12 ori diametrul acesteia, pentru un curent de sudare cuprins între 200 și 350 A. În cazul unor regimuri intensive de sudare cu arc de putere ridicată (spray sau cu arc rotitor), extensia electrodului va fi cuprinsă între 20-25 mm, iar în cazul sudării cu arc scurt, va fi redusă la cca. 10-15 mm. În principal extensia electrodului controlează rata de depunere. Creșterea lungimii libere a electrodului, determină o cădere de tensiune pe această porțiune, preluând o parte din energia furnizată de sursa de curent, datorită încălzirii prin efect Joule a capătului de sârmă. Sursa va sesiza modificarea de lungime a electrodului și prin caracteristica de autoreglare internă, va menține o lungime a arcului electric stabilă. Prin urmare, efectul va fi de micșorare a intensității curentului de sudare, ceea ce va atrage și o reducere a pătrunderii cusăturii în metalul de bază.

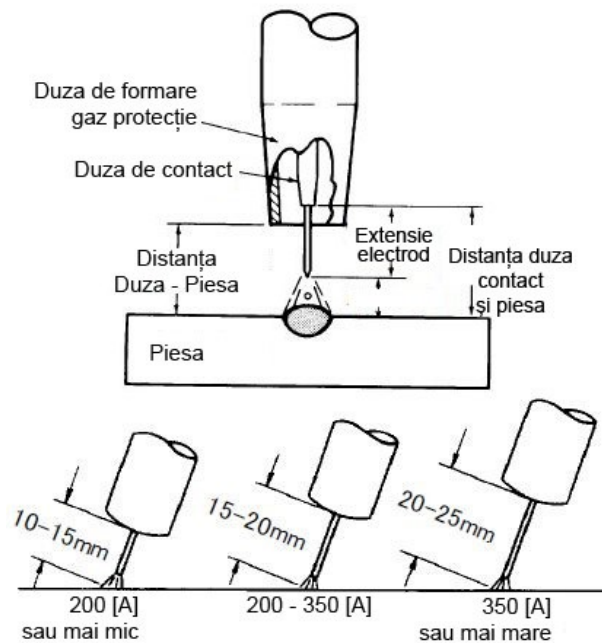


Fig. 4.46 Influența extensiei electrodului asupra caracteristicilor de productivitate.

Sursele de putere utilizate la sudarea MIG/MAG trebuie să asigure un curent de intensitate ridicată 60-500 A și tensiune relativ scăzută 20-30 V, care să prezinte o caracteristică dinamică extrem de rapidă, ceea ce se traduce printr-un timp de reacție foarte scurt la variația lungimii arcului electric. Sursele de curent sunt cu caracteristică rigidă, cu reglare internă, denumite și surse de tensiune constantă. Din condiția necesară pentru asigurarea procesului de autoreglare a lungimii arcului, rezultă importanța corelării parametrilor curentului de sudare automat, independent de pregătirea și calificarea sudorului. Aceste surse de putere se numesc cu linie **sinergică**, aspect pe care îl vom discuta în cele ce urmează.

Factorul decisiv care determină mărimea fizică și puterea sursei este **poziția transformatorului** în schema electrică bloc al echipamentului de sudare, figura 4.47. Dezvoltarea semiconductorilor de putere și progresul realizat în domeniul electronicii de putere, la curenți de intensitate foarte mare necesari în procesul de sudare combinat cu progresul din domeniul informatic, digitalizarea proceselor de conducere al acestor echipamente, au făcut posibil realizarea unor echipamente performante de sudare.

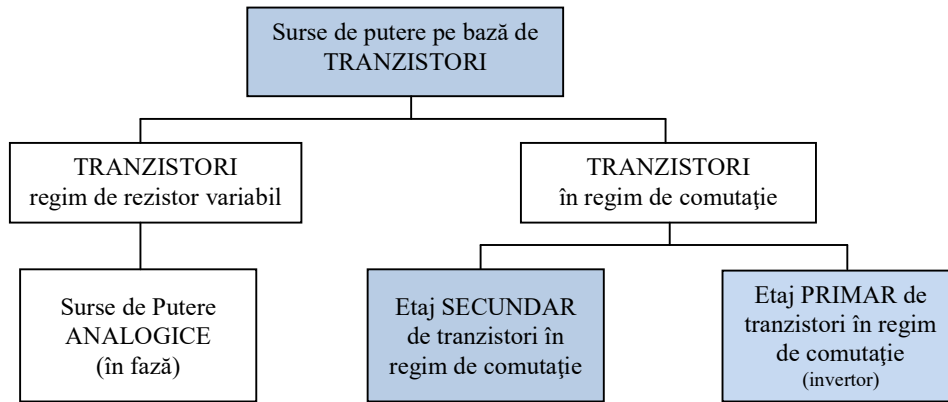
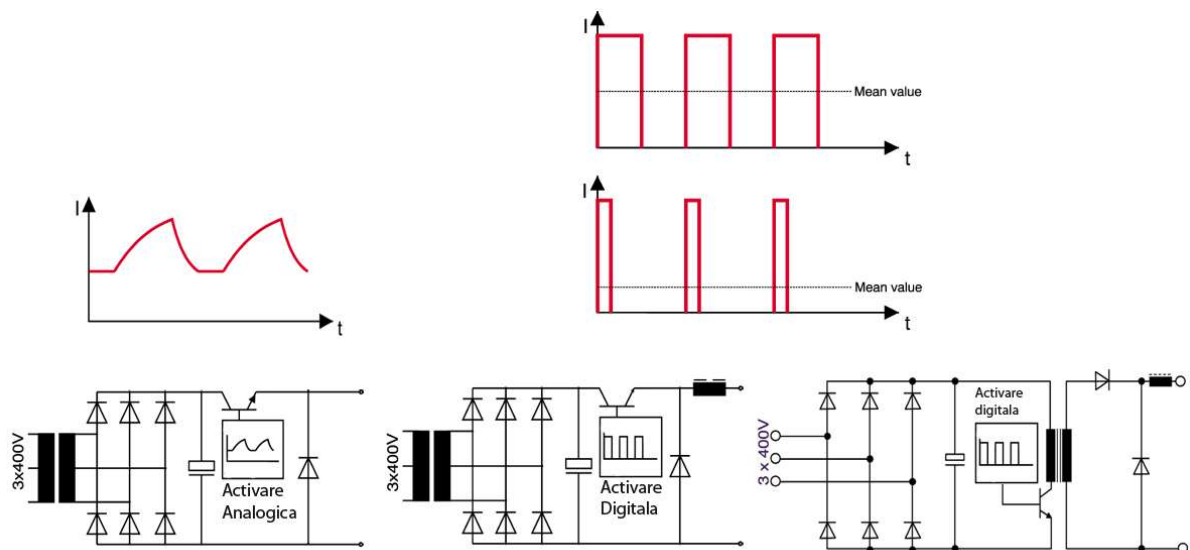


Fig. 4.47 Principiul constructiv al surselor de curent bazate pe semiconductori de putere [22].

Aceste echipamente sunt capabile să furnizeze curenți de intensitate foarte mare la tensiuni joase, modulați în frecvență și intensitate după diferite forme de undă. Prin controlul inductanței și a curentului maxim pe puls, se poate regla foarte precis valoarea impulsului pe care picătura de metal o primește și astfel accelerația și viteza cu care pătrunde în baia de sudare, aspecte extrem de importante la controlul adâncimii de pătrundere. Numărul mare de variabile care trebuie corelate dinamic, valorile efective ale intensității curentului și tensiunii în arcul electric, ale inductanței ș.a.m.d. ar face extrem de dificilă setarea unui astfel de echipament, chiar și pentru un personal avizat. Aici intervine conceptul de **linie sinergică**.

Acesta înseamnă că echipamentul de sudare stabilește și corelează toți parametrii interni, ascunși utilizatorului, în funcție de combinațiile pe care sudorul le setează pe consola aparatului: viteza de avans a sârmei, tipul curentului - continuu sau în impulsuri, tensiunea, tipul materialului adaos, diametrul sârmei, atmosferă de protecție. Sudorul setează acești parametri înainte de începerea procesului de sudare, după care de la un singur buton, uzual de la cel care reglează viteza de avans a sârmei, controlează tot setul de parametri pe care aparatul automat îi ajustează intern, simplificând extrem de mult procedura de setare a parametrilor de lucru.



a) Surse de putere ANALOGICE

b) Etaj secundar de tranzistori de putere

c) Etaj primar de tranzistori de putere (invertor)




Fig. 4.48 Principiul constructiv al surselor de curent bazate pe semiconductori de putere [22].

Problema ajustării tuturor parametrilor sursei de curent în raport cu calitatea materialului adaos și a atmosferei de protecție, îi revine echipamentului de sudare. Când sudorul alege, de ex. un material adaos de la panoul de control al aparatului, microprocesorul integrat calculează și setează toți parametrii de sudare care pot fi memorați într-un program specific, care ulterior poate fi accesat din baza de date a echipamentului. În acest fel crește flexibilitatea de lucru, sudorul putând accesa foarte rapid diferite programe de sudare, care au memorate deja parametrii de sudare în funcție de atmosfera de protecție, calitatea materialului adaos etc.

Sursa de putere cu **activare analogică** (figura 4.48.a), este construită dintr-un transformator de rețea de 50Hz, o punte redresoare și un montaj cu tranzistori de putere montați în cascadă care servesc ca și un rezistor cu rezistență variabilă continuă. Tranzistorii în cascadă elimină puterea arcului care nu este necesară procesului de sudare, pierderea de putere fiind realizată prin încălzirea semiconductorilor de putere care trebuie răciți cu ajutorul unui sistem auxiliar de răcire cu apă. Avantajul acestui sistem este viteza de reacție extrem de rapidă, însă pierderea mare energetică disipată sub formă de căldură face puțin eficiente energetic aceste surse de putere, în prezent acestea fiind tot mai puțin utilizate.

Varianta b) din figura 4.48, respectiv cu tranzistori de putere montați în secundarul transformatorului de sudare și cu **activare digitală**, constă dintr-un transformator voluminos de curent, asta înseamnă că lucrează la o frecvență de 50Hz, punte redresoare și un montaj de tranzistori de putere care acționează ca și un întrerupător, în comutație. Montajul cu tranzistori închide/deschide circuitul electric cu o frecvență de până la max. 200 kHz în funcție de tipul tranzistorilor utilizați, conform tabelului 4.12.

Tab. 4.12 Frecvența de comutație în funcție de tipul tranzistorilor utilizați în surse pentru sudare [22].

Tipul semiconductorului	Simbol	Frecvența de comutație
Tranzistor Bipolar		< 30 kHz
MOS Metal Oxide Semiconductor		< 200 kHz
IGBT Isolated Gate Bipolar Transistor		< 40 kHz

În această variantă constructivă, tranzistorii de putere realizează comutația cu viteze foarte ridicate și cu pierderi de energie mult mai mici decât în prima variantă constructivă cu activare analogică. Se poate obține astfel, un curent de sudare modulat cu o frecvență de până la 200 kHz în cazul tranzistorilor MOS și cu pierderi energetice mici, circuitul de control al tranzistorilor consumând o putere foarte redusă comparativ cu puterea livrată. La o putere a sursei de 20 kW (500 A), circuitul de control al tranzistorilor absoarbe o putere doar de câțiva W. Cu cât frecvența de comutație este mai ridicată, cu atât crește viteza de răspuns/variație a curentului de sudare, ceea ce asigură un control mai precis al mecanismului de transfer de material prin arc. Prin modularea timpilor de lucru, durata de menținere a pulsului de curent în raport cu durata de întrerupere ($I_s = 0$) a curentului, se reglează puterea arcului electric (a se vedea figura 4.48, diagramele de curent cu formă de undă dreptunghiulară) și astfel poate fi controlată energia liniară la sudare, fluiditatea băii de sudare, lățimea ZIT, adâncimea de pătrundere a cusăturii în metalul de bază și proprietățile mecanice ale materialului depus.

La sursa de putere cu **activare digitală tip inverter**, transformatorul de sudare este poziționat după blocul cu tranzistori de putere în schema electrică prezentată în figura 4.47.c. Deoarece randamentul transformatoarelor este în funcție de frecvență, în această situație volumul transformatorului pentru aceeași putere electrică este redus considerabil și în felul acesta gabaritul și greutatea invertoarelor este semnificativ mai mică, comparativ cu alte surse de curent de putere similară. Eficiența lor energetică este ridicată, de cca. 90% ceea ce le face foarte atractive pentru aplicațiile din domeniul sudării. În primă etapă, curentul de la rețea este redresat și convertit ulterior de către un bloc cu tranzistori de putere într-un curent de înaltă frecvență, care pe urmă este rectificat într-un modul final, figura 4.13. Controlul separat al inductanței circuitului electric permite controlul vitezei cu care crește intensitatea curentului electric pe puls sau în scurtcircuit și prin aceasta, controlul asupra fenomenului de stropire, figura 4.49.

În circuitul electric de putere al sursei de curent se introduce un inductor care se opune variațiilor de curent, micșorând rata cu care intensitatea variază pe ciclul/perioada formei de undă a curentului de sudare. Inductanța este variabilă și se reglează pentru a obține un arc electric stabil. Creșterea inductanței conduce la mai puține cicluri/secundă și o creștere a duratei arcului, ceea ce produce un aspect neted al cusăturii. O creștere prea mare a inductanței reduce creșterea intensității curentului, astfel încât topirea capătului sârmei este insuficient de rapidă și baia de sudare își reduce volumul, ceea ce se poate încheia cu sudarea sârmei de material și oprirea procesului.

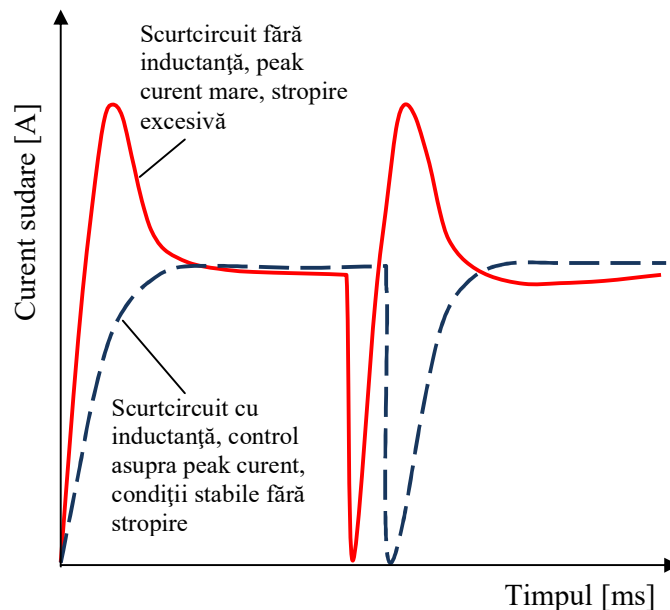


Fig. 4.49 Efectul inductanței asupra curentului de sudare.

Pe durata arcului spray, creșterea inductanței asigură o amorsare mai puțin violentă a arcului electric, controlând fenomenul de stropire. Un progres în construcția acestor echipamente de sudare îl constituie introducerea controlului digital total al echipamentului, inclusiv modulul de putere, prin intermediul procesorului digital de semnal (DSP - digital signal processors). Procesul de control digital înseamnă că toate caracteristicile arcului electric, modularea curentului de sudare și a puterii livrate de echipament se face cu ajutorul unui program software și nu hardware. Comunicarea de date între sursa de putere și elementele periferice de control, precum unitatea de avans a sârmei, panoul de control sau chiar pistolul de sudare se face printr-un bus serial prin tehnologie plug-and-play. Se facilitează în acest fel, conectarea sau deconectarea unor periferice în timpul sudării, sistemul reacționând automat la aceste modificări.

Un exemplu de dispozitiv periferic este pistolul dotat cu mini display, care permite controlul echipamentului de sudare direct de la pistolul de sudare, figura 4.50.



Fig. 4.50 Pistol de sudare cu display pentru controlul surselor de curent digitale [22].

Pornind de la procedeul de sudare MIG/MAG, s-au dezvoltat o serie de versiuni modificate, adaptate în funcție de particularitățile unor aplicații. Dintre acestea, se pot aminti:

- Sudarea **MIG/MAG cu protecție dublă**. Este o variantă în care o coloană de gaz suplimentar, asigură o protecție mai bună a băii de sudare reducând consumul de gaz inert care este mai scump. Coloana protectoare de gaz inert este introdusă central, iar printr-o duză inelară se dispune circular o coloană de CO_2 care permite astfel utilizarea unor debite mai reduse pentru gazul inert;
- Sudarea **MIG/MAG în puncte** este o altă variantă modificată a procedeului de bază. Piesele se sudează uzual prin suprapunere, piesa superioară având un orificiu în care se realizează un electronit. Duza pistolului se sprijină pe suprafața piesei și se încarcă cu material spațiul liber lăsat în piesa superioară. Se aplică la lucrări de tinichigerie auto, etc.
- Sudarea **MIG/MAG în rost îngust** s-a dezvoltat pentru a suda în condiții economice piese de grosime foarte mare, până la 350 mm. Rostul de sudare este sub 12 mm, având un unghi de deschidere a rostului ce variază uzual între 2 și 20°. Sudarea în rost îngust necesită un consum de material adaos și timp de sudare mai redus, generează deformații mici și ZIT este mai îngustă, însă necesită echipament de sudare specializat, automatizat datorită accesului dificil în rostul de sudare. Pregătirea rostului este mai pretențioasă dacă nu se permite susținerea băii la rădăcină, iar riscul de defecte datorită lipsei de pătrundere laterală insuficientă este ridicat, complicând sistemul de avans al sârmei de sudare, aspect prezentat în figura 4.51. Deasemenea, eventualele defecte de sudare detectate la controlul nedistructiv, sunt greu de remediat, datorită accesului extrem de dificil la zona defectului.



Fig. 4.51 Sudarea MIG/MAG în rost îngust.

Prevenirea apariției defectelor de sudare specifice, se poate face printr-o serie de soluții tehnologice:

- Utilizarea a doi electrozi în tandem, fiecare electrod fiind orientat spre peretele lateral (metodă utilizabilă la sudarea sub strat de flux și MIG/MAG);
- Utilizarea unui electrod care a fost deformat sub forma unei spirale, ceea ce are ca efect rotirea arcului în rostul îngust (metodă utilizabilă la sudarea MIG/MAG);
- Utilizarea a două sârme de sudare împletite (metodă utilizabilă la sudarea MIG/MAG);
- Utilizarea unui cap de sudare ce pendulează automat duza de contact alternativ spre pereții laterali ai rostului îngust (metodă utilizabilă la sudarea MIG/MAG);
- Oscilarea arcului electric.

Ca și aplicații ale sudării MIG/MAG în rost îngust se pot aminti: sudarea structurii exterioare a submarinelor, sudarea recipientelor de înaltă presiune, sudarea reactoarelor nucleare, practic a structurilor metalice ce sunt confecționate din elemente cu grosime de peste 50 mm.

Echipamentele de sudare MIG/MAG sunt controlate de programe software, care comandă sursa de curent și asigură diferite mecanisme de transfer ale materialului prin arcul electric. Aceste tehnologii de control avansate ale curentului de sudare, sunt protejate prin patente care poartă denumiri comerciale, precum: Surface Tension TransferTM, TIMETM, Constant PowerTM, Rapid MeltTM etc. și sunt optimizate pentru diferite materiale sau regimuri de sudare. Sursele de curent sunt cu linie **sinergică** deoarece permit controlul avansat al parametrilor de sudare cu ajutorul unui singur reglaj, mecanismul de transfer al picăturilor topite fiind controlat¹ în funcție de caracteristicile sursei, respectiv de puterea arcului electric.

Sudarea **MIG/MAG cu rată mare de depunere**, procedeul TIMETM s-a dezvoltat pentru a obține rate foarte ridicate de depunere. Rata de depunere M depinde de valoarea intensității curentului de sudare, tensiunea arcului influențând doar aspectul cusăturii sudate neavând influență asupra ratei de depunere, aspect ce reiese din ecuația 4.7, unde L reprezintă lungimea liberă a sârmei și d este diametrul sârmei electrod, iar A , B și C sunt constante funcție de procedeul de sudare.

$$M = A + B \cdot I_s + C \cdot \frac{L \cdot I_s^2}{d^2} \quad (\text{kg/h}) \quad (4.7)$$

Prin urmare, pentru o sârmă electrod cu diametrul de 1,2 mm, la curenți de sudare cu intensitate de peste 400 A, arcul electric de putere face transferul de material incontrolabil, datorită efectului de rotire. Prin creșterea lungimii libere L a sârmei de sudare și prin utilizarea unui amestec de gaz special ce conține 40-70% Ar, 25-60% He, 3-10% CO₂ și 0.1-1% O₂ brevetat în cadrul procedurii TIME² s-au atins viteze de avans ale sârmei de până la 50 m/min, corespunzând unei rate de depunere de 27 kg/h, conform figurii 4.52. Intensitatea curentului de sudare poate atinge valori de până la 760 A, iar tensiunea arcului de 60 de V, ceea ce necesită automatizarea procesului de sudare.

Pentru stabilizarea arcului electric, atmosfera de protecție este esențială în cadrul procedurii de sudare TIME. Heliul mărește conductivitatea termică a atmosferei, dar și tensiunea de ionizare, ceea ce necesită o creștere a tensiunii arcului. Adăugarea unei mici cantități de oxigen în amestec, contribuie la reducerea tensiunii superficiale a metalului topit și micșorează puțin tensiunea de ionizare care este mai ridicată datorită prezenței He.

¹ waveform control technology

² TIMETM = Transferred Ionized Molten Energy, brevetat de Fronius (lb. eng.)

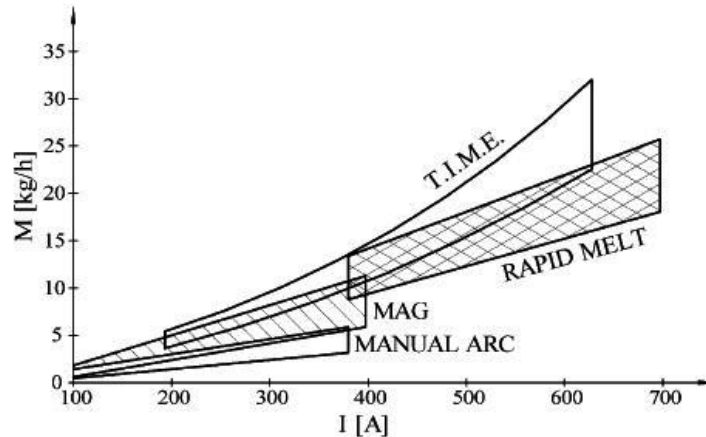
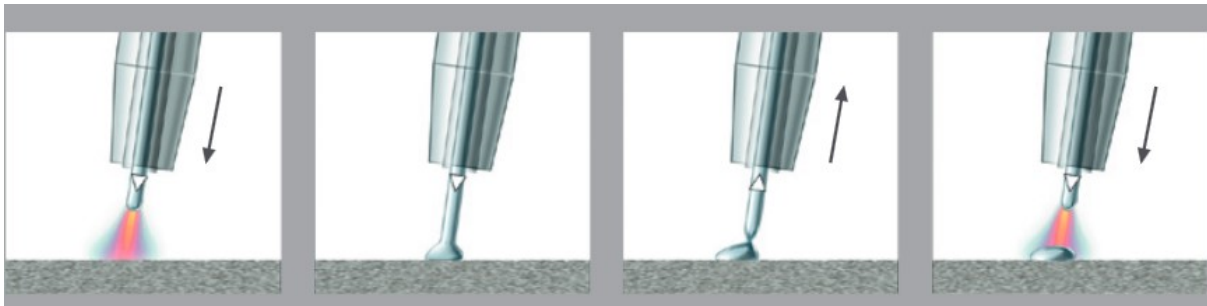


Fig. 4.52 Rata de depunere $M(\text{kg/h})$ în funcție de curentul de sudare $I_s [A]$, [24].

Chiar și în concentrații foarte reduse ale oxigenului în amestec, acesta prezintă un efect de stabilizare a arcului electric, filamentul de metal topit rotindu-se sub acțiunea forțelor electromagnetice foarte mari. Fenomenul se aseamănă, desigur la o scară mai redusă cu erupțiile solare, când filamente de plasmă sunt proiectate în corona solară. Practic, ideea este de a evita aceste erupții necontrolate de material topit și de a stabiliza arcul electric rotitor de putere foarte ridicată, limitând fenomenul de stropire. Controlul vâscozității filamentului de metal topit este esențial în acest proces, de unde rezultă contribuția fiecărui gaz component în parte: heliul mărește adâncimea de pătrundere, oxigenul controlează tensiunea superficială a metalului topit, CO_2 mărește rigiditatea arcului electric și adâncimea de pătrundere, având și un efect de îndepărtare a oxizilor din baia metalică.

La polul opus, în cazul sudării unor materiale foarte subțiri sau diferite, cu punct de topire mult diferit, (de ex. la sudarea Al cu oțel) este nevoie de un control foarte precis al efectului termic, menținerea temperaturii băii de sudare la limita inferioară, pentru a nu străpunge materialul sau pentru a evita formarea unor compuși intermetalici foarte fragili în metalul depus.



a) pe durata arcului, sârma adaos este antrenată spre baia de sudare.

b) când sârma face scurtcircuit, arcul se stinge și intensitatea curentului de sudare se reduce.

c) se inversează sensul de antrenare al sârmei și se realizează detașarea picăturii de metal. În continuare I_s este redus.

d) se inversează sensul de antrenare al sârmei, crește I_s și procesul de formare a picăturii se reia.

Fig. 4.53 Principiul sudării Cold Metal Transfer [25].

Astfel s-a dezvoltat procedeul **CMT** (Cold Metal Transfer) de la Fronius, și sudarea **Cold Arc TransferTM**. În cazul CMT procesul de sudare se caracterizează prin retragerea sârmei la o anumită distanță în momentul producerii scurtcircuitului, iar în varianta Cold Arc TransferTM efectul dorit se obține prin comanda electronică a sursei de curent.

În figura 4.53 este ilustrat modul de sudare prin tehnologia CMT de la Fronius, în care sârma electrod execută o mișcare de avans cu schimbarea periodică a sensului, de până la 90 ori/sec. Pentru aceasta, unitatea de avans a sârmei este dotată cu două motoare pas cu pas de precizie foarte ridicată controlate digital, câte unul pentru fiecare sens de mișcare. Valorile intensității curentului de sudare sunt menținute la valori foarte mici, ceea ce permite sudarea unor materiale extrem de subțiri, așa cum este ilustrat în figura 4.54.



a) sudare CMT cap la cap fără susținere baie la rădăcină, tablă AlMg₃ de 0.3 mm grosime.

b) sudare CMT între oțel și Al. Sudat pe partea cu Al și brazat pe partea cu tabla de oțel.

Fig. 4.54 Exemple de aplicare a tehnologiei de sudare Cold Metal Transfer [25].

4.1.4 Sudarea cu sârmă tubulară

Deși se aseamănă într-o foarte mare măsură cu procedeul de sudare MIG/MAG, sudarea cu sârmă tubulară este un procedeu diferit și clasificat ca atare, fiind simbolizat cu codul 136 conform ISO 4063-2011. Se poate suda și în atmosferă de protecție, însă procedeul a fost dezvoltat pentru a înlocui sudarea cu electrod învelit, în special pe șantierele navale. Atmosfera de protecție se obține din arderea elementelor gazeifiante prezente în miezul electrodului care îndeplinesc aceleași funcții ca și în cazul învelișului de la electrodul învelit. Principalele diferențe dintre acest procedeu de sudare și sudarea MIG/MAG, sunt următoarele:

- Alierea metalului depus prin elementele din miezul sârmei;
- Stabilitate ridicată a arcului electric;
- Pierdere prin stropire redusă;
- Sensibilitate redusă la sudare în curenți de aer;
- Viteza de răcire în ZIT și a cusăturii sudate este mai redusă.

Transferul de material prin arc electric prezintă aceleași caracteristici ca și la sudarea MIG/MAG cu observația că, la puteri ridicate ale arcului electric nu apare fenomenul de instabilitate datorită rotirii arcului. Se formează zgură la suprafața cusăturii sudate, care trebuie îndepărtată înaintea depunerii straturilor următoare. Uzual, diametrul sârmelor cu miez de flux este între 1.0 - 1.6 mm, iar în funcție de compoziția miezului de flux acestea se pot clasifica în:

- Sârme tubulare cu componente zgurifiante bazice;
- Sârme tubulare cu componente zgurifiante rutilice;
- Sârme tubulare fără componente zgurifiante, conținând numai pulberi metalice.

Din punct de vedere al caracteristicilor mecanice ale materialului depus, situația este asemănătoare cu cea de la sudarea cu electrozi înveliți. În cazul utilizării sârmelor având componente cu caracter bazic, obținem valori ridicate ale rezistenței mecanice, tenacitate ridicată, tendință redusă de formare a porilor, conținut scăzut de hidrogen dizolvat (sub 1.5 ml/100 g metal depus în cazul sârmelor cu profil sudat). Se utilizează varianta sudării în impulsuri.

În cazul sudării cu sârmă cu miez rutilic, obținem avantajele specifice asemănătoare cu cele de la sudarea cu electrod învelit și înveliș rutilic. Avem o stabilitate ridicată a arcului electric, însă valori mai reduse a caracteristicilor mecanice ale materialului depus și a tenacității. Acest fapt se datorează conținutului mai ridicat de elemente dezoxidante din miez (în principal aluminiu), adăugate pentru a compensa efectul oxigenului și azotului din arc electric/baia de sudare. Utilizarea sârmelor cu miez din pulberi metalice fără adaosuri zgurifiante, determină un efect de stropire foarte redus, putând fi utilizate la sudarea robotizată a unor profile de formă complexă, pentru care ar fi dificil de îndepărtat stropii metalici aderenți pe suprafața pieselor (ex. la sudarea caroseriilor autoturismelor). Nu este nevoie de îndepărtarea zgurei la sudarea multistrat, însă este nevoie de protecție de gaz la sudare. Din punct de vedere constructiv, sârmele tubulare pot fi realizate cu profil de închidere, conform figurii 4.55:

- a) Simplu sudat;
- b) Simplu, cap la cap;
- c) Simplu cu marginile suprapuse;
- d) Simplu, cu îndoirea unei margini;
- e) Simplu, cu îndoirea ambelor margini;
- f) Dublu.

Spre deosebire de electrozii înveliți, sârmele tubulare prin construcția lor protejează miezul de acțiunea umidității din mediul înconjurător, nefiind necesară o calcinare prealabilă a acestuia înainte de sudare sau asigurarea unor condiții deosebite de păstrare/depozitare. Datorită acestei particularități, cantitatea de hidrogen difuzibil din materialul depus este mică.

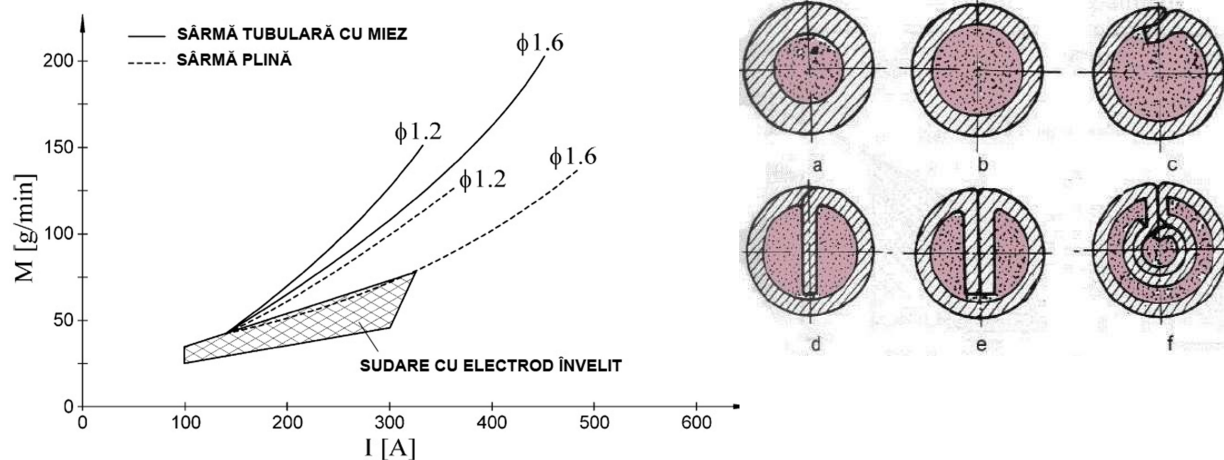


Fig. 4.55 Principii constructive ale sârmelor tubulare cu miez de flux și caracteristicile de productivitate la sudare.

Deși sârmele tubulare cu autoprotecție (se sudează fără atmosferă de protecție) s-au dezvoltat inițial pentru sudarea oțelurilor slab aliate și a celor inoxidabile, în prezent sunt cel mai frecvent utilizate la sudarea oțelurilor structurale. Sudarea cu sârme tubulare cu autoprotecție oferă rate de depunere mai ridicate, deoarece lungimea liberă a electrodului în aceste cazuri este între 25 și 100 mm, valori care sunt de 4 ori mai mari comparativ cu cele de la sudarea MAG. Rezistența electrică a capătului de sârmă crește semnificativ și are loc o preîncălzire a sârmei, înainte de a pătrunde în coloana arcului electric. Energia electrică consumată pentru preîncălzirea capătului de sârmă permite topirea cu viteză ridicată a sârmei de sudare, măbind rata de depunere. Totodată, se micșorează energia disponibilă pentru a topi metalul de bază, rezultând astfel o micșorare a adâncimii de pătrundere a cusăturii în material, care este mult mai mică comparativ cu cea obținută la sudarea MAG.

4.1.5 Sudarea WIG

Procedeul de sudare WIG (TIG în lb. eng.) face parte din grupa procedeelor de sudare cu electrod nefuzibil și în atmosferă de gaze protectoare, conform ISO 4063-2011, tabelul 4.13. Arcul electric arde între un electrod nefuzibil de wolfram și metalul de bază, sursa de curent având o caracteristică externă coborâtore, datorită faptului că lungimea arcului depinde de sudor.

Tab.4.13 Codificarea numerică a procedeelor de sudare cu electrod nefuzibil.

14	Sudarea în atmosferă protectoare și cu electrod neconsumabil
141	Sudarea TIG (Tungsten Inert Gas)
149	Sudarea în hidrogen atomic (Atomic-hydrogen welding)

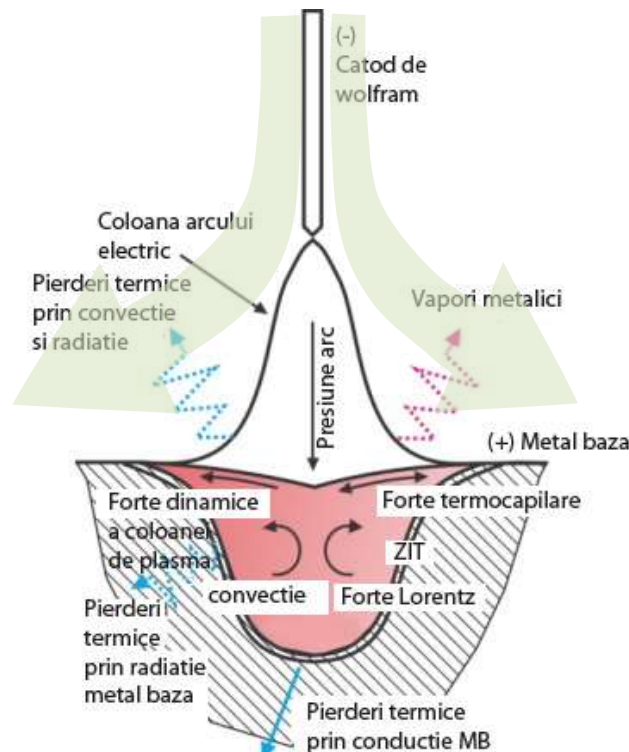


Fig. 4.56 Dinamica formării băii de sudare la sudarea WIG.

Între capătul liber al electrodului de wolfram și baia metalică se formează un arc de plasmă neconstrâns. Coloana arcului de plasmă exercită o presiune asupra suprafeței libere a băii de sudare care este agitată prin convecția metalului topit și a forțelor Lorentz. Acestea vor determina sensul de rotație a curenților de metal topit din baia de sudare. Datorită gradientului de convecție, în baia de sudare se formează doi curenți de material topit, care se rotesc în sensuri inverse, antrenând metalul topit fie spre suprafața băii de sudare, fie spre profunzimea acesteia, controlând adâncimea de pătrundere a cusăturii în metalul de bază. Să le analizăm pe rând și să vedem natura fiecărei forțe care acționează asupra băii de sudare, influențând comportamentul dinamic al acesteia.



Presiunea arcului de plasmă este efectul pe care arcul de plasmă îl manifestă asupra suprafeței băii de sudare, prin care se crează o depresiune, a cărei profil depinde de mai mulți factori, factorul principal fiind curentul de sudare.

În plasmă, atomii de gaz sunt ionizați și pierd electroni care devin sarcină liberă de conducție. Electronii de conducție sunt puternic accelerați spre baia de sudare contribuind la creșterea adâncimii pentru depresiunea formată și la transferul termic, în vreme ce ionii de gaz bombardează suprafața electrodului de wolfram, așa cum este ilustrat în figura 4.57. Temperatura din interiorul băii de sudare nu este uniformă, apare un transfer de masă, respectiv o mișcare de convecție a metalului topit din baia de sudare, ca urmare a diferenței de tensiune superficială dintre diferite zone ale acesteia, figura.4.56. Deoarece transferul de masă este indus de variația temperaturii, se mai numește **convecție termo-capilară**¹ sau convecție Bénard–Marangoni.



Efectul de mișcare a unui fluid datorită convecției termice și a gradientului de tensiune superficială se numește **efect Marangoni**.

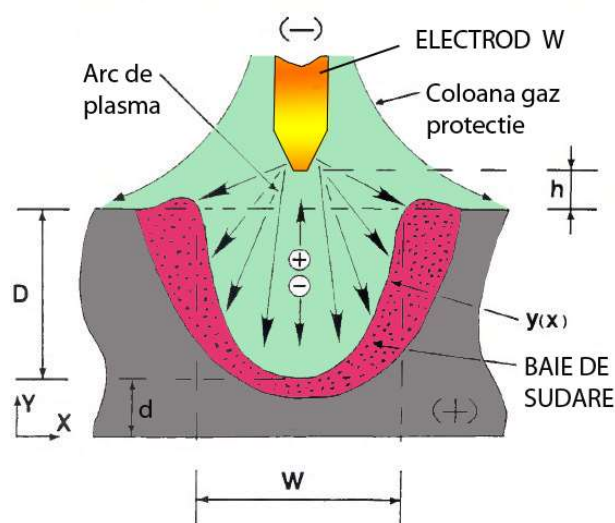


Fig.4.57 Presiunea arcului de plasmă asupra băii de sudare, la procedeul WIG [26].

În afara variației tensiunii superficiale, gradientul de temperatură din baia de sudare conduce și la variația rezistivității electrice în volumul băii de sudare. Ambele proprietăți fizice sunt dependente de temperatură. Astfel, apar variații în curentul electric în volumul băii de sudare, ceea ce produce **forțe electromagnetice Lorentz** a căror orientare este similară cu forțele exercitate de presiunea arcului, contribuind la creșterea turbulenței în baia de sudare. Forța exercitată de arc de plasmă asupra suprafeței băii de sudare are expresia prezentată în ecuația (4.8), în care μ_0 este permeabilitatea magnetică a vidului, iar raportul R_2/R_1 este expansiunea arcului, R_1 este raza arcului la vârful electrodului, iar R_2 este raza arcului la nivelul piesei metalice [27].

$$F_{arc} = \frac{\mu_0 \cdot I^2}{8\pi} \left(1 + 2 \ln \left(\frac{R_2}{R_1} \right) \right) \quad (4.8)$$

La sudarea WIG, gradientul tensiunii superficiale este negativ, ceea ce conduce la o mișcare de convecție de tip centrifugal așa cum este ilustrat în figura 4.56. Materialul topit de la baza băii de sudare, prezintă o mișcare ascensională în zona mediană dirijată spre suprafața băii, în vreme ce la varianta activată WIG, sensul de rotație a curenilor de metal topit se inversează.

¹ thermo-capillary convection (lb.eng.)

Pentru a obține acest efect, este necesar introducerea unui flux de activare ce modifică tensiunea superficială a băii și determină sensul de rotație a mișcării convective a curenților de metal topit. Zona mai fierbinte de la suprafața băii de sudare se deplasează central, unde sub acțiunea presiunii arcului de plasmă, va fi antrenată către metalul de bază, spre baza băii de sudare și astfel adâncimea de pătrundere poate crește cu un factor de până la 4 ori, figura 4.57 [27].

Asupra băii de sudare mai acționează forțe hidrostactice, datorită diferențelor de nivel și atracției gravitaționale. Acțiunea conjugată a forțelor care se manifestă asupra băii de sudare contribuie la atingerea unui echilibru dinamic pe durata procesului de sudare, determinând geometria secțiunii transversale a cusăturii sudate, respectiv adâncimea de pătrundere.

Procedeul de sudare WIG se aplică în general la sudarea:

- tablelor subțiri;
- sudarea stratului de rădăcină la îmbinări puternic solicitate, iar sudarea straturilor de completare fiind realizată printr-un alt procedeu;
- sudarea cap la cap a țevelor de diametru redus, sau în general a îmbinărilor cu acces dintr-o singură parte;
- sudarea materialelor reactive precum Cu, Al, Ti, oțeluri aliate etc;
- sudarea îmbinărilor cu pretenții ridicate de calitate.

Sudarea se poate realiza cu sau fără material adaos, în funcție de grosimea materialului. Se poate suda atât în curent alternativ cât și în curent continuu, sursa de curent având o caracteristică coborâtore. Sursele moderne de curent permit și sudarea în impulsuri, cu frecvențe ale curentului cuprinse între 10-100 Hz, în acest fel mărindu-se adâncimea de pătrundere. Procedeul de sudare se aplică în variantă manuală, mecanizată sau automatizată.

Tab. 4.14 Principalele caracteristici ale sudării WIG.

Parametrul	Domeniul de valori
Diametrul electrodului de W	0.5 - 6 mm
Curentul de sudare	10 - 300 A
Densitatea de curent	A/mm ²
Tensiunea arcului electric	10 - 25 V
Viteza de sudare	10 - 30 cm/min
Rata de depunere	1.8 - 5.4 kg/h
Grad de diluție	
Debit gaz protecție	5 - 15 l/min

Electrodul de wolfram, baia de sudare și zonele fierbinți ale materialului de bază sunt protejate de o coloană de gaz inert, uzual Ar, însă se poate utiliza și o combinație de gaze Ar-He sau Ar cu max.10% H₂. Adăugarea de heliu la atmosfera de argon, contribuie la creșterea conductivității termice a atmosferei de protecție, aspect necesar în special la sudarea unor materiale cu grosime mai mare, pentru a compensa pierderile termice prin conducție în metalul de bază, Fig. 4.58.

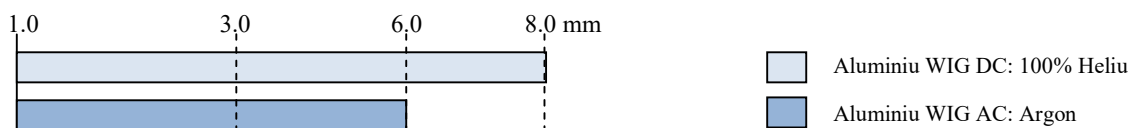


Fig. 4.58 Atmosfere de protecție la sudarea WIG a aluminiului.

Debitul de gaz se alege în funcție de grosimea și tipul materialului sudat, respectiv în funcție de diametrul duzei ceramice de protecție, valorile recomandate fiind prezentate în Fig. 4.59. În cazul sudării WIG a materialelor reactive, cu afinitate ridicată față de oxigen, este nevoie de debite mărite de gaz pentru a asigura o protecție corespunzătoare a băii de sudură. Datorită densității reduse a heliului, este necesar corectarea debitului de gaz citit pe rotametrul etalonat pentru Ar, în funcție de conținutul de He, așa cum este ilustrat în Fig. 4.59.

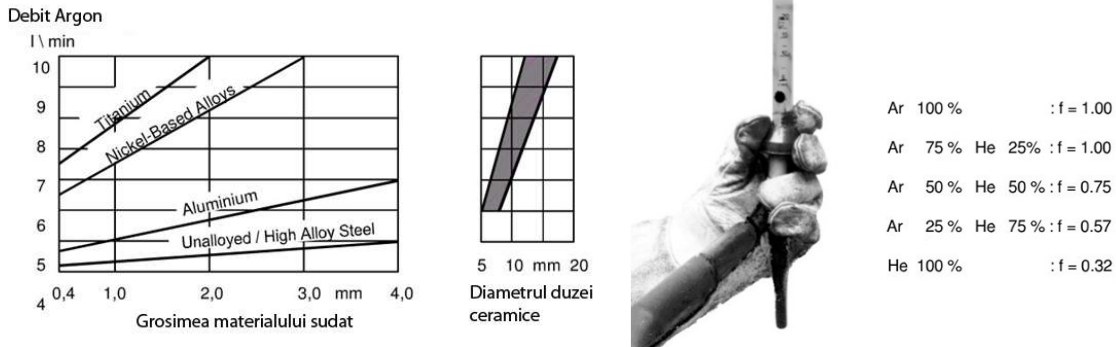


Fig. 4.59 Debitul de gaz inert necesare la sudarea WIG.

Este posibil sudarea aluminiului cap la cap într-o singură trecere până la grosimi de 8 mm ale materialului, dacă se utilizează atmosferă de protecție din He, spre deosebire de cazul în care atmosfera de protecție este din Ar sau amestec de Ar cu He, când grosimea maximă scade la 6 mm. Curentul de sudare, cu o formă de undă dreptunghiulară și modulată în frecvență, determină aspectul suprafeței cusăturii sudate, respectiv adâncimea de pătrundere, conform figurii 4.60. La frecvențe mai ridicate ale curentului de sudare, suprafața cusăturii rezultă mai netedă și este asigurată o pătrundere superioară în metalul de bază.

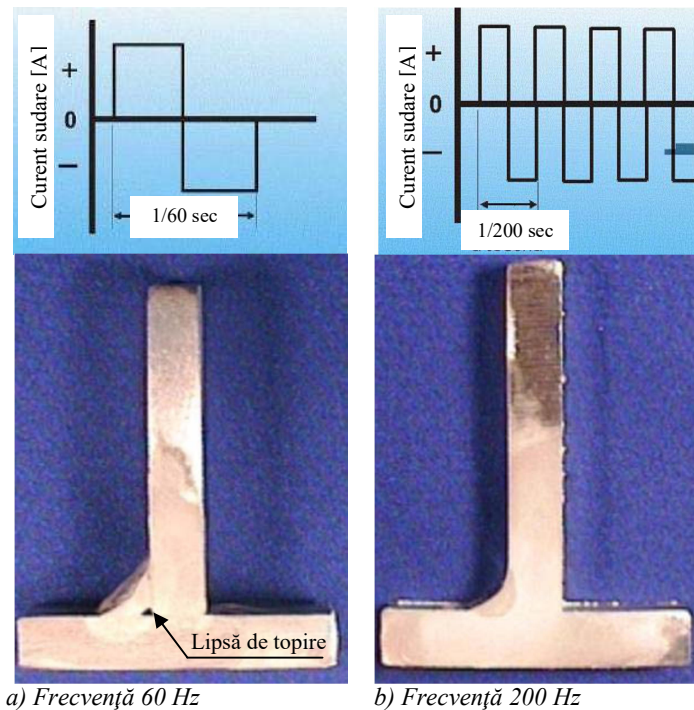


Fig. 4.60 Influența curentului de sudare asupra pătrunderii cusăturii sudate și asupra aspectului suprafeței acesteia [28].

În figura 4.60 este ilustrată influența curentului de sudare asupra geometriei și adâncimii de pătrundere a cusăturii în metalul de bază. Creșterea frecvenței curentului de sudare asigură o pătrundere mai ridicată a cusăturii și previne apariția unor defecte de sudare precum lipsa de topire la rădăcină, figura 4.60 a). Deasemenea, durata de exploatare a electrodului de wolfram crește, acesta își păstrează geometria la vârf o perioadă mai îndelungată de timp, fiind nevoie de mai puține reascuțiri pentru aceeași durată de exploatare. Geometria la vârful electrodului este esențială pentru asigurarea unui câmp termic concentrat al arcului de plasmă, menținând în parametrii optimi raportul dintre adâncime de pătrundere/lățime cusătură. Forma coloanei de plasmă este determinată și de proprietățile coloanei de gaz de protecție, tabelul 4.15.



a) Sudare cu polaritate variabilă și curent modulat având formă de undă dreptunghiulară, $f=200$ Hz. b) Sudare cu polaritate variabilă și curent modulat având formă de undă dreptunghiulară, $f=60$ Hz.
Fig. 4.61 Aspectul suprafeței cusăturii sudate în funcție de curentul de sudare, procedeul WIG [28].

Tab. 4.15 Comparație între gazele inerte Ar și He utilizate la sudarea WIG.

ARGON	HELIU
Amorsare ușoară a arcului electric	Amorsare mai dificilă a arcului electric
Conul de plasmă este focalizat	Conul de plasmă este mai divergent
Stabilitatea arcului ridicată	Stabilitate arc mai redusă la curenți mici de sudare
Tensiune în arc mai redusă	Tensiunea în arc mai înaltă
Efect de curățire a oxizilor ridicat	Efect de curățire a oxizilor mai redus
Debite de gaz 8-12 l/min	Debite de gaz dublu volumetric
Cost mai redus gaz	Cost ridicat gaz

Deoarece materialul adaos nu este conectat în circuitul electric, transferul de material se face fără stropire, pierderile de material adaos fiind minime. La sudarea manuală, sudorul va avea grijă să mențină un volum constant al băii de sudare și o lățime constantă a cusăturii sudate. Este importantă menținerea capătului vergelei materialului adaos în zona de protecție a atmosferei, pentru a preveni oxidarea acestuia, prevenind astfel introducerea oxizilor în baia de sudare. Deasemenea, materialul adaos trebuie manevrat cu mânuși curate pentru a preveni contaminarea acestuia cu grăsimi sau uleiuri, atât în timpul manipulării acestuia cât și pe durata procesului de sudare. În caz contrar, există riscul contaminării băii de sudare cu hidrogen și în acest fel crește riscul de fisurare la rece a îmbinării sau se înregistrează o creștere a porozității în metalul depus.

În acest fel, nu se formează zgură deasupra băii de sudare, cusătura sudată rezultând curată și cu risc minim de incluziuni nemetalice. Cantitatea de incluziuni nemetalice depinde exclusiv de calitatea pregătirii suprafețelor sudate, de calitatea materialului adaos și de bază și de asigurarea corectă a protecției cu gaze pe durata sudării, atât a băii de sudare cât și a rădăcinii cusăturii sudate.

Dintre dezavantaje ale procedului de sudare WIG, se pot aminti: rata mică de depunere, productivitatea redusă, radiație luminoasă UV mai intensă, necesitatea calificării înalte a sudorului, dificultatea de a asigura protecție gazoasă la sudarea în spații deschise unde curenții de aer pot interfera cu coloana de gaz protector, asigurarea condițiilor mai pretențioase de curățenie atât a metalului de bază, cât și a celui adaos.

Electrodul este confecționat din wolfram și nu se topește în procesul de sudare pentru a participa cu material la formarea cusăturii sudate. O caracteristică importantă a electrodului este capacitatea de emisie electronică care influențează numărul de sarcini electrice, respectiv electronii emiși de electrod în unitatea de timp. În capitolul 3 s-a prezentat relația lui Richardson-Dushman, ec. (3.1) care exprima densitatea de curent J a fluxului de termoioni: $J = A \cdot T^2 \cdot \exp(-W/kT)$, $[A/m^2]$. Se observă faptul că densitatea de curent este o funcție de tip Arhenius, în care energia caracteristică de extracție W^1 joacă rolul unei energii de activare, iar densitatea de curent depinde de puterea a doua a temperaturii.

Prezența oxidului pe suprafața electrodului reduce lucrul de extracție a electronilor de pe suprafața acestuia. Prin urmare, s-au realizat electrozi nefuzibili de wolfram ce conțin oxizi de thoriu, lantan sau zirconiu ce asigură caracteristici superioare de emisivitate termică. Aceste tipuri de electrozi au o stabilitate termică ridicată, pot funcționa la temperaturi superioare, adică la puteri mai mari ale arcului. Deasemenea, au caracteristici îmbunătățite în ceea ce privește capacitatea de amorsare a arcului electric, necesare la sudarea în curent alternativ când arcul electric se stinge periodic la inversarea polarității curentului de sudare. Această problemă a stingerii și amorsării repetate a arcului la sudarea în curent alternativ, s-a ameliorat prin construcția unor surse de curent care sunt capabile să asigure un curent de sudare modulată în frecvență, având o formă de undă dreptunghiulară în loc de forma sinusoidală convențională.

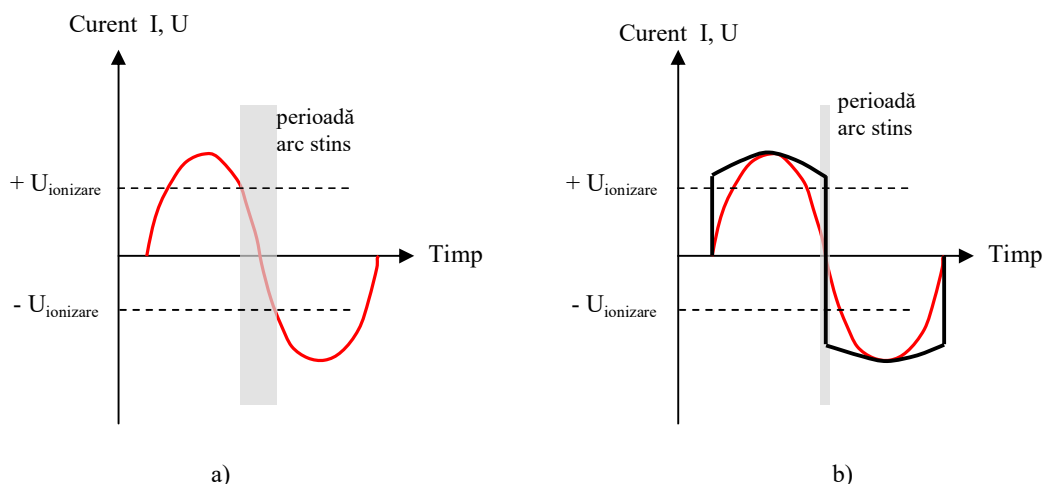


Fig. 4.62 Influența formei de undă a curentului asupra stabilității arcului electric, sudare WIG.

La rețeaua electrică, intensitatea și tensiunea curentului variază în fază în cazul curentului alternativ după o lege sinusoidală și cu o frecvență de 50 Hz. Asta înseamnă că de fiecare dată când curentul electric trece prin zero la schimbarea polarității, se produce o stingere a arcului electric, urmată de o reaprindere. De fapt, stingerea și reaprinderea arcului electric se produce când tensiunea în arc scade sub valoarea potențialului de ionizare al atmosferei de protecție, reprezentat pe schemele din figura 4.62 prin două linii orizontale punctate, corespunzător valorilor $\pm U_{ionizare}$ [V].

În momentele în care arcul electric este stins, baia de sudare se răcește și reamorsarea arcului devine dificilă în condițiile în care suprafața materialului este oxidată sau când tensiunea în arc este mică în cazul sudării cu arc de putere redusă a unor materiale subțiri. Pelicula de oxid Al_2O_3 este izolatoare electric și conduce la o instabilitate a arcului, la sudarea aluminiului sau aliajelor sale.

¹ Este o caracteristică de material

Prin urmare a fost necesar să se modifice forma de undă sinusoidală a curentului într-o formă de undă rectangulară, zona de stingere a arcului îngustându-se considerabil, prin aceasta crescând stabilitatea electrică a arcului. Mai mult, în momentul schimbării polarității, peste curentul nominal se suprapune un puls de intensitate mai mare a curentului, asigurând o amorsare ușoară a arcului de sudare, așa cum este ilustrat în figura 4.63.

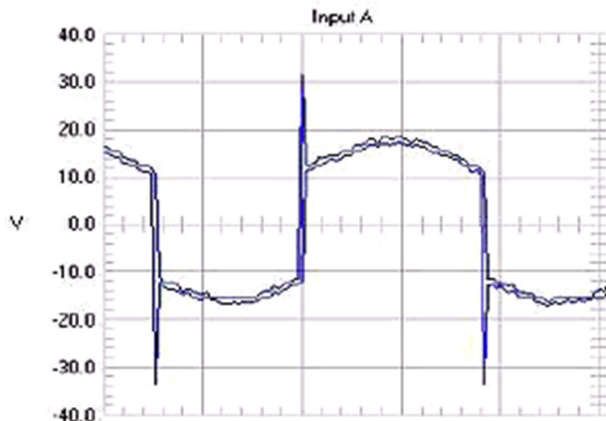


Fig. 4.63 Aspectul formei de undă la sudarea WIG în curent alternativ [28].

Stingerea și reaprinderea arcului electric în cazul sudării WIG în curent alternativ cu formă de undă modificată, produce un nivel de zgomot ridicat care depinde de frecvența și intensitatea curentului de sudare. Sudarea în curent cu formă de undă sinusoidală este mai silențioasă, însă prezintă dezavantajele reducerii adâncimii de pătrundere și a stabilității arcului electric mai reduse. Aceste inconveniente pot să conducă la apariția unor defecte de sudare, asociate cu lipsa de topire.

La echipamentele uzuale de sudare WIG, amorsarea arcului se face cu un curent de înaltă frecvență care preionizează spațiul dintre electrod și piesă și inițiază arcul electric, între electrodul de wolfram și piesa metalică neexistând contact fizic. În momentul stabilirii arcului electric, temperatura electrodului crește foarte rapid, iar lungimea arcului se stabilizează la valori cuprinse între 2-5 mm. În cazul surselor convenționale, amorsarea arcului prin scurtcircuitarea electrodului de W cu metalul de bază ar produce o contaminare a acestuia, care ar micșora durata de viață și ar modifica geometria la vârful electrodului. Prin urmare, s-ar modifica și caracteristica arcului electric, cu efecte negative asupra calității îmbinării sudate. Echipamentele moderne de sudare WIG permit inițierea arcului electric prin scurtcircuitare, prin tehnologia *Lift Arc*. Aceasta, presupune atingerea electrodului de piesa rece, echipamentul detectează scurtcircuitul și reduce tensiunea la câțiva volți și intensitatea la 1-2 A. Se ridică ușor pistolul de sudare și la aceste valori reduse ale curentului de sudare se produce un arc de putere foarte redusă, care apoi în câteva microsecunde de la creșterea lungimii arcului electric, intensitatea și tensiunea cresc foarte rapid la valorile nominale, prevenindu-se contaminarea electrodului de wolfram și a băii de sudare.

Un aspect important la sudarea WIG este efectul de microablare a suprafețelor metalice acoperite cu o peliculă subțire de oxid aderent, cum este cazul peliculei de Al_2O_3 în cazul sudării aluminiului. Prezența acestui oxid foarte stabil termic, cu punct de topire de $2072\text{ }^\circ\text{C}$, ridică probleme la sudarea aluminiului care are punctul de topire la $660\text{ }^\circ\text{C}$. Din punct de vedere electric Al_2O_3 este izolator, ceea ce se răsfrânge negativ asupra amorsării și stabilității arcului electric, însă are o conductivitate termică ridicată ($30\text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$). Ca urmare, dacă pelicula de oxid nu este îndepărtată de pe suprafața metalică, aluminiul se topește și curge sub pelicula de oxid care pătrunde în baia de sudare și conduce astfel la un conținut ridicat de incluziuni nemetalice în cusătura sudată și la proprietăți mecanice de rezistență necorespunzătoare.

Îndepărtarea peliculei de Al_2O_3 se face prin microsablare, când electrodul de wolfram are polaritate pozitivă. Nu se pot suda în curent continuu polaritate inversă, decât table de aluminiu subțiri la puteri reduse ale arcului electric, deoarece efectul termic la vârful electrodului de wolfram este foarte pronunțat. În rest, se sudează în curent alternativ, sursele moderne de sudare având posibilitatea să ajusteze tensiunea separat pe durata alternanțelor pozitive/negative, pentru a controla efectul termic la vârful electrodului de wolfram, dar și datorită diferenței de emisivitate termică dintre electrod și baia de sudare.

Pe durata alternanței pozitive, electrodul de wolfram se încălzește puternic, ionii de gaz bombardează pelicula de oxid, iar electronii din material străpung și fragmentează pelicula de oxid, figura 4.64. Efectul este de microsablare a suprafeței metalice, care este protejată împotriva oxidării de către coloana de gaz protector. Aceasta, previne contaminarea băii de sudare cu elemente din atmosfera ambiantă. Contaminarea băii de sudare cu oxigen sau hidrogen conduce la apariția porozității, fisurare sau apariția unor compuși chimici care fragilizează materialul depus. Atmosfera de protecție joacă un rol esențial și asupra stabilității arcului electric. Gazele cu potențial mic de ionizare (Ar) facilitează amorsarea arcului electric, iar cele cu conductivitate termică redusă tind să mărească stabilitatea arcului electric.

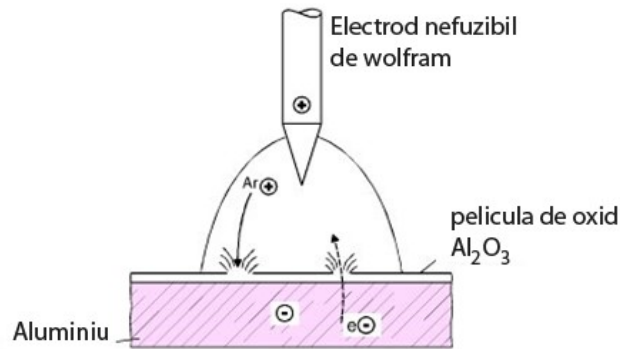


Fig. 4.64 Efectul de microsablare a peliculei de oxid de aluminiu.

Interesul pentru acest procedeu de sudare cu aplicabilitate foarte largă din punct de vedere al materialelor ce pot fi sudate a crescut foarte mult după dezvoltarea unor procedee hibride care combină avantajele mai multor procedee de sudare. Astfel, o companie australiană a brevetat procedeul de sudare K-TIG¹ ce combină procedeul de sudare WIG cu sudarea cu plasmă în gaură de cheie². Procedeul constă în sudarea automată dintr-o singură trecere fără material adaos, a îmbinărilor sudate cap la cap cu rost în I, cu o productivitate extrem de ridicată comparativ cu varianta simplă WIG. Se pot suda materiale cu grosimi de până la 16 mm fără material adaos, cu viteze de lucru de până la 100 ori mai rapide decât în varianta WIG și cu economii substanțiale de material, energie, timp și manoperă. Cusătura sudată este formată din 100% metal de bază, eliminându-se riscul apariției unor defecte de sudare precum: incluziuni nemetalice, porozitate, lipsă de pătrundere sau topire. Deasemenea, este eliminată necesitatea susținerii băii de sudare la rădăcină, în cazul sudării materialelor de grosime ridicată. Principiul sudării K-TIG este ilustrat în figura 4.65, unde sursa de curent asigură un curent de sudare cuprins între 300 - 1000 A, puterea ridicată a arcului necesitând și un sistem de răcire cu apă integrat, comanda acestor unități împreună cu sistemul de avans al sârmei (1.0 - 1.6 mm), fiind realizată de un controller de sistem conectat la o rețea locală, pentru a asigura transferul de date între sistemul informatizat și echipament.

¹ brevetat de Australian Government's Commonwealth Scientific & Industrial Research Organisation (CSIRO)

² keyhole (lb.eng.)

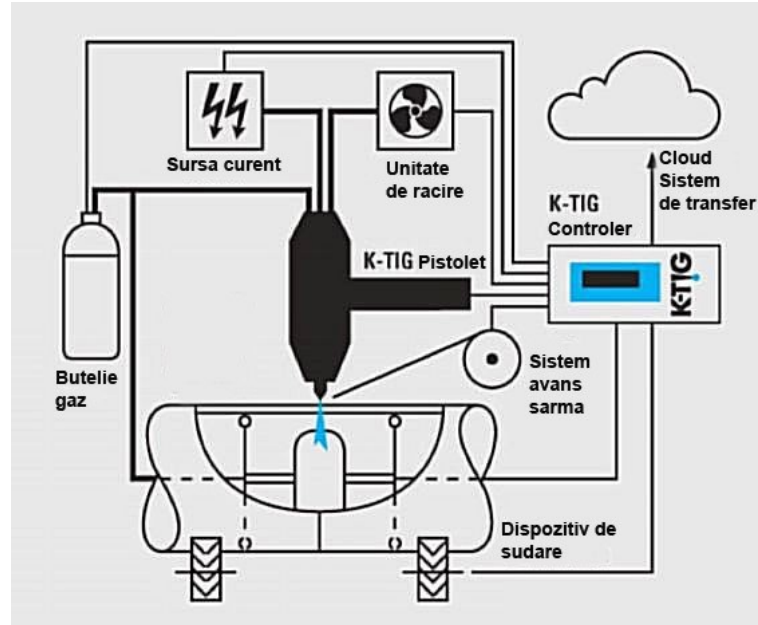


Fig. 4.65 Principiul sudării K-TIG [29].

Consumurile specifice de gaz și energie se reduc de până la 20 de ori din consumul realizat prin varianta WIG, pentru sudarea aceluiași tip de material și grosime. Analizând microstructura oțelului inoxidabil AISI 304 sudat prin procedeul K-TIG prezentată în figura 4.66, se remarcă pătrunderea îngustă la rădăcină specific tehnologiei sudării în gaură de cheie și aspectul specific cu pătrundere mai redusă de la sudarea WIG, zona influențată termic fiind redusă datorită vitezelor mari de sudare.

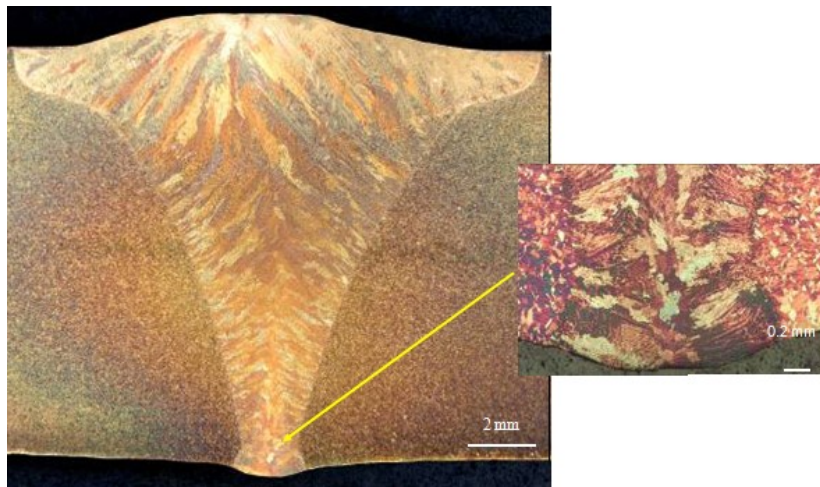


Fig. 4.66 Aspectul cusăturii sudate la sudarea K-TIG a unui oțel inoxidabil AISI 304 de 10,5 mm grosime [29].

4.1.6 Sudarea în hidrogen atomic

Sudarea în hidrogen atomic este codificată cu codul 149 conform ISO 4063-2011, (Tab.4.13) și face parte din grupa procedeele de sudare cu electrod nefuzibil în atmosferă de gaze protectoare. Procedeul a fost inventat de Dr. Irving Langmuir în anul 1926 și a fost utilizat extensiv înaintea celui de-al doilea război mondial, cu precădere în Germania.

În prezent are o utilizare limitată în industrie, procedeul fiind aplicat pentru sudarea unor materiale greu sudabile precum oțelurile pentru scule, oțeluri înalt aliate sau în unele aplicații militare. Procedeul constă în realizarea unui arc electric între doi electrozi nefuzibili de wolfram, într-o atmosferă de hidrogen, cu sau fără material adaos. Atomii de hidrogen disociază în arcul electric și în contact cu suprafața metalică a pieselor sudate, se recombina și cedează o cantitate foarte mare de căldură în imediata vecinătate a băii de sudare, obținându-se o temperatură foarte ridicată, de cca. 4000°C.

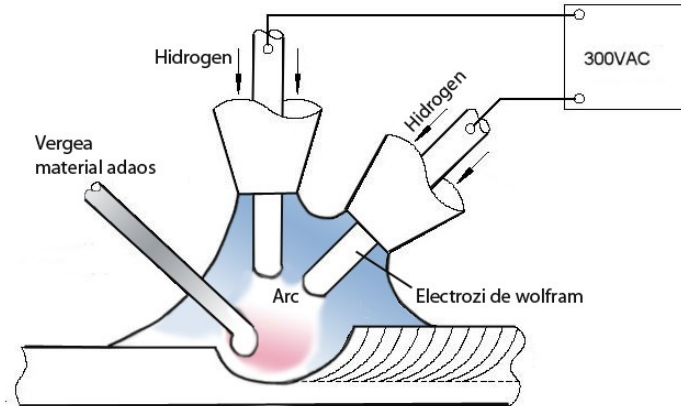


Fig. 4.67 Principiul sudării în atmosferă de hidrogen.

Ulterior, procedeul de sudare în atmosferă de hidrogen a fost înlocuit cu sudarea WIG și MIG. În cazul acestui procedeu există încă informații controversate legat de bilanțul energetic al procesului. Energia de disociere a atomilor de hidrogen este mult mai mică decât energia eliberată la recombina și astfel pare o încălcare a conservării energiei, făcându-se referire la conceptul de ZPE¹ sau energia vidului ca explicație pentru acest fenomen. Energia vidului sau ZPE este un concept din fizică susținut de anumite observații experimentale, dintre care poate cel mai interesant este efectul Casimir. Fenomenul este legat de apariția aleatoare a unor particule virtuale subatomice care împrumută energie din viitor, dar care prin anihilarea perechilor de particule/antiparticule create, restituie această energie vidului. Cu cât energia împrumutată este mai ridicată, cu atât timpul *de împrumut* al energiei este mai scurt. Din analiza acestor fenomene s-au născut o serie de idei care, teoretic, ar putea exploata această sursă inepuizabilă de energie.

De fapt, atomii ionizați de hidrogen absorb energia din arcul electric creându-se o plasmă de densitate mai redusă la presiune atmosferică, în procesul de recombina eliberându-se excesul de energie absorbit de ionii de hidrogen, creându-se iluzia că această energie provine din energia vidului. Efectul termic transmis piesei se poate controla prin controlul distanței dintre electrozii de wolfram și baia de sudură. Piesa nu face parte din circuitul electric, așadar fenomenele de stropire nu există, iar calitatea sudurii este puternic dependentă de calificarea și îndemnarea sudorului. Riscul fisurării este ridicat, datorită conținutului ridicat de hidrogen difuzibil în cusătura sudată.

4.1.7 Sudarea în arc de plasmă

Sudarea în arc de plasmă este un procedeu de sudare în atmosferă protectoare asemănător cu procedeul de sudare WIG, însă în acest procedeu gazul este constrâns să treacă printr-un orificiu îngust, obținându-se o coloană a arcului electric colimată cu temperaturi foarte ridicate. Gazul de protecție este adus în stare de plasmă și se numește gaz plasmagen.

¹ ZPE = zero point energy (lb. eng.)

Procesul de sudare se poate realiza cu sau fără material de adaos, codificarea procedeelor de sudare cu arc de plasmă fiind prezentată în tabelul 4.16. Sudarea cu plasmă se caracterizează printr-o concentrare mai ridicată a energiei și permite astfel sudarea cu viteze mai ridicate, ceea ce conduce la tensiuni termice și deformații mai reduse în cusătura sudată și ZIT.

Tab.4.16 Codificarea numerică a procedeelor de sudare cu plasmă, SR ISO 4063-2011.

15	Sudarea în arc de plasmă
151	Sudarea plasmă - MIG
152	Sudarea cu plasmă și injecție de pulbere
153	Sudarea cu plasmă cu arc transferat
154	Sudarea cu jet de plasmă

Deasemenea, prin construcția capului plasmagen, (figura 4.68), electrodul nefuzibil de wolfram este plasat în interiorul capului, fiind mai bine protejat de gazul plasmagen împotriva oxidării, iar riscul de contaminare a electrodului cu metal de bază nu mai există. Distanța de lucru¹, adică distanța dintre capul plasmagen și piesa sudată, este mult mai mare comparativ cu cea de la procedeul WIG. Sudarea cu plasmă prezintă o stabilitate mai ridicată a arcului, comparativ cu procedeul de sudare WIG și prezintă o serie de variante în funcție de construcția capului plasmagen, respectiv în funcție de modul cum este cuplat arcul electric în circuit.

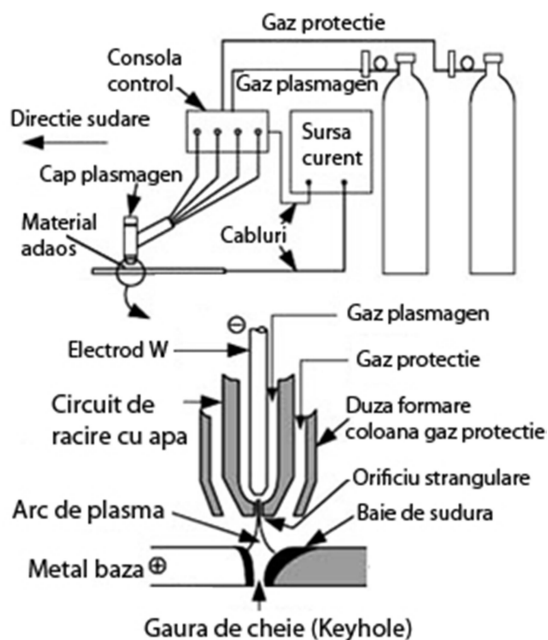


Fig. 4.68 Principiul sudării cu arc de plasmă.

În funcție de diametrul de constricție al ajutorajului de cupru, respectiv în funcție de debitul de gaz plasmagen și intensitatea curentului de sudare, există următoarea clasificare a sudării cu plasmă:

- sudarea cu microplasmă (I_s cuprins între 0.1 - 15 A);
- sudarea cu curent mediu (I_s cuprins între 15 - 200 A);
- sudarea în gaură de cheie (I_s peste 100 A).

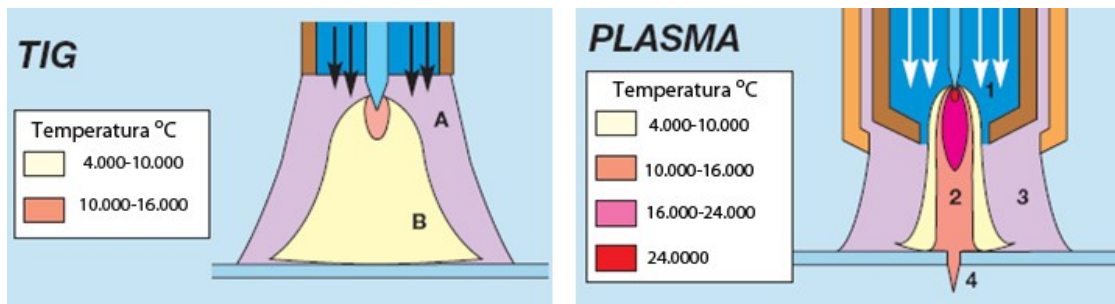
¹ Standoff distance (lb. eng.)

Sudarea cu arc de plasmă utilizează o sursă ce asigură un curent continuu având o caracteristică coborâtore. Se pot utiliza și sursele de curent pentru procedeul de sudare WIG, la care se adaugă o consolă care controlează debitul de gaz protector, așa cum este ilustrat în figura 4.68.



Fig. 4.69 Aspectul arcului de plasmă la sudarea WIG și cu plasmă.

Aspectul arcului de plasmă este diferit la sudarea cu plasmă, față de sudarea WIG. Datorită constricției arcului electric în ajutorul de cupru, arcul de plasmă care se formează are o formă aproape cilindrică, mai colimată, densitatea de energie și distribuția de temperaturi fiind mult mai ridicată, figura 4.70.



1) -gaz plasmagen; 2)- arc de plasmă; 3)- coloană de gaz protecție; 4) keyhole
Fig. 4.70 Distribuția de temperaturi la sudarea WIG și în arc de plasmă.

Procesul de sudare se inițiază cu pornirea gazelor de la consola de control, după care se realizează un arc pilot cu ajutorul unui generator de înaltă frecvență cuplat în circuitul electric al sursei de curent. Curentul de înaltă frecvență preionizează gazul plasmagen dintre electrodul de wolfram și ajutorul de cupru, între acestea stabilindu-se un arc pilot. Când capul plasmagen se apropie de piesă sau când este comutat curentul de sudare, arcul se transferă dintre electrod și ajutoraj între electrod și piesa metalică, de unde provine și denumirea de **arc transferat**.

Procesul de sudare poate fi condus în două moduri de operare distincte, respectiv cu baie de topire sau modul gaură de cheie (keyhole). Primul mod, după cum sugerează numele acestuia este cu formarea unei băi de sudare topite, similar modului de sudare prin procedeul WIG. Al doilea mod de operare este în regim gaură de cheie, adică cu străpungerea piesei sudate pe toată grosimea, formându-se un orificiu de formă tronconică alungită în sensul opus vitezei de sudare, figura 4.71.

Prin urmare, sudarea cu arc de plasmă prezintă o serie de avantaje față de sudarea WIG:

- Arcul electric este stabil de la curenți foarte mici, (microplasmă) la curenți de sudare foarte mari în cazul sudării pieselor de grosime mare;
- Sensibilitate mai redusă la variația lungimii arcului;
- Vizibilitate mai bună a băii de sudare;

- Pătrunderea cusăturii este mai ridicată, datorită densității mai mari de energie a plamei;
- Durata de exploatare a electrodului de wolfram este mai lungă;
- Viteza de sudare mai mare;
- Productivitate mai ridicată, costuri de manoperă mai reduse;
- Deformații și tensiuni după sudare mai mici.



Fig. 4.71 Aspectul găurii de cheie la sudarea în arc de plasmă [29].

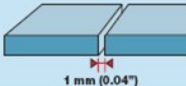
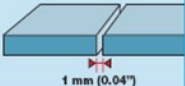
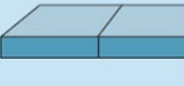
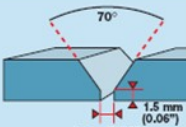
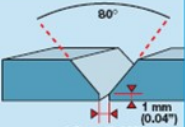
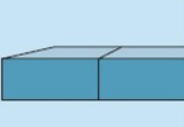
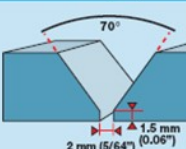
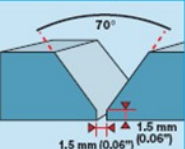
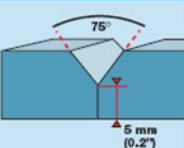
Dintre dezavantaje, față de sudarea WIG putem aminti:

- Costul mai ridicat al echipamentului de sudare;
- Alinierea pieselor și toleranța pregătirii rostului de sudare este mai pretențioasă, în special la sudarea în gaură de cheie;
- Menținerea capului plasmagen, ce conține mai multe componente, trebuie făcută mai des;
- Distanța dintre vârful electrodului și orificiul de strangulare din ajutorul de cupru trebuie menținută constantă, prin urmare trebuie verificată și reglată periodic.

Ca și domeniu de aplicații, sudarea cu arc de plasmă se utilizează frecvent la sudarea oțelurilor inoxidabile pentru o gamă variată de grosimi. Se sudează de asemenea, oțeluri carbon și aliate, aliaje de Al, Ti, Cu, Ni, dar și materiale mai speciale cu reactivitate mare, precum Zr și Ta. Grosimea materialelor sudate poate varia de la 0.025 mm (microplasmă) la 12,5 mm pentru sudarea aluminiului. Sudarea în modul keyhole se utilizează în mod special la sudarea țevilor și a recipientelor din oțel inoxidabil utilizați în industria chimică, alimentară etc.

Se recomandă sudarea în gaură de cheie longitudinală a țevilor din oțel inoxidabil cu grosimi de cca. 3 mm, deoarece pregătirea rosturilor de sudare este minimă, figura 4.72. Cusătura sudată se obține dintr-o singură trecere, fără necesitatea susținerii băii de sudare. Țevile cu grosimi mai ridicate 5-6 mm, pot fi sudate în mai multe treceri, stratul de rădăcină fiind sudat în gaură de cheie, iar straturile de umplere fiind realizate în funcție de calitatea materialului țevii : cu plasmă prin baie de topire, WIG, MIG/MAG sau sub strat de flux.

Sursele de curent pentru sudarea cu arc de plasmă, furnizează un curent continuu cu polaritate directă, electrodul de wolfram fiind legat la polul negativ al sursei de curent. Procesul de sudare se poate realiza și în curent pulsant sau în curent alternativ la sudarea Al, Mg și aliajelor acestora. Exact ca și la sudarea WIG, pe semialternanța pozitivă a curentului de sudare se produce o sablare a suprafeței metalice acoperite de pelicule aderente de oxizi metalici. Din considerente de protecție termică a electrodului de wolfram, timpul alternanțelor curentului este modificat, astfel că alternanța în care electrodul are polaritate negativă durează uzual 20 ms, iar pentru alternanța pozitivă timpul este redus la 3 ms.

Grosimea	Electrod involit (SMAW)	WIG manual (GTAW)	Plasma (PAW)
3 mm			
8 mm			
> 8 mm			

Sudarea într-o singură trecere fără pre pregătirea rostului
otel carbon, inoxidabil austenitic pînă la 8 mm, titan pînă la 10 mm

Fig. 4.72 Pregătirea rostului de sudare pentru diferite procedee de sudare.

Sudarea în arc de plasmă cu polaritate variabilă este frecvent utilizată la sudarea aliajelor ușoare cu baza Al sau Mg, în aplicații din domeniul industriei aerospațiale sau la construcția mașinilor sport de performanță ridicată, motociclete, ambarcațiuni etc. Recent, o serie de producători renumiți de autoturisme au inclus în structura metalică a mașinilor de serie, o cantitate tot mai ridicată de astfel de componente de performanță ridicată, fapt ce se răsfrînge asupra tehnologiilor de sudare care trebuie adaptate noilor tipuri de materiale.

Caracteristica externă a sursei de curent trebuie să fie cu caracteristică căzătoare, respectiv de curent constant. Cele mai frecvente sunt sursele pe bază de tranzistori de putere, însă se găsesc și surse tip invertor. Tensiunea de mers în gol este mai ridicată, minim 80 V, pentru a asigura o amorsare și un transfer ușor al arcului între electrod și piesă. Sursa trebuie să permită reglajul parametrilor principali la sudarea cu curent pulsant, respectiv curentul de bază și peak-ul de curent, precum și timpii aferenți acestor curenți. Capul plasmagen, respectiv pistolul de sudare au diferite dimensiuni, în funcție de puterea arcului și de gradul de automatizare a procesului. Principiul constructiv este același, o atenție deosebită trebuie acordată concentricității dintre electrod și orificiul ajutorului de strangulare. Capul plasmagen are o serie de conectori care asigură conexiunea la gazul plasmagen, gazul de protecție, circuitul de răcire cu apă (intrare-ieșire) și conexiunile electrice pentru electrod și ajutorul de cupru, necesare pentru inițierea arcului pilot, figura 4.73.

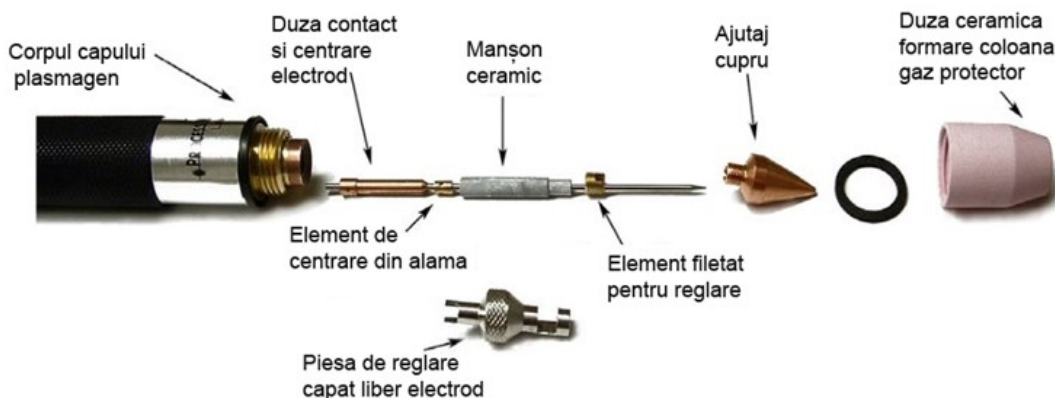


Fig. 4.73 Elementele componente ale capului plasmagen la sudarea în arc de plasmă.

Mentenanța periodică a capului plasmagen este foarte importantă pentru asigurarea condițiilor optime de funcționare și obținerea unui arc de plasmă în parametri setați. În timpul sudării se degajă din baia de sudare o serie de gaze, elemente metalice vaporizate și oxizi care rezultă din oxidarea electrodului și a elementelor din baia metalică. Acestea, se depun în timp pe suprafața interioară a ajutorului de cupru și formează un strat izolant care afectează negativ inițierea arcului pilot și stabilitatea arcului transferat. Electrocul nefuzibil trebuie reascuțit periodic și ferit de impurificare cu grăsimi sau alte substanțe pe parcursul operației de reascuțire și montaj. Vârful electrodului trebuie să fie situat pe axa electrodului, dispus concentric la montaj în raport cu ajutorul de cupru și reglat la o distanță corespunzătoare, utilizând o piesă de reglare concepută pentru fiecare cap/torță în parte.

Electrozii sunt confecționați uzual din wolfram toriat cu 2% oxid de toriu, unghiul de ascuțire depinzând de valoarea curentului de sudare. Operația de ascuțire trebuie realizată prin dispunerea axei electrodului aproximativ tangențial în planul vitezei periferice a pietrei de polizat, așa cum este ilustrat în figura 4.74, pentru obținerea unor rizuri orientate longitudinal. După ascuțire, este recomandată șlefuirea fină a suprafețelor prelucrate. Respectarea acestor recomandări, conduce la creșterea duratei de exploatare a electrodului, precum și la obținerea unui arc de plasmă stabil și colimat.

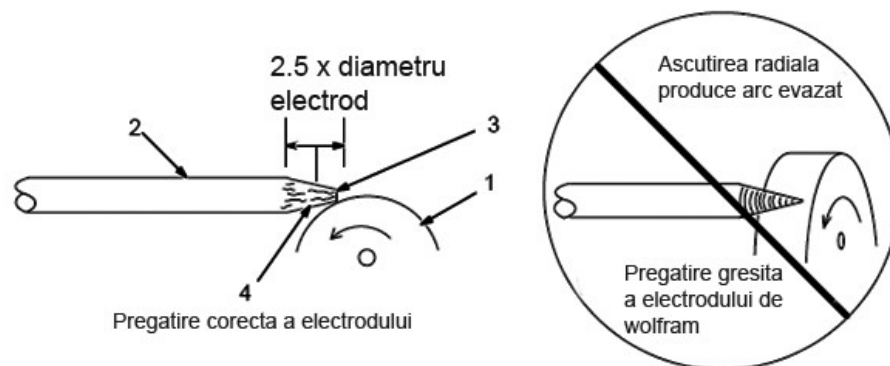


Fig. 4.74 Modul de pregătire a electrozilor nefuzibili la sudarea WIG și în arc de plasmă.

Gazele utilizate la sudarea în arc de plasmă sunt din categoria gazelor inerte. Argonul este cel mai frecvent gaz plasmagen utilizat, datorită proprietăților sale, precum și a prețului de achiziție mai scăzut. Gazul de protecție are rolul de a asigura protecția suplimentară a băii de sudare și a porțiunilor adiacente, mai ales în cazul sudării materialelor puternic reactive: Ti, Ta, Mg, Al, Zr. Tipul de gaz plasmagen utilizat, determină forma cusăturii sudate și adâncimea de pătrundere. În anumite aplicații speciale, se pot folosi amestecuri de gaze, Ar-He sau He integral, pentru mărirea conductivității termice a gazului și obținerea unui aspect specific a cusăturii sudate. Heliul produce o cusătură cu lărgime mai mare comparativ cu argonul, deoarece necesită o tensiune mărită în arcul de plasmă. Adăugarea de hidrogen la argon conduce la o îngustare a lărimii cusăturii și la creșterea adâncimii de pătrundere, cusătura având un aspect foarte curat, datorită caracterului reducător al hidrogenului. Trebuie avut însă în vedere, riscul de fisurare datorită hidrogenului difuzibil mai ridicat din cusătura sudată. Atât hidrogenul cât și heliul, datorită conductivității termice foarte ridicate, pot conduce la supraîncălzirea și deteriorarea capului plasmagen. În ceea ce privește proprietățile arcului de plasmă, debitele de gaz sunt critice, cu consecințe directe asupra caracteristicilor metalului depus. Debitul de gaz plasmagen poate varia de la 0,1 l/min în cazul sudării cu microplasmă, până la 10 l/min, la sudarea în gaură de cheie cu arc de plasmă, influențând procesul de constricție a arcului de plasmă. Astfel, se preferă un control electronic al debitului de gaz, cu ajutorul unui console de control, figura 4.68.

4.2 Sudarea cu fascicol de electroni

Procedeul de sudare cu fascicol de electroni este codificat conform SR ISO 4063-2011, cu codul 76 și se caracterizează printr-o densitate înaltă de energie, prezentând o serie de avantaje:

- Rezistență mecanică mai mare cu 15-20%, comparativ cu alte procedee de sudare cu arc electric, ceea ce permite reducerea greutateii produselor;
- Lățimea ZIT este foarte redusă;
- Forma și dimensiunile pieselor sudate sunt foarte stabile, în special când sudarea este ultima operație tehnologică;
- Elimină oxizii și impuritățile datorită sudării în vid;
- Cusătura sudată are o structură cu grăunți foarte fini;
- Permite sudarea dintr-o singură parte când partea opusă a îmbinării nu este accesibilă;
- Se pot suda dintr-o singură trecere materiale foarte subțiri ($s > 0.1$ mm), până la materiale cu grosime foarte mare ($s < 200$ mm);
- Se poate sigila sub vid volumul interior al unor instrumente;
- Procesul este complet automatizat, calitatea este constantă și ridicată;
- Nu necesită gaze de protecție, electrozi de wolfram sau prelucrări ale rosturilor la sudarea pieselor de grosime mare (rosturi în U sau 2U etc.);
- Se pot suda materiale disimilare și nu necesită material adaos.

Aceste avantaje recomandă sudarea cu fascicol de electroni în industria aerospațială, construcția vaselor ușoare, iahturilor din aliaje de aluminiu, fabricarea instrumentelor de precizie etc. De exemplu, putem aminti sudarea paletelor sau a diferitelor componente ale turboreactoarelor sau turbinelor cu gaze din industria energetică, componente din construcția rachetelor sau a avioanelor militare etc. În ultimul timp, există tendința de a înlocui sudarea sub strat de flux sau sudarea WIG la fabricarea recipientelor sub presiune, prin sudarea cu fascicol de electroni. La o grosime de 100 mm a materialului se prevăd între 20 și 80 de straturi de sudură (sub strat de flux), cu controale nedistructive intermediare, pentru a depista eventualele defecte de sudare. În cazul sudării cu fascicol de electroni, sudarea se realizează într-o singură trecere, fără material adaos, cusătura sudată este îngustă, cu un raport înalt al adâncimii de pătrundere/lățime, care poate atinge uzual valoarea de 40:1. Calitatea îmbinării sudate este superioară, eficiență economic la grosimi mari ale materialului de bază, costurile de sudare fiind minime, figura 4.75.

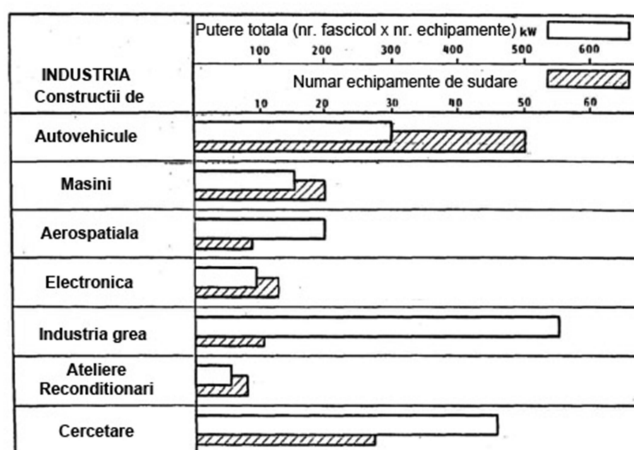
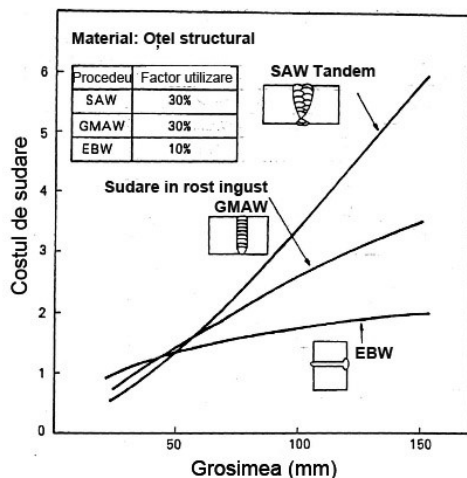


Fig. 2 – Electron beam welding machines in Japan (from Ref. 1)

Fig. 4.75 Costul sudării cu fascicol de electroni comparativ cu sudarea în rost îngust și sudarea sub strat de flux în tandem [30].

În figura 4.75 este prezentată o diagramă în care se poate observa că sudarea cu fascicol de electroni devine eficientă economic la grosimi ale materialelor de peste 50 mm. Odată cu creșterea grosimii materialului sudat, aceasta devine mult mai competitivă comparativ cu metodele uzuale de sudare pentru acest tip de aplicații, respectiv sudarea în rost îngust sau sudarea sub strat de flux [30]. Domeniul cu aplicațiile cele mai numeroase, conform figurii 4.75, la nivelul anului 1986 în Japonia, revine construcției de autovehicule, urmat de industria aerospațială, electronică, industrie grea și cercetare. Recent, în anul 2013 în UK s-a pus în funcțiune unul dintre cele mai mari echipamente de sudare cu fascicol de electroni¹ din Europa, având volumul incintei vidate de 208 m³, cu un tun de electroni mobil cu o putere instalată de max. 60 kV, fiind manipulat de un sistem robotizat cu 5 axe pentru tunul electronic și 4 axe pentru piesă, figura. 4.76.

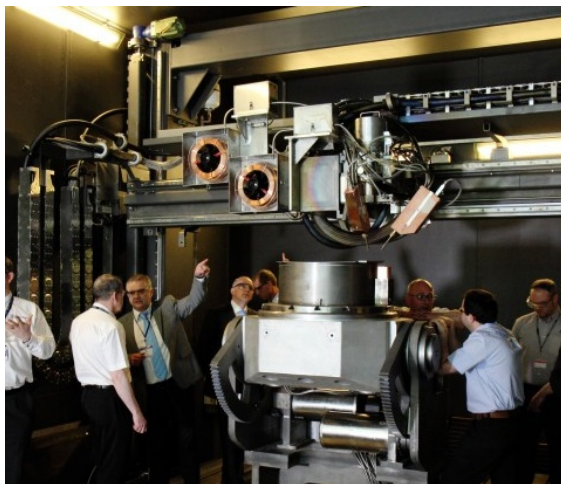
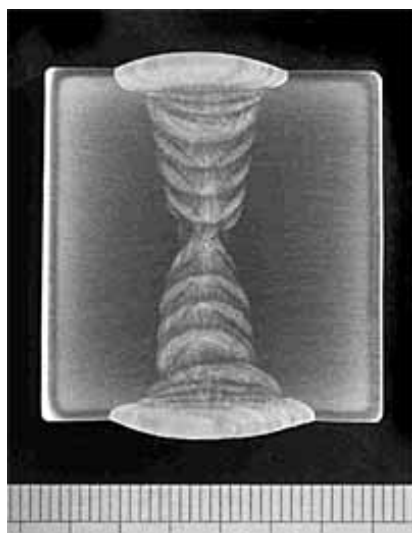
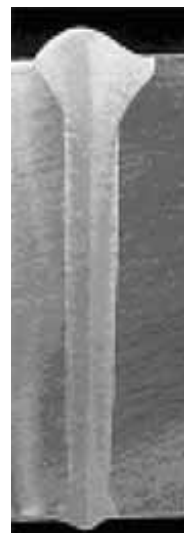


Fig. 4.76 Instalație de sudat cu fascicol de electroni cu 9 axe [31].



a) Sudarea GTAW, timp de sudare de cca. 250 min.



b) Sudare cu fascicol electroni, timp de sudare cca. 9 min.

Fig. 4.77 Sudarea unui oțel NiCrMo de 33 mm grosime în variantă WIG, respectiv cu fascicol de electroni, pentru un container de deșeuri nucleare.

¹ Pro-Beam K2000 EBW

Analizând figura 4.77, se poate observa diferența notabilă de productivitate dintre sudarea WIG (GTAW¹) și cea cu fascicol de electroni, în cazul fabricației unui container pentru deșeuri nucleare, realizat dintr-un oțel NiCrMo cu grosime de 33 mm. Ambele procedee de sudare garantează o calitate superioară a cusăturii sudate, necesară în acest caz din rațiuni de securitate, însă sudarea cu fascicol de electroni se remarcă prin timpul de sudare extrem de redus (9 min.) comparativ cu cel necesar la sudarea WIG (250 min.).

Sudarea cu fascicol de electroni prezintă și o serie de dezavantaje, dintre care amintim:

- Costul ridicat al echipamentului de sudare;
- Limitarea gabariturii construcției sudate la spațiul incintei de vidare;
- Producerea de radiații X pe durata sudării, fiind necesare măsuri speciale de protecție;
- Necesită personal calificat de operare;
- Vitezele mari de răcire, datorită vitezei ridicate de sudare și volumului redus al băii de sudare, poate produce fisurări în anumite materiale;
- Se pot suda doar piese metalice conductoare electric;
- Materialele feromagnetice trebuie demagnetizate înainte de sudare.

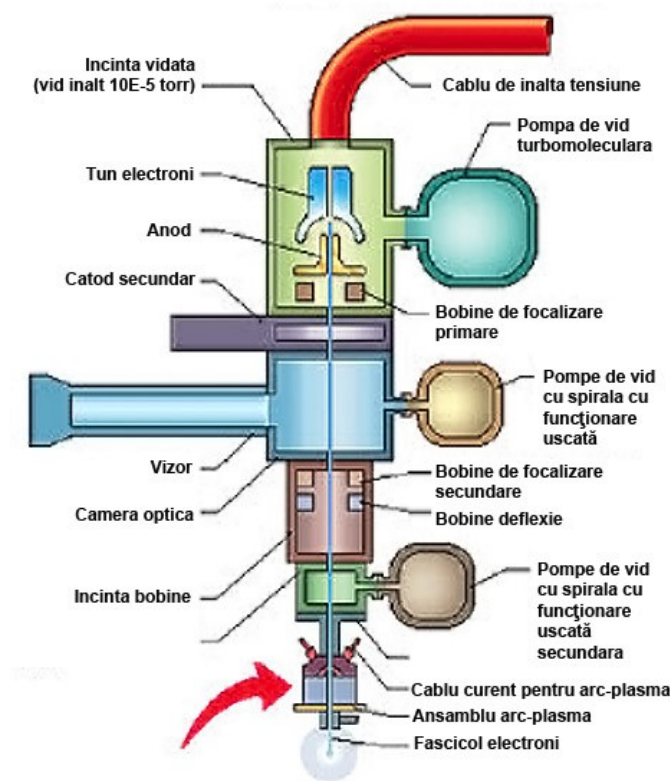


Fig. 4.78 Sudarea cu fascicol de electroni prin metoda Plasma Arc Window [32].

Fascicolul de electroni pierde foarte rapid din energie și focalizare, dacă în traiectoria sa se ciocnește cu molecule de gaz. Din această cauză, este nevoie ca sudarea să fie realizată într-o incintă vidată, însă această condiție atrage după sine complicații privind realizarea vidului, mai ales în cazul pieselor mari, ce impun creșterea volumului incintei de sudare.

¹ GTAW – acronim pentru Gas Tungsten Arc Welding (AWS)

Cum acest volum limitează și mărimea construcției sudate care trebuie să încapă în incinta respectivă, s-au făcut eforturi în găsirea unei soluții care să permită sudarea în atmosfera ambiantă. Astfel, s-a dezvoltat procedeul de sudare cu fascicol de electroni **Plasma Arc Window e-beam**, ilustrat în figura 4.78 [32].

Camera tunului de electroni este vidată, astfel că fascicolul de electroni poate fi accelerat și dirijat exact ca și în instalațiile anterioare, însă la ieșirea din camera vidată, este un orificiu care comunică cu mediul exterior și prin care trece fascicolul de electroni. Pentru a menține vidul în cameră și a împiedica pătrunderea moleculelor de gaz din atmosferă, în orificiul respectiv se crează un arc de plasmă care operează la 15000 K și care poate contrabalansa presiunea atmosferică la o densitate de 50 ori mai redusă a plasmei, decât cea a moleculelor de gaz la presiune atmosferică. Acest lucru înseamnă mai puține coliziuni ale electronilor când traversează fereastra de plasmă, respectiv o pierdere de energie și de focalizare mai redusă. Prin această metodă, utilizând o fereastră de plasmă la ieșirea din camera vidată, procedeul de sudare devine de 22.000 ori mai eficient, decât menținerea vidului prin metode de vidare diferențiale. Inventatorul metodei Plasma Arc Window, fizicianul Ady Hershovitch de la Brookhaven, a demonstrat că se poate menține diferența de presiune dintre cameră și mediu exterior până la o presiune externă de 9 atmosfere [32].

Metoda Plasma Arc Window mai prezintă un avantaj important, aceasta acționează ca și o lentilă electromagnetică pentru electronii din fascicolul de sudare. Câmpul magnetic generat de arcul de plasmă, exercită forțe orientate radial care focalizează fascicolul de electroni, concentrându-l pe o suprafață foarte mică. Sistemul aduce economii de cca. 14.000\$/lună doar din costul energiei electrice utilizate la agregatul de vidare, plus alte câteva mii de dolari pentru uleiul special folosit la pompele de difuzie. Totodată, timpii de fabricație se reduc considerabil, datorită eliminării timpilor auxiliari necesari la crearea vidului în camera de sudare.

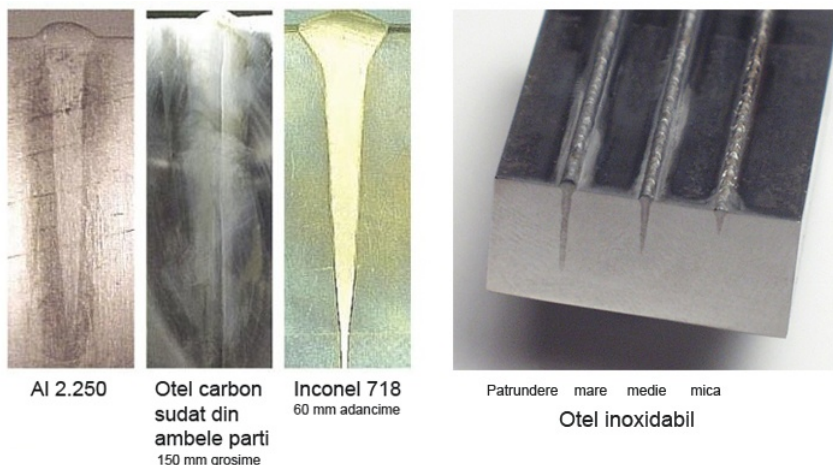


Fig. 4.79 Aspectul cusăturii sudate la sudarea cu fascicol de electroni a diferitelor materiale.

În figura 4.79 sunt prezentate o serie de cusături sudate cu fascicol de electroni, la care se remarcă aspectul specific de pătrundere foarte înaltă în metalul de bază și pe o lățime foarte îngustă. Acest lucru se datorează efectului *keyhole* sau sudării în gaură de cheie. După cum sugerează și numele, se creează un orificiu foarte îngust în care vaporii de metal exercită o presiune asupra peliculei subțire de metal topit, ce înconjoară fascicolul de electroni. Pe măsură ce fascicolul înaintează, materialul se topește în jurul acestuia cu viteză ridicată și se produce o curgere a metalului topit în urma fascicolului, unde se solidifică rapid, figura 4.80.

Efectul combinat dintre viteza de sudare ridicată, solidificarea cu viteze mari de răcire și volumul redus al băii de sudare, poate conduce la formarea unor bule formate din vapori metalici, respectiv la porozitate, așa cum este ilustrat în figura 4.80.

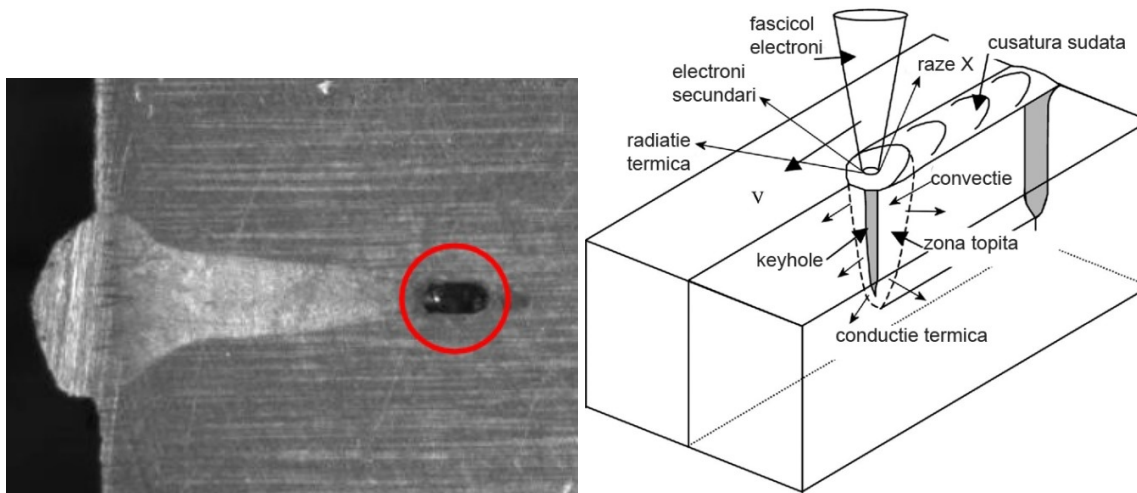


Fig. 4.80 Mecanismul de formare a porozității la sudarea cu fascicol de electroni [32].

Porozitatea este o imperfecțiune la sudare, care în cazul sudării laser este inadmisibilă. Pe de o parte avem lățimea foarte îngustă a cusăturii sudate, porii rezultați având adeseori o dimensiune egală cu cea a cusăturii (figura 4.80), fapt ce constituie o întrerupere totală a legăturii metalice dintre piese. Pe de altă parte, aplicațiile în care se utilizează sudarea cu laser, reclamă o calitate foarte înaltă a îmbinării, adeseori ansamblul sudat fiind solicitat la oboseală sau reprezintă un element cheie în funcționarea utilajului sau echipamentului din care face parte. Prin urmare, s-au căutat soluții pentru evitarea producerii porozității în cusătură. Specific acestui procedeu, este capacitatea de a modifica dinamica de curgere a metalului topit în baia de sudare, prin modificarea dimensiunii găurii de cheie. Acest parametru care este unic¹ și specific procedurii de sudare cu fascicol de electroni, produce o deflexie magnetică a fascicolului cu o frecvență de câteva sute de Hz. Fascicolul de electroni este deviat după niște traiectorii circulare și astfel, se modifică pulsatorul diametrului găurii de cheie, favorizând eliminarea bulelor de vapori metalici, respectiv eliminarea porozității din cusătura sudată.

Parametrii care influențează dinamica pulsării dimensiunii găurii de cheie, adică frecvența, traiectoria și deplasările după axa X/Y a fascicolului, poziția punctului de focalizare pot fi programate, determinând evoluția dinamică și stabilitatea găurii de cheie pe durata procesului de sudare. Acești parametri trebuie setați în corelație cu toleranța și erorile de profil ale rostului de sudare, în așa fel încât să asigure o pătrundere a cusăturii simetric pe ambele piese sudate și să se evite deviația cusăturii în profunzime de la rostul de sudare. În astfel de situații, este necesar să se asigure un anumit profil al cusăturii sudate, la o anumită adâncime de pătrundere, ceea ce se realizează prin controlul dinamic al dimensiunii găurii de cheie, așa cum s-a văzut mai sus.

4.3 Sudarea cu radiație LASER

Procedeu de sudare cu laser face parte din categoria procedurilor de sudare cu radiație luminoasă având codul 751, conform SR ISO 4063-2011 și se caracterizează prin densitatea cea mai înaltă de energie, figura 4.81.

¹ pattern generator

Sursa laser poate să fie izolată într-o încăpăre mai îndepărtată de locul efectiv unde se realizează sudarea, fascicolul laser putând fi condus la zona sudării, cu ajutorul unor oglinzi în cazul laserului cu CO₂ sau cu fibre optice pentru laserul Nd:YAG. Fascicolul laser este focalizat pe un spot extrem de îngust cu un diametru de câteva zecimi de mm, asigurând astfel o densitate extrem de ridicată de energie.

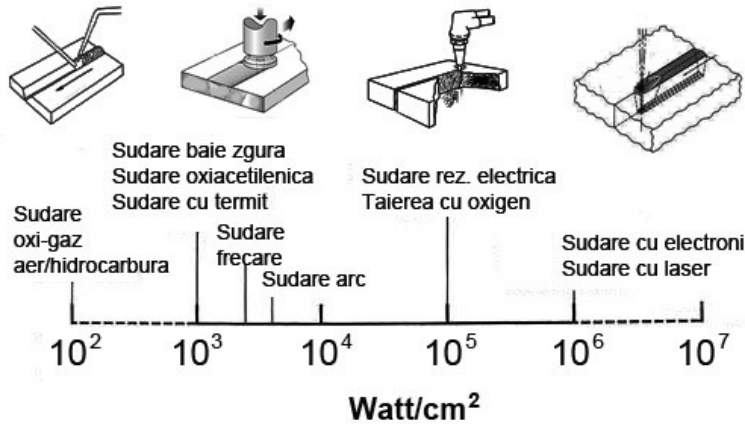


Fig. 4.81 Densitatea de energie la procesele de sudare.

În figura 4.81 sunt prezentate densitățile de energie la diferite procedee de sudare sau conexe sudării. Sudarea cu radiație laser se încadrează la densități de energie cuprinse între 10^6 și 10^7 W/cm^2 , ceea ce reprezintă valori extrem de ridicate. Densitatea de energie la radiația laser este de până la 1000 ori mai intensă, decât densitatea de energie a procedeeleor de sudare cu arc electric, care se situează în jurul valorii de 10^4 W/cm^2 . Această concentrare imensă de energie în contact cu materialul metalic produce vaporizarea locală a atomilor metalici, formând o atmosferă locală de plasmă ce contribuie la creșterea coeficientului de absorbție a radiației luminoase îmbunătățind eficiența procesului de sudare.

Este foarte importantă alegerea tipului de laser în funcție de caracteristicile materialului sudat, grosimea acestuia și accesul în zona îmbinării sudate. Materialele absorb în mod diferit radiația laser, în funcție de lungimea de undă a laserului, coeficientul de absorbție respectiv, fiind o caracteristică intrinsecă a materialului, figura 4.82.

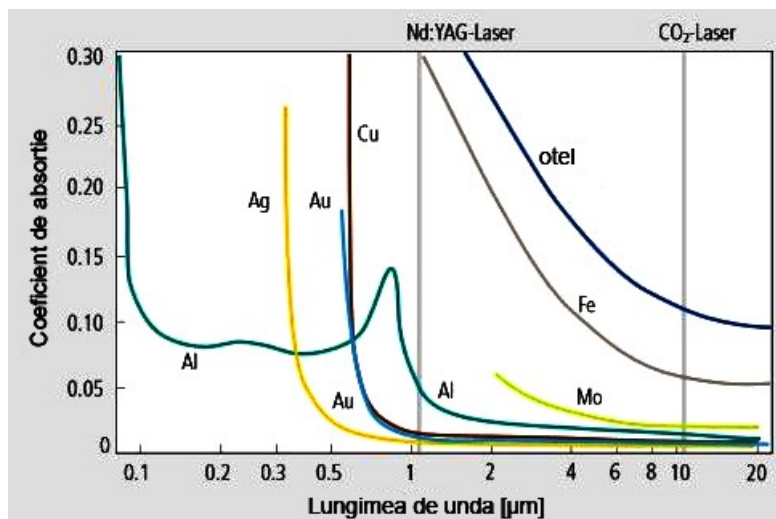


Fig. 4.82 Coeficientul de absorbție al materialelor la sudarea cu laser [33].

Din figura 4.82, se poate remarca coeficientul de absorbție extrem de redus pentru Cu, Al, Ag și Au, în cazul laserului cu CO₂, care are o lungime de undă de 10,6 μm. Acest fapt, împiedică sudarea acestor materiale cu laseri cu CO₂. Laserii cu mediu solid tip Nd:YAG (granat de ytriu și dopați cu niobim), având o lungime de undă de 1,06 μm sunt mai eficienți în transferul termic către piesă, coeficientul de absorbție al materialelor fiind mult mai ridicat la valori mici ale lungimii de undă ale fotonilor. Creșterea adâncimii de pătrundere se realizează la valori superioare ale densității de energie critică, necesare obținerii efectului de gaură de cheie și este în funcție de puterea instalată a laserului, figura 4.83.

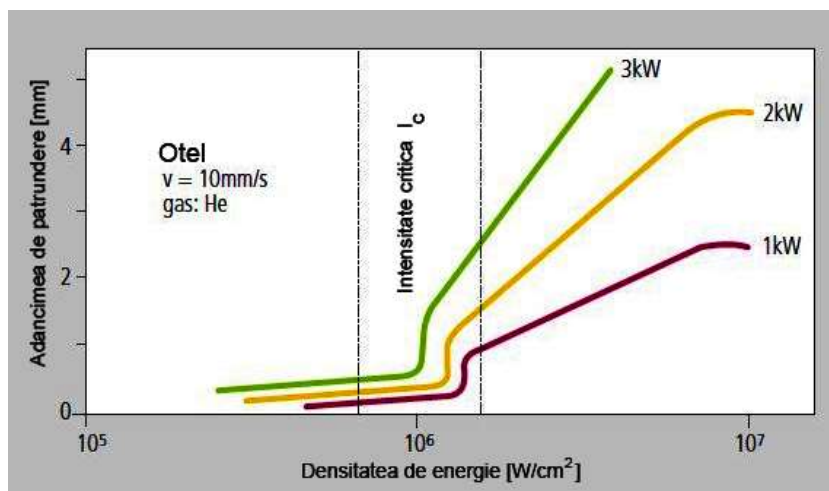


Fig. 4.83 Intensitatea critică de energie la sudarea cu laser [33].

În cazul sudării materialelor reactive se utilizează o perdea de gaz protector, pentru prevenirea oxidării acestora, respectiv pentru a preveni depunerea pe lentilele sistemului optic a stropilor metalici sau a vaporilor metalici prin condensare. Similar ca și la sudarea cu fascicul de electroni, adâncimea de pătrundere este foarte ridicată, se sudează fără material adaos și cu viteze de sudare foarte mari, ceea ce conduce la o zonă ZIT foarte îngustă, tensiuni termice și deformații foarte reduse. Adâncimea de pătrundere depinde în principal de puterea instalației laser, iar în cazul procedurilor hibride de sudare laser-MIG sau laser-WIG se utilizează și material adaos.

Pentru a caracteriza performanța fascicolului laser, s-au introdus o serie de parametri, conform figurii 4.84. Laserii pe bază de CO₂ se caracterizează uzual prin factorul de propagare K , în vreme ce laserii Nd:YAG se caracterizează prin parametrul q , conform relațiilor de mai jos:

$$K = \lambda \pi \cdot 4 / (d_0 \cdot \Theta) = \lambda \pi \cdot 1 / q \quad (4.9)$$

$$q = w_0 \cdot 1 / 2 \Theta \quad (4.10)$$

unde: w_0 este raza spotului focalizat a laserului;
 d_0 diametrul spotului focalizat;
 Θ este unghiul de divergență;
 λ este lungimea de undă a laserului.

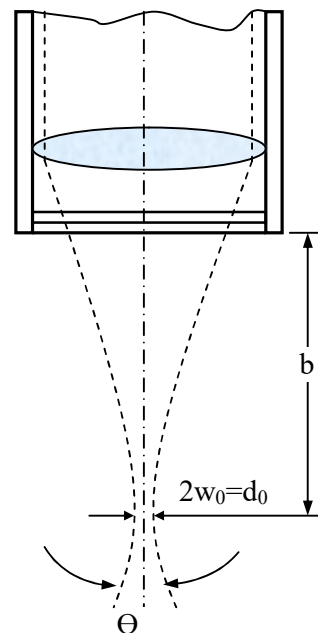


Fig. 4.84 Parametrii de performanță ai laserului [33].

Viteza de sudare depinde de puterea laserului și caracteristicile materialului sudat, în general fiind de 2 x mai rapidă decât la sudarea cu plasmă, respectiv de 8 x mai rapidă față de sudarea WIG. Sudura rezultă curată, liberă de impurități și incluziuni și decurge fără zgomot. Pentru anumite materiale sensibile la fisurare există riscul apariției unor fisuri în îmbinarea sudată datorită vitezelor foarte mari de răcire, dat fiind faptul că volumul materialului topit este foarte redus, iar viteza de sudare este foarte mare. Oțelurile aliate se călesc local rezultând o structură martensitică sau bainitică, însă cu ZIT extrem de îngustă. Diametrul fascicolului laser nu depășește câteva zecimi de mm, ceea ce înseamnă că este foarte importantă poziționarea și prelucrarea precisă a rostului de sudare în formă de „I”. Piesele ce urmează a fi sudate se aduc în contact și trebuie fixate corespunzător, pentru a preveni mișcarea lor în cursul procesului de sudare. Acest aspect este mai puțin important în cazul materialelor subțiri sudate prin suprapunere.



Fig. 4.85 Sudarea cu laser CO_2 a componentelor roților de transmisie dintr-o cutie de viteză [37].

Pinioanele, roțile de transmisie din cutiile de viteze sunt realizate prin metalurgia pulberilor, elementele componente ale acestora, fiind sudate cu laser cu CO_2 având o putere instalată de 3 - 5 kW, figura 4.85. Adâncimea de pătrundere poate depăși 10 mm, vitezele de sudare fiind situate între 2,2 - 3,7 m/min, suprafața pieselor sudate fiind protejate de o coloană de heliu cu un debit de 28 l/min.

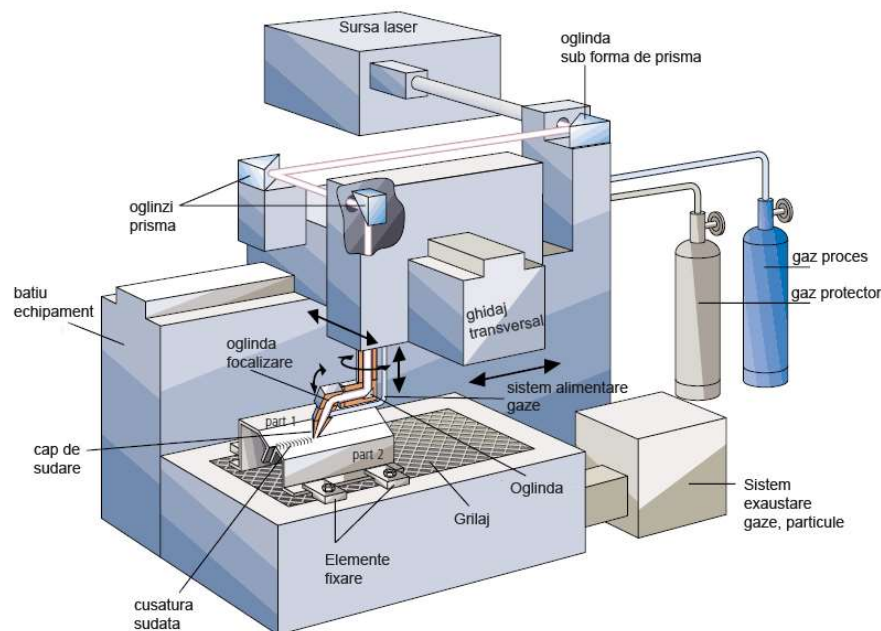


Fig. 4.86 Schemă de principiu a unei instalații de sudare cu laser [33].

Cele mai utilizate instalații de sudare sunt cele cu CO₂ și laserii pe bază de Nd: YAG. Laserii cu CO₂ se utilizează de obicei la sudarea unor materiale cu grosime mai mare, iar cei cu Nd pentru sudarea materialelor de grosime mai redusă. Acest lucru se datorează în principal puterii mai ridicate a laserilor cu CO₂, care pot realiza cusături sudate cu o pătrundere de până la 26 mm grosime a materialului de bază. Un dezavantaj al laserilor cu CO₂ este faptul că o fracție considerabilă a fascicolului de fotoni este reflectată înapoi în sistemul optic al laserului, acesta putând provoca deteriorarea instalației. Prin urmare, trebuie acordată o atenție deosebită la sudarea materialelor cu coeficient de absorbție redus, precum Al, Mg, Ag, Au, Cu.

Laserii cu Nd:YAG au o lungime de undă mult mai mică ($\lambda=1.06 \mu\text{m}$), așadar se pretează mai bine la sudarea materialelor cu coeficient de absorbție redus, conform figurii 4.82. Datorită lungimii de undă mai mică decât la cei cu CO₂ ($\lambda=10,6 \mu\text{m}$), laserii cu Nd pot fi direcționați cu ajutorul fibrelor optice și focalizați cu ajutorul unor lentile optice obișnuite, figura 4.86. Această flexibilitate de manipulare a fascicolului laser cu Nd, permite implementarea sudării robotizate pe sisteme cu mai multe axe. În acest fel, este posibilă sudarea componentelor după traiectorii complicate, frecvent întâlnite la îmbinarea elementelor de caroserie a autoturismelor. Tot la laserii cu Nd, problema absorbției fotonilor datorită plamei create la ieșirea din orificiul gaură de cheie este mai redusă și se poate utiliza un gaz de proces mai ieftin decât He, precum Ar sau amestec Ar/CO₂. Pentru puteri joase sau îmbinări în puncte se poate suda chiar și fără gaz de proces. Gazul de proces este necesar pentru minimalizarea interferenței dintre fotoni și ionii unor elemente metalice vaporizate, astfel că atomii de heliu având o dimensiune foarte redusă comparativ cu atomii metalici, interferează mult mai puțin cu fotonii din fascicolul laser. În plus, datorită contribuției termice din cadrul procesului prin fenomenul de disociere-recombinare, au o influență pozitivă în mecanismul transferului termic.

Laserii cu Nd se utilizează la sudarea unor materiale cu sudabilitate redusă și cu reactivitate ridicată, precum: Ta, Ti, Zr, Inconel etc. Dezavantajul acestor sisteme este că nu pot asigura puteri așa ridicate precum laserii cu CO₂ și din acest motiv utilizarea acestora este limitată la sudarea unor materiale cu grosimi sub 6 mm. O atenție deosebită trebuie acordată protecției operatorului sau a locului de sudare, deoarece radiația reflectată de piesă poate ajunge în ochii persoanelor ce deserveșc instalația de sudare producând leziuni în globul ocular, cu consecințe ce pot merge până la orbirea persoanelor afectate.

În figura 4.87 este ilustrat principiul constructiv al sistemului de focalizare al capului de sudare. Fascicolul laser este focalizat cu ajutorul unei lentile concave, iar transversal pe fascicolul laser se insuflă gaz de proces, pentru protejarea sistemului optic împotriva depunerilor metalice sau a stropilor de material. Gazul de proces insuflat în direcție axială formează o coloană de gaz ce îndepărtează plasma formată de atomii metalici la ieșirea din gaura de cheie, asigurând astfel prevenirea contaminării metalului de bază cu elemente din atmosferă.

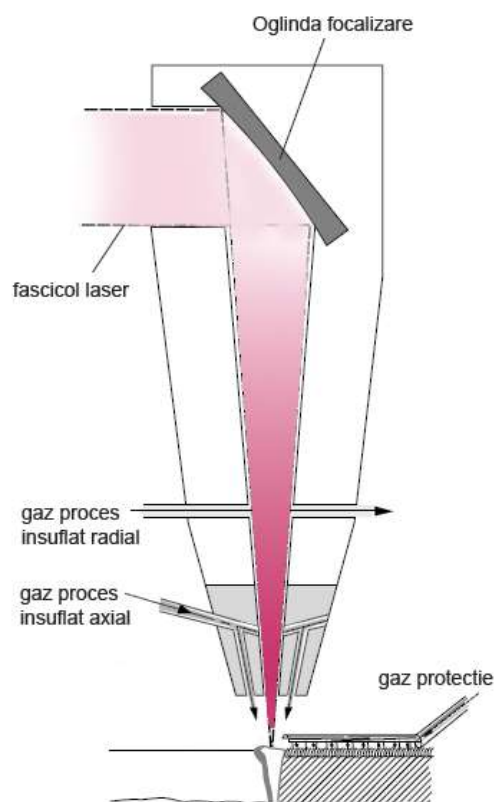


Fig. 4.87 Capul de sudare laser CO₂ cu sistemul de focalizare.

Mai recent s-au dezvoltat laseri pe bază de diode, care însă au o putere limitată, suficientă doar pentru sudarea unor materiale subțiri și nu ating performanțele de focalizare comparabile cu cele ale laserilor cu CO₂ sau Nd. În principiu, se cuplează în capul laser mai multe diode care au un efect cumulat, principalul avantaj al acestor sisteme fiind mentenanța mai ușoară. Dacă o diodă se arde, ea poate fi înlocuită individual sau laserul poate funcționa mai departe cu o putere mai redusă, proporțional cu numărul de diode defecte.

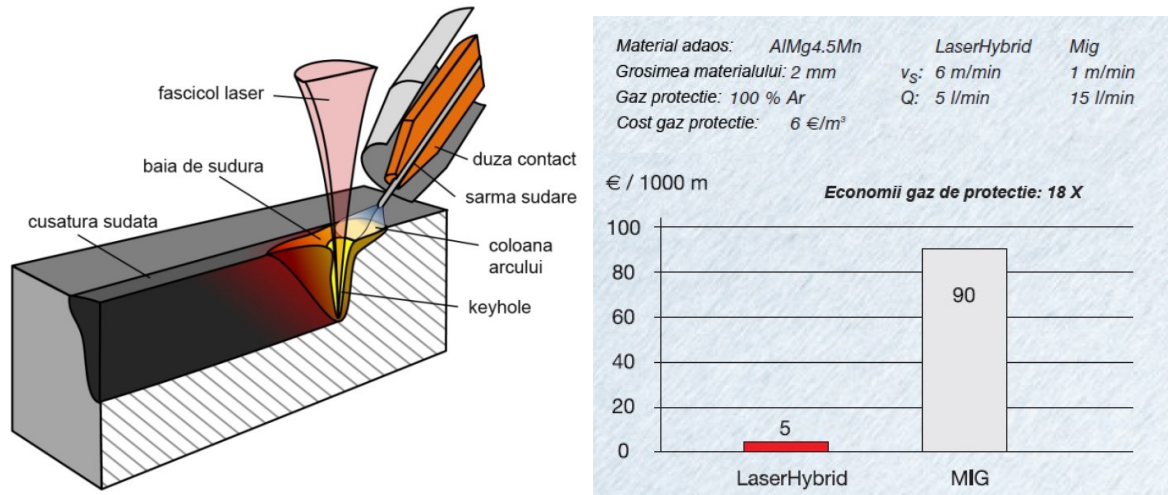


Fig.4.88 Procedul de sudare hibrid laser-MIG [35,38].

Prin combinarea procedului de sudare laser cu sudarea MIG sau cu plasmă, se obține un procedeu de sudare hibrid, care combină avantajele celor două procedee de sudare. Astfel este posibilă sudarea cu viteză ridicată, având un grad ridicat de pătrundere a cusăturii în metalul de bază și o eficiență economică foarte ridicată, economia de gaz de protecție fiind redusă cu un factor de 18 ori [35], figura 4.88. Materialul de adaos introdus în procesul de sudare hibrid laser-MIG, asigură o baie de sudare cu volum mai ridicat comparativ cu sudarea laser și astfel, sunt înlăturate condițiile de poziționare exactă a capului laser, respectiv câmpul de toleranță strâns de prelucrare a rosturilor de sudare, pentru evitarea spațiilor libere între piesele sudate. În plus, se asigură și o ranforsare a cusăturii sudate, respectiv o supraînălțare ușoară care poate fi controlată din parametrii de sudare ai procedului MIG, respectiv o viteză superioară de sudare. Prin urmare, se pot suda piese cu anumite deschideri în care se completează material adaos, se asigură o pătrundere mai ridicată și o lărgime mai mare a cusăturii sudate, crește tenacitatea materialului depus. Aceste avantaje largesc domeniul de aplicații a sudării hibrid laser-MIG, reduc investițiile în echipamente, deoarece puterea laserului poate fi semnificativ mai redusă, de doar 1,5- 2 kW, mărind eficiența economică.

În baia de sudare se formează o cavitate (gaura de cheie), datorită densității foarte mari de energie concentrată. Presiunea hidrostatică și tensiunea superficială a băii topite tind să niveleze depresiunea din baia de sudare, efectul acestora fiind contrabalansat de către presiunea vaporilor metalici, care se ridică din gaura de cheie menținută activă de fascicolul laser. Un observator virtual care s-ar deplasa cu aceeași viteză ca și capul de sudare, ar observa o baie de sudare relativ staționară în care se manifestă o anumită turbulență, însă transportul de material prin arcul de plasmă-laser se realizează cu un grad de complexitate ridicat. Se produce topirea/vaporizarea locală a metalului de bază, se formează gaura de cheie și arcul de plasmă, care determină la suprafața băii a unei perdele de vaporii metalici. Are loc un fenomen de absorbție a radiației laser la nivelul vaporilor metalici și se stabilește un echilibru dinamic între forțele hidrostatice, tensiunea superficială și presiunea arcului, producându-se agitarea băii de sudare datorită convecției termocapilare și a forțelor electromagnetice Lorentz.

Transferul de material prin arcul de plasmă a fost deja prezentat în cadrul procedurii de sudare MAG și este influențat de parametrii curentului de sudare, lungimea liberă a sârmei, calitatea materialului adaos, respectiv de compoziția atmosferei de protecție. Pentru a completa acest tablou, nu trebuie să ometem mecanismele de transfer termic prin conducție, convecție și radiație la nivelul metalului de bază, care determină ciclul termic la sudare și nivelul tensiunilor și deformațiilor din material, lățimea ZIT, precum și caracteristicile mecanice de rezistență ale îmbinării sudate.

Aspectul cusăturii sudate și pătrunderea în metalul de bază depinde direct de parametrii tehnologici pentru fiecare procedeu de sudare în parte, de puterea surselor laser-MIG și în mod evident, de mecanismul de transfer de material în arcul electric în cazul procedurii de sudare MIG. Prin urmare, descrierea matematică a mecanismului de transport de material la sudarea laser-MIG se realizează în următoarele etape:

- a) formarea arcului de plasmă și cuantificarea efectelor sale asupra dinamicii băii de sudare;
- b) formarea plasmei induse de fasciculul laser și interacțiunea dintre plasmă și laser;
- c) dinamica forțelor și presiunilor ce acționează asupra găurii de cheie;
- d) interacțiunea dintre plasmă-material adaos-baie de sudare.

Pentru a iniția procesul de sudare, temperatura piesei joacă un rol esențial în special la sudarea aluminiului, care are un grad redus de absorbție a radiației laser. După ce s-a atins temperatura de vaporizare a materialului, se formează cavitatea în baia de sudare și gaura de cheie. După acest moment, se poate cupla întreaga putere a instalației laser, pierderile de putere prin reflexie devenind practic neglijabile. Se vaporizează o cantitate suplimentară de material, inclusiv material adaos, ceea ce determină creșterea densității vaporilor metalici deasupra găurii de cheie, creșterea procesului de absorbție a energiei din fasciculul laser, respectiv o creștere a randamentului de topire a materialului. Practic se atinge un echilibru dinamic, care se stabilește în raport cu parametrii ce intervin în mecanismul de transfer termic către material.

Pentru a ilustra prin date concrete avantajele economice ale sudării hibride laser-MIG, putem prezenta un exemplu, respectiv sudarea portierelor autoturismului VW Phaeton [36]. Pentru a suda o portieră a autoturismului, se execută 7 suduri MIG (în lungime totală de 380 mm), 11 suduri cu laser (1030 mm) și 48 de suduri cu procedeul hibrid laser-MIG (3570 mm). Sudarea hibridă laser-MIG se utilizează pentru sudarea secțiunilor extrudate, turnate și realizate din tablă de aluminiu din portieră. Sudurile sunt predominant de colț în cazul îmbinărilor prin suprapunere, dar și cap la cap dacă deschiderea este îngustă. Pentru deschideri mai mari este avantajoasă sudarea MIG. În cazul rosturilor extrem de înguste sau pentru grosimi reduse ale materialului, este mai avantajoasă sudarea cu laser. Viteza de sudare poate fi cuprinsă între 1,2-4,8 m/min, viteza sârmei de sudare între 4-9



m/min, iar puterea laserului între 2-4 kW. Procesul de sudare hibrid laser-MIG a fost optimizat, parametrii de sudare finali având valorile: viteza de sudare 4,2 m/min, viteza sârmei 6,5 m/min și puterea laserului de 2,9 kW, figura 4.89.

Fig. 4.89 Sudarea portierelor autoturismului VW Phaeton cu procedeul hibrid laser-MIG [36].

Procedeul de sudare laser a fost combinat recent¹ cu procedeul de sudare MAG, pentru construcția panourilor la construcția navelor maritime, figura 4.90. Procedeul hibrid laser-MAG se aplică cu precădere pe marile șantiere navale din Europa [39], datorită avantajelor oferite: deformății reduse ale panourilor sudate, viteza mare de sudare, automatizarea procesului, costurile de fabricație mai reduse, figura 4.91 și 4.92.



Fig. 4.90 Sudarea hibridă laser-MAG a panourilor de oțel, pe șantierul Odense Steel Shipyard [39].



Fig. 4.91 Deformațiile panourilor sudate cu arc electric, GMAW[39].



Fig. 4.92 Primele panouri sandwich sudate hibrid laser-MAG pe șantierul naval Meyer Werft - Germany cu instalații laser hibride cu o putere de 12 kW[39].

4.4 Sudarea aluminotermică

Sudarea cu termit face parte din categoria procedeelor de sudare speciale prin topire, cu reacții chimice exoterme și este codificată conform SR ISO 4063-2011, cu codul 71. Procedeul de sudare se aplică pentru sudarea cap la cap a profilelor metalice de secțiune mare, cea mai cunoscută aplicație fiind sudarea șinelor de cale ferată, figura 4.93. Procedeul se mai aplică și la îmbinarea unor piese de secțiune mare din oțel sau fontă, ca de exemplu: arbori cotiți, cilindri de laminor. În cazul sudării fontelor, în termit se adaugă și ferosiliciu. Prin acest procedeu, se mai pot suda cap la cap conductori din aluminiu sau cupru, figura 4.94. Energia necesară procesului de sudare se obține prin reacția de reducere metalotermică a unui oxid metalic. Pentru sudarea șinelor de cale ferată, zona îmbinării este introdusă într-o formă realizată din materiale refractare în vederea preîncălzirii acesteia. Forma respectivă trebuie să asigure poziționarea corectă a capetelor de șină, acestea trebuie să fie aliniate, iar între suprafețele de capăt trebuie lăsat un rost, în care să pătrundă metalul topit obținut prin reacție de reducere metalotermică.

¹ după anul 2000 pe șantierul naval Odense Steel Shipyard [39].



Fig. 4.93 Sudarea aluminotermică a șinelor de cale ferată.



Fig. 4.94 Sudarea aluminotermică a cablurilor de aluminiu.

Suprafețele de capăt ale pieselor sudate trebuie pregătite corespunzător înainte de montarea formei, muchiile nu trebuie să prezinte fisuri sau lipsă de material. Forma refractară are prevăzut un canal de alimentare care se separă în două brațe pentru o curgere uniformă bilaterală a metalului topit și asigurarea umplerii complete a acesteia cu metal topit, zgura formată fiind evacuată și colectată în partea superioară a formei, printr-o rețea de canale colectoare, figura 4.95.

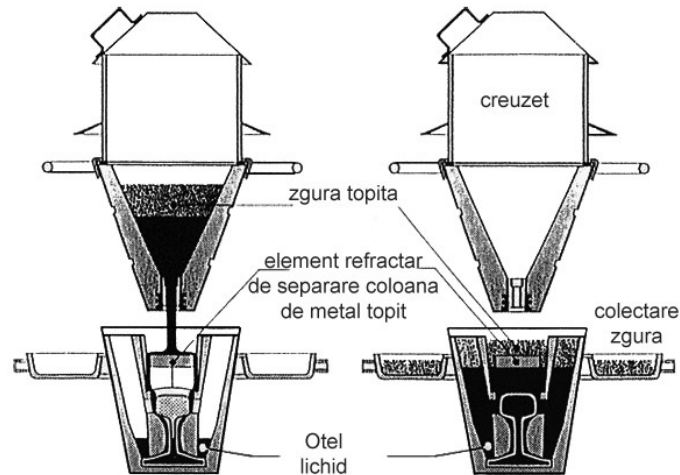


Fig. 4.95 Instalația de sudat cu termit.

Operația de sudare este precedată de o operație de preîncălzire a capetelor pieselor care urmează a fi sudate, până la o temperatură de cca. 950-1000°C. Preîncălzirea este necesară pentru a preveni solidificarea oțelului topit în contact cu șina metalică, pentru asigurarea legăturii de rezistență fiind necesară topirea parțială a capetelor de șină. Eventualii oxizi care se formează în baia de sudură, vor fi evacuați odată cu zgura în partea superioară a formei refractare, în niște vase colectoare. Preîncălzirea se execută cu propan ca și gaz combustibil, încălzirea cu flacără oxiacetilenică fiind interzisă. Arderea termitului se realizează într-un creuzet executat dintr-un material refractar, aprinderea amestecului putându-se realiza cu arc electric, cu o amorsă specială sau cu benzi de magneziu. La aprindere, termitul trebuie să fie uscat, deoarece apa poate provoca împrăscări și explozii. După terminarea reacției de ardere, care durează cca. 20-30 secunde, produsele topite pot fi evacuate în formă. După turnare, se lasă îmbinarea să se răcească în formă cca. 5 sec. după care se pot îndepărta elementele metalice ale dispozitivului de turnare, figura 4.96.

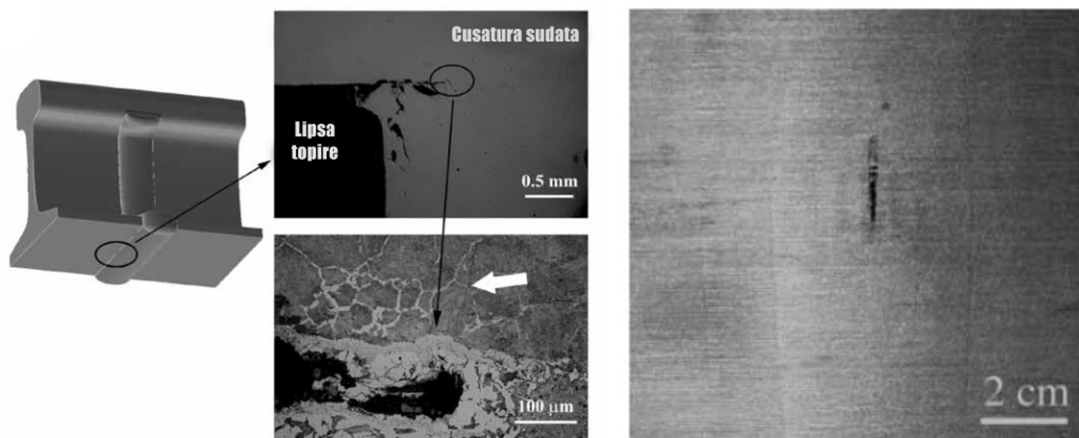
După îndepărtarea zgurii și a resturilor din forma refractară, este necesară polizarea profilului căii de rulare, restul îmbinării sudate rămânând neprelucrat. Îmbinarea sudată se inspectează vizual și ultrasonic, pentru a depista eventuale defecte din îmbinare.



Fig. 4.96 Aspectul îmbinării sudate, după îndepărtarea dispozitivului de sudare cu termit.

Sudarea prin termit se poate aplica la îmbinarea unor piese din oțel carbon, slab aliat, aliat, fontă și aluminiu, cupru cu grosimi de la 1-100 mm. În cazul sudării cuprului se folosește un termit pe bază de cupru, iar în celelalte cazuri unul pe bază de aluminiu [40]. Procedul are avantajul că nu necesită o pregătire pretențioasă a pieselor înainte de sudare, utilajul este foarte simplu, iar secțiunea sudată nu este limitată ca formă sau suprafață. Reacția exotermă a unui kilogram de termit de aluminiu dezvoltă o energie de cca. 3100 kJ, în timpul arderii rezultă o temperatură a metalului lichid de peste 3000°C. Termitul folosit în România este format din 7 kg oxid de fier și 2 kg pulbere de aluminiu. În urma arderii unei cantități de 1 kg de termit de acest tip se obțin cca. 550 g oțel topit și 450g zgură.

În îmbinarea sudată pot apărea o serie de defecte de sudare, precum lipsă de topire, porozitate, incluziuni, retasură de solidificare, sau fisuri la cald localizate uzual în centrul secțiunii sudate, figura 4.97. Lipsa de topire se poate întâlni în cazurile în care preîncălzirea capetelor de material și a formei refractare a fost insuficientă, fapt ce conduce la o topire insuficientă a materialului de bază, metalul topit solidificându-se rapid, fără a mai reuși topirea marginală a metalului de bază.



a) Lipsa de topire în talpă b) fisurare la cald
Fig. 4.97 Defecte de sudare aluminotermică [41].

Porozitatea se poate datora degazării necorespunzătoare a băii de sudare, temperaturii scăzute a băii, ceea ce va conduce la prezența porilor în cusătura sudată. Fisurarea la cald se întâlnește destul de frecvent la sudarea aluminotermică. Datorită contracției de solidificare a cusăturii sudate, apar tensiuni de întindere între grăunții cristalini, iar dacă între aceștia se găsește un film lichid de metal cu punct de topire scăzut (eutectice), acesta nu poate prelua tensiunile datorate fenomenului de contracție. Astfel, pe interfața dintre filmul lichid și cristalele columnar dendritice se propagă o fisură localizată central, în zonele de material unde este posibil să întâlnim aceste condiții. Acest fenomen este asociat cu prezența unor impurități precum P sau S în baia de sudare, când se formează eutectice cu temperatură joasă de fuziune, în cazul unor viteze de răcire neuniforme sau la sudarea materialelor care au un coeficient ridicat de contracție volumică.

4.5 Sudarea în baie de zgură

Sudarea în baie de zgură este codificată conform SR ISO 4063-2011, având codul 72. Aceasta se caracterizează printr-un randament foarte ridicat și se utilizează exclusiv la sudarea în poziție verticală a tablelor cu grosimi de peste 20 mm, într-o singură trecere. Energia termică se obține prin efect Joule, datorită trecerii curentului de sudare printr-o baie de flux topit cu rezistivitate electrică ridicată. Baia de flux este conductoare electric și prin convecție se asigură fluxul termic necesar topirii rostului de sudare. Materialul adaos este sub formă de sârmă sau de pulbere metalică și este introdus în baia de zgură, participând la formarea cusăturii sudate. Baia de sudare este menținută în poziție de niște patine mobile de cupru, răcite cu apă. Patinele se deplasează vertical ascendent, odată cu formarea cusăturii sudate, pe măsură ce materialul depus se solidifică.

Ca și caracteristici generale ale procedurii de sudare, se pot aminti:

- Rata depunerii cuprinsă între 11-54 kg/h;
- Utilizează rosturi în „I” pentru orice grosime de material;
- Sudarea se realizează într-o singură trecere;
- Porozitatea sau incluziunile nemetalice sunt rar prezente în cusătura sudată, datorită vitezelor mici de răcire a băii de sudare;
- Diametrul sârmei de sudare este între 2-6 mm;
- Curentul de sudare este cuprins între 200-2000 A;
- Tensiunea curentului este de 25-50 V, sudarea se efectuează în cc⁻ sau c.a.;
- Viteza de sudare se încadrează între 0,4 și 4 cm/min.
- Se pot suda oțeluri carbon sau slab aliate.

Datorită efectului termic foarte mare, energia liniară la sudare atinge valori extrem de ridicate, zona influențată termic rezultând foarte largă. Aceasta este caracterizată printr-o structură cu grăunți grosolani, datorită căreia tenacitatea materialului în această zonă este afectată. Pentru a îmbunătăți caracteristicile de rezistență mecanică, în special energia consumată la rupere, este nevoie de un tratament termic post-sudare de normalizare. Aplicațiile uzuale ale acestui procedeu se regăsesc în construcțiile sudate realizate pe șantierele navale, fabricarea unor componente pentru utilaje grele, etc. Lungimea elementelor sudate și grosimea acestora este mare, fapt pentru care procedeu devine atractiv economic. Reamintim că nu este nevoie de prelucrarea rostului de sudare, ceea ce contribuie semnificativ la reducerea costurilor de sudare. Pentru a preveni impactul negativ al unei microstructuri grosolane asupra rezilienței scăzute a cusăturii sudate și în ZIT, s-au elaborat o serie de oțeluri speciale ce conțin microincluziuni, care modifică cinetica transformărilor structurale la răcire, figura 4.98. Astfel, este promovată o transformare feritică cu granulație fină, cu excelente proprietăți de rezistență mecanică, în special tenacitatea. Aceasta era puternic afectată de structura grosolană, care rezultă uzual în cazul procedurilor de sudare cu energie liniară mare.

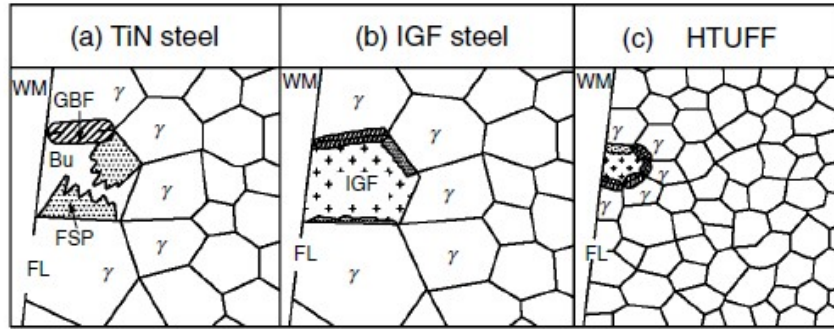
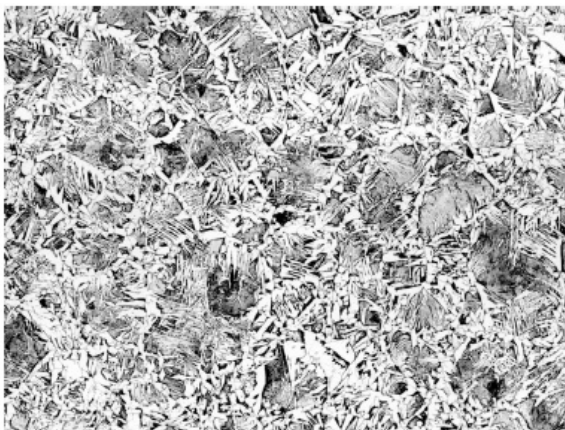


Fig. 4.98 Prezentare schematică a controlului microstructurii în ZIT [42].

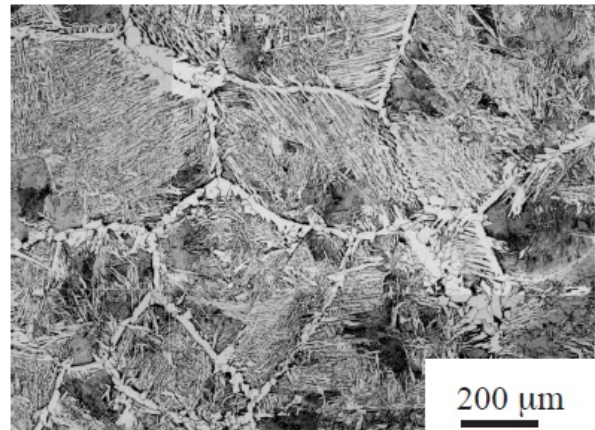
- a) oțeluri microaliate cu Ti, b) oțeluri cu promovarea separării feritei intergranular (IGF),
c) oțeluri cu microstructură fină realizată prin incluziuni de nanoparticule de oxizi de Ca, Mg. (HTUFF)

Blocarea creșterii grăuntelui de austenită în ZIT supraîncălzită este o problemă care a preocupat inginerii metalurgi și sudori, în special în cazul utilizării unor procedee de sudare ce utilizează o energie liniară de sudare foarte ridicată, 300-1300 kJ/cm [42]. Spre comparație, la sudarea cu electrod învelit, energia liniară la sudare este în jur de 1-1.5 kJ/cm. Cantitatea de căldură foarte mare preluată de materialul de bază, se reflectă în microstructura din ZIT, caracterizată de grăunți grosolani, datorită creșterii exagerate a grăunților de austenită în zonele de material supraîncălzite. Mărirea mare a grăunților de austenită conduce la creșterea călibilității și la o tenacitate redusă în zonele afectate termic.

Nitrurile de titan TiN, manifestă un efect de blocare a creșterii grăuntelui de austenită, care se menține până la temperaturi de cca. 1200°C. Temperaturile mai ridicate și menținerea mai îndelungată a materialului de bază la aceste temperaturi, reduc eficiența particulelor de nitruri care se descompun termic. O cantitate controlată de oxizi de titan TiO_2 , Ti_2O_3 fin dispersați în metalul de bază (concentrația de O_2 fiind de cca. 120 ppm) mărește limita termică de stabilitate. Aceștia împiedică creșterea grăuntelui de austenită, efect care se menține până la temperaturi de cca. 1300°C, promovând o structură preponderent de ferită aciculară printr-un mecanism de separare intergranular. În Japonia s-au elaborat o serie de oțeluri speciale HTUFF, care datorită unor incluziuni pe bază de nanoparticule de oxizi-sulfuri de Ca și Mg, reușesc să împiedice creșterea grăuntelui de austenită în ZIT, chiar și la temperaturi ce depășesc 1400°C, figura 4.99 a).



a) mărirea grăuntelui γ , 100 μ m

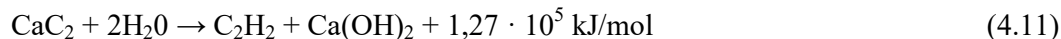


b) a) mărirea grăuntelui γ , 400 μ m

Fig. 4.99 Controlul microstructurii în ZIT la o energie de sudare liniară de 100 kJ/cm la sudarea în baie de zgură [42].

4.6 Sudarea cu flacără oxiacetilenică

Procedeele de sudare cu flacără oxiacetilenică face parte din grupa 31 a proceselor oxi-gaz și este codificat conform SR ISO 4063-2011 cu codul 311. Din aceeași grupă mai fac parte sudarea oxipropan 312 și sudarea oxihidrogen 313. Datorită proprietăților de ardere excelente ale acetilenei, sudarea oxiacetilenică este cel mai răspândit procedeu de sudare din grupa proceselor oxi-gaz. Acetilena se obține în urma reacției dintre carbura de calciu CaC_2 și apă:



Acetilena are o densitate de $1,10 \text{ kg/m}^3$ și este un compus instabil la temperaturi și presiuni ridicate. La o presiune peste $1,5 \text{ atm}$ se descompune prin explozie. Deasemenea, în contact mai îndelungat cu cuprul sau argintul, acetilena formează compuși care explodează în cazul încălzirii la temperaturi de $110\text{-}120^\circ\text{C}$.



La operațiile de sudare sau la procedeele conexe sudării, când se lucrează cu acetilena sau alte gaze combustibile, trebuie respectate o serie de măsuri de protecția muncii, deoarece se pot produce foarte ușor explozii sau incendii.

Acetilena se păstrează în butelii de oțel cu o capacitate de 40 litri, la o presiune de 16 bar. Pentru a putea păstra acetilena la astfel de presiuni, aceasta trebuie dizolvată în acetonă. Interiorul buteliei este compartimentat și este umplut cu o masă poroasă de mangal, plută, azbest mărind suprafața de contact dintre acetilena și acetonă, reacția de descompunere a acetilenei fiind oprită. Într-o butelie de acetilena de 40 litri, la o presiune de 15 atm se pot stoca 6000 litri de acetilena la o presiune normală de 1 atm [40]. Flacăra oxiacetilenică prezintă trei zone caracteristice în care au loc o serie de reacții chimice după cum urmează:

- în zona I se produce reacția de disociere a acetilenei în prezența oxigenului:

$$\text{C}_2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{C} + \text{H}_2 + \text{O}_2 \quad (4.12)$$
- în zona II are loc reacția de ardere primară:

$$2\text{C} + \text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO} + \text{H}_2 + 450\,000 \text{ kJ/kmol} \quad (4.13)$$
- iar în zona III se produce arderea completă:

$$2\text{CO} + \text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + 850\,000 \text{ kJ/kmol} \quad (4.14)$$

Oxigenul este utilizat în amestec cu acetilena pentru a mări viteza de ardere și pentru a obține un efect termic mai puternic. Oxigenul poate fi depozitat sau transportat sub formă gazoasă la presiunea atmosferică sau sub formă lichefiată, comprimat la o presiune de 150-200 bar. În Europa, buteliile de oxigen sunt confecționate din oțel carbon cu o grosime de 8 mm și se încarcă la o presiune de 150 bar sau din realizate din oțel aliat cu o grosime de 6 mm, fiind încărcate la o presiune de 200 bar. O butelie normală de oxigen cu capacitatea de 40 litri, încărcată la o presiune de 150 atm, poate conține 6 m^3 de oxigen gazos la o temperatură de 0°C și o presiune de 1 atm. În prezent, în USA se utilizează butelii de oțel de înaltă rezistență, având o capacitate de 50 litri, care pot stoca oxigenul la presiuni de 300 bar [43].

Gazul combustibil, în general este acetilena, se amestecă cu oxigenul în camera de amestec a suflaiului, fiind pe urmă insuflată prin duza de amestec în țeava suflaiului. În funcție de grosimea materialelor sudate, se aleg corespunzător debitele de gaz, precum și mărimea duzei de sudare (care se mai numește bec). Racordurile de cuplare pentru acetilena și oxigen sunt cu filet pe stânga, respectiv pe dreapta, pentru a evita o cuplare greșită a acestora. Schema de principiu a unui arzător sau suflai de sudare, este prezentată în figura 4.10.

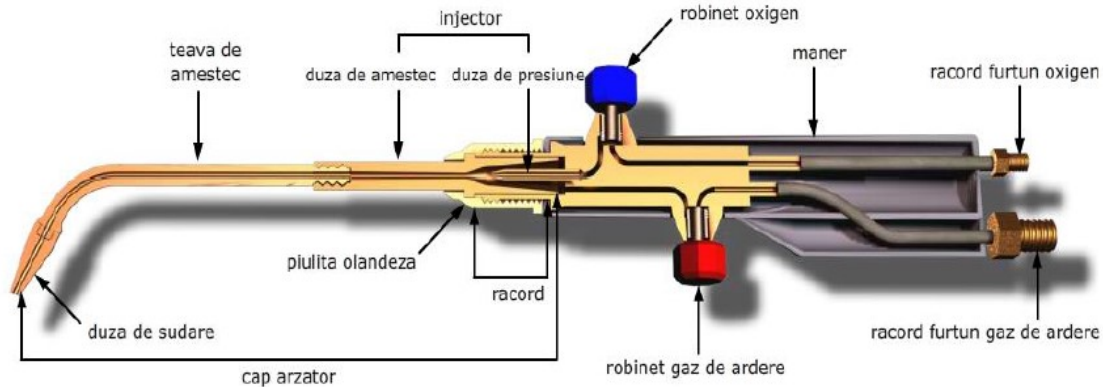


Fig. 4.10 Secțiune longitudinală într-un suflai de sudare [40].

La sudarea cu flacără oxiacetilenică se utilizează materiale adaos sub formă de vergele și fluxuri dezoxidante. Ca și regulă generală, materialul adaos trebuie să aibă o compoziție chimică cât mai apropiată de cea a materialului de bază și poate fi livrat sub formă de colaci sau vergele. Este important ca suprafața materialului adaos, dar și cea a metalului de bază să fie curățată, lipsită de oxizi, grăsimi, uleiuri sau vopsea. Fluxurile sunt substanțe solide care se introduc în baia de sudură pentru dezoxidarea metalului topit. Ele formează prin solidificare un strat de zgură care acoperă cusătura și o protejează față de oxidare. Cel mai des se utilizează fluxuri pe bază de borax [40].

O atenție mărită trebuie acordată la sudarea în colț interior, când flacăra se întoarce dinspre material spre arzător, care se supraîncălzește mărind pericolul de aprindere a amestecului în arzător sau chiar în furtunele flexibile de alimentare cu gaze. Când se produce arderea inversă, se aude un șuierat ascuțit și este obligatoriu oprirea alimentării cu gaze și răcirea arzătorului. Ignorarea acestui pericol se poate solda cu accidente grave, explozii și arsuri, care pot accidenta persoanele din imediata vecinătate a zonei de sudare. Sub nici o formă nu este permis ca personal neinstruit și necalificat să lucreze fără supravegherea directă a unei persoane calificate.

Sudarea oxiacetilenică se aplică cu precădere pentru lucrări de reparații, intervenții pe teren unde nu sunt condiții pentru a suda cu alte procedee. Trebuie avut în vedere că deși densitatea de energie este redusă, cantitatea de căldură asimilată de metalul de bază este ridicată, datorită faptului că fluxul termic nu este concentrat și viteza de sudare este redusă. Acest fapt, contribuie la formarea unei zone largi afectată termic, precum și la apariția unor tensiuni/deformații ridicate, în funcție de nivelul de bridare a construcției metalice.

Tehnologia de sudare cu flacăra de gaze presupune stabilirea: regimului de sudare, pregătirea rostului de sudare, metoda de sudare, modul operator și a eventualelor tratamente termice. În tabelele 4.17 și 4.18 sunt prezentate caracteristicile gazelor combustibile și parametrii de lucru, în funcție de grosimea materialului sudat și de tipul gazului combustibil utilizat la sudare.

Tab. 4.17 Principalele caracteristici ale gazelor combustibile utilizate la sudare.

Gazul combustibil	Temperatura maximă a flăcării °C	Raport volumetric oxigen-gaz (vol)	Distribuția căldurii kJ/m ³	
			Zona primară	Zona secundară
Acetilena	3,160	1.2:1	18890	35882
Propan	2,810	4.3:1	10433	85325
MAPP	2,927	3.3:1	15445	56431
Propilenă	2,872	3.7:1	16000	72000
Hidrogen	2,834	0.42:1	-	-
Gaz natural	2,770	1.8:1	1490	35770

Tab. 4.18 Caracteristicile de lucru pentru arzătoare utilizate la sudarea oxi-acetilenică.

Nr. arzător	0	1	2	3	4	5	6	7
Grosimea material sudat (mm)	0.5-1.0	1-2	2-4	4-6	6-9	9-14	14-20	20-30
Consum acetilenă (dm ³ /h)	75	150	300	500	750	1200	1700	2500
Consum oxigen (dm ³ /h)	86	175	330	550	825	1320	1850	2750
Presiune oxigen (bar)	1,5-2,0	1,8-2,5	2,5-2,8	2,5-3,0	2,8-3,5	3,5-4,0	3,8-4,5	4,0-5,0
Lungime nucleu luminos (mm)	6	8	12	15	17	19	21	25
Viteza de sudare (m/h)	12-10	8-6	6-4	4-3	3-2	2-1,5	1,5-1	1-0,75

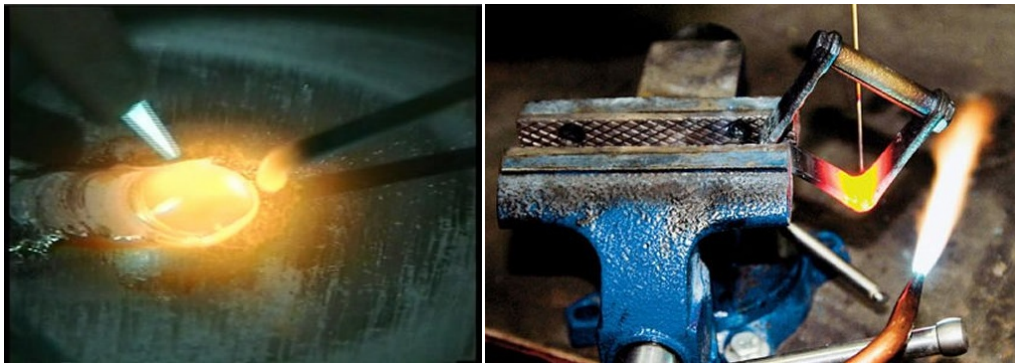


Fig. 4.101 Aspecte specifice de la sudarea cu flacăra oxi-acetilenică.

Alegerea materialului adaos se face în funcție de calitatea metalului de bază și trebuie să aibă o compoziția chimică similară sau îmbunătățită cu adaosuri de elemente de aliere, care să compenseze arderea acestora în procesul de sudare sau să îmbunătățească proprietățile îmbinării sudate. Metalul de adaos trebuie să corespundă certificatului de calitate, să fie curat, lipsit de impurități sau unsori, să aibă o suprafață netedă. Se livrează sub forma de colaci sau vergele cu lungimea de 0,8 – 1 m, în gama de diametre cuprinse între 1 și 8 mm. În tabelul 4.19, sunt prezentate valorile recomandate pentru diametrul vergelei de adaos, în funcție de grosimea materialului sudat.

Tab. 4.19 Valori recomandate pentru diametrul vergelei de adaos la sudarea oxi-acetilenică.

Grosimea materialului (mm)	1,5	1,6-3	3-5	5-7	7-10	> 10
Diametrul vergelei (mm)	1,5-2,0	2,5-3,0	3-4	4-5	5-6	6-8

Pentru sudarea oțelurilor structurale cu flacăra oxiacetilenică se poate utiliza sârmă de sudare S10 (0,1 % C), iar pentru sudarea oțelurilor carbon de calitate, sârmă de sudare S10X elaborate îngrijit cu conținut redus de impurități. Pentru oțelurile cu conținut de carbon peste 0,3%, este necesar ca piesele să fie preîncălzite la temperaturi cuprinse între 150-350°C, temperaturile mai mari fiind pentru oțelurile cu conținut de carbon mai ridicat. Preîncălzirea trebuie menținută pe toată durata sudării, deoarece în caz contrar se pot produce crăpături datorită tensiunilor termice ce iau naștere în piesele sudate. După sudare, răcirea pieselor trebuie să fie lentă, pentru a se evita durificarea și fragilizarea metalului depus și a ZIT. La sudarea oțelurilor cu conținut de carbon peste 0,3% se va folosi o flacăra ușor carburantă, deoarece nu se recomandă folosirea de sârme de adaos cu conținut mai mare de 0,3% C, care provoacă fierberea băii și produc porozitate în metalul depus. Pentru obținerea unor cusături sudate de înaltă rezistență mecanică, se folosesc sârmele aliate, precum: S10 M1 sau S10 M2 cu mangan, sau sârma S08 N3 cu nichel.

La sudarea fontelor se utilizează vergele de adaos turnate din fontă cenușie pentru sudare: VT-S 30, cu 3,5% Si, VT-S 36, cu (3,6-4,8%) Si. Vergelele de fontă mai conțin pe lângă Si cca. (3-3,6%) C, (0,5-0,8%) Mn, (0,3-0,5%) P. Pentru sudarea pieselor din fontă albă supuse unui tratament de maleabilizare după sudare, se folosesc bare de fontă albă cu conținut redus de siliciu, având compoziția: 2,2-2,5% C; 0,4-0,6% Mn; 0,7-1,2% Si; și maximum 0,2% P, respectiv 0,1% S. Un element favorabil sudării fontelor care se introduce în barele pentru sudare, este fosforul, deoarece acesta împiedică formarea fontei albe, iar în timpul operației de sudare fluidizează baia de sudură. Vergelele se livrează sub formă de bare cu lungime de 450-700 mm și cu diametre de 4-14mm. Răcirea după sudare trebuie să fie lentă, pentru evitarea contracțiilor și tensiunilor interne care pot conduce la fisurarea piesei sudate.

Sudarea cu flacără a metalelor neferoase se face cu materiale adaos după cum urmează:

Pentru sudarea aluminiului:

- vergele de aluminiu pentru conductoare, conducte;
- vergele de aluminiu-cupru pentru duraluminiu;
- vergele turnate din siluminiu.

Pentru sudarea cuprului:

- sârmă de cupru electrolitic CuE;
- vergele de cupru-argint.

Pentru sudarea alamei:

- sârme și vergele din alamă.

Fluxurile sau fondanții utilizați la sudarea oxiacetilenică pot fi sub formă de praf, pastă sau lichide. Principalul rol pe care-l îndeplinesc este de dezoxidare a băii de sudare, zgura formată se separă de baia de sudare și asigură o viteză de răcire controlată a cusăturii sudate. Principalele proprietăți ale fluxurilor de sudare sunt:

- Ușor fuzibile;
- Vâscoase în stare topită;
- Dizolvă pelicula de oxizi;
- Greutatea specifică este mai mică decât a metalului de bază topit;
- Nu formează produse gazoase.

Cele mai utilizate fluxuri la sudarea oxiacetilenică sunt:

- Borax 50%, bicarbonat de sodiu 47% și acid sulfuric 3% (pentru sudarea oțelurilor);
- Borax 70%, clorură de sodiu 20% și acid boric 10% (sudarea cuprului și a alamei).

5. SUDAREA ÎN STARE SOLIDĂ

5.1 Sudarea prin rezistență electrică

Procedeele de sudare în stare solidă prin rezistență electrică fac parte din grupa a 2-a, conform codificării numerice a procedeelelor de sudare din SR ISO 4063-2011, tabelul 5.1.

Tab. 5.1 Codificarea numerică a procedeelelor de sudare prin rezistență electrică, conform SR ISO 4063-2011.

2	Sudarea prin rezistență electrică
21	Sudarea în puncte
22	Sudarea în linie
221	Sudarea în linie prin suprapunere
225	Sudarea în linie cu bandă
23	Sudarea în relief
24	Sudarea cu topire intermediară
25	Sudarea prin presiune și rezistență electrică cap la cap
29	Alte procedee de sudare prin rezistență electrică
291	Sudarea cu curenți de înaltă frecvență

Toate procedeele de sudare prin rezistență electrică au ca și principiu general obținerea energiei termice prin efect Joule, de unde provine și denumirea grupei procedeelelor de sudare prin "rezistență electrică". Orice conductor electric are o anumită rezistivitate electrică intrinsecă, care stă la baza efectului termic Joule. Căldura produsă este proporțională cu rezistența electrică, cu pătratul curentului de sudare și cu timpul de menținere a curentului, conform relației (5.1), unde: R este rezistența electrică (Ω), I este intensitatea curentului de sudare (A) și τ timpul de sudare (sec).

$$Q_{\text{efect Joule}} = R \cdot I^2 \cdot \tau \quad (\text{J}) \quad (5.1)$$

Îmbinarea sudată se încălzește local datorită efectului termic Joule, după care se aplică o forță de refulare prin diferite metode mecanice sau pneumatice. Astfel se asigură contactul dintre suprafețele elementelor care urmează să fie sudate, asigurându-se întrepătrunderea materialului în zona îmbinării. Sub acțiunea forței de refulare, atomii situați în straturile superficiale de material în secțiunea de contact dintre cele două piese, ajung să intre în contact la distanțe atomice, determinând formarea unor legături metalice de rezistență. Forța de refulare se menține și pe durata procesului de recristalizare a materialului din zona sudurii, fapt ce influențează pozitiv microstructura și caracteristicile mecanice de rezistență ale îmbinării sudate.

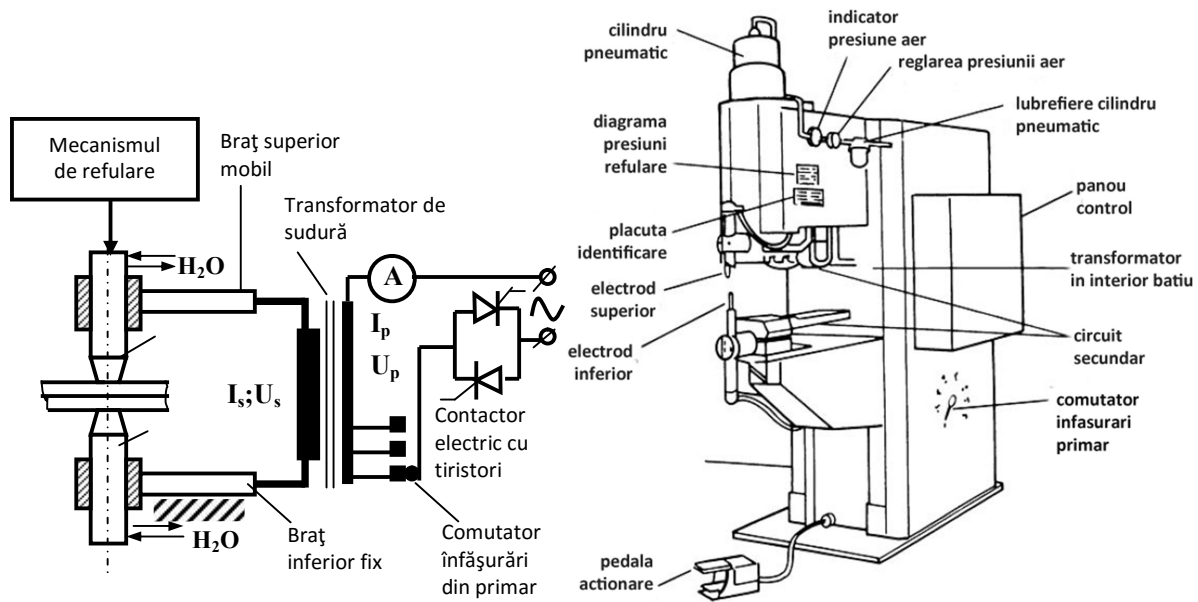
5.1.1 Sudarea în puncte

Sudarea în puncte este un procedeu de îmbinare aplicat în general tablelor subțiri prin suprapunere, prin realizarea unor puncte de sudare, formate dintr-un nucleu topit. În jurul acestora, materialul este refulat pe o anumită rază, în funcție de grosimea elementelor sudate, geometria la vârf a electrozilor de contact și parametrii de sudare. Sudarea în puncte se aplică și barelor sau sârmelor, de exemplu la realizarea plaselor sudate utilizate în construcții. Dintre aplicațiile cele mai cunoscute ale sudării în puncte, se pot aminti sudarea elementelor de caroserie sau a diferitelor elemente metalice realizate din tablă subțire: panouri, carcase pentru diverse produse, obiecte de uz casnic, instrumentar medical etc. În prezent, în industria auto, sudarea în puncte tinde să fie înlocuită prin sudare laser, sau laser hibrid. Procedeu de sudare se realizează în variantă mecanizată sau complet automatizată, în funcție de seria de producție.

Timpii de sudare sunt foarte mici, uzual 0,6-0,8 sec. pentru tablele subțiri utilizate în construcția autoturismelor, ceea ce reprezintă o productivitate ridicată. Factorii de influență ai procesului de sudare în puncte, sunt după cum urmează:

- Grosimea și calitatea materialului;
- Intensitatea curentului de sudare;
- Caracteristicile sursei de curent: frecvența și tipul curentului (alternativ, continuu sau pulsant);
- Timpul de sudare;
- Forța de refulare, respectiv presiunea de refulare;
- Geometria și calitatea electrozilor de contact;
- Efectul de șunt;
- Starea suprafețelor sudate: rugozitate, nivel de oxidare.

Ca și caracteristici generale ale procedurii de sudare în puncte, putem enumera: simplitatea procedurii, productivitatea ridicată, se pot realiza îmbinări omogene cât și eterogene, se sudează fără material adăos, se pot realiza tratamente termice imediat după sudare pe același echipament, posibilitatea automatizării. Schema de principiu și părțile componente ale unui echipament de sudare în puncte, sunt prezentate în figura 5.1.



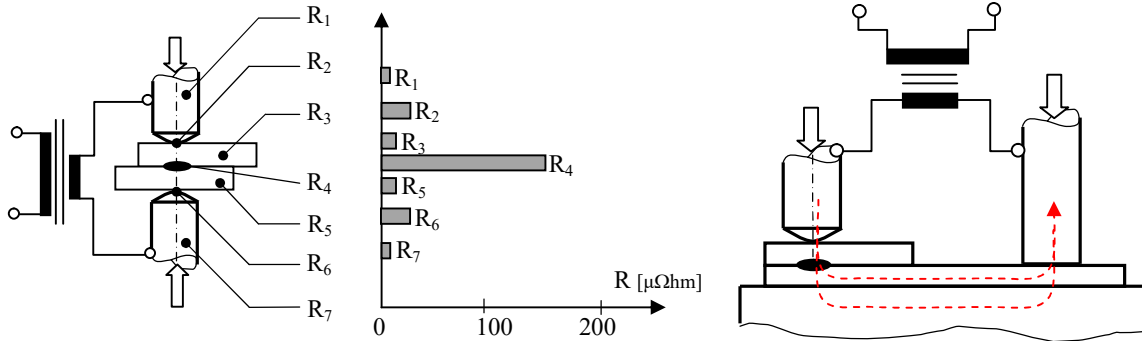
a) schema electrică, b) vedere generală

Fig. 5.1 Schema de principiu a unei mașini de sudat în puncte.

Mecanismul de refulare este acționat mecanic sau pneumatic, în funcție de nivelul de automatizare al echipamentului. La variantele mai simple, forța de refulare se asigură printr-un sistem de pârghii și arcuri elastice pretensionate la anumite valori. În cazurile echipamentelor integrate în linii mecanizate de fabricație, se utilizează acționarea pneumatică care se pretează și la automatizare.

În funcție de condițiile de acces, pozițiile electrozilor de contact și modul de realizare a circuitului electric, se disting mai multe variante de sudare în puncte, figura 5.2 și 5.3. La sudarea unor table de grosime mai mare, până la 5 mm, se aplică varianta de sudare din două părți, prin două puncte, procedeul fiind cunoscut sub denumirea “push-pull” [40]. Secundarele transformatoarelor formează un circuit comun, străbătut direct, fără șuntare de suma curenților.

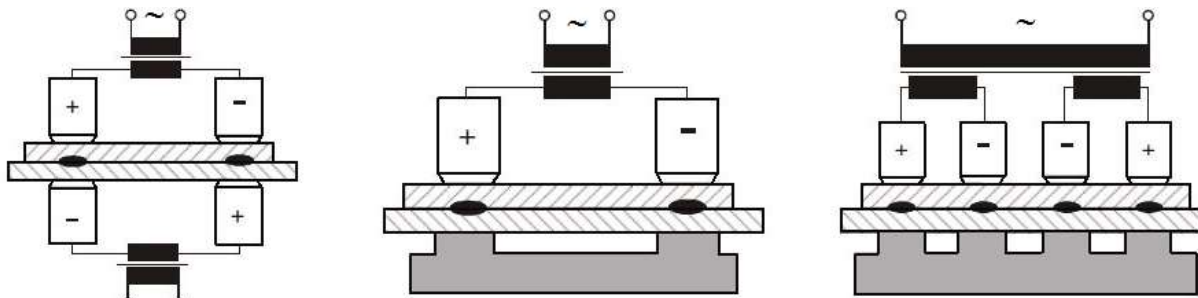
Procedeul de sudare *push-pull* se aplică atunci când avem nevoie de intensități de curent foarte mari, pentru sudarea unor piese cu pereți groși până la 5 mm sau la carcasa din tablă galvanizată, tablele cositorite sau zincate, ce nu pot fi sudate dublu punct indirect, din cauza șuntării exagerate prin stratul protector [40], figura 5.3.



a) sudarea din ambele părți sau directă

b) sudarea indirectă, pe o singură parte

Fig. 5.2 Variante de sudare în puncte prin presiune și rezistență electrică.



a) push-pull

b) sudare dintr-o parte cu bază conductivă

c) sudare în puncte multiple

Fig. 5.3 Variante de sudare în puncte multiple.

Punctul de sudură rezultă sub o formă lenticulară, în zona centrală din planul de separație al pieselor sudate, figura 5.4. Se formează un nucleu topit al cărui dimensiuni rezultă în funcție de parametrii de sudare, acesta fiind înconjurat de o zonă influențată termic, caracterizată de modificări structurale. Fenomenul este similar cu cel întâlnit la procedeele de sudare prin topire. Rezistența mecanică a îmbinării sudate depinde de mărimea punctului de sudare, existând o valoare optimă pentru aceasta, care rezultă pentru o anumită combinație a parametrilor de sudare. La dimensiuni mici ale punctului de sudare, legătura metalică se realizează pe o lungime redusă, iar la valori mari ale dimensiunii nucleului topit, se produce o reducere a grosimii efective a îmbinării, datorită refulării pronunțate ale materialului. În ambele cazuri, rezistența mecanică a îmbinării este redusă.

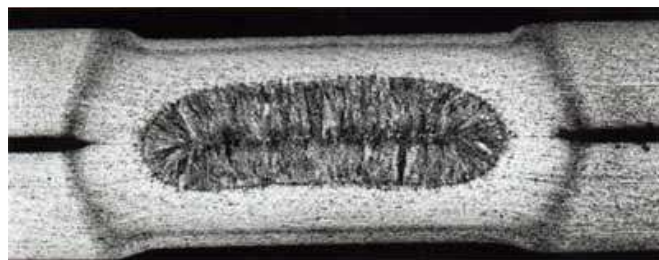


Fig. 5.4 Aspectul microstructurii punctului de sudare.

Aceste aspecte pot fi observate în microstructura prezentată în figura 5.4. Nucleul topit al materialului este evidențiat clar de metalul de bază, printr-un contur de elipsoid alungit, care determină aspectul lenticular al punctului de sudură, specific acestui procedeu. Se poate observa forma columnară a grăunților cristalini, orientați perpendicular pe suprafața nucleului topit, în direcția gradientului de temperatură. În zona centrală a nucleului topit se poate distinge o linie mai difuză și mai închisă la culoare, corespunzând ultimei porțiuni din nucleu care cristalizează. În această zonă se regăsesc elemente superficial active, impurități într-o concentrație mai ridicată. Menținerea presiunii de refulare și după decuplarea curentului de sudare, are ca și scop prevenirea riscului de fisurare la cald în zona centrală a nucleului topit, dar și rafinarea microstructurii.

Deasemenea, în zona de contact dintre electrozi și tablele suprapuse s-a produs o refulare a materialului, micșorându-se grosimea efectivă a îmbinării sudate. Acest aspect este foarte important la stabilirea regimului de sudare, deoarece efectul de refulare este proporțional cu efectul termic, respectiv cu presiunea de refulare și timpul de sudare. Efectul termic la sudarea în puncte poate fi controlat prin alegerea corespunzătoare a forței de apăsare pe electrozi, care la rândul său influențează direct rezistența electrică de contact și implicit căldura produsă prin efect Joule. Trebuie menționat faptul că rezistența electrică a componentelor circuitului, precum și rezistențele electrice de contact variază cu temperatura, figura 5.5.

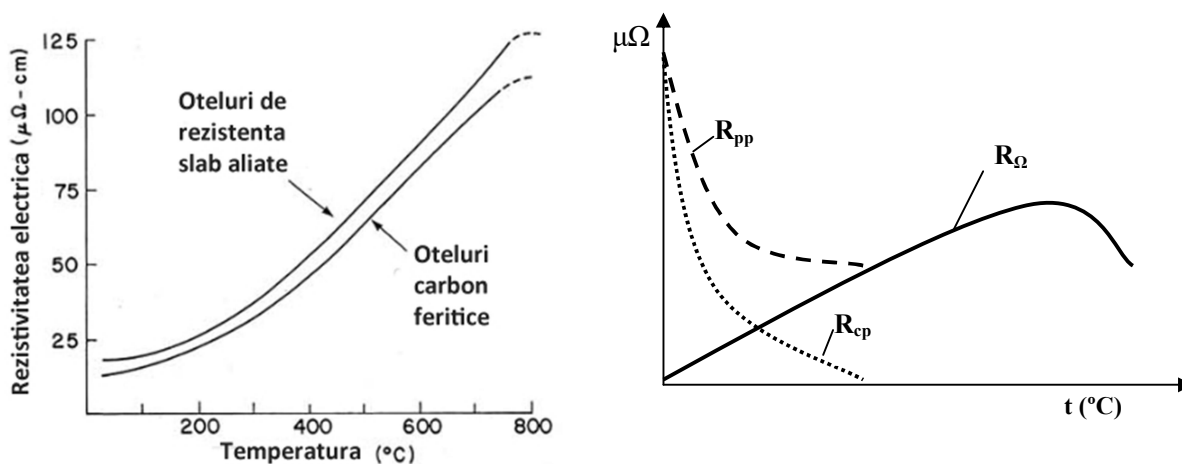


Fig. 5.5 Variația rezistențelor electrice din circuitul de sudare în puncte [44].

Asigurarea presiunii de refulare asupra elementelor supuse sudării se realizează cu ajutorul unor electrozi de contact, realizați din cupru sau aliaje de cupru, asupra cărora acționează o forță de refulare F_{ref} (kN). Curentul electric de preîncălzire se transmite prin electrozii de contact, motiv pentru care, aceștia trebuie să prezinte o bună conductivitate electrică. Pentru prelungirea duratei de exploatare a acestora, este nevoie de răcirea lor cu ajutorul unui sistem auxiliar. În acest scop, electrozii de contact au prevăzute canale interioare, prin care circulă agentul de răcire. Cantitatea de căldură sau efectul termic produs la sudare, se determină cu relația (5.1). Rezistența electrică R , măsurată între electrozii de contact, este obținută prin suma dintre rezistența ohmică a metalului de bază (R_{Ω}), rezistența de contact dintre piesele de îmbinat (R_{pp}) și rezistența de contact dintre electrozii de cupru și material (R_{cp}), conform relației (5.2).

$$R = 2R_{\Omega} + R_{pp} + 2R_{cp} \quad (\Omega) \quad (5.2)$$

$$R_{\Omega} = 4\rho \cdot s / \pi d_e^2 \quad (\Omega) \quad (5.3)$$

Rezistența ohmică a metalului de bază R_Q , se determină cu ajutorul relației (5.3), unde s-au folosit următoarele notații: ρ rezistivitatea electrică a metalului de bază, s grosimea acestuia, iar cu d_e s-a notat diametrul la vârf a electrodului de contact. Rezistențele de contact depind de calitatea metalului de bază și a electrozilor de contact, de starea și rugozitatea suprafețelor de contact, precum și de temperatura și presiunea de refulare. Variația rezistențelor din circuitul de sudare, în funcție de temperatură sunt prezentate în figura 5.5. Astfel că, în timp ce rezistența ohmică a materialului R_Q crește cu temperatura, rezistențele de contact dintre piesele de sudat R_{pp} , respectiv dintre electrozii de cupru și material R_{cp} , scad odată cu creșterea temperaturii. Acest fapt poate fi explicat prin realizarea unui contact mai bun dintre elementele metalice respective, suprafața efectivă de contact mărirându-se prin aplatizarea asperităților ce există la interfața de contact, determinând astfel un contact electric îmbunătățit. Valorile orientative ale acestor rezistențe electrice măsurate la temperatura ambiantă, înaintea cuplării curentului de sudare, pentru piese din oțel, sunt: $R_Q = 7 \mu\Omega$; $R_{pp} = 178 \mu\Omega$; $R_{cp} = 30 \mu\Omega$.

Parametrii optimi de sudare se pot determina printr-o serie de încercări, criteriul principal de selecție, fiind cel de rezistență mecanică a îmbinării sudate. Variabilele esențiale ce trebuiesc corelate, sunt: tipul și ciclul curentului de sudare, forța de refulare și modul de variație în timp a acesteia, timpul de sudare, tratamentul termic post-sudare. Toate aceste elemente stau la baza realizării ciclogramei de sudare, după care va fi programat echipamentul de sudare, figura 5.6.

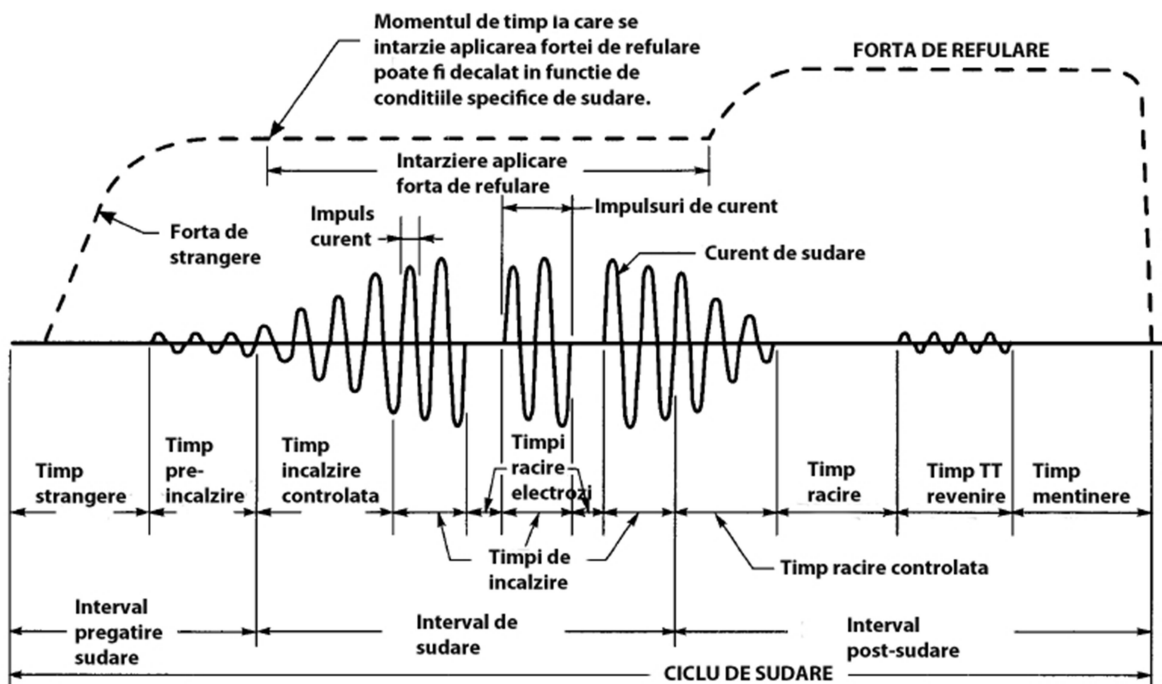


Fig. 5.6 Ciclograma de sudare. Schiță de principiu.

Sudarea în puncte se desfășoară în trei faze:

1. În prima fază are loc preîncălzirea materialului pentru a-l aduce într-o stare favorabilă deformării plastice la cald cu temperaturi cuprinse între 1100 și 1300°C.
2. În faza următoare este mărită forța de refulare pentru a asigura întrepătrunderea materialului și a asigura un diametru corespunzător al punctului sudat. Are loc în această etapă formarea nucleului topit având un diametru $d_n = (0,8-0,9) \cdot d_e$ și o deformare plastică a materialului învecinat.

- În faza finală se produce solidificarea nucleului topit și recristalizarea zonelor deformate plastic aflate în continuare sub acțiunea forțelor de refulare pentru asigurarea unei granulații fine în ZIT.

Formarea nucleului topit, diametrul și viteza de creștere a acestuia, depind de parametrii de sudare utilizați. Creșterea diametrului punctului de sudare în funcție de curentul de sudare, este prezentată în figura 5.7. La început, nucleul topit crește rapid în diametru, după care viteza de creștere se micșorează. La valori prea mari ale curentului de sudare, se produce o supraîncălzire a materialului cu formarea unui volum excesiv de material topit, aflat sub presiune și localizat între vârful electrodului și piesa sudată. La atingerea unui volum critic de material topit, se va produce o expulzare de material de sub vârful electrodului de contact, conducând la creșterea adâncimii de pătrundere a electrodului în material, precum și la micșorarea periculoasă a grosimii îmbinării.

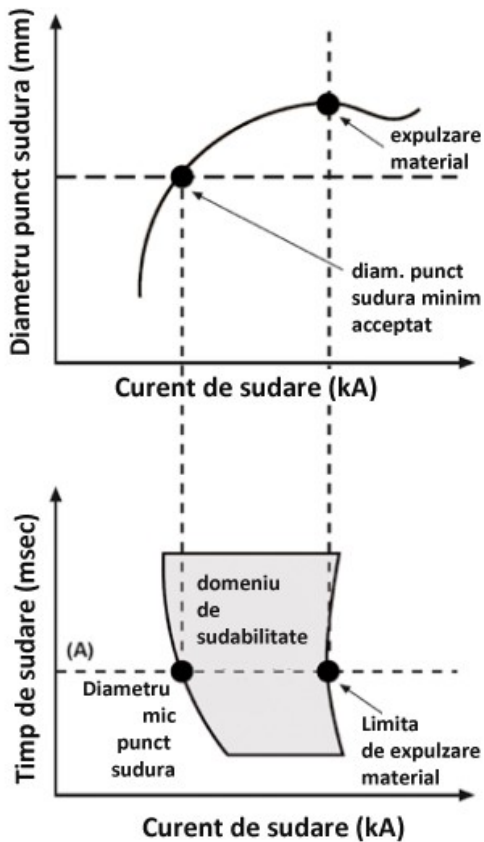


Fig. 5.7 Regimul de sudare și influența acestuia asupra dimensiunii punctului de sudură. Expulzare de material în zona de contact cu electrodul.

Un punct de sudare executat corect are un diametru suficient și prezintă o penetrare bună în metalul de bază. Diametrul minim acceptat pentru punctul de sudură este de $3,5\sqrt{s}$, unde s este grosimea tablei sudate. Valoarea recomandată pentru diametrul punctului sudat este de $5\sqrt{s}$. Această valoare se obține sub limita curentului de sudare corespunzător expulzării de material, când creșterea nucleului topit este stabilizată, iar variațiile mici de curent nu mai modifică semnificativ geometria punctului de sudură.

Expulzarea de material datorită încălzirii excesive

conduce la apariția unor cavități în zona nucleului topit, micșorând capacitatea portantă a îmbinării sudate. Totodată, crește adâncimea de pătrundere a electrozilor de contact în material cu reducerea grosimii efective în zona de sudare.

În funcție de procesele fizice care au loc, se pot identifica patru etape în formarea și creșterea nucleului topit, respectiv a punctului de sudură:

- Crește cantitatea de căldură preluată de materialul de bază, însă nu s-a atins punctul de topire al materialului. Datorită forței de refulare și a temperaturii înalte are loc netezirea asperităților suprafețelor de contact și crește suprafața efectivă de contact dintre piese, micșorându-se rezistența electrică locală de contact R_{pp} . În cazul pieselor galvanizate, stratul de zinc din zona de contact se topește și se vaporizează local, înaintea atingerii temperaturii de topire a metalului de bază.

2. Are loc formarea nucleului topit și creșterea rapidă a diametrului acestuia. Rezistența electrică a zonei de metal topită este mai mare decât cea a metalului de bază, datorită căreia crește efectul termic local.
3. Creșterea mărimii nucleului topit scade în intensitate. Procesul de creștere a nucleului topit este controlat de viteza de răcire a electrozilor și de transferul termic în metalul de bază.
4. Dacă procesul de încălzire continuă, volumul de material topit crește, astfel că se atinge pragul în care se produce expulzarea de metal topit din zona de contact. Peste acest prag, scade rezistența mecanică a îmbinării sudate și implicit aspectul și calitatea îmbinării sudate.

Domeniul de sudabilitate se află între cele două curbe de delimitare ale dimensiunii punctului de sudare: cea minimă și cea corespunzătoare expulzării de material, conform figurii 5.7. Electrozii de contact se mai numesc și cuie de contact și servesc la strângerea pieselor de sudat, transmiterea curentului de sudare și aplicarea forței de refulare. Electrozii sunt confecționați din cupru sau aliaje de cupru, principalele caracteristici ale acestora fiind prezentate în tabelul 5.2. Aceștia sunt răciți cu apă printr-un circuit interior, pentru evitarea supraîncălzirii peste temperatura maximă de lucru. Un electrod rezistă la cca. 200-12000 cicluri de sudare, după care trebuie schimbați.

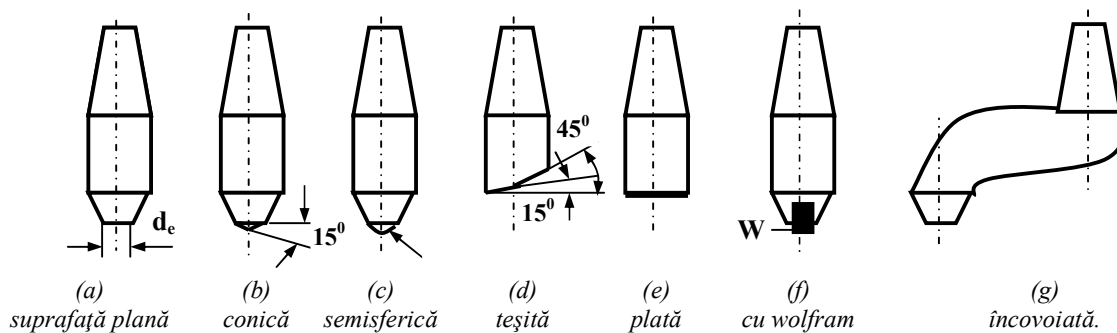


Fig. 5.8 Caracteristicile geometrice ale electrozilor de sudare în puncte.

Forma electrozilor poate fi foarte variată, de la cea conică, la cele teșite sau încovoiate, în funcție de particularitățile pieselor care se sudează. Pentru sudarea tablelor de oțel carbon și oțeluri slab aliate se utilizează electrozii cu vârf tronconic de tip (a) și (b), pentru sudarea aliajelor ușoare vârful electrodului tronconic este rotunjit (c), la sudarea cu mișcare circulară pe arc de cerc electrodul este teșit (d), pentru sudarea plaselor de sârme electrodul are capătul plat (e), electrodul cu vârf de wolfram este ilustrat în schița (f), iar pentru sudarea pieselor de formă complicată se utilizează electrozi încovoiți tip (g), figura 5.8.

Tab. 5.2 Caracteristicile electrozilor de contact din aliaje de cupru.

Aliajul	Elemente aliene (%)	Ψ (%)	HB (kg/mm ²)	t_{\max} (°C)
CuCr	Cr=0,4-1	80	120	370
CuCrZr	Cr=0,1-1 Zr=0,03-0,2	85	130	500
CuNiBe	Ni=1,4-1,6 Be=0,2-0,4	50	170	510
CuCd	Cd=0,9-1,2	85	110	300
CuNiSi	Ni=3-4 Si=0,6-1	40	140	450
CuW	W=1-5	75	160	550
CuAl₂O₃	Al ₂ O ₃ =1-3	70	210	580

În tabelul 5.2 s-au folosit următoarele notații :

- Ψ** conductivitatea electrică relativă a aliajului față de cea a cuprului;
- HB** duritatea alajului la 20°C;
- t_{max}** temperatura maximă de funcționare a electrozului.

Electrozii de contact sunt realizați din materiale ce întrunesc condițiile de calitate specificate în standardul SR ISO 5182 și sunt clasificate în trei grupe:

- A - cupru și aliaje de cupru;
- B - materiale sinterizate;
- C - aliaje de cupru durificate prin dispersie.

Pentru fiecare tip de material, în standard sunt indicate compoziția chimică, starea de livrare, duritatea minimă, conductivitatea electrică relativă față de cupru, temperatura de înmuiere a materialului.

Brațele portelectrod se confecționează uzual din alamă, având ca scop transmiterea curentului de sudare, a forței de refulare și a apei de răcire la electrod, care este introdus într-un ajutoraj conic 1:10. Mecanismul de refulare realizează deplasarea pe verticală a electrozului de contact superior în vederea strângerii pieselor sudate, aplicarea forței de presare pentru preîncălzire și acționarea forței de refulare. Cele mai utilizate mecanisme de acționare sunt cu comandă manuală tip clește până la o forță de presare de 20 daN, cu pedală și pârghii cu arc pentru forțe de apăsare între 20-50 daN, mecanică cu came și pârghii, electro-pneumatică (50-500 daN) sau electro-pneumo-hidraulică (peste 500 daN).

Dispozitivele de comandă sunt electrice sau electronice cu contactoare, ignitroane sau tiristoare comandate pe bază de program reglabil computerizat. Aceste dispozitive permit reglarea și modificarea în timpul sudării a intensității curentului de sudare, a forței de presare și asigură reproductibilitatea timpului de sudare prestabilit. Din punct de vedere constructiv, se deosebesc patru tipuri de utilaje de sudare în puncte prin presiune și rezistență electrică, prezentate în figura 5.9. Pistolul de sudare (a) se utilizează pentru sudarea unilaterală cu acționare manuală, pentru realizarea caroseriilor de mașini și carcase de utilaje la care dispozitivele de sudare bilaterală sunt inaccesibile. Cleștele de sudare în puncte (b) se folosește la sudarea cu acționare bilaterală a construcțiilor mari din tablă, cu acces bun la îmbinare, cum sunt caroseriile de autovehicule, plafonele vagoanelor, carcasele, cutiile, ramele, suporturile de dimensiuni mari etc.

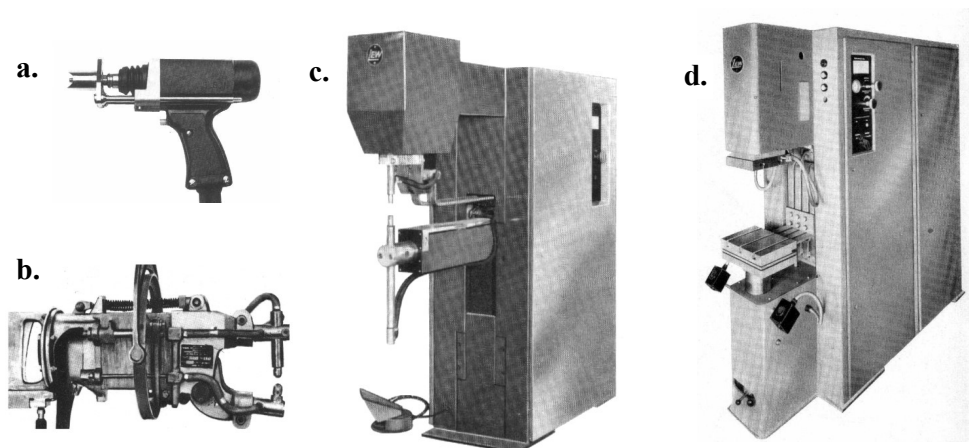


Fig. 5.9 Utilaje de sudare în puncte (a-pistol; b-clește; c-mașină; d-presă).

În multe aplicații, cleștele de sudare se montează pe roboți de sudare, realizând construcții sudate pe bază de programe asistate de calculator. Mașina de sudat este staționară **(c)** și servește la realizarea construcțiilor sudate mici prin manevrarea manuală a acestora, în condițiile sudării bilaterale. Presele de sudare **(d)** de asemenea sunt staționare, fiind utilizate pentru sudarea în multipuncte unilaterale sau bilaterale a pieselor mici ștanțate, îndoite sau ambutisate din tablă, în cadrul producției de serie mare a unor organe de mașini, cutii, capace, grilaje etc. Sudarea în puncte prin presiune și rezistență electrică este larg utilizată în industrie, pentru realizarea de utilaje și elemente de mașini din tablă de oțeluri carbon și aliate, oțeluri inoxidabile, Cu, Al, Ti și aliajele lor cu grosimi cuprinse între 0,1-10 mm, tije, pârgăhii, roți, stative, suporturi, schelete, stâlpi, rame, grinzi, carcase, dulapuri, caroserii, vagoane, plase de sârme, grilaje pentru armarea betonului etc. Parametrii de sudare se stabilesc în funcție de grosimea și calitatea metalului de bază. Diametrul vârfului electrodului de contact, se determină respectând următoarele relații:

- $d_e = 2s + 3$ (mm) pentru sudarea tablelor cu $s \leq 3$ mm,
- $d_e = 5\sqrt{s}$ (mm) pentru sudarea tablelor cu $s > 3$ mm.

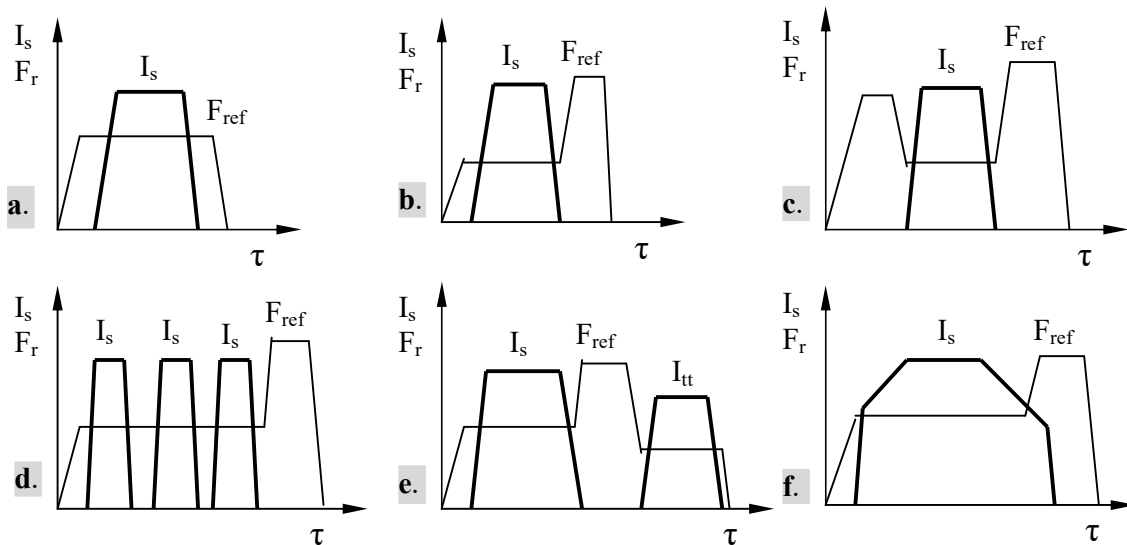


Fig. 5.10 Ciclograme pentru diferite variante de sudare în puncte prin presiune și rezistență electrică.

Ciclogramele proceselor de sudare în puncte pot fi foarte diferite în funcție de materialul și condițiile de sudare, figura 5.10. Cea mai simplă ciclogramă **(a)**, utilizată mai mult la sudarea manuală a tablelor subțiri cu grosimi s cuprinse între 0,5-5 mm, cuprinde următoarele secvențe: prinderea și strângerea pieselor cu forța de refulare, cuplarea curentului de sudare până la atingerea temperaturii de preîncălzire, refularea la cald și răcirea fără eliberarea pieselor.

În cazul variantei **(b)** forța de strângere în timpul preîncălzirii este mai mică pentru protejarea vârfului electrodului de contact, pentru ca la atingerea temperaturii de sudare și decuplarea curentului, să crească la valoarea de refulare prin care impuritățile dintre table sunt expulzate. La varianta **(c)**, forța de strângere este mai mare la început, pentru apropierea tablelor prin deformare la rece, apoi forța scade pentru perioada de preîncălzire și crește la valoarea de refulare pentru sudare. În ciclograma **(d)** este prezentat cazul aplicat la sudarea tablelor mai groase cu $s > 5$ mm, la care curentul de sudare se aplică în 3-5 impulsuri, pentru a asigura intervale de timp necesare pentru răcirea electrodului de contact. Diagrama **(e)** ilustrează cazul la care după sudare curentul este din nou cuplat la o valoare mai mică pentru efectuarea unui tratament termic de recoacere a punctului sudat. În final se prezintă o ciclogramă cu intensitatea variabilă a curentului de sudare, aplicat la sudarea tablelor de aluminiu **(f)**.

Valoarea intensității curentului de sudare I_s și a forței de refulare F_{ref} se determină din densitatea curentului de sudare i_s (A/mm^2), respectiv din presiunea specifică de refulare p_{ref} (MPa), care pot fi diferite în funcție de regimul de sudare. Se pot aplica două regimuri de sudare, în raport cu condițiile impuse sudării:

- Sudarea cu regim moale**, care se caracterizează prin valori mai mici ale curentului de sudare și timpi mai lungi de preîncălzire în vederea refulării. Zona încălzită rezultă mai mare, metalul de bază poate fi mai ușor deformat, iar vitezele de încălzire și răcire sunt mai reduse, evitându-se astfel formarea unor structuri de călire. Sudarea cu regim moale se aplică pentru lucrări de asamblare-sudare, pentru sudarea tablelor de oțeluri aliate și cu conținut mai mare de carbon, ușor călibile, cu grosimi mai mari, $s > 6$ mm cu un regim de sudare, conform tabelului 5.3.
- Sudarea cu regim dur** (tare) se realizează cu intensități mari ale curentului de sudare și timpi mici de preîncălzire. Astfel, rezultă o zonă ZIT îngustă, productivitate mare de sudare și pierderi mai reduse de căldură prin conducție în tablele sudate. Se aplică la fabricarea în serie mare sau în masă a structurilor sudate în puncte, precum și pentru sudarea tablelor din metale și aliaje cu conductibilitatea termică ridicată: Cu, Al.

Tab. 5.3 Regimurile de sudare în puncte a diferitelor materiale metalice.

s (mm)	Regim moale					Regim dur				
	d_c (mm)	I_s (kA)	F_{ref} (daN)	τ_s (s)	d_n (mm)	d_c (mm)	I_s (kA)	F_{ref} (daN)	τ_s (s)	d_n (mm)
	$i_s = 80-160 A/mm^2$ $\tau_s = (0,8-3)t$ $p_{ref} = 20-30$ MPa; pentru $t \leq 3$ mm $p_{ref} = 40-80$ MPa; pentru $t > 3$ mm;					$i_s = 200-400 A/mm^2$ $\tau_s = (0,1-0,3)t$ $p_{ref} = 30-50$ MPa; pentru $t \leq 3$ mm $p_{ref} = 50-100$ MPa; pentru $t > 3$ mm;				
Table de oțel carbon și slab aliate cu $C < 0,3\%$										
0,5	4	4	60	0,4	3,5	4	6,5	150	0,05	3,5
1,0	6	5	100	0,8	4,5	6	9	250	0,10	4,5
1,5	6	6	150	1,2	5,5	6	10	350	0,20	5,5
2,0	7	7	200	1,6	6,5	7	14	500	0,24	6,5
2,5	8	8	250	2,0	7,5	8	16	700	0,30	7,5
3,0	9	9	300	2,4	8,5	9	18	800	0,36	8,5
4,0	11	10	380	2,8	10,5	11	22	1200	0,42	10,5
5,0	13	12	450	3,4	12,5	13	25	1700	0,56	12,5
Table de oțel inoxidabil cu 18%Cr și 8%Ni										
0,5	4	3	175	0,6	3,5	4	16	240	0,08	3,5
1,0	5	7,6	400	1,0	4,5	5	21	380	0,16	4,5
1,5	6	11	650	1,2	5,5	6	25	540	0,24	5,5
2,0	7	14	800	1,4	6,5	7	29	850	0,30	6,5
2,5	7,5	16	1000	1,8	7,0	7,5	33	1100	0,34	7,0
3,0	8,5	18	1200	2,2	8,0	8,5	36	1400	0,38	8,0
Table de aluminiu										
0,5						3,5	18	180	0,08	3,5
1,0						4,0	30	250	0,12	4,5
1,5						5,0	35	320	0,16	5,5
2,0						6,0	40	400	0,22	6,5
2,5						6,5	50	520	0,28	7,5
3,0						7,0	58	600	0,34	8,5

Posibilitatea realizării unor îmbinări eterogene sau din metale neferoase sudate în puncte, depinde de caracteristicile materialelor sudate, grosimea materialelor, precum și de starea suprafețelor de sudare, aspecte prezentate în figura 5.11 [45].

	Aliaje de Al	Aluminium	Alpaca	Bronzuri de siliciu	Bronzuri de fosfor	Alamă	Cu-Ni	Nichel	Aliaje de Ni
								B	B
Aliaje de Ni			B				B	B	A
Nichel								A	
Cu-Ni			B	B	B		A		
Alamă				B		B			
Bronzuri de fosfor			B	B	A				
Bronzuri cu siliciu			B	A					
Alpaca			B						
Aluminium	B	B							
Aliaje de Al	B								

Metale neferoase

Fig. 5.11 Posibilitatea sudării în puncte a metalelor neferoase [45].

A - excelent, B - bine, se pot lipi.

Referitor la echipamentele de sudare în puncte, se mai pot menționa următoarele aspecte:

- Caracteristicile sursei de curent sunt extrem de importante asupra calității îmbinării sudate, în special la sudarea unor materiale cu proprietăți mai speciale, precum: aluminiul, oțelurile inoxidabile, oțelurile galvanizate;
- Echipamentele de sudare dotate cu invertor au posibilitatea de control foarte precis al efectului termic, datorită frecvenței ridicate a pulsurilor de curent, astfel că o sursă cu invertor ce lucrează la 1000 Hz monitorizează/controlază procesul la fiecare perioadă de 1 ms, iar la o frecvență de 5000 Hz perioada se reduce la 0.2 ms spre comparație cu sursele de curent ce operează în curent alternativ la o frecvență de 50Hz, unde perioada crește la 20 ms.
- Creșterea frecvenței de operare, respectiv micșorarea perioadei de variație a curentului, permite un control mult mai precis al efectului termic care este transmis punctului de sudare. Acest lucru se traduce prin creșterea calității îmbinărilor sudate, prin micșorarea timpului de reacție în variația efectului termic, se reduce deformarea materialului prin refulare, se micșorează pierderile termice și implicit consumul de energie, crește gama de materiale care pot fi sudate, se păstrează intacte acoperirile galvanice etc.
- O altă caracteristică foarte importantă a surselor de curent moderne, comparativ cu cele de generație mai veche, este **controlul adaptiv al puterii** ce se produce automat la variația rezistenței electrice din ciclul de sudare. Astfel, este posibil asigurarea unui ciclu termic constant, chiar dacă au loc variații ale rezistenței electrice ale elementelor din circuitul de sudare. Aceste caracteristici sunt extrem de utile la sudarea oțelurilor galvanizate, pentru protejarea stratului de zinc, la sudarea aluminiului sau a oțelurilor inoxidabile, mărind durata de exploatare a electrozilor de contact.

5.1.2 Sudarea în linie

Procedeul de sudare în linie este derivat din procedeul de sudare în puncte, electrozii de contact fiind înlocuiți cu două role de contact, care suplimentar față de sudarea în puncte, asigură și mișcarea de avans a elementelor sudate. Astfel, se poate spune că sudarea în linie este de fapt o sudare în puncte succesive, unde electrozii de contact sub formă de cuie au fost înlocuiți cu role de contact, care realizează strângerea și refularea tablelor de îmbinat. Transmiterea curentului de sudare și avansul pieselor sudate, se realizează printr-o mișcare continuă sau intermitentă de rotație a roților de contact. În funcție de regimul de sudare adoptat, se pot obține puncte de sudare distincte, tangente, parțial suprapuse, respectiv o cusătură sudată continuă, figura 5.12.

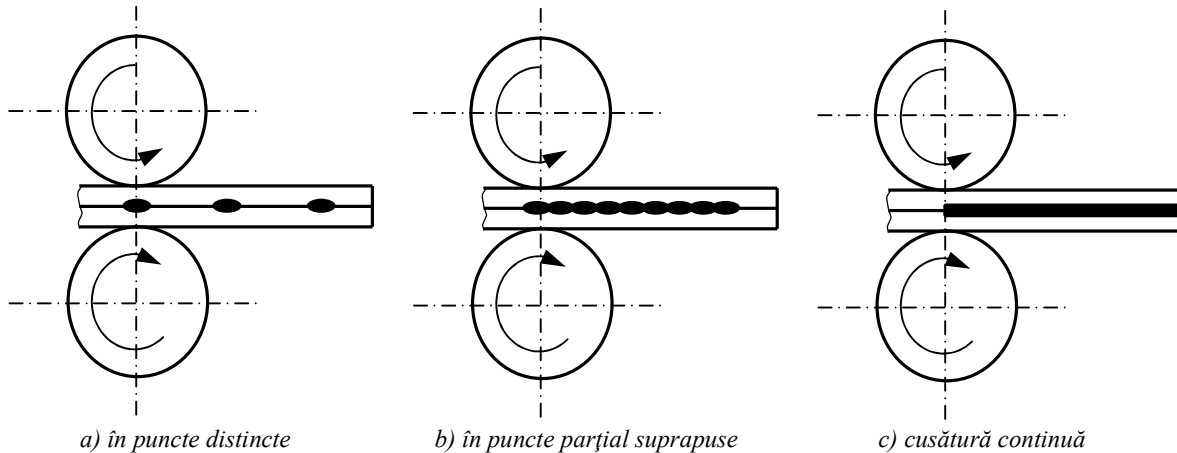


Fig. 5.12 Principiul sudării în linie.

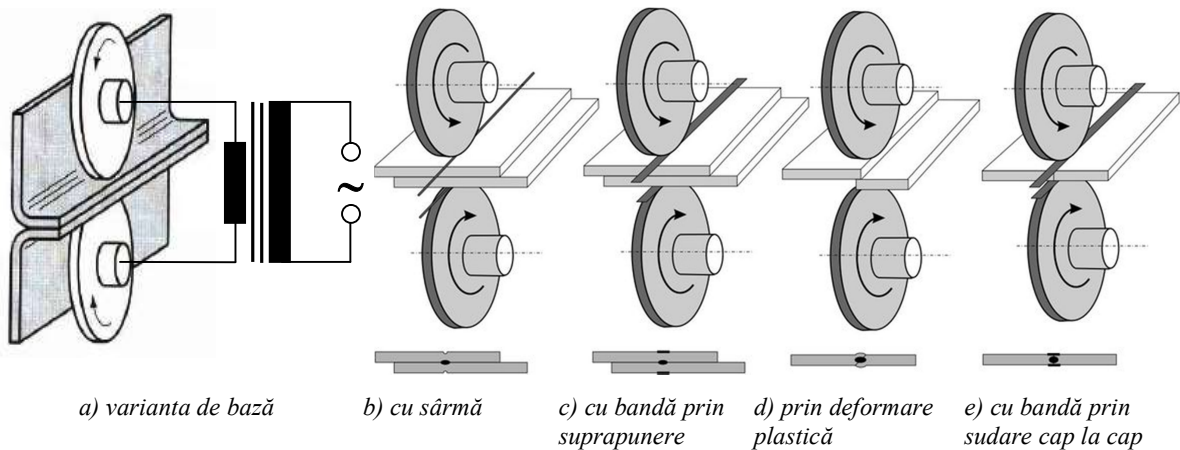


Fig. 5.13 Variante de sudare în linie.

Pornind de la varianta de bază, s-au dezvoltat o serie de variante derivate ale procedurii de sudare în linie, ce utilizează elemente auxiliare: sârmă sau bandă, figura 5.13 b,c,e. O altă variantă la care îmbinarea se realizează prin deformarea plastică a elementelor sudate, este ilustrată în figura 5.13 d. În funcție de dispunerea elementelor de sudare și a rotelor, procedeul de sudare în linie se poate clasifica în trei categorii:

- Sudarea cu role dispuse pe ambele părți, figura 5.13 a);
- Sudarea cu role dispuse într-o parte;
- Sudarea în linie cu dispunerea cap la cap a componentelor, figura 5.14.

În cazul sudării prin suprapunerea componentelor **cu role dispuse pe ambele părți**, se pot realiza îmbinări cap la cap a tablelor plane, figura 5.13 d). Tablele pot fi suprapuse inițial pe o porțiune limitată cuprinsă între rolele de contact, astfel încât, în timpul sudării marginile se deformează ajungând în poziție cap la cap. Îmbinarea poate să fie etanșă, dacă punctele sudate se suprapun parțial. Sunt situații, când datorită configurației geometrice a componentelor, una din role trebuie înclinată cu un anumit unghi pentru a permite realizarea unor cusături rectilinii sau circulare. Nu întotdeauna diametrul rotelor este același [40]. Role de dimensiuni diferite, în special în lățime, se aplică la sudarea componentelor de grosimi diferite, rola mai mică și mai îngustă așezându-se dedesubtul componenteii mai subțire .

Sudarea componentelor prin suprapunere **cu role dispuse într-o singură parte** se aplică în cazurile când accesul din ambele părți este deficitar sau când lungimea cusăturilor sudate este mare. Sudarea se execută cu două role coaxiale dispuse în paralel, curentul de sudare închizându-se prin componente prin intermediul suportului pe care sunt așezate. În anumite situații rolele pot fi dispuse cu axele paralele (în tandem) distanțate între ele, realizând cusături pe porțiuni limitate ale componentelor suprapuse.

Sudarea în linie prin **dispunerea cap la cap a componentelor** se aplică la sudarea țevilor în linie pe generatoare, figura 5.14. Procedeu este aplicat la fabricarea țevilor din benzi, fiind un procedeu de mare productivitate. Pentru obținerea de suduri etanșe fără supraînălțare, țevile se pot suda cu material adaos sub formă de bandă din oțel moale cu grosimea aproximativă de 0,2 mm și lățimea de 4 mm, poziționată cu ajutorul unui dispozitiv de ghidare [40]. Procedeu se aplică la sudarea tablelor cu grosimi de 1-4 mm, vitezele de sudare fiind de 0,4-0,8 m/min. Alte aplicații ale acestui procedeu de sudare sunt: pereții laterali ai vagoanelor de tren, sudarea diferitelor caroserii mari, sudarea anumitor rezervoare etc.

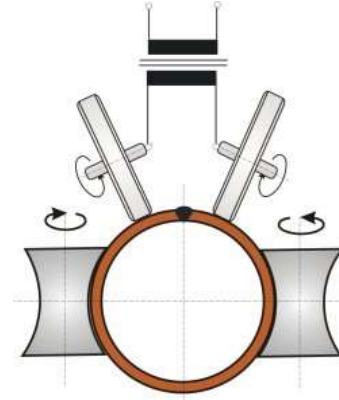


Fig. 5.14 Sudarea țevilor pe generatoare.

5.1.3 Sudarea în relief

Sudarea în relief este un procedeu de sudare derivat din procedeu de sudare în puncte, în care electrozii de contact au fost substituiți cu o serie de proeminențe realizate în materialul de bază care concentrează liniile de curent în zona îmbinării sudate. La sudarea în puncte o problemă esențială este durata de viață a electrozilor de contact, care este un factor decisiv ce determină calitatea și caracteristicile de rezistență ale îmbinărilor sudate în puncte. Modificarea geometriei la vârful electrozilor conduce la o modificare a repartiției presiunilor de contact între piese, respectiv a rezistenței electrice de contact, adică a fluxului termic preluat în zona îmbinării sudate. Acest inconvenient a fost rezolvat prin dezvoltarea procedeu de sudare în relief, în care electrozii de contact sunt parte integrantă din elementele metalice care se sudează, având o geometrie constantă. În acest mod s-au redus substanțial parametrii care potențial pot produce variații în condițiile de sudare și implicit în caracteristicile de rezistență ale îmbinărilor sudate. Sudarea în relief se aplică la sudarea unor componente realizate din oțel cu conținut redus de carbon sau slab aliate, utilizate cu precădere în industria auto, sau industria ușoară. Astfel, se sudează diferite elemente de asamblare precum: table subțiri, piulițe, bolțuri sau elemente de fixare, centrare, plase metalice etc. Datorită diversității mari de forme și dimensiuni ale profilurilor în relief, respectiv ale elementelor sudate, sudarea în relief este mai dificil de standardizat decât sudarea în puncte.

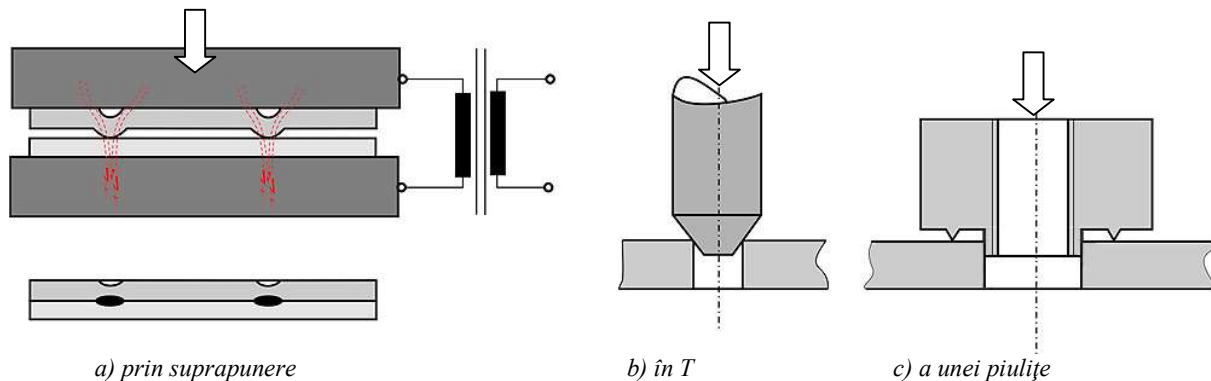


Fig. 5.15 Sudarea în relief. Variante de asamblare.

În figura 5.15, se poate observa că circuitul electric se închide prin proeminențele în relief, realizate anterior în elementele sudate sau care rezultă din forma constructivă a îmbinării. Se întâlnesc astfel de situații la sudarea plaselor metalice sau la fixarea unor bolțuri perpendicular pe un element plan, în cazul îmbinării în T. Condițiile necesare pentru a realiza o îmbinare sudată cu caracteristici de rezistență ridicate, sunt:

- Curățirea pieselor metalice în zona de îmbinare, pentru a evita prezența oxizilor, impurităților, urmelor organice, care ar putea contamina materialul din îmbinare;
- Încălzirea locală a materialului în zona îmbinării, pentru a realiza deformarea plastică la cald a elementelor metalice;
- Concentrarea curentului pe o suprafață de contact redusă;
- Aplicarea cu ajutorul unor plăci de contact a forței de refulare necesare, pentru atingerea presiunii de refulare indicate.

Practic, procedeul de sudare în relief presupune aceleași principii de sudare, parametrii de lucru, ca și în cazul sudării în puncte, cu mențiunea că cursa sub sarcină a electrodului este mai lungă în cazul sudării în relief. Refularea materialului este însoțită și de refularea electrodului, care în acest caz face parte efectivă din structura elementelor sudate. Deasemenea, suprafața elementelor metalice trebuie să fie curată, lipsită de oxizi sau urme de uleiuri sau grăsimi organice, ce pot proveni din operațiile anterioare de formare a bosajelor sau proeminențelor, realizate prin deformare plastică.

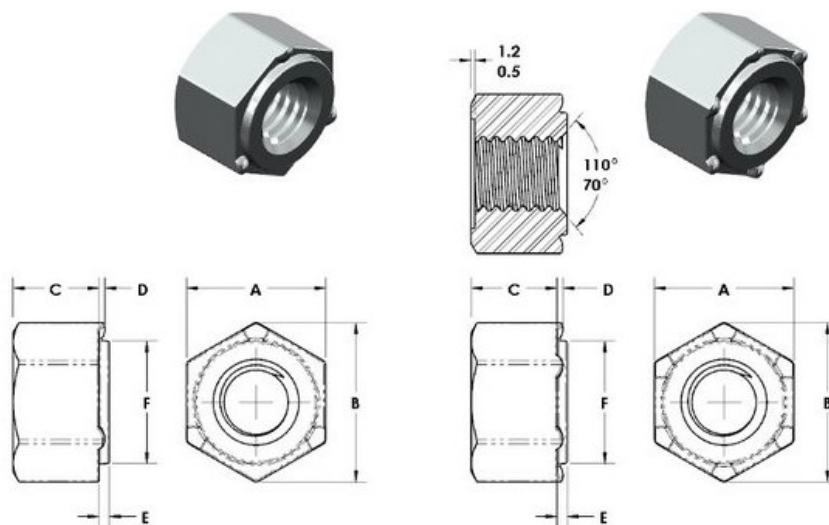


Fig. 5.16 Forme constructive pentru piulițe destinate sudării în relief.

Pentru a asigura o poziționare corectă a piuliței în raport cu orificiul din tabla pe care urmează să fie sudată, acestea sunt prevăzute cu o suprafață cilindrică de centrare, dispusă de aceeași parte cu proeminențele specifice sudării în relief, figura 5.16.

5.1.4 Sudarea cap la cap prin presiune și rezistență electrică

Acest procedeu de sudare în stare solidă, constă într-o încălzire locală a pieselor metalice prin rezistență electrică, până la temperaturi caracteristice prelucrării la cald a materialelor sudate și aplicarea unei forțe de refulare perpendiculară pe suprafața de îmbinare. Astfel, prin deformare plastică la cald și recristalizare, se realizează sudarea fără material adaos, dintr-o singură operație. În general, procedeul se aplică la sudarea cap la cap a pieselor cu formă alungită: bară, sârmă, șină, profile laminate, țevi, axe, arbori, tije, bolțuri, știfturi, zale de lanț etc.

Piesele sunt fixate între bacurile de prindere, care sunt confecționate din cupru și sunt conectate la o sursă de curent de mare putere, ce asigură preîncălzirea pieselor metalice prin rezistență electrică. Totodată, prin bacurile de prindere se transmite pieselor forța de refulare, conform figurii 5.17.

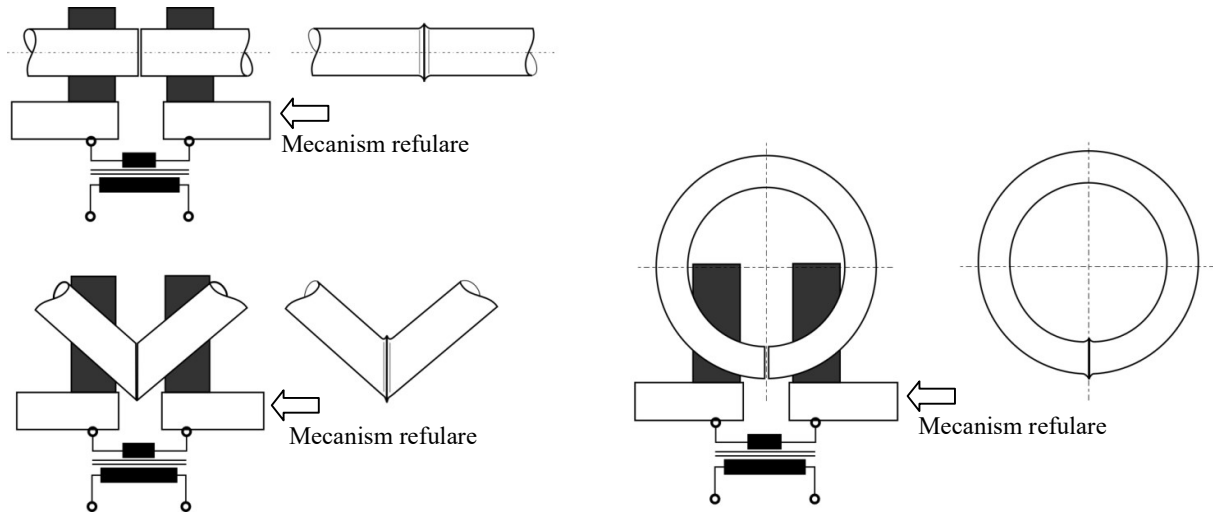


Fig. 5.17 Diferite îmbinări sudate cap la cap prin presiune și rezistență electrică.

Procedeul de sudare se desfășoară în trei faze: preîncălzirea materialelor, refularea și recristalizarea îmbinării sudate. Preîncălzirea se efectuează în domeniul temperaturilor uzuale de deformare la cald a materialelor, valorile recomandate pentru diferite metale și aliaje fiind prezentate în tabelul 5.4.

Tab. 5.4 Temperaturile de preîncălzire a diferitelor metale și aliaje în vederea sudării în stare solidă.

Nr. crt.	Tipul metalelor sau aliajelor sudate	Temperatura de preîncălzire [°C]	Rezistivitatea electrică [$\Omega \cdot m$] la 20 °C
1.	Oțeluri carbon și slab aliate	900 - 1300	$9,71 \times 10^{-8}$
2.	Oțeluri inoxidabile și refractare	950 - 1250	100×10^{-8}
3.	Cuprul	600 - 800	$1,68 \times 10^{-8}$
4.	Alame și bronzuri	600 - 750	$5...7 \times 10^{-8}$
5.	Aluminiul și aliajele AlMn, AlMg, AlSi	350 - 450	$2,65 \times 10^{-8}$

Căldura necesară preîncălzirii materialelor se obține prin efect Joule, datorită rezistivității electrice a materialelor sudate, respectiv datorită rezistenței de contact în zona îmbinării. Creșterea temperaturii materialului, conduce la creșterea rezistivității electrice, realizându-se un efect în lanț, astfel încât timpul necesar atingerii temperaturilor de preîncălzire este foarte scurt, de ordinul secundelor, în funcție de dimensiunea pieselor sudate.

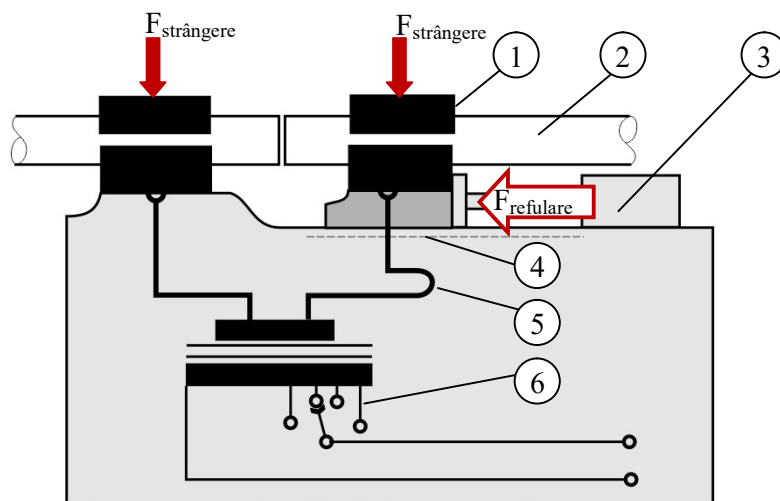
Un factor foarte important în determinarea regimului termic la sudare, îl deține presiunea de refulare exercitată de bacul mobil, starea, rugozitatea și calitatea suprafețelor în zona de contact. În general, se dorește ca procesul de încălzire să fie cât mai rapid, deoarece în acest fel se reduc pierderile termice prin conducție și prin radiație. Timpul de preîncălzire depinde de puterea instalată a mașinii de sudat, de mărimea secțiunii sudate, respectiv de proprietățile fizice ale materialelor sudate. Pentru oțeluri, varianta de sudare prin refulare este recomandată până la secțiuni cu diametrul de 12 mm. Materialele neferoase se pot suda prin refulare și pentru secțiuni mai mari. Pentru piesele din oțel cu secțiuni mari, se aplică varianta de sudare prin topire intermediară, de exemplu, sudarea în atelier a șinelor de cale ferată.

Refularea este faza în care se aplică o forță de presare, perpendicular pe suprafețele îmbinării, pentru a asigura contactul și formarea legăturilor atomice dintre elementele metalice ce urmează să fie sudate. Practic, se produce o deformare plastică la cald, impuritățile și oxizii prezenți pe suprafețele de contact fiind expulzați în zona de refulare, care urmează să fie îndepărtată ulterior prin prelucrări mecanice.

Recristalizarea are loc pe parcursul răcirii îmbinării sudate, formându-se o nouă structură cristalină fină și comună în zonele de material deformate plastic prin refulare până la ecruisare. Forța de refulare se menține pe durata de răcire, până la atingerea temperaturii de 500°C, pentru asigurarea unei rezistențe mecanice superioare.

Tab. 5.5 Gradul de deformare și presiunea de refulare pentru sudare în stare solidă.

Calitatea metalului de bază	Gradul de deformare [%]	Presiunea de refulare [MPa]
Fier și oțeluri carbon	80-85	60-120
Nichelul și aliajele sale	75-85	110-140
Oțeluri inoxidabile	80-90	130-250
Cuprul și aliajele sale	75-85	140-250
Aluminiul și AlMg	50-65	80-150



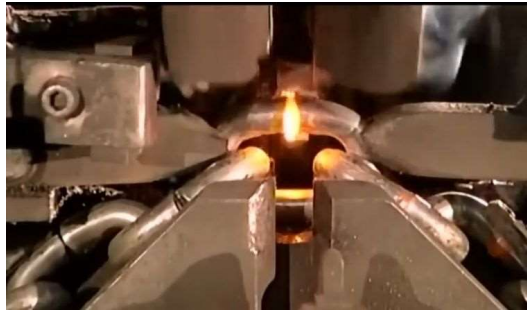
1) bacuri de fixare, 2) piesă metalică, 3) mecanism de refulare, 4) ghidaj bac mobil, 5) conductor flexibil, 6) comutator primar
Fig. 5.18 Schema de principiu a unei mașini de sudat cap la cap prin refulare.

Principiul de funcționare a mașinii de sudat cap la cap în stare solidă, este ilustrat în figura 5.18. Piesele metalice ce urmează să fie sudate, sunt fixate coaxial în bacurile (1) de fixare ale mașinii, care sunt confecționate din cupru și sunt răcite cu ajutorul unui circuit de apă. Unul dintre bacurile de fixare este fix, iar celălalt este mobil și este montat pe un ghidaj (4), fixat pe batiul mașinii de sudare. Cu ajutorul mecanismului de refulare, se exercită o forță de presare reglabilă asupra bacului mobil, realizându-se presiunea de refulare necesară sudării. Aceasta, se alege în funcție de tipul materialelor sudate, valorile recomandate fiind prezentate în tabelul 5.5.

Pentru secțiuni mici sudate, fixarea pieselor în bacurile mașinii se poate realiza cu sisteme mecanice cu came, acționate cu pârghii. La piese de gabarit mare, fixarea acestora se realizează cu sisteme de strângere acționate pneumatic sau hidraulic. Bacurile asigură și contactul electric dintre piesele metalice cu circuitul din secundarul transformatorului de sudură. Lungimea capetelor libere, înspre suprafața de contact ale pieselor metalice, este în funcție de mărimea secțiunii sudate, respectiv în funcție de rezistivitatea electrică a materialelor. În cazul oțelurilor, lungimea liberă este inferioară grosimii pieselor, iar pentru Al și Cu este de cca. 1,5-4 ori grosimea materialelor sudate. O atenție corespunzătoare trebuie acordată scurtării pieselor după sudare, datorită refulării.

5.1.5 Sudarea cu topire intermediară

Sudarea cu topire intermediară este o variantă tehnologică de sudare în stare solidă cap la cap a elementelor metalice cu secțiuni mari. Se pot realiza și îmbinări sudate cu secțiune redusă, de ex. jenți de biciclete sau autoturisme, sudarea unor bare metalice, inele de diferite dimensiuni, realizate din diferite tipuri de materiale, oțeluri carbon și aliate, titan, aluminiu, figura 5.19.



a) sudarea zalelor de lanț



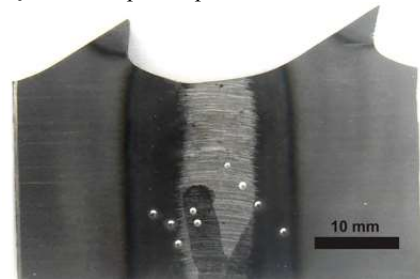
b) za de lanț sudată cap la cap



c) sudare cap la cap bară de oțel beton cu bară din oțel inoxidabil



d) jantă camion sudată cap la cap



e) pânză de ferăstrău pentru gatere sudată cap la cap

Fig. 5.19 Exemple de aplicații ale sudării cap la cap cu topire intermediară.

Piesele ce urmează a fi sudate sunt prinse în bacurile de fixare ale mașinii de sudat, între capetele acestora lăsându-se un interstițiu de dimensiuni, ce depinde de grosimea elementelor sudate. Procesul de sudare începe prin deplasarea bacului mobil, ce execută o mișcare de apropiere și se inițiază o serie de descărcări electrice, care se produc între proeminențele suprafețelor de contact. În această fază, procesul este instabil, au loc o serie de descărcări electrice caracterizate printr-o variație dezordonată a curentului de sudare, la intensități de curent reduse ale acestuia, figura 5.20.

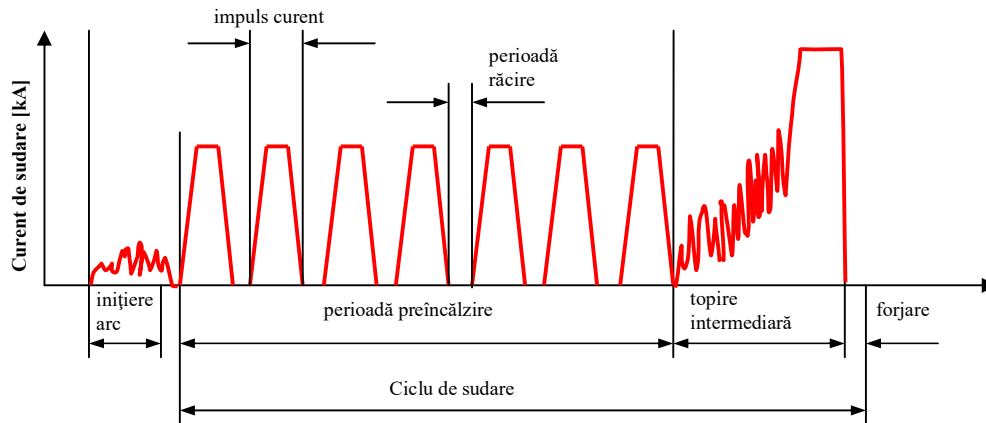


Fig.5.20 Variația curentului la sudarea cap la cap prin topire intermediară.

În timpul procesului are loc preîncălzirea capetelor pieselor, descărcările electrice se uniformizează, amplitudinea de variație a curentului de sudare se reduce concomitent cu creșterea intensității efective a acestuia. Valoarea forței de refulare este redusă și menținută constantă pe toată durata de preîncălzire a pieselor, care în acest interval de timp realizează o scurtă apropiere. Într-un interval de timp foarte scurt, se produce contactul pieselor pe întreaga secțiune de sudare, intensitatea curentului crește brusc la valoarea maximă și are loc o creștere bruscă a forței de refulare. Ca urmare, bacul mobil va executa o mișcare de apropiere față de cel fix, producându-se scurtarea la refulare a îmbinării sudate.

În faza finală se întrerupe curentul de sudare, curgerea materialului se realizează mai departe sub sarcină în planul îmbinării sudate (planul inițial de separație). Practic, se închid craterele formate în procesul de topire intermediară, are loc o expulzare de material topit împreună cu oxizii și alte impurități prezente în zona de îmbinare dintre materiale.

5.1.6 Sudarea cu curenți de înaltă frecvență

Prin acest procedeu se pot suda elemente metalice structurale, tuburi sau țevi, realizate din: oțeluri carbon, oțeluri inoxidabile, oțeluri de înaltă rezistență, titan sau aluminiu. Căldura preluată de piese este redusă, ZIT este îngustă și proprietățile mecanice de rezistență ale îmbinărilor sudate sunt superioare celor obținute prin alte procedee. Sudarea se realizează fără material adaos, încălzirea locală se produce datorită curenților de înaltă frecvență, uzual cu valori cuprinse între 150 și 400 kHz. Spre deosebire de curentul de frecvență joasă (50 Hz), din rețeaua trifazică industrială, care se transmite pe întreaga secțiune a conductorilor metalici, curentul de înaltă frecvență se transmite doar pe suprafața conductorului metalic, adâncimea de pătrundere în conductor fiind invers proporțională cu frecvența curentului. Acest fenomen de distribuție neuniformă a curentului în secțiunea conductorului, se numește **efect pelicular**¹.

Deasemenea, dacă există doi conductori alăturați parcurși de curenți de înaltă frecvență, curentul se va distribui pe suprafețele învecinate dintre conductori, fenomenul fiind denumit **efect de proximitate**. Ambele efecte devin mai pronunțate odată cu creșterea frecvenței curentului, iar distribuția acestuia pe o adâncime tot mai redusă în conductorul metalic, conduce la o încălzire puternică a straturilor superficiale ale materialului.

Prin utilizarea curenților de înaltă frecvență se pot încălzi atât materiale magnetice, cât și materiale nemagnetice. În cazul materialelor magnetice, la încălzirea produsă prin efect Joule, se adaugă încălzirea datorată pierderilor prin histerezis. Adâncimea de conducție în cazul conductorilor parcurși de curenți de înaltă frecvență, este asociată cu o mărime denumită adâncime de referință² d care se calculează cu relația 5.4 [46].

$$d = 3160 \sqrt{\frac{\rho}{\mu \cdot f}} \quad (5.4)$$

unde: ρ este rezistivitatea materialului [$\Omega \cdot m$];
 f este frecvența curentului în [cicluri/sec];
 μ este permeabilitatea magnetică [$N \cdot A^{-2}$];
 constanta numerică 3160, este specifică oțelurilor [46].

¹ skin effect (lb. eng.)

² reference depth (lb. eng.)

Cea mai cunoscută aplicație a sudării cu curenți de înaltă frecvență este **sudarea pe generatoare a țevilor**. În cazul țevilor cu grosime redusă, de exemplu cele utilizate în instalații, încălzirea materialului se realizează pe o zonă foarte îngustă, cu o lățime de câteva zecimi de mm, într-un timp foarte scurt. Acest fapt, permite sudarea acestora cu viteze mari, fără deformații, fiind vizibilă doar o bavură subțire sau o mică denivelare în zona cusăturii sudate. În funcție de modul cum se transmite în material curentul de înaltă frecvență, prin inducție sau prin contacte glisante, avem diferite variante constructive ale echipamentelor de sudare. În interiorul țevii care se sudează se introduce o bară feromagnetică, figura 5.21, care are un rol similar cu jugul magnetic din cadrul transformatoarelor de curent convenționale, țeava sudată îndeplinind rolul de înfășurare secundară, iar inductorul de înfășurare primară. Bara feromagnetică¹ crește impedența electrică în interiorul țevii. Impedanța electrică caracterizează rezistența unui circuit electric la trecerea unui curent alternativ. Practic, extinde noțiunea de rezistență electrică din curentul continuu, la circuitele electrice în curent alternativ. În modul, valoarea impedenței Z se calculează cu relația 5.5.

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (5.5)$$

unde R - reprezintă rezistența electrică și caracterizează circuitul electric în ceea ce privește puterea activă disipată (consumul de putere), iar X este reactanța electrică și caracterizează circuitul electric, în ceea ce privește puterea reactivă (energia acumulată în câmp electric sau magnetic). În timp ce rezistența electrică este întotdeauna pozitivă, reactanța poate fi atât pozitivă, în cazul inductivităților cât și negativă, în cazul capacităților electrice.

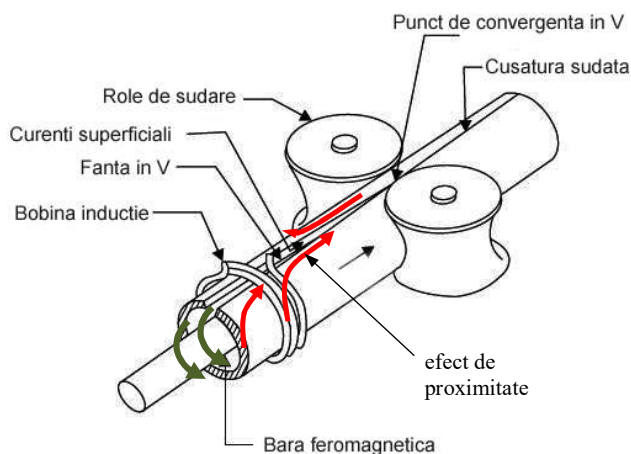
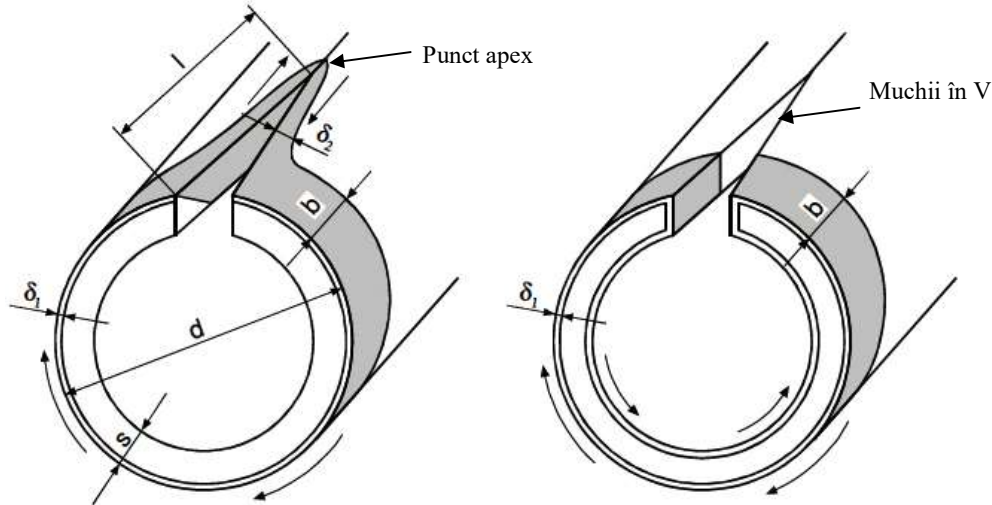


Fig. 5.21 Sudarea țevilor cu curenți de înaltă frecvență prin inducție.

Prin efect pelicular curentul indus circulă în straturile superficiale de material pe traiectorii circumferențiale în interiorul suprafeței țevii, iar pe suprafața exterioară a țevii curentul indus se deplasează în sens contrar celui din interior. Combinat cu efectul de proximitate, densitatea de curent va fi maximă în lungul muchiei în V spre punctul apex, pe care o formează marginile de material ce urmează să fie sudate, figura 5.21. Prin urmare, efectul termic este dirijat și controlat, astfel încât cantitatea de căldură este maximă în zona de îmbinare dintre cele două margini ale materialului, care sunt aduse în contact cu ajutorul rolor de conducere. Se diminuează în acest fel lățimea ZIT și transformările structurale din material, se micșorează tensiunile și deformațiile din zona cusăturii sudate, crește viteza de sudare, iar energia electrică este folosită mai eficient.

¹ impeder (lb.eng.)



b - lățimea inductorului; s - grosimea peretelui țevii;
 δ_1 - adâncimea de pătrundere a curentului în secțiune transversală;
 δ_2 - lățimea zonei parcursă de curent în lungul fantei în V;
 d - diametrul exterior al țevii; l - distanța de la inductor la punctul apex.

Fig. 5.22 Zona densității maxime de curent la sudarea țevilor cu curenți de înaltă frecvență [48].

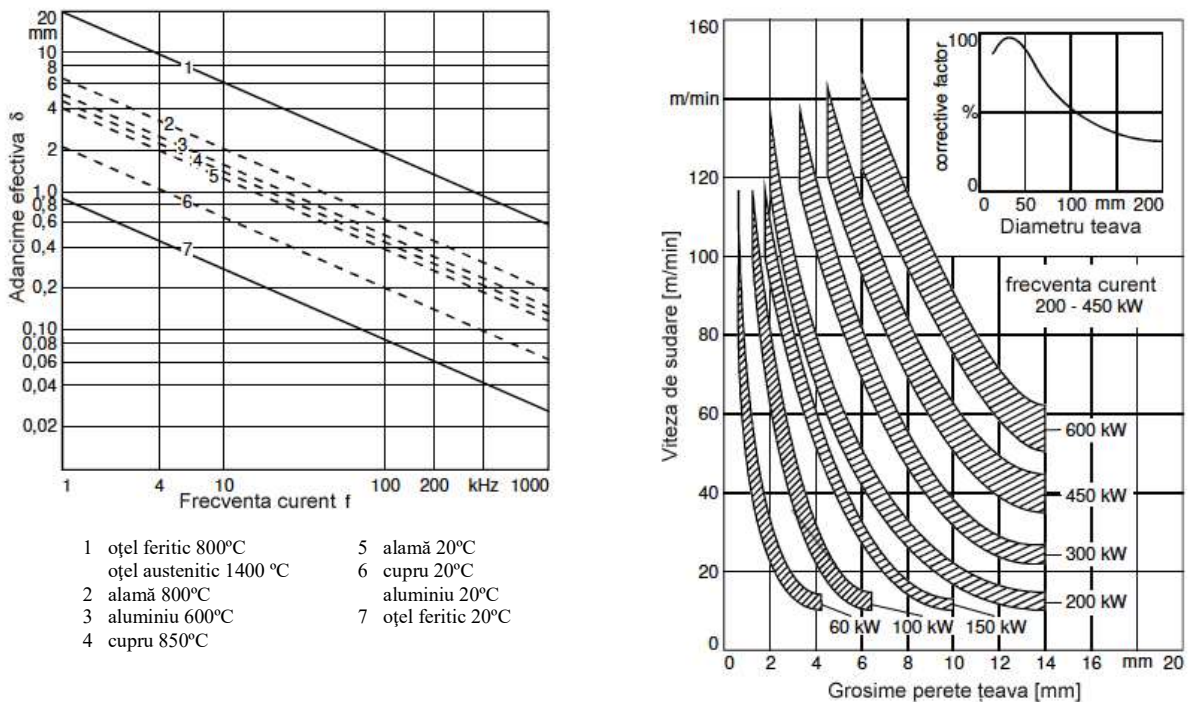


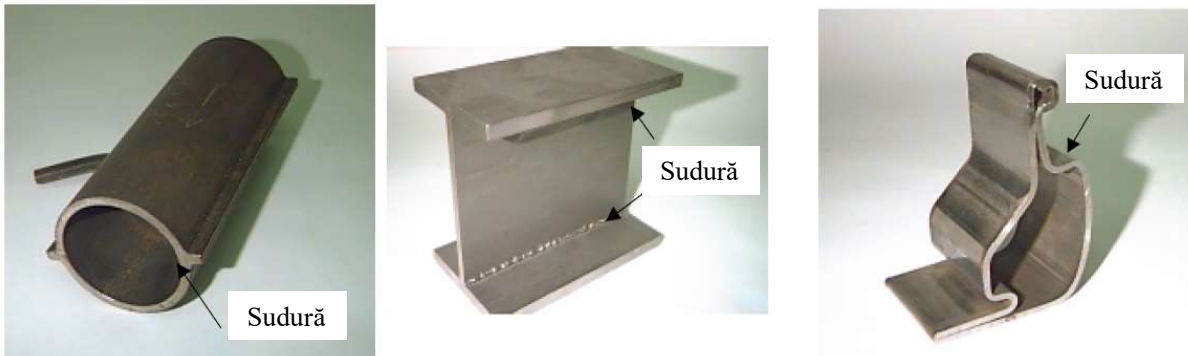
Fig. 5.23 Parametrii tehnologici de sudare cu curenți de înaltă frecvență [48].

În figura 5.21, respectiv în detaliul din figura 5.22 este prezentată schema de principiu a unui echipament de sudare prin inducție, unde inductorul are o formă inelară. Există și variante de echipamente în care inductorul poate fi liniar, orientat în lungul muchiilor ce urmează a fi sudate. Curentul de înaltă frecvență produce încălzirea superficială a muchiilor de material care se aproprie progresiv una de alta, utilizând în acest scop diferite sisteme cu role de laminare, esențial fiind aducerea suprafețelor în contact într-un plan de simetrie pe direcția generatoarei sudate.

Frecvențele înalte folosite la sudare variază în limite largi. Pentru sudarea țevilor cu grosimea peretelui de 10-15 mm se folosesc frecvențe de 2 kHz; pentru grosimea peretelui de 4 mm se folosesc frecvențe de 4-10 kHz, iar pentru țevi subțiri de oțel nealiat sau înalt aliat, aluminiu etc. se folosesc frecvențe de până la 450 kHz. Frecvențele indicate pentru grosimile respective nu sunt limitative, există echipamente unde frecvența curentului de sudare poate atinge valori de 800 kHz sau chiar mai ridicate [46].

În general, cu cât frecvența este mai înaltă, cu atât crește prețul de achiziție al echipamentului. În funcție de puterea instalației și grosimea peretelui de țevă, se obțin viteze diferite de sudare, conform figurii 5.23. Astfel, pentru sudarea țevilor cu grosimea peretelui între 2 și 8 mm, pe instalații cu puteri cuprinse între 240-280 kW, se obțin viteze de sudare care se situează între 40-100 m/min, iar pe instalații cu puteri de până la 600 kW, vitezele de sudare pot atinge valori de 60-120 m/min [48].

Prin varianta de **sudare cu contacte glisante** se pot suda și alte profile în afara țevilor (figura 5.22), precum profile T sau I, cu grosimi între 3 și 7,5 mm pentru tălpi, respectiv între 1,5 și 6 mm pentru inimi, cu viteze de sudare cuprinse între 10 și 50 m/min. Deasemenea, sudarea cu curenți de înaltă frecvență poate fi utilizată și pentru sudarea cap la cap a barelor, temperatura în zona de îmbinare putând atinge valori cuprinse între 1250-1280°C, fiind necesar exercitarea unei presiuni de refulare de cca. 50-60 MPa. Încălzirea materialului se poate realiza, fie cu un inductor plasat între capetele frontale ale barelor, fie cu inductor inelar.



a) tub 63 x 4 mm pentru cazane b) profil I Titan, 150 x 100 mm c) profil laminat 108 x 3 mm
Fig.5.22 Exemple de aplicații la sudarea cu curenți de înaltă frecvență cu contacte glisante [46].

5.1.7 Sudarea bolțurilor

Conform nomenclatorului procedeele de sudare și a numerelor de referință din SR EN ISO 4063-2009, care codifică numeric toate procedeele de sudare și conexe sudării, sudarea bolțurilor este încadrată în grupa 78 și conține alte 7 subgrupe, în funcție de particularitățile procedeului de sudare a bolțurilor, aspect evidențiat în diagrama din figura 5.25.

Sudarea bolțurilor este o metodă foarte rapidă și eficientă, de a suda de o suprafață plană diverse piese metalice, precum elemente simple de fixare, bolțuri, prezoane, știfturi, sau elemente de configurație geometrică mai complexă, utilizate în diverse echipamente industriale, în industria ușoară, chimică etc. Deasemenea, ancorarea covorului de asfalt pe structura metalică a podurilor sau realizarea legăturilor de rezistență între pilonii de beton și structurile metalice ale podurilor se realizează cu ajutorul bolțurilor sudate. Sudarea acestora se execută dintr-o singură parte, manual sau mecanizat.


<p>782 Sudarea electrică prin presiune</p>	<p>78 SUDAREA BOLȚURILOR SR EN ISO 4063-2009</p> 	<p>785 Sudarea cu arc electric cu amorsare prin ridicare cu descărcarea unui condensator.</p>
<p>783 Sudarea cu arc electric cu amorsare prin ridicare cu inel ceramic sau cu gaz de protecție</p>		<p>786 Sudarea cu arc electric cu amorsare prin vârf fuzibil cu descărcarea unui condensator.</p>
<p>784 Sudarea cu arc electric cu amorsare prin ridicare cu ciclu scurt.</p>	<p>788 Sudarea prin frecare</p>	<p>783 Sudarea cu arc electric cu amorsare prin ridicare cu inel fuzibil.</p>

Fig. 5.25 Variante de sudare a bolțurilor, clasificate după SR EN ISO 4063-2009.

În figura 5.26 sunt prezentate o serie de piese metalice sudate, conform procedurii de sudare al bolțurilor și care în general se utilizează pentru operațiuni de asamblare, fixare, centrare sau poziționare a unor elemente componente dintr-un subansamblu.

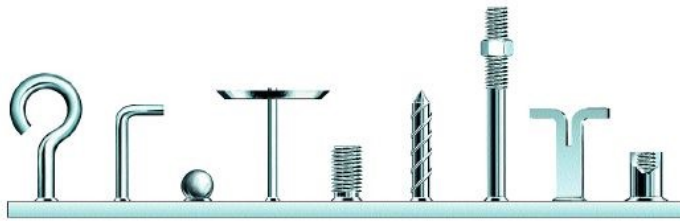
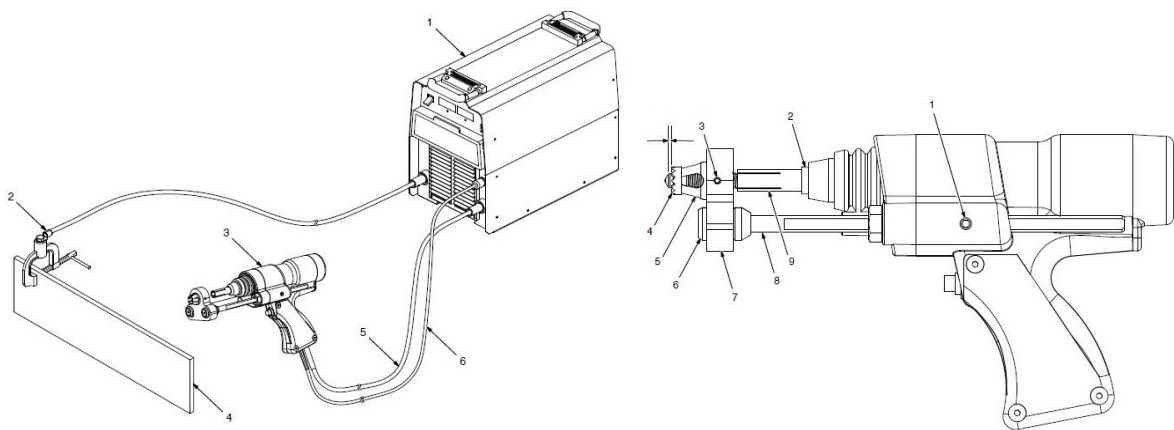


Fig. 5.26 Elemente metalice sudate prin unul dintre procedeele de sudare din grupa 78.



a) vedere generală
1- sursă de curent; 2- clemă masă; 3- pistol de sudare;
4- piesă metalică; 5,6- cabluri putere/comandă

b) detaliu pistol de sudare
1- șurub blocare limitator; 2-adaptor bucă elastică;
3-șurub; 4-inel ceramic; 5-mandrină; 6-limitator;

Fig. 5.27 Echipament de sudare a bolțurilor.

În funcție de varianta de sudare utilizată, sursele de curent sunt de două tipuri: surse de curent cc⁻ ce asigură curentul necesar menținerii unui arc electric pe o durată de până la o secundă și care asigură topirea vârfului bolțului, sau surse de curent ce folosesc o baterie de condensatori electrolitici care se descarcă într-un timp extrem de scurt, uzual sub 3 ms și care eliberează brusc toată energia electrică înmagazinată anterior, figura 5.27.

Topirea cu arc se utilizează în general pentru bolțuri cu diametrul de peste 6 mm, materialul de care se sudează bolțurile având grosime mai mare, de ex. sudarea bolțurilor de grinzi structurale utilizate în construcția podurilor, sau la turnarea planșelor de beton în construcția zgârie-norilor, figura 5.28. În aceste cazuri, betonul care se toarnă peste structura metalică este ancorat de bolțurile sudate și face ca întreaga structură, cea metalică și cea turnată din beton să lucreze unitar, deși luate individual au un comportament foarte diferit. Densitatea de curent este cuprinsă între 5-20 A/mm², timpul de sudare între 0,1-1 sec, grosimea minimă a metalului de bază fiind de 1/8 din diametrul bolțului. Gama de dimensiuni pentru bolțuri este cuprinsă între ϕ 2-22 mm (M24).

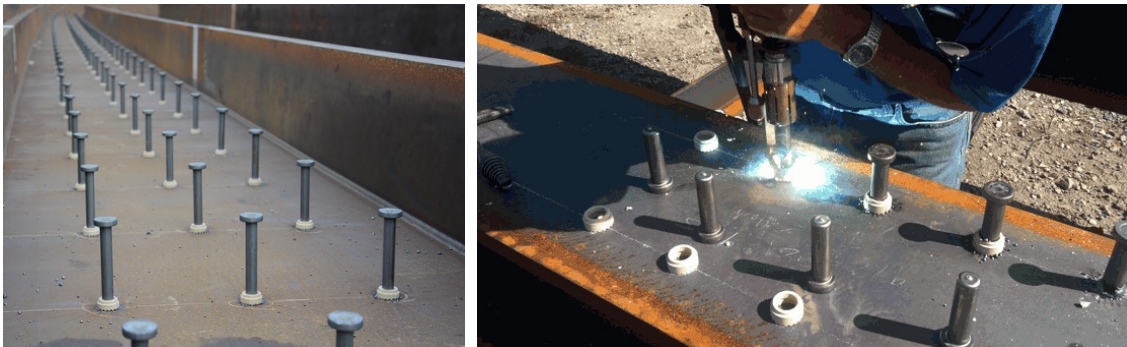


Fig. 5.28 Exemple de aplicații de construcții cu bolțuri sudate cu arc prin ridicare cu inel ceramic.

În cazul sudării cu energie înmagazinată sursele de curent au o baterie de condensatori¹, procedeul de sudare din punct de vedere metalurgic având aceleași principii de bază ca și oricare alt procedeu de sudare cu arc electric, diferența majoră constând în timpul extrem de scurt de sudare (1-3 ms) în care se produce topirea vârfului electrodului și a porțiunii corespundente din materialul de bază. Curentul de sudare atinge valori foarte mari, grosimea minimă a materialului de bază fiind de 1/10 din diametrul bolțului care variază între M3-M8. Scopul este de a concentra fluxul de curent obținut prin descărcarea bateriei de condensatori electrolitici de mare putere, pe o suprafață de contact minimă, materializată de vârful special al bolțului de sudare. Timpul extrem de scurt în care toată energia este disipată într-un punct de contact cu rezistență electrică mare, concentrează practic toată energia termică pentru topirea vârfului bolțului, care este presat perpendicular pe suprafața de sudare. Materialul de bază preia o fracție redusă de energie termică și datorită timpului foarte scurt de transfer termic, ZIT din metalul de bază este foarte redusă, deformațiile sunt practic inexistente, iar aspectul îmbinării sudate este estetic, nu necesită operații de prelucrare ulterioară. Procedeul de sudare cu energie înmagazinată prezintă o serie importantă de avantaje, cum ar fi:

- Se pot suda materiale diferite, cu grosimi, respectiv cu proprietăți fizice diferite;
- Se pot suda piese executate din Al, Cu (materiale cu conductivitate electrică și termică foarte ridicată);
- Se pot suda materiale acoperite cu diferite straturi, fără a afecta stratul de acoperire din zona îmbinării sudate, păstrându-se astfel rolul funcțional al stratului de acoperire;
- Se pot suda materiale foarte subțiri, care prin procedeele uzuale nu pot fi sudate.

¹ capacitor discharge welding (lb.eng.)

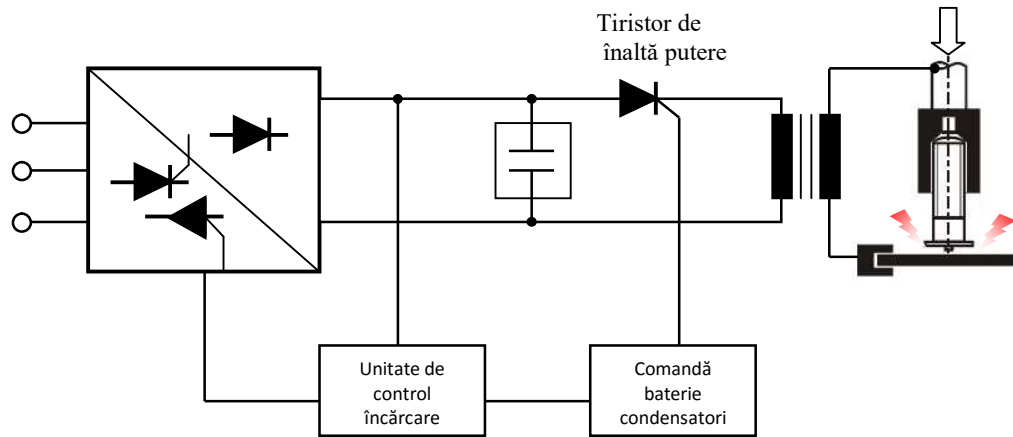


Fig. 5.29 Schema de principiu a unui echipament de sudare a bolțurilor cu energie înmagazinată.

Energia electrică se înmagazinează într-o baterie de condensatori, figura 5.29, în decurs de cca. 1-5 min, în funcție de capacitatea și puterea electrică a echipamentului de sudare. Astfel, echipamentul este independent de variațiile de tensiune din rețeaua de alimentare. Operația de sudare se inițiază prin acționarea unității de comandă printr-un tiristor de înaltă putere, din circuitul primar al transformatorului de sudură. Transformatorul de sudură are un număr mic de spire în secundar, ceea ce va determina un curent de sudare sub forma unui impuls electric cu intensitate de curent foarte mare, ce se va închide prin contactul dintre bolț și metalul de bază. În anumite aplicații, curentul de sudare poate depăși și 100 kA. Cantitatea de energie electrică înmagazinată în bateria de condensatori, este dată de relația : $W=C \cdot U^2/2$ și este cuprinsă între 500-1600 Ws.

5.2 Sudarea prin presiune

Procedeele de sudare prin presiune aparțin grupei 4 din codificarea numerică a procedeele de sudare, conform standardului SR ISO 4063-2011. Elementul esențial, care este comun tuturor acestor procedee de sudare, este presiunea exercitată normal pe secțiunea în care se realizează îmbinarea sudată.

Tab. 5.6 Clasificarea procedeele de sudare prin presiune, conform SR ISO 4063-2011.

4	Sudarea prin presiune
41	Sudarea cu ultrasunete
42	Sudarea prin frecare
43	Sudarea prin forjare
44	Sudarea prin energie mecanică ridicată
441	Sudarea prin explozie
45	Sudarea prin difuzie
47	Sudarea prin presiune cu gaz
48	Sudarea prin presiune la rece

Particularitățile procedeele de sudare prin presiune prezentate în tabelul 5.6 și figura 5.30, constau în condițiile specifice prin care energia este introdusă în zona îmbinării, temperaturile atinse, timpul de sudare, intensitatea forțelor de presare, pregătirea suprafețelor înainte de sudare etc. Gama de procedee de sudare prin presiune și cu energie electrică, considerate convenționale, a fost deja tratată la începutul capitolului, urmând ca în cele ce urmează să fie prezentate procedeele de sudare prin presiune considerate neconvenționale. Acestea, au aplicații mai restrânse, precum: obținerea panourilor bimetalice utilizate în industria chimică, petrochimică, nucleară sau sudarea aliajelor ușoare pentru construcția navelor de război sau în industria aerospațială.

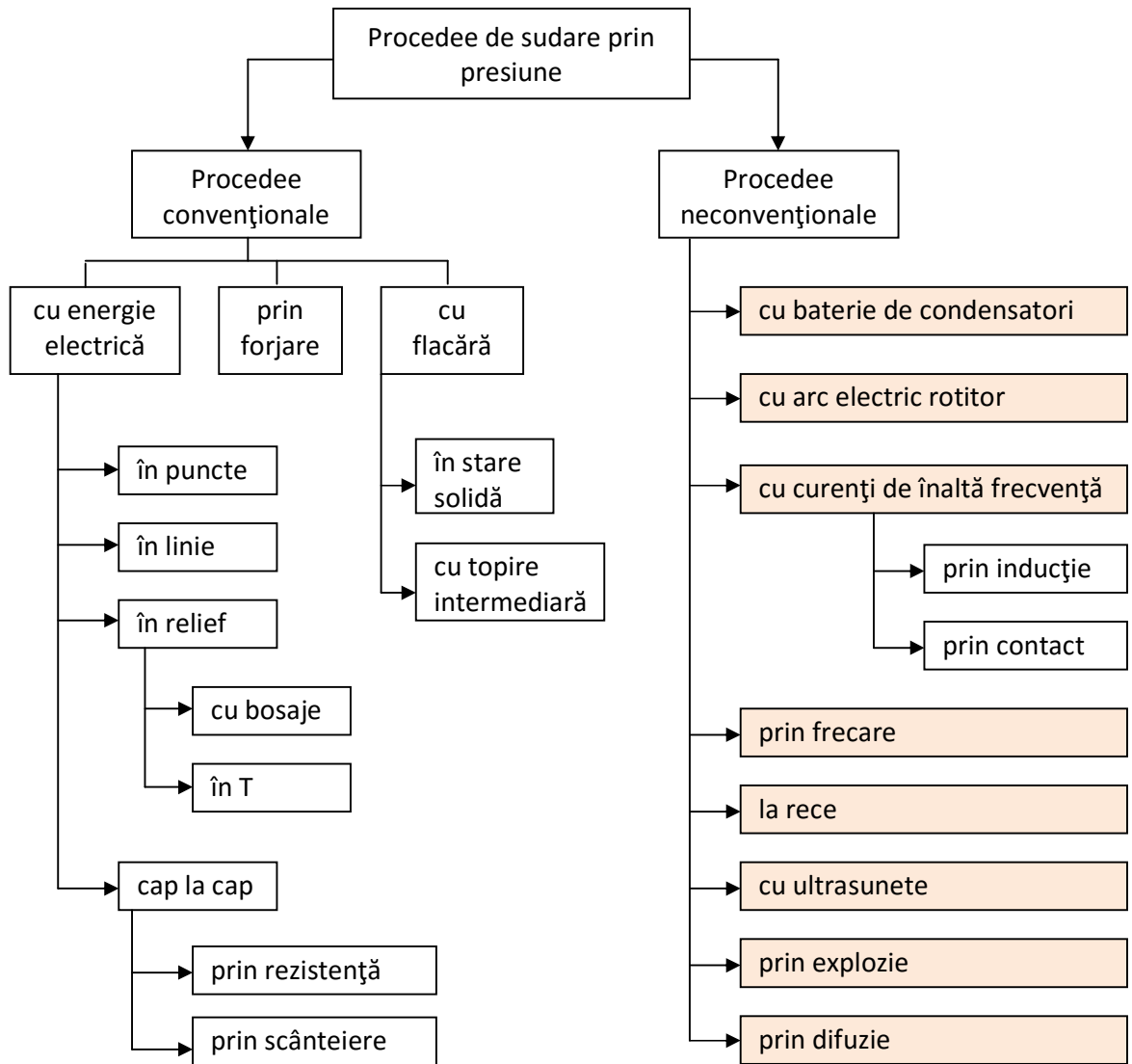


Fig.5.30 Clasificarea procedeeelor de sudare prin presiune.

5.2.1 Sudarea cu ultrasunete

Ultrasunetele sunt unde elastice, care au frecvențe de oscilație cuprinse între 16 kHz și 10^4 MHz. Sudarea cu ultrasunete este codificată numeric cu codul 41, conform SR ISO 4063-2011 și este un procedeu de sudare în stare solidă **prin presiune**, prin care se pot suda materiale metalice, ceramice, polimerice și compozite. Procedeu de sudare constă în aplicarea simultană a unor vibrații mecanice de frecvență ridicată (20-70 kHz), respectiv a unor forțe statice de presare orientate perpendicular pe suprafețele sudate. Direcția de propagare a undelor ultrasonice în material este diferită, în funcție de tipul materialului sudat. În cazul sudării materialelor metalice, direcția de propagare a undelor ultrasonice este perpendiculară pe forța de presare, iar în cazul materialelor polimerice, această direcție este paralelă cu forța de presare. Analizele metalografice și de microscopie electronică au pus în evidență fenomene de difuzie și de recristalizare în secțiunea sudată, fără să apară fenomene de topire în această interfață. Studiul evoluției temperaturii în staturile superficiale ale materialelor din secțiunea sudată, arată că are loc o creștere foarte rapidă a temperaturii în zona suprafețelor de contact, după care temperatura se stabilizează, răcirea materialului efectuându-se natural datorită pierderilor termice.

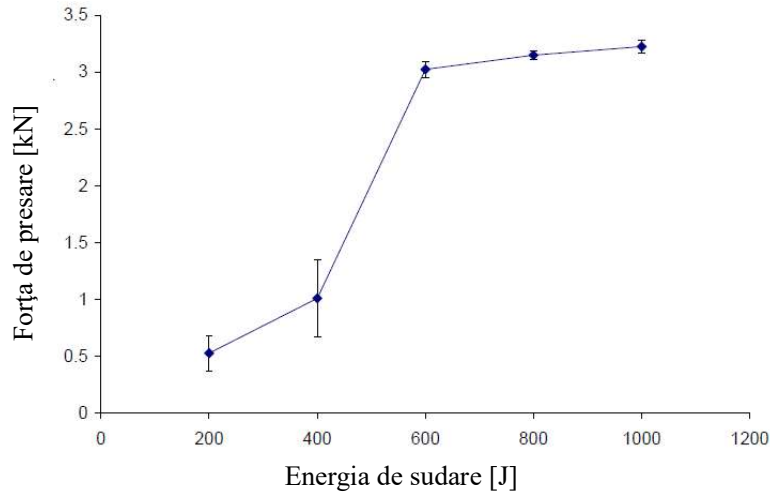


Fig. 5.31 Parametrii la sudarea cu ultrasunete a aluminiului [49].

Prin intermediul sonotrodei, undele ultrasonore sunt transmise materialului care absoarbe o anumită cantitate de energie de la acestea, fiind corelată cu forța de presare, figura 5.31. Astfel, se produce o încălzire locală a materialului peste temperatura de recristalizare, însă sub curba solidus, împiedicând apariția fazei lichide în îmbinarea sudată. La aceste temperaturi ridicate se produc fenomene de difuzie și de curgere a materialului sub influența forțelor de presare, exercitate perpendicular pe suprafața de contact dintre piesele sudate. Deasemenea, pelicula de oxizi de pe suprafața metalică este fragmentată, se produc fenomene de degazare, curgere vâscoasă a materialului, autodifuzie volumică cu formarea unor legături metalice la interfața de contact dintre piesele metalice. Ca urmare, materialul se remodelează sub acțiunea forțelor de presare exercitate, îmbinarea sudată realizându-se fără material adaos. În funcție de poziția relativă a pieselor sudate, putem avea îmbinări sudate cu ultrasunete prin suprapunere sau cap la cap, figura 5.32.

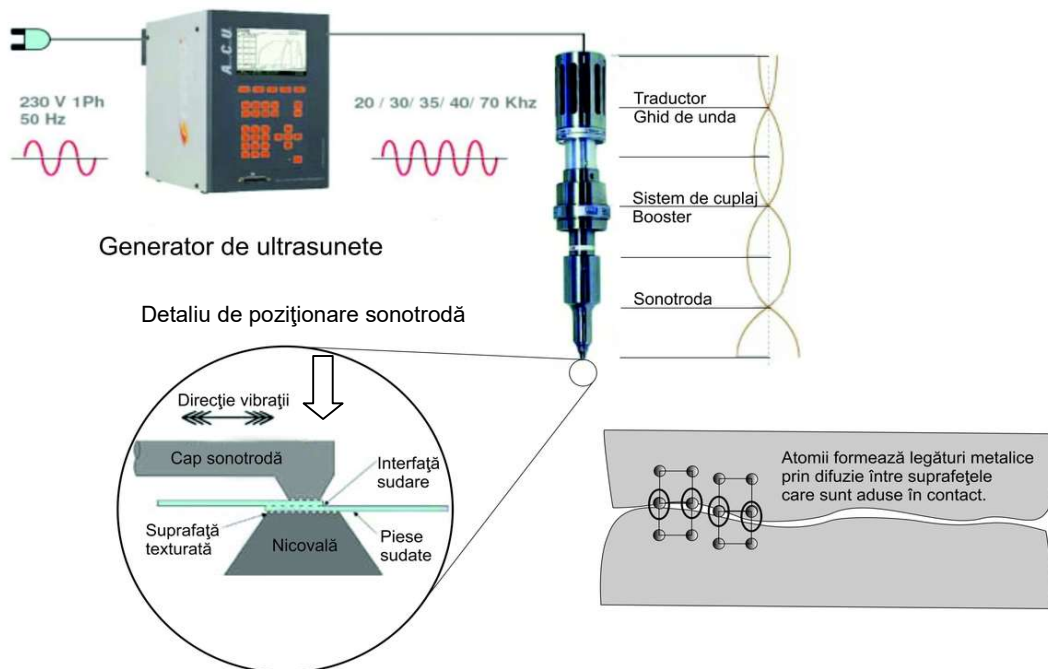
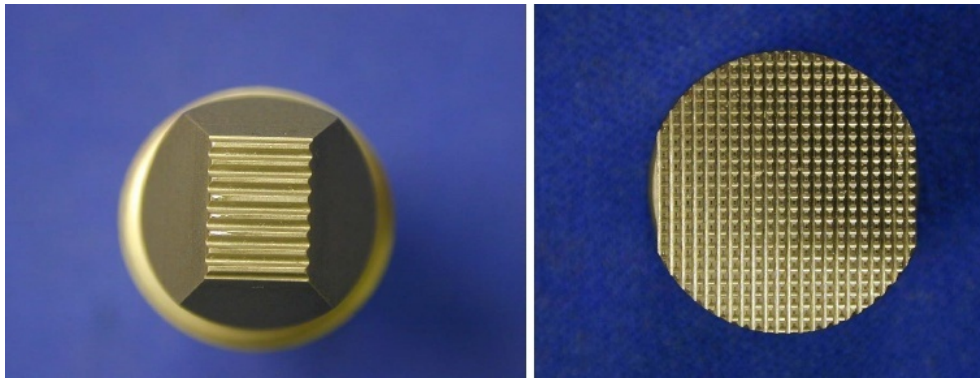


Fig. 5.32 Principiul sudării cu ultrasunete a pieselor metalice.

Echipamentul de sudare cu ultrasunete conține următoarele componente, figura 5.32:

- Generatorul de înaltă frecvență asigură energia necesară procesului de sudare;
- Blocul ultrasonic transformă energia electrică de înaltă frecvență livrată de generatorul de înaltă frecvență, în energie mecanică vibratorie;
- Traductorul, respectiv ghidul de undă¹ controlează amplitudinea vibrațiilor mecanice și o transmite la sonotrodă prin sistemul de cuplaj. Acesta din urmă lucrează la frecvența de rezonanță a traductorului cu o pierdere minimă de energie, trebuind să asigure o rezistență la oboseală ridicată. Traductorul poate fi magnetostrictiv sau electrostrictiv, în funcție de principiul de funcționare. Vibrațiile mecanice de înaltă frecvență sunt generate de traductorul magnetostrictiv pe baza unui câmp magnetic variabil, iar în cazul traductorului electrostrictiv pe baza variației câmpului electric. Traductorii magnetostrictivi sunt confecționați din aliaje de nichel, iar cei electrostrictivi din materiale ceramice.
- Sistem de aplicare și control al forței de apăsare;
- Programator proces de sudare.



a) aspectul suprafeței de contact a sonotrodei

b) aspectul suprafeței de contact nicovală

Fig. 5.33 Detalii suprafețe de contact sonotrodă și nicovală [49].

Atât sonotroda, cât și nicovala prezintă o suprafață de contact în relief, figura 5.33, pentru a împiedica alunecarea laterală a pieselor metalice în timpul aplicării energiei de vibrație furnizată de generatorul de ultrasunete. Forma și dimensiunile sonotrodei trebuie corelată cu geometria sudurii și grosimea pieselor sudate. Sonotroda se execută din diverse materiale, în funcție de calitatea materialului pentru piesele ce urmează să fie sudate prin ultrasunete. Astfel, pentru sudarea aliajelor din aluminiu sau cupru, sonotroda se execută din oțel de scule, iar pentru sudarea unor aliaje mai rezistente sau refractare, sonotroda va fi realizată din aliaje de nichel.

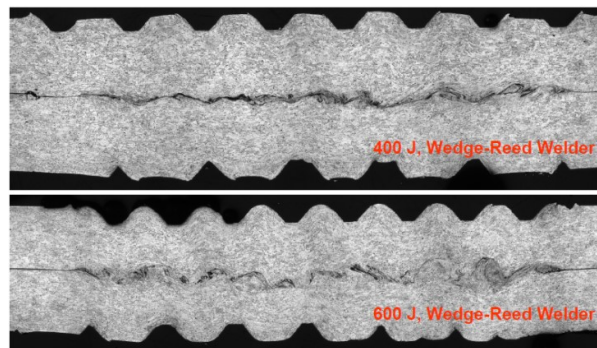


Fig. 5.34 Aspectul în secțiunea sudată a două table de Al, în funcție de energia de sudare [49].

¹ booster (lb.eng.)

Comportarea la sudare cu ultrasunete a materialelor metalice depinde de numeroși factori, care pot fi clasificați după cum urmează:

- **Factori de material**, ce iau în considerare proprietățile mecanice, starea suprafeței etc. a materialelor din care sunt executate piesele ce urmează să fie sudate. Se consideră raportul dintre limita de curgere a materialului la temperatura ambiantă și limita de curgere a materialului la temperatura în zona sudării. Se consideră că materialele sunt sudabile prin ultrasunete, dacă raportul respectiv este inferior limitei de 0,30. Deasemenea, proprietățile mecanice ale materialelor sudate, precum duritatea și modulul de elasticitate, reprezintă factori de material cu influență ridicată asupra sudării cu ultrasunete ;
- **Factori de prindere și fixare** a piesei sudate. Forma și dimensiunile dispozitivului de fixare-poziționare, forma suprafețelor active, respectiv starea de uzură a suprafețelor de contact ale sonotrodei și nicovalei;
- **Factori tehnologici**, precum:
 - puterea electrică introdusă în blocul ultrasonic, (0,01-10 kW);
 - frecvența oscilațiilor mecanice vibratorii, (15-60 kHz);
 - amplitudinea oscilațiilor, (5-35 μm);
 - forța de apăsare, (100-1000 N);
 - timpul de sudare, (0,1-3 sec).

Pe baza datelor cumulate până în prezent, în funcție de comportarea la sudare cu ultrasunete, materialele metalice au fost clasificate în patru grupe de sudabilitate:

- Grupa 1 - comportare la sudare foarte bună: Al, Au, Ag, Cu, Ni, Pd, Pt;
- Grupa 2 - comportare la sudare bună: Th, Fe, Nb, Ta;
- Grupa 3 - comportare la sudare satisfăcătoare: Mn, Mo, Zr, Ti, Mg, Zn, Sb;
- Grupa 4 - comportare la sudare nesatisfăcătoare: Ir, Rh, Pb, W, Cr, Si, Be, Cd, Co.

Dintre aplicațiile uzuale ale sudării cu ultrasunete se regăsesc aplicații din industria electrotehnică sau electronică, sudarea unor conectori electrici, realizarea unor îmbinări eterogene din materiale greu sudabile sau realizarea unor îmbinări din elemente cu grosimi foarte reduse (sute de μm), în domeniul industriei construcțiilor de mașini sau în industria aerospațială, figura 5.35 și 5.36.



Fig. 5.35 Sudarea cu ultrasunete a unei aripi de avion Airbus A380. Fokker Aerostructures [50]



Fig. 5.36 Contacte electrice și elemente de iluminare sudate cu ultrasunete, pentru automobile.

5.2.2 Sudarea prin frecare

Sudarea prin frecare este codificată numeric cu codul 42, conform standardului SR ISO 4063-2011. Istoricul acestor procedee de sudare datează din anul 1891, când a fost emis primul patent pentru acest procedeu, în USA. Cercetări pentru extinderea sudării prin frecare au fost intensificate în perioada celor două războaie mondiale, iar în fostul bloc sovietic USSR, începând cu anul 1956.

Mai recent, în cadrul TWI Cambridge s-a aplicat pentru prima oară, în 1991, **procedul de sudare prin frecare cu element rotitor** FSW¹. Sudarea prin frecare cu element rotitor, s-a dezvoltat inițial pentru sudarea aliajelor de aluminiu, dar în prezent procedeul de sudare a fost extins pentru sudarea unor materiale mai variate, incluzând oțelurile inoxidabile și materialele polimerice. Datorită solicitării termice și abrazive foarte mari a elementului rotitor, în cazul sudării oțelurilor feritice, inoxidabile, duplex sau a aliajelor de nichel, elementul rotitor se execută din materiale speciale precum PCBN (nitruri de bor policristaline), PCD (diamant policristalin) sau MMC (materiale compozite cu matrice metalică).

Dificultatea obținerii de structuri sudate din aliaje de aluminiu din clasa 2XXX și 7XXX care să prezinte rezistență mecanică și la oboseală, a limitat utilizarea acestora în domeniul aerospațial. Aliajele de aluminiu din clasa 2XXX și 7XXX, în general nu sunt considerate sudabile, datorită porozității ridicate și a microstructurii necorespunzătoare din zona cusăturii sudate. Procedeul de sudare FSW a înlăturat problemele de sudare a aliajelor de aluminiu, prin procedeele de sudare convenționale. Astfel, s-au obținut rezultate foarte bune, chiar și la sudarea aliajelor de aluminiu considerate nesudabile, clasa 2XXX și 7XXX [51].

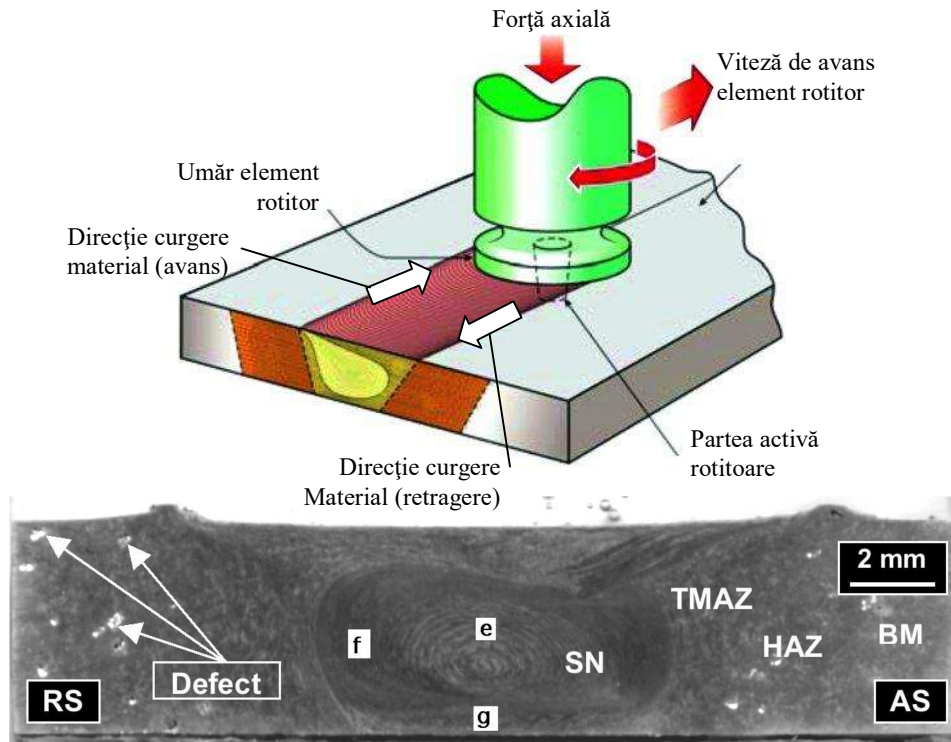


Fig. 5.37 Procedul de sudare cu element rotitor. Secțiune transversală îmbinare [51].
HAZ - zonă afectată termic, TMAZ - zonă afectată termo-mecanic, BM - material bază

Sudarea se realizează fără topirea materialelor și fără material adaos, chiar și pentru materiale care s-au dovedit greu sudabile prin procedee convenționale. Se pretează pentru sudarea componentelor plate și lungi, dar poate fi adaptat și pentru sudarea țevelor sau profilelor tubulare. Sudura se realizează prin acțiunea combinată a efectului termic obținut prin frecare și a deformării plastice imprimate de elementul rotitor, figura 5.37.

¹ Friction Stir Welding (lb.eng.)

Analizând microstructura prezentată în figura 5.37, putem observa în zona centrală a cusăturii sudate, o structură stratificată concentrică, ce reprezintă zona cea mai intens deformată plastic. Acest aspect stratificat, se datorează curgerii de material antrenat de partea activă a elementului rotitor, combinat cu mișcarea de avans a acestuia. Datorită proceselor dinamice de recrystalizare din zona deformată, grăunții cristalini capătă un aspect echiaxial. Zona afectată termo-mecanic, este o zonă intermediară între nucleul sever deformat plastic și zona afectată termic. Aspectul grăunților cristalini din metalul de bază se păstrează în această zonă, însă sunt ușor alungiți în direcția de curgere a materialului. Partea superioară a cusăturii sudate prezintă o microstructură diferită, ca urmare a forțelor tangențiale exercitate de umărului elementului rotitor. În cazul pieselor turnate, sudarea cu element rotitor rafinează microstructura dendritică a materialului rezultată după turnare, elimină eventualii pori interni din material și fărâmițează eventuale incluziuni fragile sau particule grosolane de siliciu, care conferă fragilitate pieselor turnate.

Materialul din îmbinarea sudată curge în direcții opuse, sub acțiunea forțelor de frecare exercitate de elementul rotitor, totodată fiind încălzit la o temperatură de cca. 0,8 din temperatura de topire a aliajului. Procedul de sudare FSW conferă o serie de avantaje în raport cu procedeele de sudare convenționale, dintre care amintim:

- Energia liniară de sudare redusă;
- Obținerea unei structuri fine în cusătura sudată;
- Deformații reduse;
- Sudarea fără material adaos cu implicațiile respective;
- Reducerea riscului de contaminare cu incluziuni, hidrogen;
- Eliminarea radiației luminoase și a noxelor eliminate, a vaporilor metalici etc. fiind un procedeu de sudare ecologic, fără să pună în pericol sănătatea sudorului;
- Permite realizarea îmbinărilor sudate eterogene.

Elementul rotitor poate fi prevăzut la partea activă cu un vârf cilindric sau conic, prevăzut cu canale elicoidale pentru a micșora volumul de material antrenat în procesul de curgere plastică, figura 5.38. Umărul elementului rotitor are rolul de a conferi cusăturii sudate o suprafață plană, cu aspect final neted, ce nu mai necesită prelucrări mecanice ulterioare. Parametrii de sudare se corelează cu raportul dintre efectul termic produs prin frecare și volumul deformat plastic, în funcție de grosimea pieselor sudate.

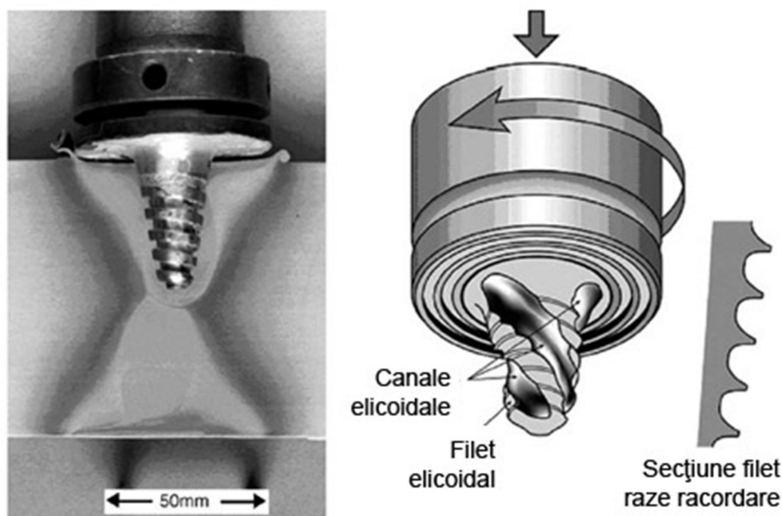


Fig. 5.38 Aspectul părții active a elementului rotitor [51].

Geometria părții active a elementului rotitor este esențială în ceea ce privește performanțele obținute prin sudarea FSW. S-au realizat o serie de scule cu o geometrie special concepută, WhorlTM, MX TrifluteTM [51], care controlează procesul de curgere plastică a materialului și reduc forțele necesare procesului. La același diametru, comparativ cu un element rotitor cu pin cilindric, pentru WhorlTM volumul de material ocupat de partea activă este redus cu 60%, iar în cazul MX TrifluteTM volumul de material se reduce cu 70%. Prin micșorarea volumului de material deformat plastic, se reduc forțele necesare în procesul de sudare și crește suprafața de contact dintre partea activă a sculei și material. Prin urmare, se dezvoltă un efect termic mai puternic, care este proporțional cu suprafața de contact dintre partea activă a elementului rotitor și material, determinând creșterea randamentului la deformare și eficiența sculei utilizate la sudarea FSW. S-au putut realiza îmbinări sudate prin procedeul FSW, utilizând element rotitor tip WhorlTM pentru grosimi de material de până la 75 mm, [52]. Materialul de bază 6082Al-T6, a fost sudat cap la cap din ambele părți în două treceri, adâncimea de pătrundere pe trecere fiind de 38 mm.

Performanța procedeeului de sudare depinde de raportul volumului de material antrenat în procesul de curgere și volumul părții active a elementului rotitor. Pentru elemente rotitoare cu geometrie conică/cilindrică, acest raport este de 1,1:1, iar în cazul sculelor MX TrifluteTM, acest raport ajunge la 2,6:1. Prin urmare, caracteristicile mecanice de rezistență ale acestui tip de îmbinare sudată sunt foarte bune, fapt ce a permis ca procedeul de sudare cu element rotitor, să fie utilizat în aplicații foarte pretențioase din punct de vedere a calității și rezistenței îmbinărilor sudate.

Exemple de astfel de aplicații sunt: sudarea rezervoarelor de combustibil la avioane Boeing, sudarea unor containere folosite în industria nucleară pentru combustibili, sudarea rezervoarelor de combustibil pentru rachetele din programul spațial, construcția unor iahturi de croazieră sau a unor nave maritime de război, figura 5.39 etc.



a) Nava USS Freedom a cărei structură este realizată din panouri de Al, sudate prin FSW.

b) Sudare FSW a panourilor pentru puntea vasului de croazieră 'The World'.

Fig. 5.39 Exemple de aplicații ale procedeeului de sudare cu element rotitor FSW [53].

Sudarea prin frecare cu element rotitor este o variantă de sudare în stare solidă cu un istoric relativ recent. Există și alte variante de sudare în stare solidă prin frecare, la care încălzirea pieselor metalice se realizează fără o sculă intermediară. Efectul termic se obține prin frecarea capetelor frontale ale pieselor sudate, fie printr-o mișcare de rotație, fie printr-o mișcare liniară alternantă. Se pot realiza îmbinări sudate din materiale diferite, care pot ajunge la un gabarit de peste 300 tone, pentru piese utilizate în industria aerospațială [53], figura 5.40. În cazul sudării prin frecare rotativă, piesele se rotesc în sensuri contrare, una dintre acestea putând să rămână fixă, în funcție de principiul constructiv al mașinii de sudare. Piesele cu secțiune mare necesită mașini de sudat prin frecare inerțiale, la care energia necesară procesului de frecare este înmagazinată prin antrenarea în mișcare de rotație a unui volant.



Fig. 5.40 Mașină de sudat prin frecare rotativă pentru componente ale motoarelor turbo jet ale avioanelor de linie [53].

În momentul cuplării bruște a celor două piese de sudat, energia înmagazinată a volantului este convertită prin frecare în energie termică, iar sub acțiunea forțelor de refulare exercitate pe secțiunea frontală de sudare, se execută o sudare prin forjare. Sudarea se realizează fără material adaos sau auxiliar, flux sau atmosferă protectoare. Deoarece materialul nu se topește și rămâne în stare solidă, riscul apariției porilor sau incluziunilor nemetalice în îmbinarea sudată, este redus. Un alt avantaj al acestui procedeu de sudare, este că se pot suda orice materiale care în principiu sunt forjabile sau care prin procedee de sudare convenționale, sunt greu sudabile sau chiar nesudabile. Se pot realiza îmbinări sudate din materiale, precum: aluminiu-oțel, cupru-aluminiu, titan-cupru sau aliaje de nichel-oțeluri. Deasemenea, pot fi sudate oțeluri aliate, oțeluri maraging, oțeluri de scule, aliaje de tantal sau materiale compozite cu matrice metalică. Diagrama de sudare prin frecare rotativă, este ilustrată în figura 5.41.

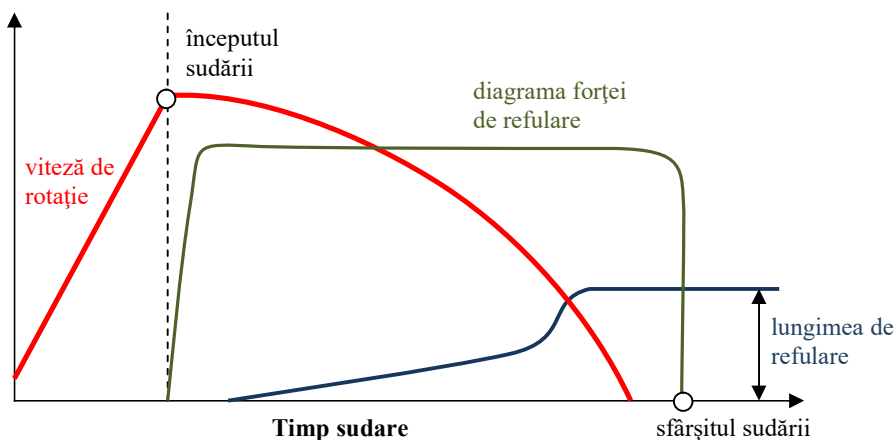
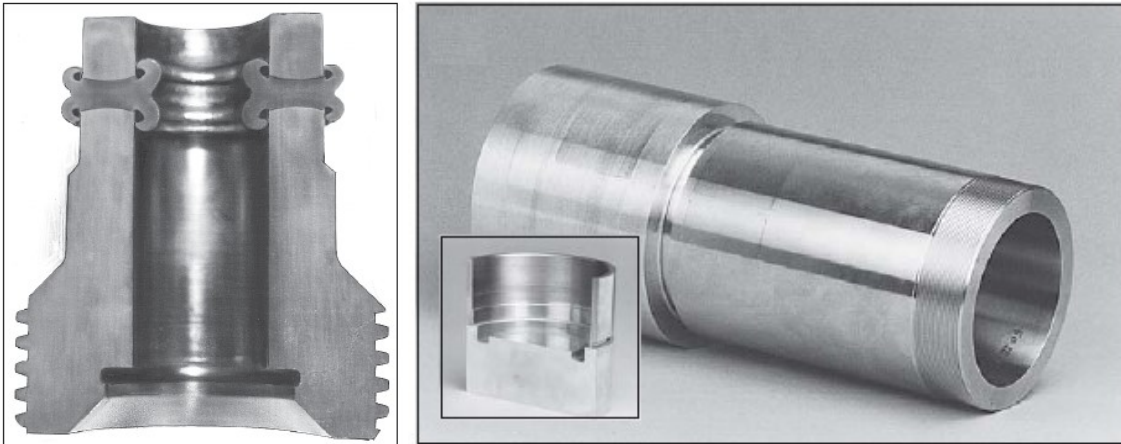


Fig. 5.41 Diagrama de sudare prin frecare rotativă.

Procesul de sudare, începe cu antrenarea volantului inerțial în mișcare de rotație. Este necesar un timp tehnologic pentru ca volantul să ajungă la viteza de rotație programată, corespunzătoare energiei necesare înmagazinate, pentru a fi convertită în căldură prin frecare.

În momentul cuplării pieselor de sudat, crește brusc forța de refulare aplicată asupra acestora. Ca urmare, se produce un proces de refulare a materialului în zona de contact, aspect ilustrat în figura 5.42. Trebuie ținut cont de scurtarea finală a pieselor, astfel încât, în momentul încheierii procesului de sudare, piesele să ajungă la distanța finală corectă. Forțele de refulare se pot aplica într-o singură etapă sau în trepte, pe măsură ce energia mecanică de frecare este convertită în căldură.



a) secțiune longitudinală printr-un manșon de cuplare la capul de forat petrolier

b) îmbinare eterogenă sudată pentru aplicații criogenice: inconel și aluminiu

Fig. 5.42 Exemple de piese sudate prin frecare rotativă inerțială [53].

5.2.3 Sudarea prin forjare

Este un procedeu care a fost utilizat încă din cele mai vechi timpuri, la confecționarea armelor sau uneltelor, figura 5.43. Procedeu constă în încălzirea pieselor care urmează a fi sudate în domeniul austenitic, după care se forjează împreună, utilizând un ciocan manual sau pneumatic. Prin acest procedeu s-au confecționat săbiile de samurai katana, care posedă proprietăți uimitoare de rezistență mecanică. Miezul sabiei katana este realizat dintr-un oțel carbon cu conținut redus de carbon, oferind tenacitate și capacitate de absorbție ridicată a energiei de impact, în vreme ce partea exterioară, tăișul sabiei, este realizat dintr-un oțel cu cca. 0,8% carbon. După tratamentul termic, oțelul cu conținut ridicat de carbon, conferă duritate și rezistență tăișului extrem de ascuțit. Cele două calități diferite de oțel, sunt forjate împreună în pachet, după o tehnică specială. Astfel, sabia devine extrem de rezistentă, fără ca tăișul acesteia să manifeste fragilitate.



Fig. 5.43 Confecționarea securii prin sudare prin forjare.

5.2.4 Sudarea prin explozie

Codificat cu codul numeric 441, conform clasificării procedeele de sudare (SR ISO 4063-2011), sudarea prin explozie este una dintre cele mai eficiente metode de îmbinare a materialelor. Energia necesară realizării îmbinării, este furnizată de unda de șoc produsă la arderea cu viteză ridicată a unui material exploziv. Procesul se numește explozie, fiind caracterizat de viteza de detonație. Deși metoda se caracterizează printr-o eficiență foarte ridicată, aceasta se aplică limitat, datorită măsurilor de siguranță extrem de severe care trebuie luate. Ne referim aici, atât la zona în care se produce explozia, cât și la zona de depozitare a explozibilului, riscului de manipulare și la transportul acestuia etc. Exemplu de explozivi de putere ridicată, cu detonații de înaltă viteză (4572-7620 m/s) sunt, trinitrotoluenul (denumit TNT), sau hexogenul (RDX), care se fabrică din acid azotic, hexa-metilente-tramină și azotat de amoniu. Din categoria explozibililor de putere medie (detonație de la 1524 până la 4572 m/s), fac parte dinamita și azotatul de amoniu, care se folosește ca și îngrășământ în agricultură. În cazul procedeele de sudare prin explozie se folosesc frecvent amestecuri de explozivi, ca de exemplu TNT cu azotat de amoniu, în funcție de grosimea și tipul materialelor sudate, de viteza necesară pentru detonație, ce determină forța undei de șoc.

Prin acest procedeu, pot fi fabricate panouri bimetalice sau multistrat, de dimensiuni mari, realizate din materiale greu sudabile, sau chiar nesudabile prin alte procedee de sudare (ex. Ni-Ti, Al-Ti, paleta de combinații fiind extrem de largă, figura 5.43).

	Zirconiu	Vanadiu	Wolfram	Titan	Tantal	Otel slab aliat	Otel cu C < 0,2%	Otel inoxidabil	Argint	Reniu	Platina	Paladiu	Niobiu	Aliaje de Nichel	Nichel	Aliaje de Mo	Molibden	Magneziu	Kovar	Indiu	Hafniu	Aur	Aliaje de cupru	Cupru	Aliaje Be-Cu	Bronzuri de Al	Aliaje de Al	Aluminiu
Aluminiu	8	8	4	1	1\3	6\3	1	6\3	1	8	8	7	1	6	6	8	8	7	6\3	7	8	1	5	5	7	6	1	1
Aliaje de Aluminiu	8	8	4	1	1\3	6	6\3	6\3	1	8	8	7	1	6	6	8	8	7	6\3	7	8	8	5	5	7	6	1	1
Bronzuri de Aluminiu	7	8	7	7	8	8	1	7	7	7	8	7	8	7	7	8	8	7	8	8	7	8	8	8	7	8		
Aliaje Be-Cu	7	8	7	7	8	7	1	7	8	7	8	7	8	7	7	8	8	7	7	7	7	8	1	1	7			
Cupru	8	8	4	1\3	1\3	1	1\3	1\3	1	8	1	1	1	1	1	8	1	7	1\3	1	8	1	1	1				
Aliaje de Cupru	8	8	8	8	8	1	1	1	8	8	8	8	1	1	8	8	1	7	1\3	8	8	8	1					
Aur	8	8	8	8	8	8	8	8	1	8	1	8	8	8	8	8	8	7	8	8	8	8	1					
Hafniu	7	1	8	7	8	8	8	1	8	8	8	8	8	7	7	1	1	6	8	7	8							
Indiu	8	8	8	7	8	7	7	7	8	7	7	7	8	7	7	8	8	6	8	8								
Kovar	7	8	8	7	8	1	1	1	8	7	8	7	8	8	8	8	8	6	1									
Magneziu	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	8										
Molibden	8	1	4	8	1	1	1	1	8	1	8	8	8	8	8	8	1	8										
Aliaje de Molibden	8	1	4	8	8	8	8	8	1	8	8	8	8	8	8	8												
Nichel	8	8	8	1	1	1	1	1	7	8	7	7	8	1	1													
Aliaje de Nichel	7	8	8	7	8	1	1	1	8	7	8	7	8	8	8													
Niobiu	8	1	4	8	8	8	8	1	8	1	1	8	1															
Paladiu	7	7	7	7	7	1	7	7	7	7	7	8																
Platina	8	8	8	8	8	1	8	1	8	8	8																	
Reniu	7	1	8	7	1	7	7	7	7	8																		
Argint	8	8	8	8	8	1	1	1	1																			
Otel inoxidabil	2\5	1	4	2\5	1\3	1	1	1																				
Otel C<0,2%	2\5	8	8	2\5	1\3	1	1																					
Oteluri slab aliate	8	8	8	2\5	1\3	1																						
Tantal	8	1	4	1	1																							
Titaniu	8	1	8	1																								
Wolfram	8	1	4																									
Vanadiu	8	8																										
Zirconiu	8																											

1. Sudate frecvent (material placare < 18 mm grosime).
2. Pot fi sudate cu efect de margine, necesită debitare.
3. Suduri etanșe, ermetice.
4. Sudate frecvent (material placare subțire)
5. Sudabile, rezistența îmbinării este inferioară.
6. Sudate frecvent, cu strat intermediar.
7. Comportare incertă, poate necesita strat intermediar.
8. Comportare incertă cu probabilitate ridicată de sudare directă, fără strat tampon.

Fig. 5.43 Harta compatibilității metalelor ce pot fi sudate prin explozie.

Principiul procedurii de sudare este ilustrat în figura 5.44. Pe substratul metalic de grosime ridicată, se distribuie sub formă de grilă, o serie de distanțatoare cilindrice, care asigură o anumită distanță între substrat și placa metalică cu care se face placarea. Această distanță reprezintă un element cheie pentru reușita operației de sudare. Peste elementul de placare, se distribuie uniform un strat de exploziv, care prin arderea cu detonație ridicată, va genera o undă de șoc care va deforma cu viteză extrem de ridicată, elementul de placare. În punctul apex, sau mai precis în lungul generatoarei de contact dintre metalul de bază și elementul de placare, se dezvoltă presiuni extrem de ridicate, cuprinse între 10.000 și 100.000 de bar. Frontul de coliziune dintre materialele placate, se deplasează cu viteza egală cu cea de detonație, expulzând aerul, impuritățile dintre piese, sub forma unui jet cu aceeași viteză extrem de ridicată. Ca urmare, ambele materiale la interfața de contact, suferă o deformare plastică și o întrepătrundere cu aspect specific, de valuri de mare datorită undei de șoc, fără ca să existe zone de discontinuitate între acestea, figura 5.45.

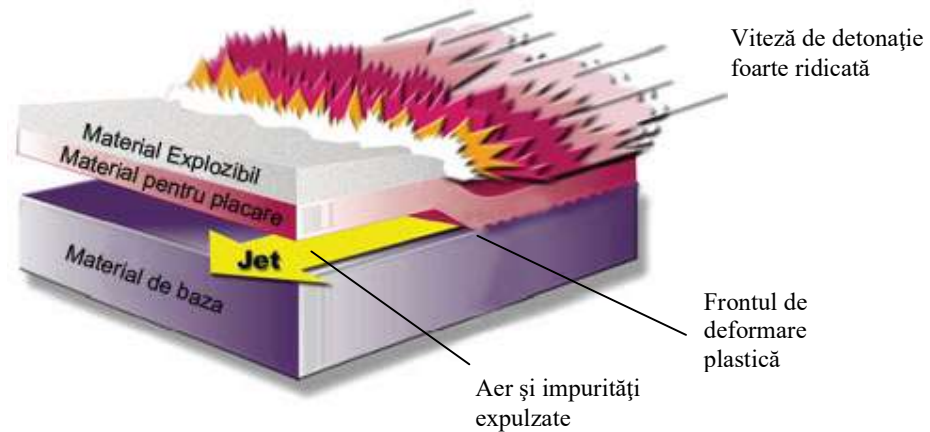


Fig. 5.44 Principiul procedurii de sudare prin explozie [57].

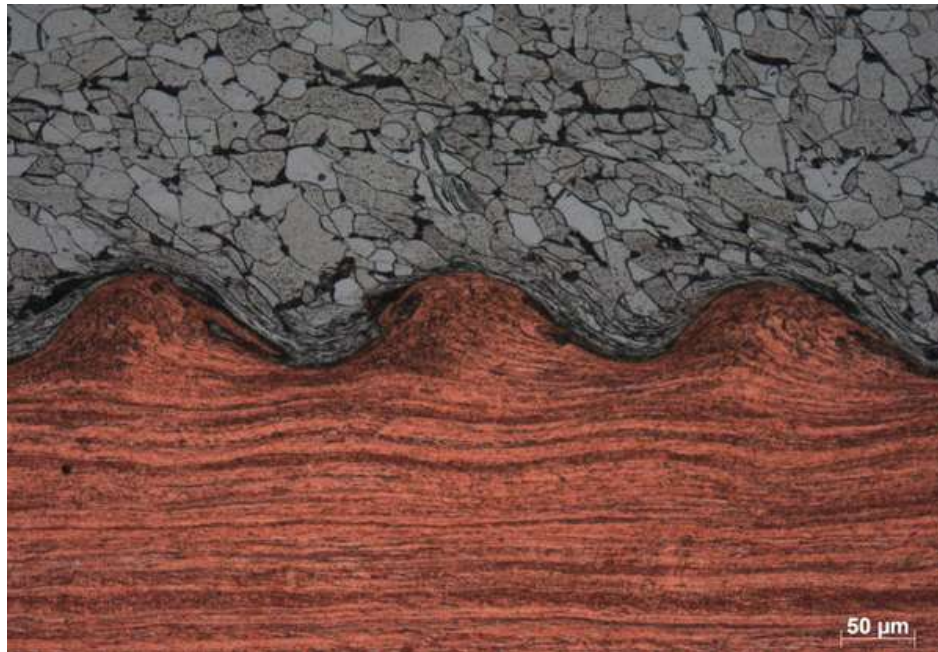


Fig. 5.45 Aspectul unei îmbinări sudate realizate prin impact cu viteză ridicată. Îmbinare dintre cupru și oțel, prin impuls electromagnetic [58].

O variantă asemănătoare ca și principiu de formare a legăturii metalice, prin impactul dintre materiale cu viteză extrem de ridicată, este **sudarea cu impuls electromagnetic**.

5.2.5 Sudarea cu impuls electromagnetic

Procedeul de sudare a fost inventat la începutul anilor 1970 de cercetători ruși, din cadrul Institutului Nuclear de Fizică din Kurchatov. S-a utilizat inițial pentru sudarea suporturilor barelor de combustibil nuclear. Denumirea în limba engleză a procedurii este "*Magnetic Pulse Welding*", cea ce înseamnă sudare cu puls magnetic, însă conform terminologiei de specialitate din limba română, s-a adoptat denumirea de sudare cu impuls electromagnetic.

Principiul sudării cu impuls electromagnetic se bazează pe efectul de inducție într-un material cu conductivitate electrică ridicată. Impulsul de curent obținut prin descărcarea unei baterii de condensatori, alimentează o bobină a cărei dimensiuni limitează gabaritul îmbinării sudate. Îmbinarea metalică, trebuie să fie situată în interiorul bobinei, figura 5.46. Fluxul de curent cu intensitate ridicată, determină variația câmpului magnetic din bobină, care la rândul său va conduce la inducerea unor curenți Foucault/Eddy (cunoscuți și sub denumirea de curenți turbionari), în materialul conductiv. Curenții induși vor genera un câmp magnetic, care conform legii lui Lenz, se va opune variației fluxului magnetic original, cel care a determinat fenomenul de inducție. Prin urmare, asupra elementelor îmbinării poziționate în interiorul bobinei, se vor exercita forțe de accelerare de tip Lorentz, creând un impact cu viteză ridicată dintre acestea. Un parametru important pentru proces, îl reprezintă distanța dintre piesele de îmbinat (*Standoff distance*).



Sudarea cu impuls electromagnetic, este un procedeu de sudare la rece, sub presiune, care se realizează la trecerea unui curent tranzitoriu printr-o bobină, producând o presiune magnetică ce aduce piesele metalice în contact brusc.

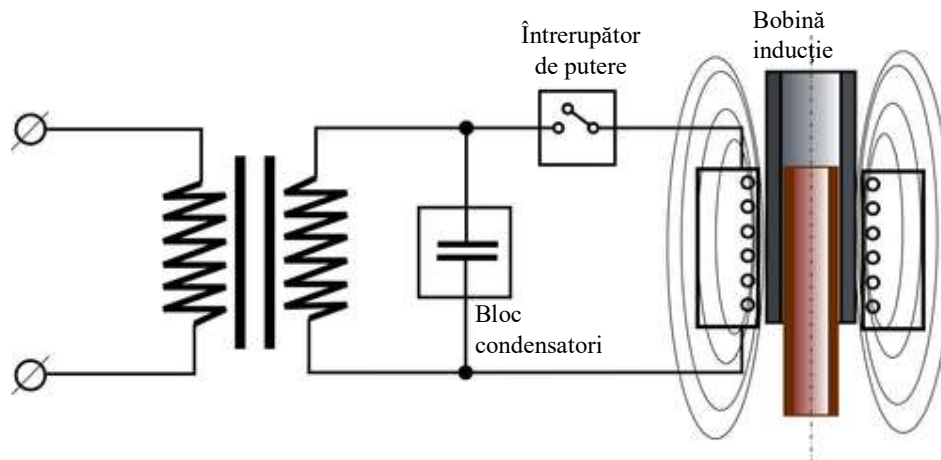


Fig. 5.46 Sudarea cu impuls electromagnetic.

Deformația materialelor se produce cu viteză extrem de ridicată, ca și la sudarea prin explozie, timpul de realizare a îmbinării efective, fiind de cca. 10-15 μ s. Materialele nu se topesc în procesul de sudare, prin urmare se pot îmbina materiale diferite, cu caracteristici fizice foarte diferite, produse tubulare, plate în funcție de forma geometrică a bobinei. Datorită faptului că nu se introduce energie termică în proces, deformațiile și tensiunile asociate cu ciclul termic la sudare, nu mai ridică probleme în acest caz. Aplicațiile sudării cu impuls electromagnetic sunt: îmbinarea țevilor sau a tablelor subțiri, așezate prin suprapunere, placarea unor tuburi, flanșe cu materiale rezistente la coroziune etc, figura 5.47.



Fig. 5.47 Sudarea cu impuls electromagnetic a profilelor tubulare [59].

O variantă de sudare care se bazează pe un principiu asemănător, este procedeul VFA¹ (figura 5.48), dezvoltat de o echipă de cercetare de la universitatea Ohio State University, USA. Un impuls electric de intensitate foarte mare, este aplicat pe o folie subțire de aluminiu. Aceasta se vaporizează într-un timp extrem de scurt, formând o plasmă foarte fierbinte și de presiune ridicată, ceea ce determină o expansiune a gazului extrem de rapidă. Impactul dintre materialele sudate, se produce cu o viteză de câteva mii de km/h. Tot la aceeași universitate, s-a patentat o tehnică nouă de îmbinare a materialelor prin impact cu viteză ridicată, care are la bază energia furnizată de un impuls laser, prin procedeul de sudare LIW². Viteza de impact dintre materiale, depășește 200 m/sec într-un interval de timp de ordinul nanosecundelor, procedeul având aplicații în domeniul electronicii, unde dimensiunile interfeței de contact sunt foarte mici, de ordin micro/nano sau în domeniul construcției structurilor ușoare pentru autovehicule speciale, militare etc.

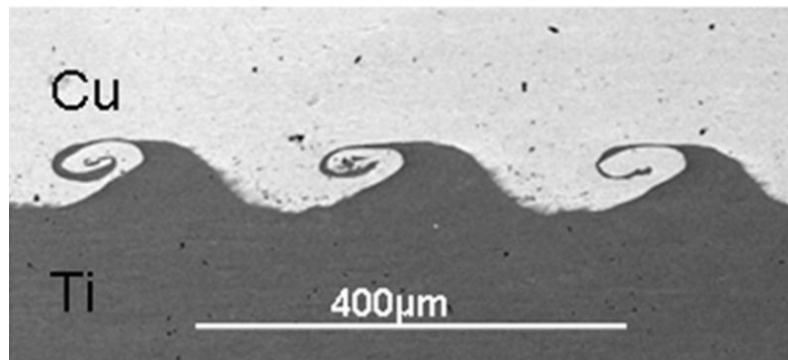


Fig. 5.48 Sudarea prin procedeul VFA a Cu-Ti, prin vaporizarea unei folii de Al.
Reprodus după : <https://iml.osu.edu/vaporizing-foil-actuator-tool-creating-lightweight-structures>

¹ VFA - Vaporized Foil Actuator welding

² LIW – Laser Impulse Welding

6. SUDABILITATEA MATERIALELOR

6.1 Principii generale de determinare a sudabilității

Conform normelor ANSI/AWS (American Welding Society) A3.0-89, sudabilitatea materialelor poate fi definită după cum urmează:



Sudabilitatea este o proprietate tehnologică definită ca fiind capacitatea unui material de a putea fi sudat în condiții specifice de fabricație, parte a unor structuri metalice proiectate eficient și care satisfac criteriile de performanță și siguranță în exploatare.

Sudabilitatea materialelor este un concept simplu în aparență, însă datorită numeroaselor variabile și a interacțiunilor complexe dintre acestea care intervin în procesele de sudare, este extrem de dificil de cuantificat printr-o metodă unitară sau printr-o singură valoare numerică, care să exprime sudabilitatea.

Prin urmare, sudabilitatea poate fi evaluată prin prisma cuantificării unor fenomene care apar la sudare sau prin măsurarea unor proprietăți mecanice sau chimice din cusătură sau ZIT. Coroborate aceste evaluări calitative și cantitative definesc comportarea la sudare a materialului considerat, în condițiile specifice de fabricație. Aici intervin și aspecte legate de bridare, de complexitatea structurii metalice, de tehnologia de sudare, acestea fiind doar câteva dintre cele mai importante aspecte de fabricație care se iau în considerare.

Pentru definirea sudabilității, vom încerca să arătăm prin fenomenele și procesele metalurgice care au loc în timpul și după procesul de sudare, aspectele principale care afectează sudabilitatea. Acestea sunt:

- Susceptibilitatea fisurării metalului de bază, a metalului depus și în ZIT;
- Ductilitatea și tenacitatea cusăturii sudate și a ZIT;
- Adâncimea de pătrundere a cusăturii sudate în metalul de bază;
- Aspectul cusăturii sudate și procesele metalurgice din baia de sudare.

În afara acestor criterii enunțate, pentru definirea sudabilității, se pot lua suplimentar în considerare și aspecte specifice din punct de vedere al condițiilor de exploatare. De exemplu, se poate lua în considerare: rezistența la oboseală, rezistența la coroziune în diferite medii chimice, la temperaturi diferite de exploatare etc. Din aceste considerente, rezultă diversitatea condițiilor de testare a îmbinărilor sudate care trebuie să corespundă calitativ la criteriile de exploatare. Astfel, fiecare test este conceput să evalueze o anumită susceptibilitate, pentru diferite aspecte ale sudabilității. Informațiile obținute în urma acestor teste, reprezintă o evaluare de bază a sudabilității, pentru condițiile de sudare considerate. Acestea, reprezintă doar o aproximare a condițiilor reale de fabricație și de exploatare. Datele obținute servesc ca bază de comparație pentru alte tipuri de materiale sudate în aceleași condiții, proceduri de sudare, ciclul termic etc, care servesc inginerului sudor pentru a stabili o tehnologie de sudare adecvată, reproductibilă, cu garanțiile de calitate și de exploatare considerate.

Metodele de evaluare a sudabilității pot fi clasificate după natura acestora, în două grupe:

- Metode directe de determinare a sudabilității;
- Metode indirecte de determinare a sudabilității.

Metodele directe de determinare a sudabilității presupun realizarea unor probe sudate având forme și dimensiuni specifice fiecărui test de sudabilitate în parte. Nu există o standardizare în acest domeniu, tocmai datorită condițiilor de fabricație și exploatare extrem de diverse, portabilitatea rezultatelor fiind limitată de respectarea condițiilor impuse în testul de sudabilitate. De exemplu, pentru evaluarea directă a sudabilității prin examinarea susceptibilității de fisurare în metalul de bază sau cusătura sudată, au fost propuse o serie de teste [2]:

- Testul Lehigh;
- Testul Varestreint;
- Testul Cranfield;
- Testul Nick de îndoire;
- Testul de fisurare în orificiu propus de Naval Research Laboratory;
- Testul Batelle de fisurare în plăci cu creștături;
- Testul de sudură circulară (Navy Circular Patch Test);
- Testul de fisurare pe probe sudate în cruce, etc.

În esență, aceste teste de sudabilitate se bazează pe suprapunerea efectului tensiunilor de contracție rezultate la solidificarea băii și la răcirea îmbinării, cu efectul prezenței unor concentratori de tensiune geometrice, precum: orificii, variații de secțiune, grosime etc. Se apreciază susceptibilitatea de a se produce fisuri în materialul de bază, ZIT sau în metalul depus, ca urmare a tensiunilor generate de ciclul termic la sudare, precum și a celor pre-existente în material, datorită concentratorilor de tensiuni.

Metodele indirecte de determinare a sudabilității se bazează pe calculul unor coeficienți care exprimă, fie influența unor elemente chimice asupra caracteristicilor mecanice de rezistență, fie susceptibilitatea de fisurare la cald sau la rece. Acțiunea metalurgică a diferitelor elemente asupra procesului de germinare și cristalizare din baia de sudură, determină caracteristicile microstructurale din cusătura sudată și din ZIT.

6.2 Metode indirecte de determinare a sudabilității

Principalele metode indirecte pentru determinarea sudabilității, sunt:

- Determinarea conținutului de carbon echivalent, C_{ech} ;
- Determinarea indicelui de fisurare la cald;
- Determinarea durității Vickers sub cordon;
- Pe baza diagramelor de sudabilitate;
- Cu ajutorul diagramelor TTT.

Înainte de a analiza și de a înțelege rațiunea utilizării conținutului de carbon echivalent, precum și aplicabilitatea diferitelor formule disponibile în literatura de specialitate, vom analiza o serie de fenomene metalurgice care au loc la sudare, în funcție de concentrația unor elemente însoțitoare sau de aliere, care se regăsesc în compoziția materialului de bază sau adaos.

Neomogenitatea chimică

Neomogenitatea chimică se poate manifesta sub formă de:

- Segregări din soluția solidă (micro și macrosegregații);
- Segregări sub formă de bandă;
- Incluziuni nemetalice și solide;
- Porozitate.

Microsegregația are loc la nivelul structurilor microscopice, de exemplu, în cadrul unor structuri dendritice sau ale grăunților cristalini, iar **macrosegregația** reprezintă variații ale compoziției chimice pe zone mai întinse, ca de exemplu, pe zona cusăturii sudate. Cauzele macrosegregației chimice pot fi: neomogenitatea băii de sudare, calitatea diferită a metalului de bază și a celui adaos, diluția, tehnologia anterioară de procesare a metalului de bază (metalurgia pulberilor) etc.

Elementele de aliere, care au un coeficient de segregare la echilibru $k < 1$, au o tendință de segregare către exteriorul brațelor dendritice sau către limita de grăunte, iar în cazul elementelor chimice cu coeficientul k supraunitar, segregarea tinde către nucleul formațiunii dendritice sau a grăuntelui cristalin. Fenomenul de microsegregare chimică joacă un rol esențial în determinarea susceptibilității de fisurare la solidificare a îmbinărilor sudate [2].

Coeficientul de segregare chimică la echilibru, este definit de relația (6.1):

$$k = \frac{C_S}{C_L} \quad (6.1)$$

unde C_S și C_L reprezintă concentrația fazei solide și cea a fazei lichide la interfața dintre cele două faze, fiind o funcție de temperatură, figura 6.1.

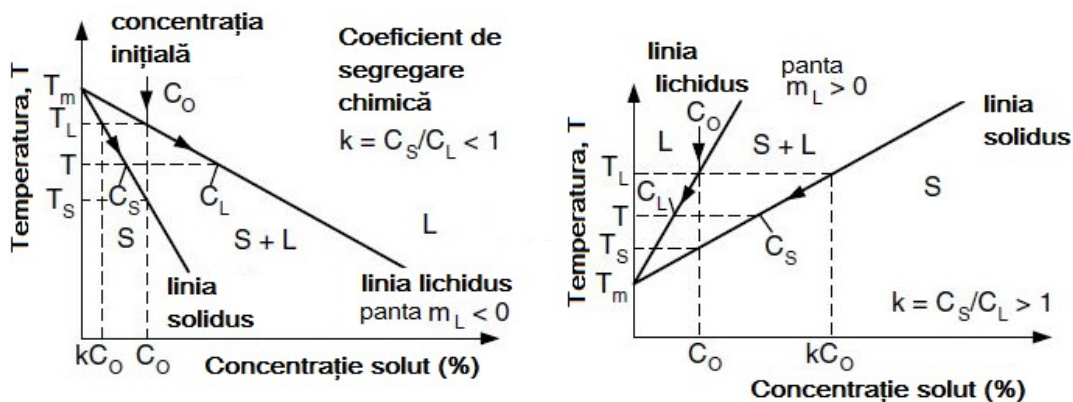


Fig. 6.1 Coeficientul de echilibru de partiționare dintre faza lichidă și solidă.

Neomogenitățile chimice și microstructurale rezultate ca urmare apariției unor benzi în material, pot avea cauze care rezidă din variația vitezei de sudare, instabilitatea arcului electric sau a curgerii turbulente a coloanei de gaz protector la sudare, fluctuații ale câmpurilor electromagnetice, microstructura inițială anizotropă a materialului de bază, viteze rapide de răcire etc. Incluziunile și porozitatea din cusătura sudată, afectează negativ caracteristicile de rezistență mecanică ale îmbinării sudate, respectiv comportarea structurii metalice în exploatare.

Susceptibilitatea de fisurare la cald depinde de o serie de factori, care acționează în ultimul stadiu al procesului de solidificare, când apar tensiuni de întindere între găunții adiacenți, ca urmare a contracției la solidificare și răcirii metalului de bază. Fisura se inițiază și se formează la temperaturi ridicate, iar dacă comunică cu suprafața cusăturii are marginile oxidate. Se formează aproape exclusiv în zona mediană a cusăturii și se va dezvolta rapid sub influența tensiunilor din material. Fisurile la cald se produc în zone bogate în segregării cu impurități precum P,S care formează compuși cu punct de fuziune scăzut. Aceștia, sunt împinși de frontul de solidificare din baia de sudare, către axa mediană a cusăturii, unde se distribuie sub forma unui film lichid continuu sau întrerupt, la limita grăunților cristalini, constituind punctul de amorsare a fisurilor la cald.

Fenomenul este accentuat de creșterea energiei liniare la sudare, datorită creșterii temperaturii din baie și timpului mai îndelungat disponibil pentru segregarea impurităților la limita de grăunte. Efectul contracției la solidificare poate fi compensat parțial, în funcție de tipul de bridare și de posibilitățile de dilatare/contracție liberă a elementelor din structura metalică. Mărimea tensiunilor de întindere din cusătură, care se manifestă la solidificare, depind de: nivelul de bridare, grosimea materialului, geometria cusăturii (factorul de formă înălțime/lățime), caracteristicile fizice ale materialelor utilizate (coeficienții de dilatare liniară, de contracție la solidificare, de conductivitate termică), precum și de volumul băii de sudare, coeficientul de diluție.

Factorii metalurgici principali care influențează susceptibilitatea de fisurare la cald, sunt:

- Intervalul de temperaturi dintre curba lichidus și solidus (fenomenul de segregare chimică este accentuat cu creșterea acestui interval de solidificare);
- Cantitatea și distribuția fazei lichide în stadiul final al solidificării cusăturii sudate (coeficientul k de segregare chimică la echilibru);
- Tipul fazei primare de solidificare;
- Tensiunea interfacială dintre faza lichidă cu cea solidă;
- Viteza de răcire și microstructura.

Un interval larg de temperaturi în care se produce solidificarea, conduce la creșterea domeniului bifazic lichid și solid (figura 6.2), ceea ce promovează fenomenul de segregare chimică, mărește lățimea efectivă din zona liniei de topire în care avem neomogenitate chimică și astfel crește susceptibilitatea apariției de fisuri la cald.

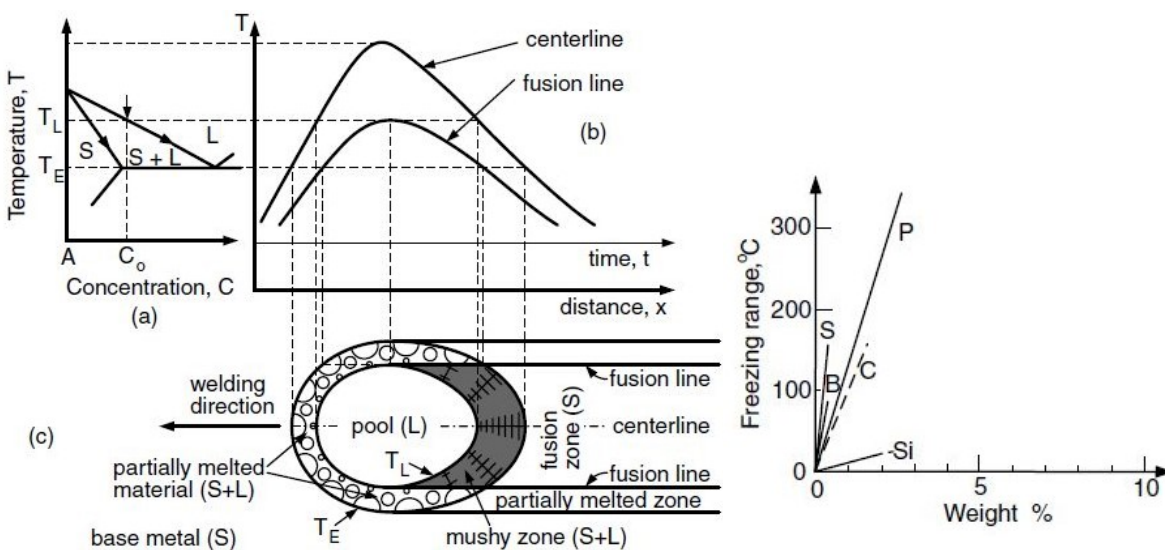


Fig. 6.2 Influența intervalului de solidificare asupra susceptibilității de fisurare la cald [3].

Impuritățile de S și P au o tendință de segregare la limita grăunților cristalini ($k < 1$), formând compuși cu punct de topire scăzut, ca de exemplu FeS, cu punct de topire la 1190°C, mărind riscul de fisurare la cald. Prezența Mn în materialul de adaos are un efect benefic, deoarece având o afinitate mai mare față de sulf ca și fierul, se va forma preferențial MnS, în detrimentul formării de FeS. Cum punctul de topire a MnS este de 1600°C, riscul de fisurare la cald se va diminua substanțial în funcție de concentrația de mangan și sulf, raportat la conținutul de carbon al oțelului. Raportul optim dintre Mn/S se determină în funcție de concentrația carbonului din oțel, pentru a preveni riscul de fisurare, conform figurii 6.3.

În figura 6.3 se poate observa efectul pozitiv al MnS (sulfura de mangan are punct de topire ridicat și aspect morfologic globular), care micșorează efectul negativ al sulfului, la concentrații mici de carbon. La creșterea conținutului de carbon, efectul formării MnS nu mai este atât de eficient în prevenirea riscului de fisurare la cald, prin urmare, este mult mai eficient reducerea concentrației de carbon din metalul depus. Acest lucru poate fi realizat pentru un metal de bază dat, prin utilizarea unor materiale adaos cu conținut redus de carbon, respectiv prin măsuri tehnologice care conduc la micșorarea diluției. O variantă puțin mai complicată este adoptarea unor soluții care să conducă la rafinarea microstructurii din cusătura sudată. Micșorarea dimensiunii grăunților cristalini conduce la creșterea lungimii cumulate a limitelor de grăunți, prin urmare aceeași cantitate de incluziuni se distribuie pe o lungime mai mare a limitelor de grăunte, ceea ce reprezintă o micșorare efectivă a concentrației specifice de sulf¹.

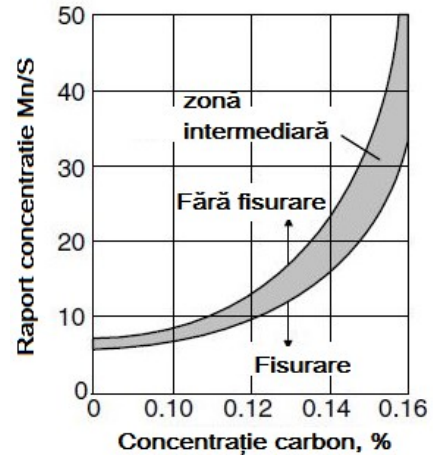


Fig. 6.3 Diagramă cu riscul de fisurare în metalul depus, în funcție de concentrația de C, S și Mn [3].

Rafinarea microstructurii reprezintă un obiectiv de atins în general, deoarece prin aceasta se măresc proprietățile de rezistență mecanică, în special tenacitatea, dar și rezistența la oboseală, prin blocarea propagării fisurilor în material. În afară de factorii metalurgici care influențează riscul de fisurare, aspectul suprafeței cusăturii sudate sau raportul dintre înălțimea și lățimea rândurilor de sudare la sudarea multistrat, poate juca un rol important în distribuția de tensiuni din material și astfel, asupra fenomenului de fisurare, figura 6.4. Explicația constă în mărimea și sensul tensiunilor superficiale, în funcție de raza și tipul de curbură a suprafeței cusăturii sudate: concav sau convex. Pentru suprafețele convexe, datorită supraînălțării și tensiunilor de compresiune în suprafață, avem o comportare mai bună la solicitări de forfecare a cusăturii, figura 6.4.

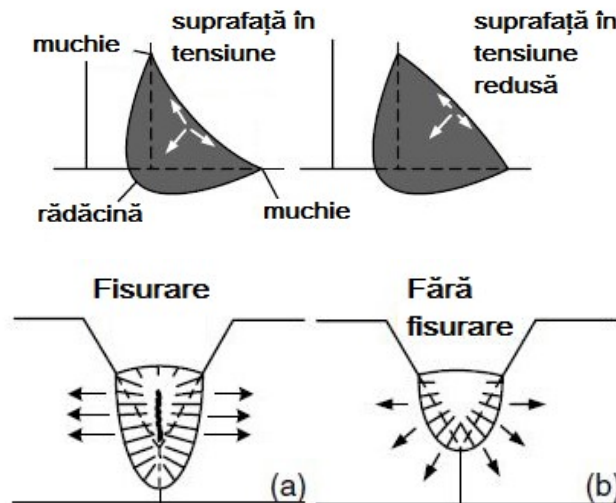


Fig. 6.4 Influența curburii suprafeței cusăturii și a raportului înălțime/lățime rând de sudare asupra riscului de fisurare [3].

¹ concentrație de sulf pe unitatea de lungime a limitelor de grăunte

Trebuie menționat totuși că supraînălțarea excesivă a cusăturii sudate conduce la o distribuție neuniformă a tensiunilor în muchiile cusăturii, prezentând astfel, un efect de concentrator de tensiuni. Datorită acestuia, se reduce rezistența îmbinării la oboseală, crește riscul de fisurare la rece în muchia cusăturii, mai ales dacă sunt prezenți și ceilalți factori asociați cu acest fenomen: concentrația mare de hidrogen difuzibil și o microstructură necorespunzătoare, de tip martensitic.

Profilul concav al suprafeței cusăturii, este preferat în cazul structurilor metalice sudate, solicitate la oboseală. Tranziția mai lină de la suprafața cusăturii, la metalul de bază, are un efect favorabil asupra stării de tensiuni din muchia cusăturii și prin urmare, asupra rezistenței la oboseală. Trebuie avut însă în vedere, raportul dintre înălțimea și lățimea cusăturii, deoarece la valori mari ale acestuia, există riscul de fisurare la cald, figura 6.4. În anumite situații, se prevăd chiar prelucrări mecanice ale cusăturii sudate, pentru a asigura trecerea de la cusătură la metalul de bază, după un profil cu o anumită rază de racordare.

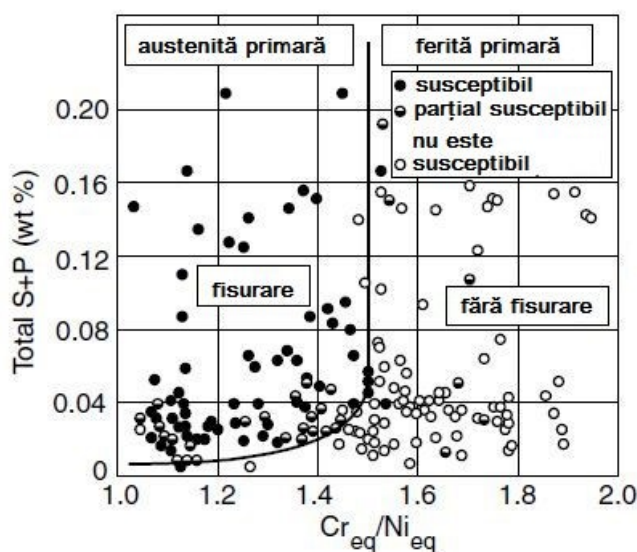


Fig. 6.5 Susceptibilitatea de fisurare la cald a oțelurilor austenitice sudate cu arc electric [3].

În figura 6.5 este ilustrată dependența susceptibilității de fisurare la cald, în funcție de tipul fazei primare de solidificare și de concentrația de impurități care manifestă fenomene de segregare pe limită de grăunte, P și S. În cazul oțelurilor austenitice, riscul de fisurare scade semnificativ în cazul separării unei cantități inițiale de ferită δ din faza lichidă. Pe măsură ce raportul dintre cromul și nichelul echivalent crește, faza primară ce se separă din baia de sudare se modifică din austenită în ferită δ , cu reducerea susceptibilității de fisurare. Cantitatea optimă de ferită δ este de cca. 5÷10%. Peste această valoare este afectată rezistența la coroziune, iar în cazul expunerii materialului la temperaturi ridicate, cuprinse între 600÷850°C, ferita δ se poate transforma în faza sigma, formată din compusul intermetalic FeCr, care fragilizează cusătura sudată.

Susceptibilitatea de fisurare la rece este asociată de obicei cu fisurarea asistată de hidrogen, deși fisurarea la rece se poate produce și în lipsa hidrogenului difuzibil [70]. Fenomenul de fisurare la rece a fost intens studiat, datorită efectului întârziat cu care se manifestă, uneori în decurs de ore, zile sau chiar săptămâni de la momentul sudării. Acest fapt, este extrem de neplăcut, deoarece într-o etapă intermediară de control nedistructiv, fenomenul de fisurare nu poate fi pus în evidență. Foarte frecvent, se întâmplă ca structura metalică sudată să fie finalizată, livrată și montată pe șantier la beneficiar (uneori la distanțe apreciabile față de locul unde s-a executat), fiind aparent conformă.

Detectarea unor fisuri ulterior acestui moment, sau chiar cedarea unor elemente ale structurii ca urmare a fisurării întârziate, ridică probleme extrem de complicate și costuri ridicate pentru remediarea problemelor apărute. Uneori ansamblul respectiv, în care a apărut fisura, nu mai poate fi demontat, fiind sudat pe șantier în cadrul unor structuri metalice mai mari.

Fisurarea la rece, apare de regulă în materiale cu grosimi ridicate, în porțiuni ale structurii metalice cu un grad ridicat de constrângere (materialul sau elementele sudate sunt împiedicate să se deplaseze liber, ca urmare a ciclului termic de la sudare). Aceste porțiuni, sunt denumite plastic în lb. engleză „*heat sink*” și reprezintă acele zone ale îmbinării metalice, unde fluxul termic se transmite în material prin conducție cu viteză ridicată, determinând viteze mari de răcire. Acestea, sunt responsabile de tipul și volumul transformărilor structurale ce au loc la răcirea materialului, de caracteristicile microstructurale din cusătură și ZIT. La viteze mari de răcire, peste cea critică, apare martensita în ZIT, fragilizând această zonă a îmbinării. Datorită rețelei cristaline puternic deformată de acest constituenț microstructural, hidrogenul difuzibil migrează în această porțiune a rețelei cristaline, având un culoar de difuzie creat de prezența martensitei. Prin urmare, se vor acumula în timp în porțiunile puternic deformate ale rețelei cristaline, zone cu concentrații ridicate de hidrogen difuzibil. Timpul în care migrează hidrogenul difuzibil, poate fi îndelungat: ore, zile sau chiar săptămâni, în funcție de temperatură, sarcini mecanice, starea de tensiuni din material, caracteristicile chimice și microstructurale ale acestuia etc.

În momentul în care se atinge o concentrație critică de hidrogen difuzibil, starea de tensiuni din material depășește pragul critic, determinând apariția unei fisuri. Se poate face o paralelă cu mecanismul de cristalizare a unui material aflat în fază lichidă, în care apar germeni de cristalizare, care cresc prin coalescență și formează structura cristalină a materialului. Într-un fel asemănător, în locul germeilor de cristalizare, avem microfisuri localizate în rețeaua cristalină, în zona afectată de transformările structurale. Aceste microfisuri, continuă să se extindă, să crească ca urmare a acumulării de hidrogen difuzibil la vârful microfisurii, acționând ca și un efect de pană. Acumularea de hidrogen se face doar pe seama hidrogenului difuzibil, cel care este prins în capcanele de hidrogen, nu participă la creșterea stării de tensiuni.

Rezumând fenomenele și procesele metalurgice descrise mai sus, se poate spune că factorii principali care măresc susceptibilitatea de fisurare la rece, sunt:

- Prezența hidrogenului difuzibil;
- Microstructură necorespunzătoare, de tip martensitic;
- Prezența unei stări ridicate de tensiuni în material (tensiuni datorate ciclului termic, tensiuni reziduale, tensiuni provenite din sarcinile mecanice preluate de structura metalică sudată).

Cunoscând mecanismul de formare și cauzele care conduc la apariția fisurării la rece, se pot recomanda o serie de măsuri pentru prevenirea acesteia:

- Preîncălzirea materialului de bază, în vederea reducerii vitezei de răcire, prevenind formarea martensitei în ZIT și acordând timp suficient hidrogenului difuzibil să părăsească materialul prin procese de difuzie;
- Reducerea stării de tensiuni, a concentratorilor de tensiune, a discontinuităților de sudare, printr-o dispunere corectă a mărimii, poziției și formei cusăturii sudate, respectiv a succesiunii de sudare;
- Utilizarea unor materiale adaos cu conținut redus de hidrogen, a unei atmosfere de protecție adecvată, compatibile cu metalul de bază;
- Utilizarea unor procedee de sudare adecvate cu calitatea metalului de bază, grosimea lui, etc.

Acum, poate după o introducere puțin mai lungă asupra aspectelor metalurgice privind susceptibilitatea la fisurare, ca urmare a ciclului termic de la sudare, putem reveni asupra conceptului de carbon echivalent și oportunitatea acestuia, de a putea servi ca și instrument în evaluarea sudabilității materialelor. Avem deja schițat un tablou general, în care vom putea înțelege mai bine relația prin care se exprimă conținutul de carbon echivalent, în raport cu sudabilitatea.

Din cele prezentate mai sus, s-a văzut că comportarea la sudare a oțelurilor carbon, depinde de concentrația de carbon din baia de sudare. Pe de altă parte, și caracteristicile mecanice de rezistență ale materialelor, depind de asemenea de conținutul de carbon. Ne aflăm într-o situație conflictuală, prin care, pe de o parte avem limitări în ceea ce privește conținutul de carbon din material, pentru a avea o comportare la sudare adecvată (sudabilitate bună), iar pe de altă parte, trebuie să avem un conținut de carbon ridicat, pentru a obține caracteristici de rezistență superioare, necesare în aplicațiile structurale.



Se consideră că un oțel carbon sau slab aliat este în **limita de sudabilitate**, dacă duritatea maximă în ZIT este de 350HV10, ceea ce corespunde unui oțel cu 0,22% C și o structură în care se găsește martensită în proporție de 50%.

În cazul sudării oțelurilor carbon și slab aliate, putem defini sudabilitatea în termeni de valori măsurate pentru **duritatea Vickers sub cordon**, adică în ZIT.

Această definiție poate fi interpretată și în felul următor. Se consideră că oțelurile carbon au o comportare la sudare corespunzătoare, dacă au **un conținut de carbon sub 0,22%**. Problema care apare însă, este faptul că oțelurile mai au în compoziția lor chimică și alte elemente însoțitoare, dar și elemente de aliere, care în mod evident afectează sudabilitatea oțelului. Dintre elementele însoțitoare ale oțelurilor, s-a văzut influența pe care o exercită sulfurul și fosforul asupra sudabilității acestora. Foarte pe scurt, vom prezenta în continuare influența altor elemente, frecvent întâlnite în compoziția oțelurilor sudabile:

- **Siliciul** este un element cu efect dezoxidant și influențează mai puțin caracteristicile mecanice de rezistență. La elaborarea oțelurilor, se mai adaugă și pentru calmare. Oțelurile cu până la 0,1% Si, se numesc oțeluri necalmate și au zone macroscopice puternice de segregare, conținutul de P și S este mai ridicat, ceea ce creează probleme la sudare. Oțelurile cu concentrații de Si cuprinse între 0,1 – 0,8% sunt semicalmate și nu prezintă zone de segregare, fapt pentru care au o bună comportare la sudare. Oțelurile cu un conținut de Si mai mare de 0,8%, manifestă un fenomen de fragilizare și sudabilitatea acestora scade ca urmare a acestui fenomen.
- **Azotul** este asociat cu fenomenul de durificare prin precipitare (îmbătrânire). Efectul azotului poate fi redus prin aliere cu aluminiu, care are un efect dezoxidant.
- **Aluminiul** se adaugă pentru dezoxidare, dar și pentru controlul granulației. În combinație cu azotul formează nitruți, care acționează ca și stabilizator pentru creșterea grăuntelui de austenită la supraîncălzire, incluziunile de Al_2O_3 sau nitruții formate, acționând ca și centre de nucleație pentru transformările secundare la răcire. Prin tratamente termice de normalizare după sudare, se obțin structuri cu granulație fină și caracteristici mecanice superioare (Al trebuie să fie cuprins între 0,02 și 0,1 % conform DIN EN 10020).
- **Cuprul** îmbunătățește rezistența oțelului la coroziune atmosferică, dacă se găsește în concentrații de 0,15% până la 0,2%.
- **Nb, V sau Ti** se adaugă ca elemente de microaliere, pentru controlul și rafinarea microstructurii în cusătura sudată.

- **Manganul** se adaugă în oțeluri pentru a compensa efectul negativ al sulfului. Se formează sulfura de mangan MnS, care previne formarea FeS cu punct de topire scăzut (1190°C) și astfel, se reduce riscul de fisurare la cald. Oțelurile structurale de construcții conțin Mn în proporții de 0,4÷0,6% Mn, iar materialele adaos de sudare conțin cca. 1÷1,5% Mn. Manganul are și rol de dezoxidant, iar dizolvat în soluția solidă de ferită conduce la creșterea proprietăților de rezistență mecanică. La grosimi de peste 20 mm, piesele trebuie pre-încălzite înainte de sudare, la temperaturi ce pot fi calculate conform unor diagrame sau relații disponibile în literatură.
- **Fosforul** se dizolvă în oțel în cantități foarte mici, excesul de fosfor precipitând sub forma de Fe₃P, care precipită în centrul cusăturii sudate, odată cu ultimele cantități de fază lichidă prezente între limitele de grăunți. Fosforul afectează negativ reziliența materialului, motiv pentru care, trebuie limitată concentrația lui în oțeluri, la valori foarte mici, uzual între 0,02% și 0,035%.
- **Sulful** se dizolvă în cantități mici în oțel și adesea poate fi considerat insolubil. Împreună cu fierul și oxigenul, acesta formează eutectice cu temperatură de topire joasă, care în cusătura sudată la cristalizare poate conduce la formarea de fisuri la cald (fragilitate la roșu). Sulful are un puternic efect de segregare la oțelurile necalmate și se concentrează în centrul cusăturii. Din această cauză, concentrația de sulf trebuie menținută în limite foarte joase ($S < 0,03\%$), pentru a avea o sudabilitate corespunzătoare. În concentrații mai mari, chiar dacă în structură apare legat sub formă de MnS, în cazul oțelurilor laminate poate conduce la fenomene de destrămarea lamelară după sudare.
- **Oxigenul** se dizolvă în oțel până la cca. 0,003% și manifestă un efect de fragilizare. Apare sub formă de incluziuni nemetalice (oxizi), care în concentrații ridicate reduc foarte mult proprietățile de rezistență ale oțelului. În concentrații reduse, incluziunile nemetalice pot avea un rol pozitiv în procesul de germinare din baia de sudare, contribuind la rafinarea microstructurii. Gradul de calmare a oțelului, este dat de concentrația de elemente dezoxidante: Si, Al și Mn.
- **Hidrogenul** conduce la fragilizarea oțelului. La temperatura camerei, doar 0,0004 ml H₂/100g de fier este solubil. Electrozii înveliți bazici pot asigura un conținut redus de hidrogen difuzibil, respectiv sub 3-5 ml/100 g de metal depus, dacă sunt corect calcinați înainte de sudare. Fisurilor induse de hidrogen sunt sub formă de ochi de pește, exfolieri, microfisuri, iar la oțelurile cu limită de curgere mică, fisurile de hidrogen sunt localizate în ZIT (sau sub cordon), iar la cele cu limită de curgere ridicată în cusătura sudată. Factorii esențiali la acest mecanism de fisurare sunt concentrația de hidrogen difuzibil, microstructura martensitică și starea de tensiuni.

Prin urmare, devine cât se poate de evident, necesitatea evaluării influenței acestor elemente chimice, asupra sudabilității oțelurilor. Acest deziderat este realizat prin introducerea unor relații de calcul, care în baza a numeroase cercetări efectuate în timp, au condus la o serie de relații empirice obținute în baza corelării dintre compoziție chimică și caracteristicile mecanice de rezistență sau microstructură. Cu acestea, considerăm că suntem deja pregătiți pentru introducerea relației de carbon echivalent, având o imagine de ansamblu a factorilor implicați în evaluarea sudabilității.

Relația de calcul pentru conținutul de carbon echivalent (relația 6.2), a fost dezvoltată original pentru a cuantifica compoziția oțelului printr-un număr, care să ofere o imagine asupra nivelului echivalent de călibilitate. Adică altfel spus, să putem analiza comparativ călibilitatea oțelurilor, în funcție de diferite compoziții chimice. Această expresie a fost dezvoltată ulterior, pentru a putea cuantifica influența compoziției chimice a oțelului, asupra susceptibilității de fisurare la rece, sau a fisurării asistate de hidrogen.

Pornind de la valoarea durtății măsurate în cordon și ZIT, se pot obține informații privind rezistența la tracțiune sau tenacitate, pe baza unor relații de proporționalitate [84].

$$CE_{IIW} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \quad (6.2)$$

Relația 6.2 a fost adoptată în anul 1967, de Institutul Internațional de Sudură (IIW), ca bază de calcul pentru aprecierea sudabilității oțelurilor carbon uzuale sau a oțelurilor C-Mn. În decursul timpului, relația a fost modificată, prin adăugarea unor termeni suplimentari, modificându-se și factorii de pondere. Cele mai răspândite variante de calcul pentru carbonul echivalent, sunt prezentate în relațiile: 6.3 pentru P_{CM} , 6.4 pentru CE_q și 6.5 pentru CEN . Fiecare relație, are un domeniu de aplicabilitate determinat de compoziția oțelurilor, luând în considerare și influența unor elemente compoziționale aflate în concentrații reduse, dar cu impact puternic asupra sudabilității.

$$P_{CM} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn + Cu + Cr}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B \quad (6.3)$$

Relația 6.3 pentru P_{CM} a fost dezvoltată de Ito și Bessyo din Japonia [84], pentru oțelurile cu conținut redus de carbon sau slab aliate, a căror conținut de carbon este mai mic de 0,11%. O relație asemănătoare a fost propusă de Düren, prin formula pentru CE_q , relația 6.4.

$$CE_q = C + \frac{Si}{25} + \frac{Mn + Cu}{16} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cr}{10} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} \quad (6.4)$$

Relația 6.5 pentru CEN , este aplicabilă pentru o gamă mai largă de oțeluri, atât pentru concentrații mici, cât și la concentrații mari de carbon, utilizând în formula acestuia o funcție hiperbolică, prin coeficientul $A(C)$ calculat pe baza concentrației de carbon [84].

$$CEN = C + A(C) \times \left(\frac{Si}{24} + \frac{Mn}{6} + \frac{Cu}{15} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr + Mo + Nb + V}{5} + 5B \right) \quad (6.5)$$

unde, coeficientul $A(C) = 0,75 + 0,25 \cdot \tanh\{20(C - 0,12)\}$

S-a demonstrat că între coeficientul P_{CM} și CEN în cazul oțelurilor structurale slab aliate, de tipul Ni-Cr-Mo și oțelurile carbon cu concentrație mai mică de 0,17%, există o corelație liniară, exprimată prin relația 6.5. La concentrații de carbon peste 0,17% există o corelație mai bună între conținutul de carbon exprimat de relațiile CEN și CE_{IIW} , relația 6.6.

$$CEN = 2P_{CM} - 0,092 \quad (C < 0,17\%) \quad (6.6)$$

$$CEN = CE_{IIW} + 0,012 \quad (C > 0,17\%)$$

Trebuie remarcat faptul că, indiferent de relația considerată din literatură pentru conținutul de carbon echivalent, sunt luate în considerare pentru evaluarea sudabilității doar informațiile legate de compoziția chimică, fără a considera aspecte care țin cont de ciclul termic la sudare, vitezele de răcire sau structura anterioară a materialului. Pe cale de consecință, aprecierea sudabilității exclusiv pe baza compoziției chimice, în baza unui model simplificat care nu conține influența tuturor elementelor chimice (ex. N_2 sau Al, O_2 , Ti care joacă un rol extrem de important în procesele de cristalizare etc.) va conține o marjă de eroare ce poate fi semnificativă.

Totuși, un model matematic complex care să cuprindă totalitatea acestor influențe și cu aplicabilitate largă pentru materialele evaluate, este extrem de dificil de realizat și de aplicat. Asumând aceste erori în aprecierea sudabilității, formulele de calcul pentru carbonul echivalent rămân un instrument simplu, rapid de aplicat și cu o acuratețe relativ bună în ceea ce privește evaluarea sudabilității, prin prisma călibilității materialului.

În funcție de conținutul de carbon echivalent calculat, se pot face următoarele recomandări cu caracter general:

- Pentru $CE < 0,45\%$, nu este nevoie de preîncălzirea pieselor înainte de sudare.
- Pentru $0,45 < CE < 0,7\%$, aplicarea preîncălzirii pieselor la temperaturi cuprinse între 200 și 500°C, în funcție de condițiile specifice: calitate și grosime material, proprietățile termofizice ale acestuia, nivel bridare construcție sudată, etc.
- Pentru $CE > 0,7\%$, sudabilitatea este foarte scăzută, normal nu se sudează.

Conținutul de carbon echivalent se poate corecta cu un factor ce ține seama de grosimea pieselor sudate, deoarece aceasta afectează negativ susceptibilitatea la fisurare. Avem astfel, următoarea relație corectată, pentru conținutul de carbon echivalent:

$$CCE = CE + 0.00425t \text{ (\%)} \quad (6.6)$$

unde t - reprezintă grosimea piesei sudate în mm.

Efectul preîncălzirii asupra sudabilității este unul pozitiv, deoarece, prin încălzirea locală sau integrală a construcției sudate, se micșorează vitezele de răcire și astfel la materialele cu călibilitate mai ridicată, se evită fragilizarea cusăturii sudate și a materialului din ZIT.

Viteza de răcire în intervalul 800÷500°C este extrem de importantă la sudarea oțelurilor, deoarece trebuie să fie inferioară vitezei critice de călire. Tensiunile datorate contracției la solidificare a băii de sudare și răcirea materialului învecinat cusăturii sudate, se suprapun peste tensiunile datorate transformărilor structurale, care au loc la răcirea austenitei. La acestea, se pot adăuga tensiunile datorate unor concentratori de tensiune datorat variațiilor de grosime sau secțiuni a materialului, orificii etc. Efectul cumulativ al tensiunilor din material, combinat cu efectul indus de prezența unor constituenți fragili din microstructură, măresc semnificativ riscul de fisurare.

6.3 Temperatura de preîncălzire la sudare

Foarte frecvent, această operație tehnologică este o condiție esențială pentru asigurarea sudabilității materialelor sudate. Preîncălzirea poate fi necesară și la tăierea materialelor, nu numai la sudarea acestora. Inginerul coordonator responsabil cu sudarea, trebuie să țină cont și de condițiile în care se execută lucrarea. Nu este indiferent dacă lucrarea se execută pe durata verii, sau pe durata iernii, când temperatura în hala de producție poate coborî sub 5°C, sau chiar la valori negative.

Pentru determinarea temperaturii de preîncălzire, se poate utiliza una dintre metodele de mai jos, în figura 6.6 fiind prezentate și normele aferente, care iau în considerare următorii factori [86]:

- Conținutul de carbon echivalent;
- Grosimea materialului și tipul îmbinării (2D sau 3D regim transfer termic);
- Procedul și parametrii de sudare (energia liniară la sudare);
- Tensiunile de contracție și cele datorate transformărilor structurale;
- Conținutul de hidrogen difuzibil din metalul depus.

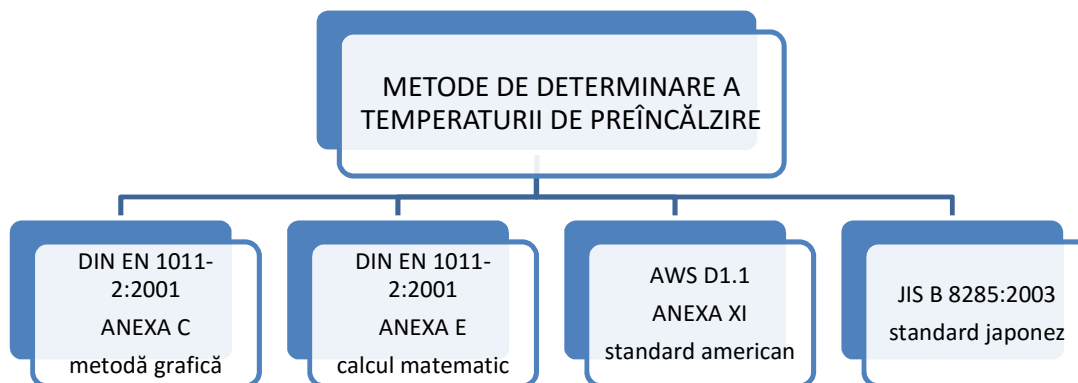
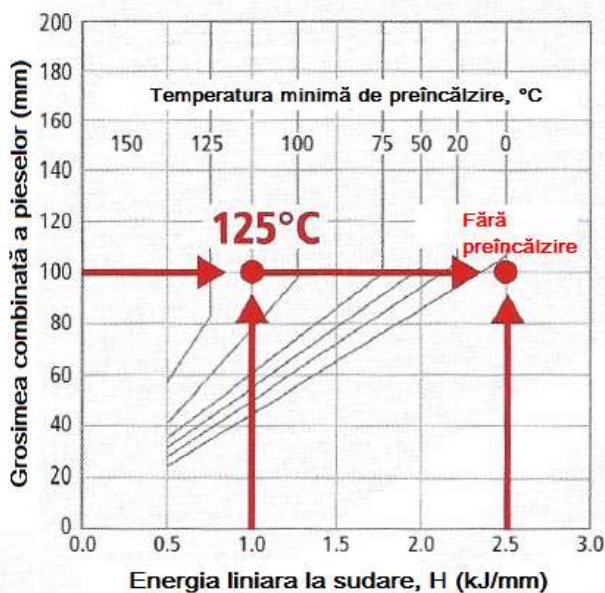


Fig. 6.6 Metode recomandate de calcul a temperaturii de preîncălzire la sudarea oțelurilor carbon.

Tabel 6.1 Clasa de hidrogen [86].

Conținut de hidrogen difuzibil ml/100 gr. metal depus	Clasa de hidrogen
> 15	A
$10 \leq 15$	B
$5 < 10$	C
$3 \leq 5$	D
≤ 3	E

Varianta din Anexa C a standardului DIN EN 1011-2:2001 se bazează pe prelucrarea statistică a unor date obținute în special la sudarea oțelurilor C-Mn și au un caracter orientativ. Unii experți germani, consideră că această metodă nu se poate aplica la sudarea oțelurilor structurale S355 sau a celor cu granulație fină, ce au limita de curgere $R_{p0,2} > 355$ MPa [86]. Conținutul de carbon echivalent se calculează cu ajutorul relației CE_{IIW} relația 6.2, iar în funcție de conținutul de hidrogen difuzibil din metalul depus, se alege grupa corespunzătoare din cele 5 variante: A, B, C, D sau E, conform tabelului 6.1.



SCALE	A	B	C	D	E
Conținut carbon echivalent (%)	0.41	0.43	0.45	0.50	0.52

Influența transferului termic din material se consideră simplificată, respectiv viteza de răcire a îmbinării se evaluează în funcție de grosimea elementelor sudate și de tipul îmbinării: cap la cap sau în T. Grosimea combinată a pieselor se face prin însumarea grosimilor individuale ale pieselor componente. În cazul sudării îmbinărilor în T, dacă se sudează simultan cele două suduri în colț interior, atunci grosimea combinată se obține prin media aritmetică a grosimilor componente.

Temperatura de preîncălzire rezultă din intersecția coordonatelor pentru grosimea combinată și energia liniară la sudare, conform figurii 6.7.

Fig. 6.7. Principiul determinării temperaturii de preîncălzire la sudarea oțelurilor C-Mn, prin metoda grafică, conform DIN EN 1011-2:2001 Anexa C [86].

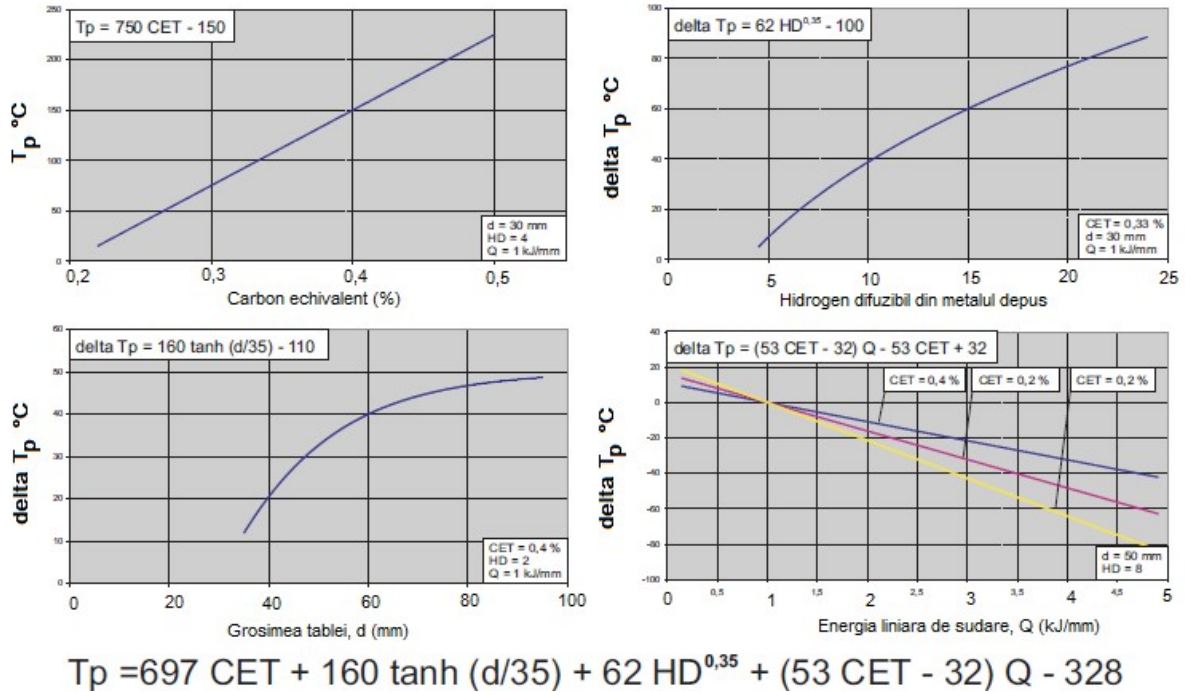


Fig. 6.8 Principiul determinării temperaturii de preîncălzire la sudarea oțelurilor prin calcul matematic, conform DIN EN 1011-2:2001, Anexa E [86].

unde CET se calculează cu relația de mai jos, (6.7):

$$CET = C + \frac{Mn + Mo}{10} + \frac{Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{40}$$

Metoda de calcul a T_p conform DIN EN 1011-2:2001, Anexa E

Metoda se poate aplica oțelurilor din grupa 1-4, conform clasificării CR ISO 15608 a materialelor metalice sudabile. Această variantă se bazează pe datele experimentale și studiul susceptibilității oțelurilor, la fisurare la rece. Față de prima variantă, conținutul de carbon se calculează cu o relație diferită, respectiv cu relația 6.7, iar temperatura de preîncălzire T_p se calculează cu relația din figura 6.8, unde s-au considerat: conținutul de carbon echivalent CET , (%), grosimea materialului d (mm), conținutul de hidrogen difuzibil HD (ml/100 gr.) și energia liniară la sudare Q (kJ/mm) [86].

Metoda de calcul a T_p conform AWS D1.1, ANEXA XI

Metoda de determinare a temperaturii de preîncălzire T_p , pornește de la calculul conținutului de carbon P_{CM} cu ajutorul relației 6.3. Metoda este recomandată în cazul în care vitezele de răcire sunt mari sau pentru sudarea stratului de rădăcină. Se determină în continuare susceptibilitatea de fisurare la rece indusă de hidrogen, conform valorilor prezentate în tabelul 6.2.

Tab. 6.2 Indexul susceptibilității de fisurare la rece, AWS D1.1 [86].

Index de susceptibilitate	$P_{CM} < 0,18$	$P_{CM} < 0,23$	$P_{CM} < 0,28$	$P_{CM} < 0,33$	$P_{CM} < 0,38$
H1 (5 ml/100 gr. metal)	A	B	C	D	E
H2 (10 ml/100 gr. metal)	B	C	D	E	F
H3 (30 ml/100 gr. metal)	C	D	E	F	G

Temperatura de preîncălzire se determină în funcție de nivelul rezidual al tensiunilor la sudare, pentru care se consideră trei variante, în funcție și de posibilitatea deplasării libere a elementelor sudate (nivelul de constrângere), datorită contracției termice sau la solidificare, tabelul 6.3.

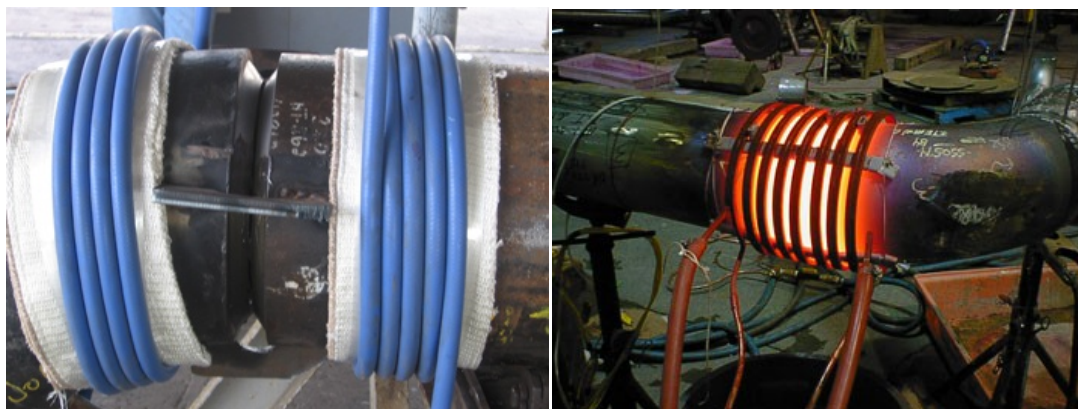


Fig. 6.9 Preîncălzirea prin inducție a unor țevi, înainte de sudare.

Tab. 6.3 Valori recomandate pentru temperatura de preîncălzire, conform AWS D1.1 AnexaXI.

Nivelul de constrângere	Grosimea [mm]	Temperatura de preîncălzire, [°C]						
		A	B	C	D	E	F	G
SCĂZUT Există un grad rezonabil de libertate a structurii în raport cu contracțiile termice	< 10	< 20	< 20	< 20	< 20	60	150	150
	10 - 20	< 20	< 20	20	60	100	140	150
	20 - 38	< 20	< 20	20	80	110	140	150
	38 - 75	20	20	40	95	120	140	150
	> 75	20	20	40	95	120	140	150
MEDIU Există o libertate limitată a elementelor sudate, deja fixate în construcția sudată	< 10	< 20	< 20	< 20	< 20	70	140	160
	10 - 20	< 20	< 20	20	80	115	145	160
	20 - 38	20	20	75	110	140	150	160
	38 - 75	20	80	110	130	150	150	160
	> 75	95	120	140	150	160	160	160
ÎNALT Foarte redusă sau nu există libertate de deplasare a elementelor sudate. (reparații, sau materiale groase)	< 10	< 20	< 20	20	40	110	150	160
	10 - 20	< 20	20	35	105	140	160	160
	20 - 38	20	85	115	140	150	160	160
	38 - 75	115	130	150	150	160	160	160
	> 75	115	130	150	150	160	160	160

În figura 6.10 este prezentată o instalație de preîncălzire cu inducție, care poate fi utilizată și la tratamentele termice post-sudare. Există sisteme cu pături electrice, ce pot asigura preîncălzirea unor structuri metalice mari, rezervoare, recipiente sub presiune etc. La aceste sisteme, unitatea de putere este dotată cu controlere ce monitorizează temperatura măsurată în mai multe puncte, cu termocuple, asigurând o încălzire uniformă și precisă, conform ciclogramei de lucru. În cazul instalațiilor de putere redusă, răcirea conductorilor de inducție se face cu apă sau cu aer.

În cazul sudării unor elemente metalice cu grosime ridicată, cusătura se realizează din mai multe straturi, fiecare strat putând să conțină mai multe rânduri. În aceste situații, trebuie monitorizată și menținută în parametrii, temperatura între treceri. Fiecare rând depus, îndeplinește în această situație, un tratament termic pentru straturile depuse anterior.



Fig. 6.10 Sistem industrial de preîncălzire sau tratamente termice post-sudare cu inducție [87].

În concluzie, stabilirea temperaturii de preîncălzire revine inginerului sudor, care trebuie să ia în considerare la stabilirea tehnologiei de sudare, toate aspectele importante care pot afecta sudabilitatea și integritatea construcției sudate. Toți parametrii și condițiile de sudare, pregătirea, forma rostului de sudare, materialul adaos, etc. se trec în fișa WPS¹, pentru a asigura sudorului toate informațiile necesare executării lucrării. În plus, aceste documente constituie date importante pentru eventuale expertize ulterioare, verificări, calculul unor indicatori tehnico-economici sau vor asigura informații utile, în baza cărora se va putea îmbunătăți tehnologia de sudare.



Fig. 6.11 Preîncălzirea unor structuri metalice de gabarit ridicat.

¹ WPS - Welding Procedure Specification (lb.eng.)

În anumite situații, materialele care trebuie sudate, trebuie să prezinte proprietăți de rezistență ridicată, duritate, rezistență la abraziune și la impact prin șoc foarte bune. Dintre aceste situații, se pot aminti utilajele pentru prelucrarea primară și de pregătire a minereurilor, concasoare, mori, echipamente pentru minerit, dar și utilaje grele, precum: excavatoarele, buldozerele etc.

Aceste materiale trebuie să satisfacă condițiile de rezistență necesare funcționării utilajului, dar să prezinte în același timp și bune proprietăți de sudabilitate. Din această categorie de materiale, fac parte și oțelurile Hardox și Weldox [64]. În afara aplicațiilor amintite, din aceste materiale se execută și cazane sau o serie de instalații energetice, datorită proprietăților excelente de sudare, combinate cu caracteristicile de rezistență mecanică foarte ridicate. În figura 6.12 sunt indicate valorile temperaturii de preîncălzire înainte de sudare/tăiere termică, în funcție de grosimea pieselor sudate, cu o energie liniară la sudare, de 1,7 kJ/mm. Aceste materiale au la livrare o structură formată din martensită de revenire și trebuie monitorizată atent temperatura aferentă sudării dintre straturi, să nu depășească valorile maxime recomandate. Depășirea acestor valori, se va reflecta în scăderea caracteristicilor de rezistență, necesare în exploatarea utilajelor respective.

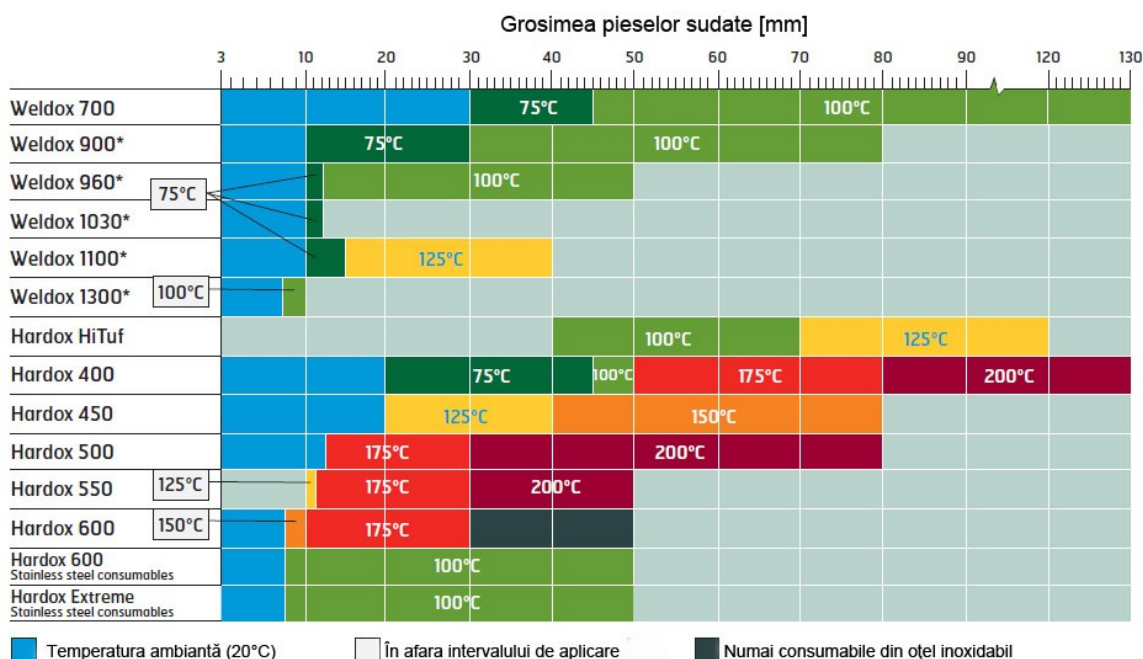


Fig. 6.12 Valorile minime ale temperaturilor de preîncălzire și a temperaturii maxime între straturi, la sudarea oțelurilor Hardox și Weldox, utilizate la construcția utilajelor grele [64].

7. TRATAMENTE TERMICE APLICATE PIESELOR SUDATE

Tratamentele termice sunt operații tehnologice realizate la o anumită temperatură și durată, constând în principiu într-o operație de încălzire, menținere și răcire cu viteză controlată a structurii metalice, cu scopul de a obține anumite caracteristici microstructurale în metalul de bază, ZIT și cusătura sudată. În mod evident, tratamentul termic aplicat structurilor sudate, contribuie la îmbunătățirea sudabilității materialelor utilizate, la atingerea criteriilor de rezistență mecanică și la creșterea siguranței în exploatare a structurii respective.

În raport cu suprapunerea ciclului termic de la sudare cu cel al tratamentului termic, există o primă clasificare a tratamentelor termice: tratamente termice anterioare, concomitente și ulterioare procesului de sudare.

7.1 Tratamente termice anterioare sudării

Tratamentele termice aplicate anterior operației de sudare au ca și obiectiv pregătirea metalului de bază (microstructură, mărime grăunți cristalini, tensiuni interne, segregatii chimice, comportare la coroziune etc.), pentru a obține o comportare favorabilă la sudare și aici ne referim în primul rând la ciclul termic de la sudare, figura 7.1.

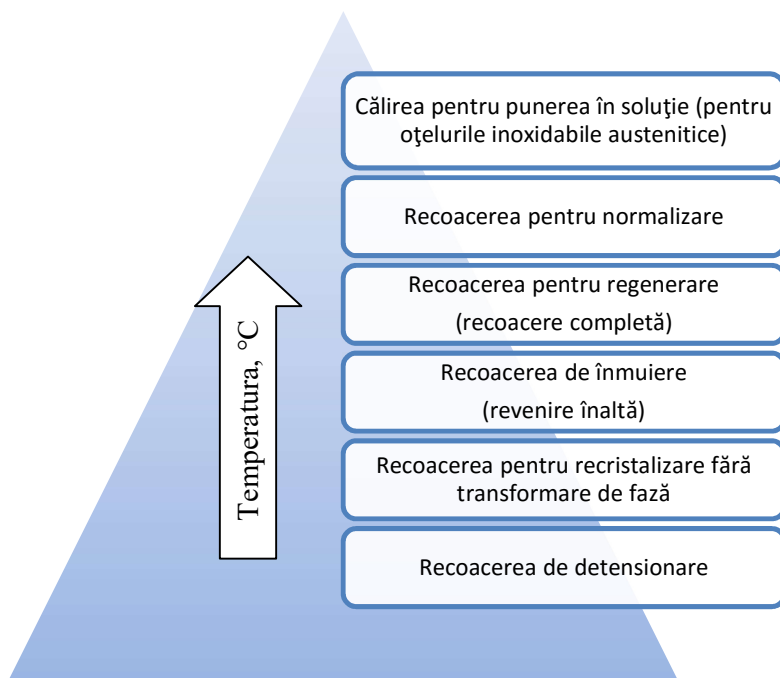


Fig. 7.1 Tratamente termice executate anterior operației de sudare.

7.1.1 Recoacerea pentru detensionare¹

Obiectivul principal al recoacerii de detensionare este eliminarea tensiunilor interne, rezultate în urma unor prelucrări tehnologice anterioare, inclusiv alte operații de sudare. Anumite zone ale materialului se deformează plastic, iar zonele învecinate cu acestea, rămân într-o stare de deformație elastică, în ansamblu, starea de tensiuni fiind în echilibru.

¹ Stress relief (lb.eng.)

Această stare de echilibru este însă una instabilă și prin urmare, la acțiunea unor procese noi ce introduc o stare de tensiuni suplimentară, acestea se combină cu cele preexistente în material și pot să conducă la efecte locale, precum: deformații plastice, fisurări sau chiar ruperea materialului. Odată cu creșterea temperaturii se micșorează limita de curgere a materialului, modulul de elasticitate și are loc o relaxare a materialului prin fluaj, acesta fiind de fapt mecanismul prin care tensiunile reziduale sunt eliminate. Prin recoacerea de detensionare materialul suferă mici deformări plastice, ca urmare a consumării stării de tensiuni anterioare, care este astfel neutralizată. Temperatura de încălzire la care se realizează detensionarea, în cazul structurilor sudate din oțeluri structurale este de $530\div 580^{\circ}\text{C}$, pentru piese deformate plastic la rece, este de $350\div 400^{\circ}\text{C}$, iar pentru piese tratate termic, între 150 și 200°C . Temperatura de încălzire nu poate depăși pragul critic A_{c1} , recoacerea de detensionare fiind un tratament subcritic, fără transformări de fază.

7.1.2 Recoacerea pentru recristalizare fără transformare de fază¹

Acest tratament, se aplică produselor prelucrate anterior prin deformare plastică la rece, caracterizate printr-un grad ridicat de ecrusare, densitate de dislocații mare, anizotropie ridicată a microstructurii, scăderea caracteristicilor de ductilitate și tenacitate, precum și a celor de rezistență la coroziune. Capacitatea de deformare plastică a metalului de bază este importantă la sudare, deoarece reduce riscul fisurării în zonele în care se acumulează tensiuni termice, ca urmare a contracțiilor ce au loc la solidificarea băii de sudare și la răcirea materialului. Temperatura de recristalizare fără transformare de fază, este situată sub punctul critic de transformare A_{c1} și se alege în funcție de compoziția chimică și gradul de deformare anterior. În cazul oțelurilor carbon de construcție, temperatura de recristalizare se situează în intervalul $680\div 700^{\circ}\text{C}$, iar pentru oțelurile C-Mn în intervalul $550\div 640^{\circ}\text{C}$.

7.1.3 Recoacerea de înmuiere² (revenire înaltă)

Tratamentul termic se aplică semifabricatelor din oțeluri aliate, ce prezintă în microstructură constituenți de călire precum martensita sau bainita și astfel prezintă un risc ridicat de fisurare la sudare. Pentru a reduce acest risc, piesele ce urmează a fi sudate se încălzesc la temperaturi sub punctul critic A_{c1} ($650\div 700^{\circ}\text{C}$), urmate de o menținere de câteva ore și pe urmă, de o răcire lentă. Durata lungă de menținere la temperatura subcritică, permite descompunerea martensitei prin procese de difuzie și coalescența carburilor în masa metalică, însoțite de scăderea durtății.

7.1.4 Recoacerea pentru regenerare³ (recoacere completă)

Tratamentul termic de regenerare, are ca și obiectiv creșterea proprietăților de plasticitate la nivelul maxim și reducerea tensiunilor reziduale la nivelul minim, ca urmare a procesării anterioare prin: turnare, deformare plastică, sudare sau chiar tratamente termice conduse incorect. Aceasta este o recoacere însoțită de transformări fazice, temperatura de încălzire fiind situată cu $30\div 50^{\circ}\text{C}$ peste punctul critic A_{c3} , pentru a obține o austenitizare completă a materialului. Răcirea se realizează foarte lent, în vederea obținerii unor structuri cât mai apropiate de cele de echilibru, figura 7.2 și 7.3. În cazul oțelurilor de construcție, timpul de menținere izotermă este proporțional cu grosimea pieselor, de cca. 1 h pentru fiecare 25 mm grosime. Pentru oțelurile austenitice sau aliajele neferoase care nu suferă transformări de fază, recoacerea completă implică încălzirea pieselor la o temperatură superioară temperaturii de recristalizare, unde structura cristalină se reface conform mecanismului de recristalizare.

¹ Tempering

² Annealing (lb.eng.)

³ Full Annealing (lb.eng.)

Cele trei stadii ale mecanismului de recrystalizare (figura 7.3), sunt:

- În primul stadiu de **restaurare sau relaxare**, au loc reducerea tensiunilor de ordinul I, II și parțial cele de ordinul III prin mecanisme de difuzie, respectiv datorită mobilității ridicate a atomilor, vacanțelor și dislocațiilor în rețeaua cristalină;
- În stadiul al doilea de **recrystalizare primară sau germinarea**, are loc un proces de formare a unor grăunți noi poliedrici care germinează la limitele grăunților deformați. Procesul este activat termic și de gradul de deformare a grăunților inițiali;
- În cel de-al treilea stadiu, se produce **creșterea grăunților cristalini** noi formați, pe măsură ce grăunții deformați se micșorează în dimensiuni, în favoarea noii structuri formate.

Temperatura și durata de menținere trebuie selectate cu atenție, deoarece depășirea valorilor optime, conduce la creșterea exagerată a grăunților, având efecte negative asupra tenacității și rezistenței la rupere la tracțiune, R_m .

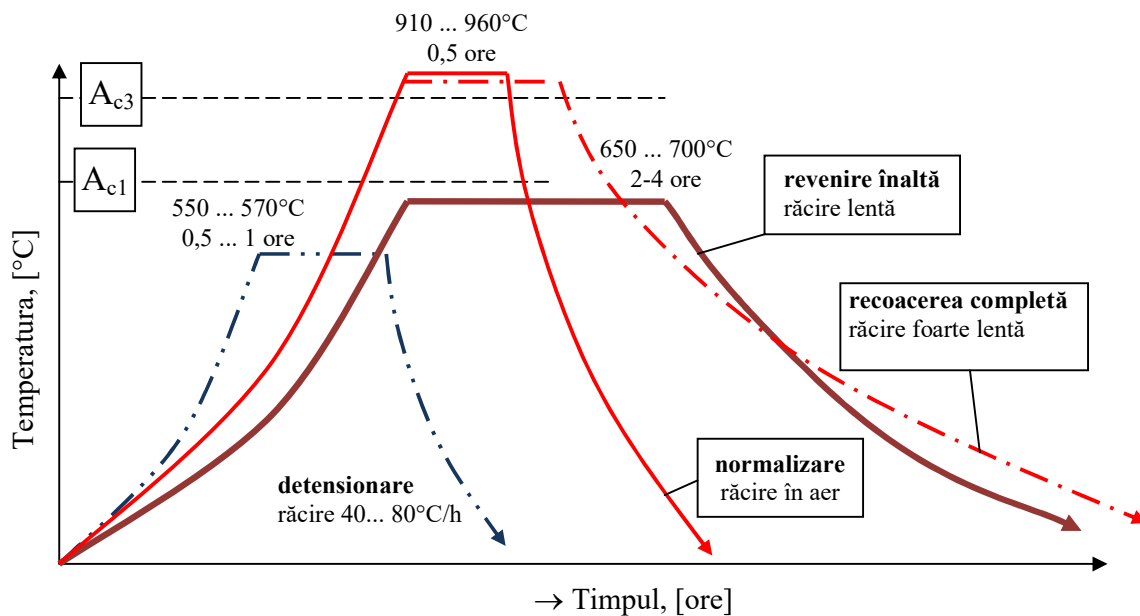


Fig. 7.2 Schema tratamentelor termice aplicate oțelurilor carbon de construcții, anterior sudării.

7.1.5 Recoacerea de normalizare

Acest tratament se execută cu scopul obținerii unei microstructuri cu granulație fină, în vederea îmbunătățirii proprietăților de rezistență mecanice și se aplică în general:

- Oțelurilor după turnare, pentru eliminarea structurii Widmannstatten;
- După deformare plastică la cald (forjare, laminare, matrițare etc.), pentru eliminarea structurilor orientate în benzi;
- După sudare, pentru eliminarea structurii grosolane din cusătură și din ZIT;
- După tratamente termice incorect executate.

Tratamentul termic de normalizare constă într-o încălzire peste punctul de transformare A_{c3} , urmată de o menținere scurtă și o răcire în aer, figura 7.2. Practic, este un caz particular al recoacerii complete, diferența constând în durata de menținere și viteza de răcire. Viteza de răcire fiind mai ridicată, se obține o perlită mai fină cu caracteristici mecanice de rezistență mai ridicate. Structura grosolană a grăunților cristalini anterior operației de sudare, favorizează creșterea grăunțului de austenită în ZIT, ceea ce va determina o creștere a călibilității materialului pe zona respectivă.

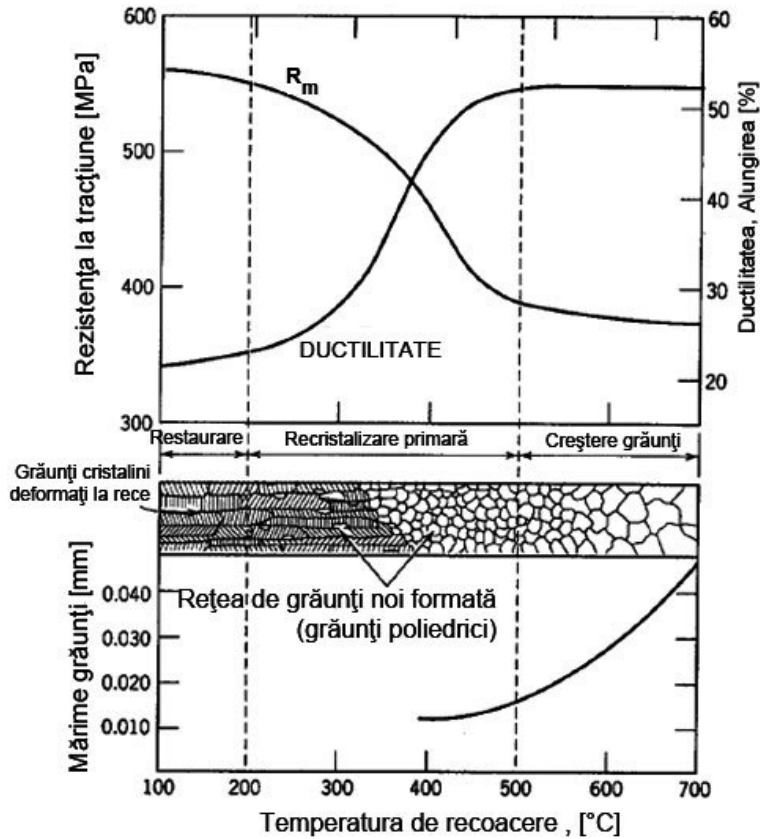
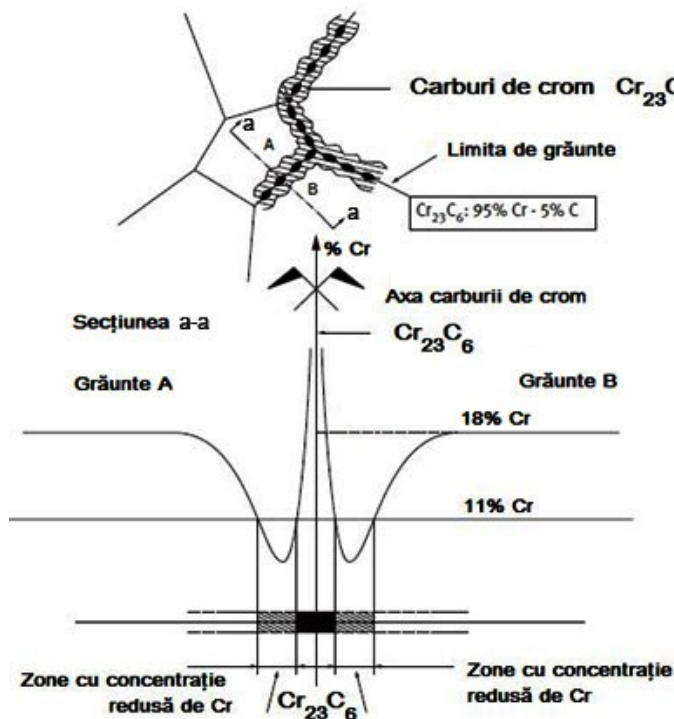


Fig. 7.3 Stadiile recoacerii de regenerare (completă).

7.1.6 Călirea pentru punerea în soluție (pentru oțelurile inoxidabile austenitice)



Datorită proprietăților excelente de rezistență la coroziune chimică pe care le dețin, oțelurile inoxidabile austenitice se folosesc în foarte multe aplicații din industria chimică, petrochimică ș.a. Rezistența la coroziune chimică se datorează în principal cromului, a cărui concentrație nu trebuie să scadă sub valoarea de 12%, pentru a menține această proprietate. Ca urmare a ciclului termic de sudare, în funcție de conținutul de carbon, apare un fenomen de fragilizare și de reducere a rezistenței la coroziune a acestor oțeluri, în zona limitelor de grăunți, fenomen ilustrat în figura 7.4.

Fig. 7.4 Distribuția carburilor la limita de grăunte, în cazul fragilizării oțelurilor inoxidabile, după [88].

Oțelurile austenitice Fe-Cr-Ni la temperaturi cuprinse între 500 și 800°C, suferă un fenomen de fragilizare, ca urmare a formării de carburi de crom în zona limitelor de grăunți, figura 7.4. Concentrația de crom în carbura $Cr_{23}C_6$ este de 95%, ceea ce determină reducerea conținutului de crom din zonele imediat învecinate, la valori inferioare concentrației de 12%. Sub acest prag de concentrație a cromului, rezistența la coroziune nu mai este asigurată și începe un fenomen de coroziune chimică, localizat la limita de grăunte. Acesta, va compromite în timp, structura sudată, figura 7.5.

Pentru evitarea acestui fenomen de fragilizare, trebuie evitată contaminarea cu carbon a băii de sudare, alegerea unor materiale adaos cu conținut de carbon foarte scăzut ($C < 0,03\%$) și adăugarea în compoziția materialului adaos a elementelor stabilizatoare, precum Ti și Nb. Dacă are loc un fenomen de fragilizare a oțelurilor austenitice, tratamentul termic pentru înlăturarea acestuia constă într-o încălzire la 1050°C (700÷800°C în cazul oțelurilor feritice) urmate de o răcire rapidă.

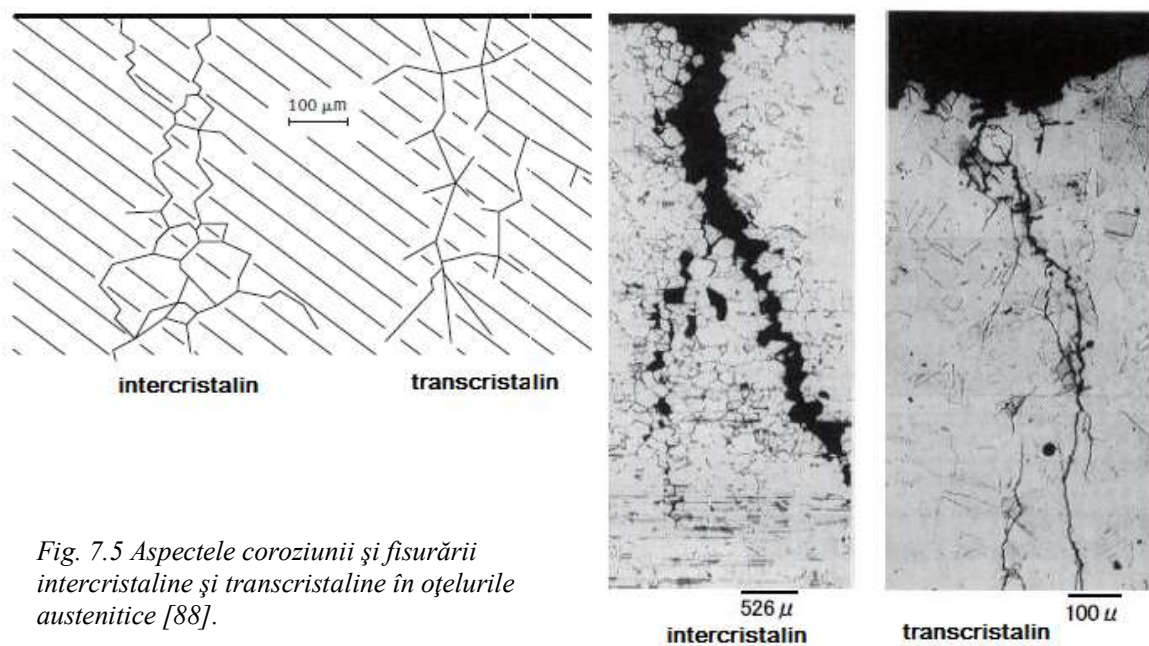


Fig. 7.5 Aspectele coroziunii și fisurării intercristaline și transcristaline în oțelurile austenitice [88].

În concluzie, călirea de punere în soluție a oțelurilor austenitice asigură rezistența maximă față de fenomenul de coroziune intercristalină, ca urmare a precipitării carburilor de crom la limita de grăunte. La temperaturi ridicate, datorită afinității mai mari a titanului sau niobului față de carbon, în raport cu cromul, se va forma TiC sau NbC , ceea ce va permite cromului să rămână dizolvat în soluția solidă de austenită și astfel să asigure rezistența la coroziune.

7.2 Tratamente termice concomitente cu sudarea

Operația de preîncălzire este necesară pentru prevenirea fenomenelor de fisurare, ca urmare a ciclului termic la sudare, dar are și o influență pozitivă asupra creșterii adâncimii de pătrundere la sudare și asupra stării de tensiuni remanente, acestea fiind mai reduse. Preîncălzirea materialului se poate combina cu postîncălzirea pentru a controla vitezele de răcire, difuzia hidrogenului din cusătură și ZIT, precum și starea de tensiuni remanente și deformații, figura 7.6. Aspectele legate de operația de preîncălzire au fost prezentate în cadrul capitolului 6, subcapitolul 6.3. Prin urmare, nu se va mai insista asupra acestor fenomene, însă se vor preciza câteva aspecte legate de operația de postîncălzire și sudarea în mai multe straturi.

În cazul sudării multistrat, fiecare rând/strat de sudură depus, realizează un tratament termic pentru rândurile anterioare, ca urmare a căldurii preluate de la fiecare trecere. În acest fel, se asigură o răcire mai lentă a piesei sudate, evitându-se atingerea vitezei critice de călire. La procedeele de sudare cu energie liniară ridicată (ex. sudarea sub strat de flux), cantitatea de căldură preluată de materialul de bază este considerabilă, având un efect de preîncălzire a materialului la sudarea multistrat. Trebuie avut grijă însă, ca temperatura de sudare între straturi să nu depășească anumite valori limită în funcție de material, pentru a nu afecta structura materialului de bază, respectiv caracteristicile de rezistență mecanică ale acestuia.

De exemplu, la sudarea de încărcare a bandajelor de la roțile de tramvai, o temperatură prea ridicată la sudarea între straturi, va conduce la o structură grosolană în metalul depus, respectiv la o scădere a durității. Duritatea este o proprietate importantă în acest caz, deoarece roțile de tramvai sunt sollicitate în exploatare la presiune de contact și uzare abrazivă. O duritate insuficientă în metalul depus la încărcarea prin sudare, va conferi o rezistență la uzură insuficientă, ridicând costurile de întreținere a parcului de tramvaie. Pe de altă parte, o duritate prea ridicată, va conduce la uzura prematură a căii de rulare și va mări riscul de fisurare în materialul depus. În concluzie, pe baza acestui exemplu, se poate spune că tehnologia de sudare, parametrii de sudare trebuie selectați cu atenție, pentru a obține un raport optim între caracteristicile de rezistență mecanică necesare ale materialului depus, sudabilitatea materialelor, costurile de fabricație și de exploatare a structurilor metalice.

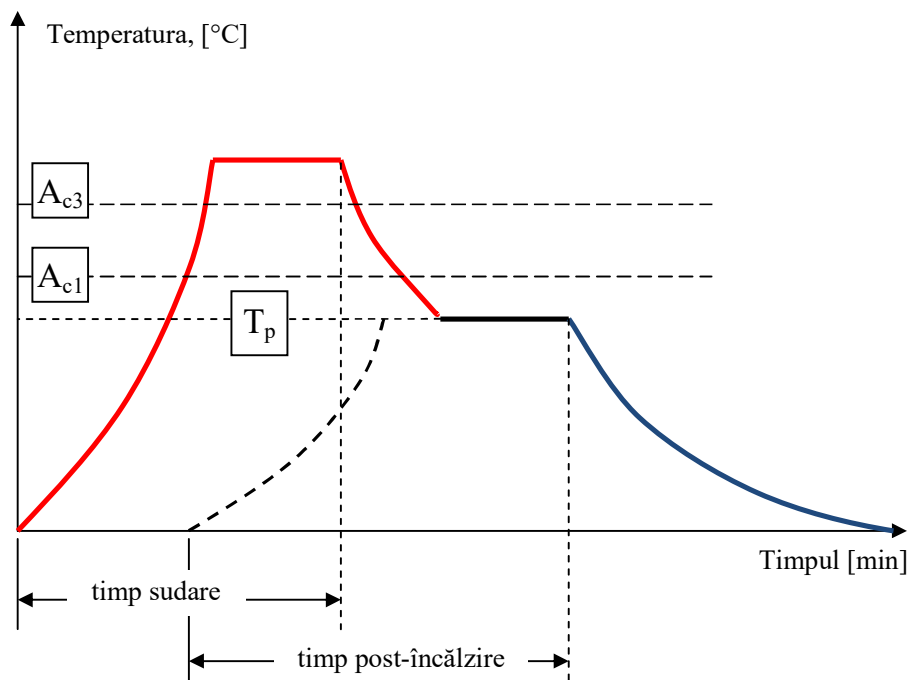


Fig. 7.6 Procesul de sudare combinat cu postîncălzirea.

În anumite situații, când viteza de răcire a pieselor sudate poate conduce la pericolul de fisurare, se poate aplica un tratament termic simultan cu operația de sudare, conform schemei prezentată în figura 7.6. Menținerea izotermă a pieselor sudate la temperatura T_p , prin întreruperea răcirii normale favorizează difuzia hidrogenului difuzibil, micșorând riscul de fisurare la rece. Deasemenea, prin uniformizarea câmpului termic în structura sudată, se reduce starea de tensiuni sau nivelul deformațiilor post-sudare. Temperatura de postîncălzire, poate fi egală cu cea de preîncălzire sau cu cea minimă necesară, pentru asigurarea difuziei hidrogenului.

7.3 Tratamente termice post-sudare

Aceste tratamente termice se aplică structurilor metalice sudate cu scopul de a îmbunătăți comportarea lor în exploatare, avându-se în vedere următoarele aspecte:

- Eliminarea stării de tensiuni reziduale;
- Micșorarea durității în metalul depus și în ZIT;
- Creșterea tenacității metalului depus;
- Dehidrogenarea și eliminarea riscului de fisurare la rece;
- Reducerea pericolului de coroziune fisurantă sub tensiune;
- Asigurarea stabilității dimensionale a structurilor sudate la prelucrările mecanice ulterioare.

Tratamentele termice post sudare reprezintă o condiție esențială pentru asigurarea sudabilității materialelor cu limită de curgere ridicată, utilizate în aplicații precum: construcția recipientilor sub presiune, rețele de conducte, generatoare de aburi, schimbătoare de căldură, dar și în construcția de utilaje grele, autoturisme etc. Tratamentul termic poate fi aplicat local sau întregii structuri sudate. Tensiunile reziduale sunt inerente proceselor de sudare prin topire, datorită dilatărilor și contracțiilor, care se manifestă în material pe durata ciclului termic de sudare. O altă sursă de tensiuni reziduale poate proveni de la etapele de procesare anterioară a materialelor metalice, ca de exemplu, cele obținute prin deformare plastică la rece. Anumite elemente metalice sudate trebuie să fie prelucrate mecanic după sudare, pentru a asigura poziția relativă a componentelor din subansamblurile din care fac parte.

Adeseori, toleranța și precizia de asamblare constituie un factor important în buna funcționare a acestor subansamble. Ne putem gândi aici, de exemplu, la diverse organe de mașini precum arbori, bușe, roți dințate etc. care se montează pe structuri realizate din elemente sudate, ceea ce ridică o serie de dificultăți privind asigurarea toleranțelor prescrise la fabricație. Eliminarea tensiunilor remanente din structura metalică, îmbunătățește stabilitatea dimensională, tenacitatea și rezistența la coroziunea fisurantă sub tensiune, reduce riscul de fisurare la rece, contribuind astfel la creșterea nivelului de siguranță în exploatare a echipamentului respectiv. Ca și exemple de subansamble metalice sudate în atelier, tratate termic și pe urmă montate în structuri metalice mai mari, putem aminti: diverse subansamble componente ale platformelor marine de exploatare petrolieră sau de gaze, o serie de structuri metalice de susținere a unor rezervoare, echipamente energetice, subansamble de comandă a unor porți, grilaje de dimensiuni mari în cadrul barajelor, podurilor etc.

7.3.1 Tratamentul prin impact cu ultrasunete

Reducerea stării de tensiuni reziduale, scăderea riscului de fisurare la rece, se poate obține prin operația de ciocănire. Varianta cea mai simplă se realizează cu ajutorul ciocanului, însă există metode mecanice care pornesc de la rotopercutoare, sablare cu particule dure, până la tratamente cu impact cu unde ultrasonore¹. În funcție de metoda aleasă sau de tipul particulelor folosite la sablare, de la nisip la alicie, se obține un efect variabil de deformare microplastică la nivelul suprafețelor metalice.

Uzual, sablarea se aplică oțelurilor carbon de construcții sau celor slab aliate, mai rar se aplică oțelurilor inoxidabile sau oțelurilor bogat aliate cu nichel. Variantele mecanice de ameliorare a stării de tensiuni după sudare, pot înlocui tratamentul termic post-sudare, în cazurile în care acestea nu se pot aplica din diverse motive.

¹ Ultrasonic Impact Treatment (UIT)

Un exemplu în acest sens este tratamentul prin impact cu ultrasunete (*Ultrasonic peening*, lb. eng.), figura 7.7. Acesta este o variantă mecanică de detensionare locală a cusăturii sudate. La o frecvență uzuală, de 20-30 kHz și o amplitudine a cursei de 20-40 mm a poansonului de contact, energia mecanică oscilatorie este transferată metalului depus, în zona de racordare cu metalul de bază. Prin ciocnirile repetate a unor corpuri dure cu stratul superficial, acesta tinde să se deplaseze lateral, însă deplasarea este împiedicată de interacțiunea de tip elastic, cu atomii din interiorul materialului. Ca urmare, în stratul superficial iau naștere tensiuni de compresiune, care contribuie la creșterea rezistenței la oboseală, împiedică amorsarea și propagarea fisurilor în straturile superficiale, mărește rezistența la coroziune și la erodare prin cavitație.

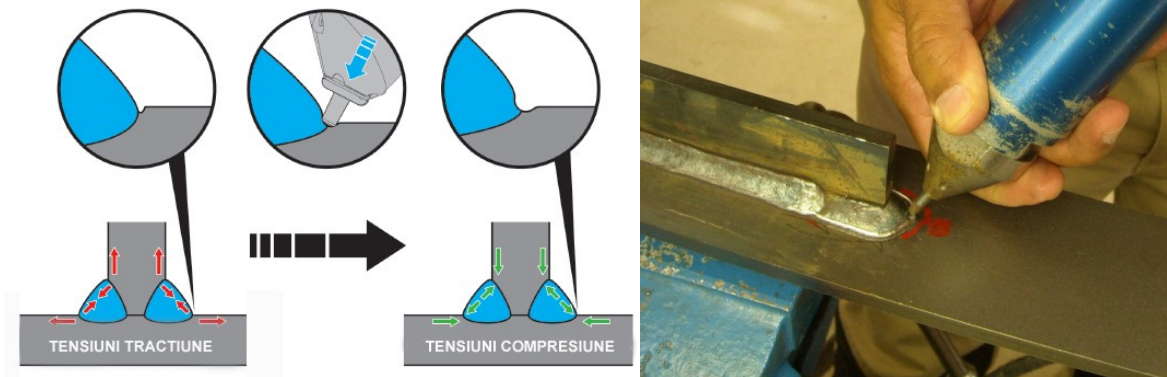
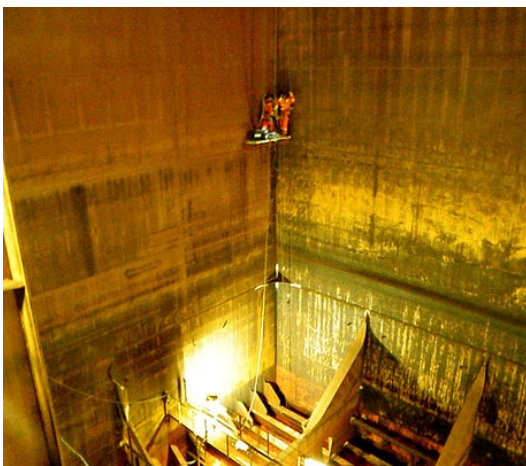


Fig. 7.7 Principiul tratamentului prin impact cu ultrasunete [90].

În figura 7.8 sunt prezentate două situații, în care tratamentele termice post-sudare convenționale nu sunt aplicabile. În prima variantă, motivul este gabaritul foarte mare a structurii metalice, fiind vorba de un vas tip cargo, grosimea pereților metalici este mare și face practic imposibil aplicarea unui tratament termic local, datorită pierderilor termice foarte mari prin conducție. În varianta a doua, tratamentul termic devine de asemenea extrem de dificil de aplicat, datorită faptului că structura metalică este sub apă.



a) interiorul unui vas maritim cargo



b) structură metalică sub apă

Fig. 7.8 Exemple de aplicații ale tratamentului cu ultrasunete UIT pentru îmbunătățirea rezistenței la oboseală, coroziune, reducerii riscului de fisurare [89].

Tratamentul prin impact cu ultrasunete depășește inconvenientele prezentate în situațiile din figura 7.8 și face posibil aplicarea unui tratament post-sudare, ameliorând starea de tensiuni din material și îmbunătățind comportarea structurii sudate la oboseală.

Tratamentul prin impact cu ultrasunete se aplică prin intermediul unui poanson în zona muchiei sudate. Detaliul prezentat în figura 7.7, prezintă deformarea locală a materialului în lungul muchiei cusăturii sudate, realizându-se o racordare cu o anumită rază, între cusătură și metalul de bază. Această zonă de racordare, concomitent cu finisarea grăunților cristalini pe o adâncime redusă de material, prezintă un efect semnificativ de creșterea a rezistenței la oboseală a îmbinării sudate, chiar dacă tratamentul se aplică ulterior, când durata rămasă de funcționare a structurii metalice este de 50% [90]. Acest avantaj este extrem de important în mentenanța unor structuri metalice importante, cum sunt podurile rutiere sau cele de cale ferată.

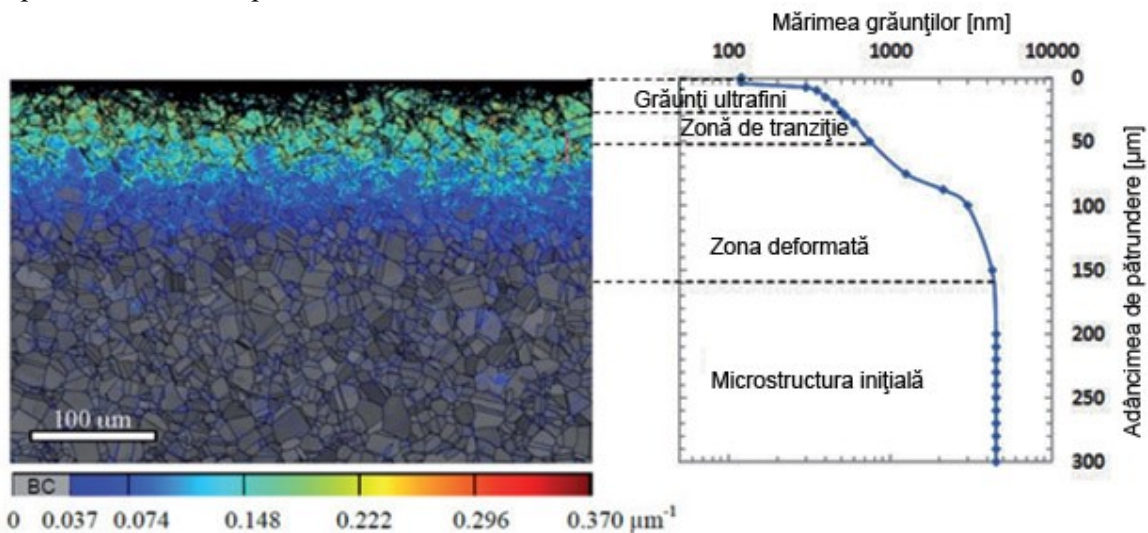


Fig.7.9 Aspectul grăunților cristalini în raport cu adâncimea, la tratamentul prin impact cu ultrasunete [90].

În cazurile în care tratamentul prin impact cu ultrasunete este prelungit, suprafața metalică tratată suferă o transformare prin care se generează o structură nanocristalină pe o adâncime cuprinsă între 10 și 50 μm . Se poate observa din figura 7.9, formarea unei zone de tranziție dintre stratul nanocristalin și structura grăunților din metalul de bază. Adâncimea stratului afectat de tratamentul prin impact cu ultrasunete, poate ajunge până la valori de 200 μm , restul materialului conservând particularitățile microstructurale rezultate după sudare.

Alegerea tipului de tratament termic post-sudare se face în funcție de calitatea metalului de bază, grosimea acestuia și obiectivele urmărite pentru construcția sudată, dictate în principiu de condițiile de exploatare, factorii de risc, importanța construcției etc. O prezentare schematică a tratamentelor termice post-sudare este prezentată în figura 7.10.

7.3.2 Tratamente termice aplicate oțelurilor carbon și slab aliate

Aceste tratamente se aplică în general pentru detensionarea construcției sudate sau pentru compensarea efectului negativ, indus de creșterea granulației în cusătură și ZIT, ca urmare a energiei liniare ridicată la sudare. Situații de acest gen se întâlnesc frecvent la sudarea în baie de zgrură, sau la sudarea sub strat de flux. Temperatura și durata de menținere se aleg în funcție de marca oțelului, grosimea materialului și obiectivele urmărite: detensionare sau micșorarea dimensiunii grăunților din zonele supraîncălzite. Tratamentele termice aplicate acestor produse, sunt: recoacerea de detensionare, revenirea înaltă și recoacerea de normalizare, figura 7.10.

Oțeluri carbon și slab aliate	<ul style="list-style-type: none"> • recoacere de detensionare; • revenire înaltă (de inmuiere, fără transformare de fază); • recoacere de normalizare;
Oțeluri aliate cu structură martensitică în ZIT	<ul style="list-style-type: none"> • revenire înaltă (de inmuiere, fără transformare de fază); • normalizare + revenire înaltă; • tratament intercritic;
Oțeluri înalt aliate	<ul style="list-style-type: none"> • recoacere pentru stabilizare; • călire de punere în soluție;
Imbinări sudate eterogene (oțeluri diferite)	<ul style="list-style-type: none"> • recoacere cu răcire accelerată; • revenire înaltă;
Tratamente Termice Speciale	<ul style="list-style-type: none"> • sudarea în trepte (combinații de sudare cu diferite cicluri de încălzire/răcire), în funcție de stabilitatea austenitei la răcire;

Fig. 7.10 Scheme de tratament termic post-sudare în funcție de calitatea metalului de bază.

7.3.3 Tratamente termice aplicate oțelurilor aliate cu structură martensitică în ZIT

Aceste tratamente se aplică cu scopul de a:

- Reduce starea de tensiuni remanente induse de procesul de sudare ;
- Obține în ZIT a unei structuri de revenire cu ameliorarea durității și creșterea caracteristicilor de plasticitate pentru a evita riscul de fisurare în ZIT ;
- Reduce fragilitatea datorate structurii martensitice ;
- Diminua cantitatea de austenită reziduală ;
- Prevenirea riscului de fisurare la rece.

În cazul unor structuri metalice cu gabarit ridicat, normalizarea poate fi înlocuită cu un tratament intercritic (încălzire între A_{c1} și A_{c3}) care conduce la o rafinare a grăunților perlitici ce suferă o transformare parțială. După acest tratament se aplică și o revenire pentru reducerea tensiunilor interne.

7.3.4 Tratamente termice aplicate oțelurilor înalt aliate

Îmbinările sudate ale oțelurilor înalt aliate se tratează termic în funcție de grupa din care fac parte, iar clasificarea pe grupe se face în funcție de compoziția chimică, respectiv tipul de microstructură pe care îl au. Astfel avem următoarea clasificare, figura 7.11:

- Oțeluri martensito-feritice ;
- Oțeluri feritice (cu conținut ridicat de Cr) ;
- Oțeluri austenito-martensitice (oțeluri maraging) ;
- Oțeluri austenito-feritice (oțelurile duplex) ;
- Oțeluri austenitice (oțeluri Cr-Ni).

Tratamentele termice aplicate acestor grupe de oțeluri au scopuri diferențiate și se aplică în funcție de calitatea materialului adaos și condițiile specifice de exploatare. Structura metalului depinde de calitatea metalului de bază, a materialului de adaos și de diluție. Diluția poate varia în limite largi, în funcție de tipul procedurii de sudare și parametrii de sudare.

La sudarea oțelurilor aliate trebuie ținut seama de coeficientul redus de conductivitate termică, precum și de coeficientul mare de dilatare liniară față de cele ale oțelurilor carbon. Aceste particularități ale oțelurilor aliate impun limitarea vitezelor de încălzire și răcire pe intervalul de temperaturi cuprins între 100 și 400°C. La temperaturi cuprinse între 400 și 550°C, oțelurile aliate sunt sensibile la fenomenul de fragilizare, prin apariția fazei fragile sigma (FeCr).

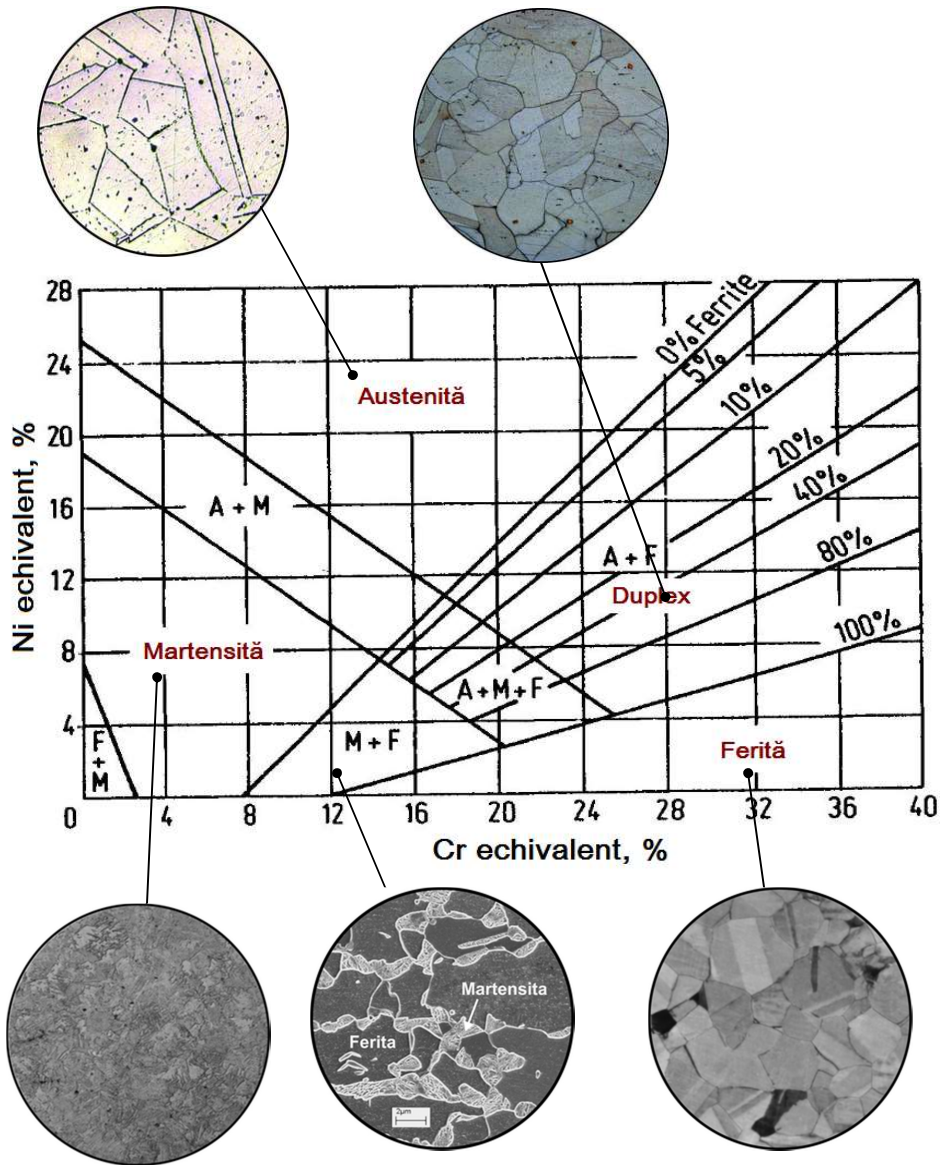


Fig. 7.11 Structura oțelurilor înalt aliate, diagrama Schaeffler.

Oțelurile ferito-martensitice sudate cu electrozi austenitici, în general nu se tratează termic, eventuale tratamente pot fi aplicate în vederea eliminării tensiunilor remanente și obținerea unei structuri martensitice de revenire, cu duritate și fragilitate mai redusă.

Oțelurile feritice sunt susceptibile la creșterea granulației și astfel la reducerea tenacității. În general nu se tratează termic, putând fi prevăzute doar tratamente în vederea reducerii tensiunilor remanente după sudare.

Oțelurile austenitice și cele **austenito-feritice (duplex)** se utilizează în aplicații unde rezistența la coroziune reprezintă cel puțin un factor critic în exploatare. Prin urmare, tratamentele termice aplicate acestor grupe de oțeluri, vizează asigurarea stabilității față de coroziunea intercristalină în ZIT, precum și a caracteristicilor de tenacitate și rezistență mecanică. Se pot prevedea astfel recoaceri de stabilizare, normalizare urmată de revenire înaltă, călire de punere în soluție. Alegerea tratamentului se va face în funcție de marca oțelului, calitatea metalului de adaos și particularitățile de exploatare a construcției sudate.

8. PROCEDEE CONEXE SUDĂRII

8.1 Tăierea termică

Tăierea termică este un proces conex sudării, respectiv un proces tehnologic de procesare a materialelor metalice, prin care se obțin componente pentru inginerie mecanică, în industria grea sau cea a construcțiilor de mașini, respectiv componente destinate confecționării structurilor metalice sudate. Tot prin tăiere termică, se mai pot pregăti în condiții economice rosturi de sudare pentru table de grosime ridicată. Acestea, sunt utilizate în construcții metalice, precum podurile feroviare sau cele rulante, clădiri cu structură de rezistență metalică, industria navală etc. Procesele de tăiere termică, pot fi clasificate după mai multe criterii, conform figurii 8.1:

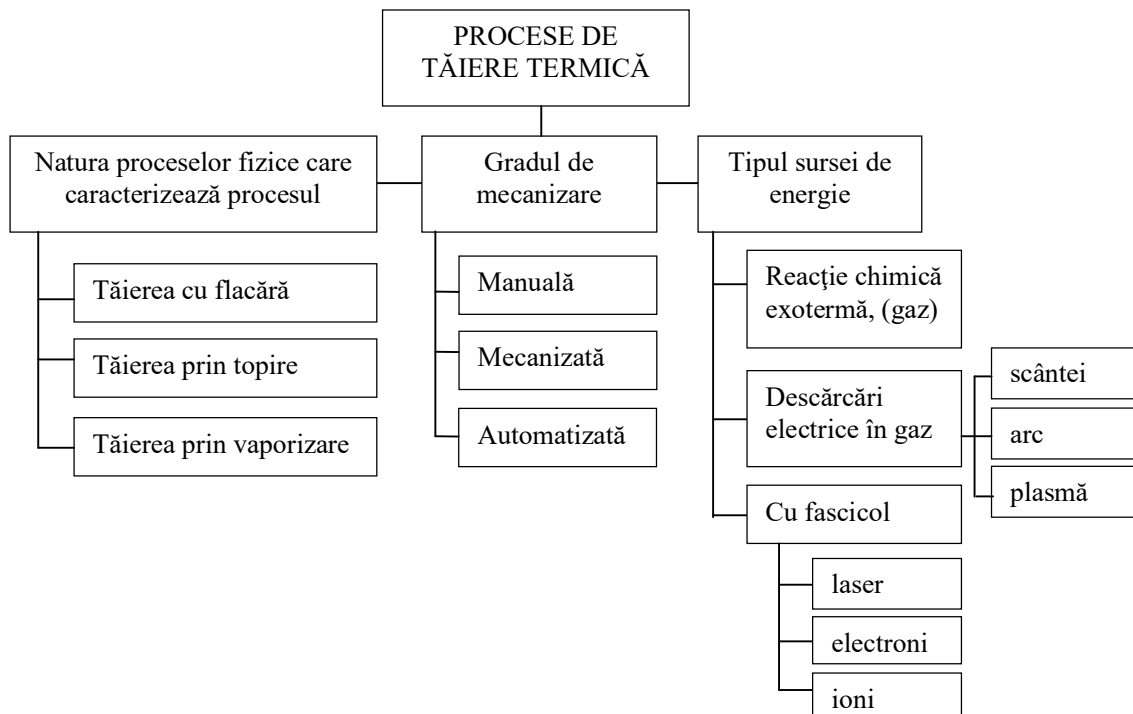


Fig. 6.1 Clasificarea proceselor de tăiere termică.

În cazul **tăierii cu flacără** materialul arde în prezența oxigenului, iar jetul de gaze arse având presiune ridicată, îndepărtează metalul topit și oxizii metalici formați în urma reacției de ardere.

Tăierea prin topire se realizează prin topirea locală a materialului și îndepărtarea acestuia cu ajutorul unui jet de gaz suplimentar, insuflat cu viteză și presiune ridicată.

Tăierea prin sublimare se produce prin vaporizarea metalului, îndepărtarea metalului topit și a zgurii formate, realizându-se prin expansiunea vaporilor metalici sau prin utilizarea unui gaz suplimentar.

Alegerea procedurii de tăiere termică se face în funcție de tipul și grosimea materialelor ce urmează să fie tăiate, dar și funcție de indicatorii de performanță și calitate urmăriți. În anumite aplicații, se aplică procedee de tăiere specială, precum: tăierea cu flacără și cu pulbere metalică, tăierea cu lance de oxigen, scobirea cu flacără.

8.1.1 Tăierea cu flacără

Tăierea cu flacără necesită încălzirea metalului de bază până la **temperatura de aprindere**, după care acesta arde în jetul de oxigen, figura 8.2. Temperatura de aprindere este menținută pe durata procesului de tăiere de către flacăra de preîncălzire, iar pe partea opusă sursei termice se asigură prin procesul de conducție și convecție. Duzele arzătoarelor de tăiere se aleg în funcție de calitatea și grosimea materialului care se taie. În funcție de presiunea oxigenului de tăiere, arzătoarele pot fi clasificate după cum urmează:

- **Arzătoare standard** (presiune oxigen 5 bar), sunt utilizate pentru operații de tăiere manuală, arzătoarele putând fi dotate cu sisteme de ghidaj;
- **Arzătoare de tăiere rapidă** (presiune oxigen 8 bar), permit creșterea vitezei de tăiere prin creșterea presiunii de oxigen suplimentar. Conducerea arzătoarelor de tăiere se face mecanizat, cu ajutorul unor dispozitive optice de copiere sau cu ajutorul echipamentelor de comandă numerică.
- **Arzătoare de mare putere** (presiune oxigen 11 bar), sunt utilizate pe echipamente specializate de tăiere economică, pentru anumite intervale de grosimi ale materialului de bază. Aceste tipuri de arzătoare au o construcție specială, nu sunt standardizate, camera de amestec a gazelor putând fi în corpul arzătorului, în duza de tăiere sau chiar în fața acesteia.

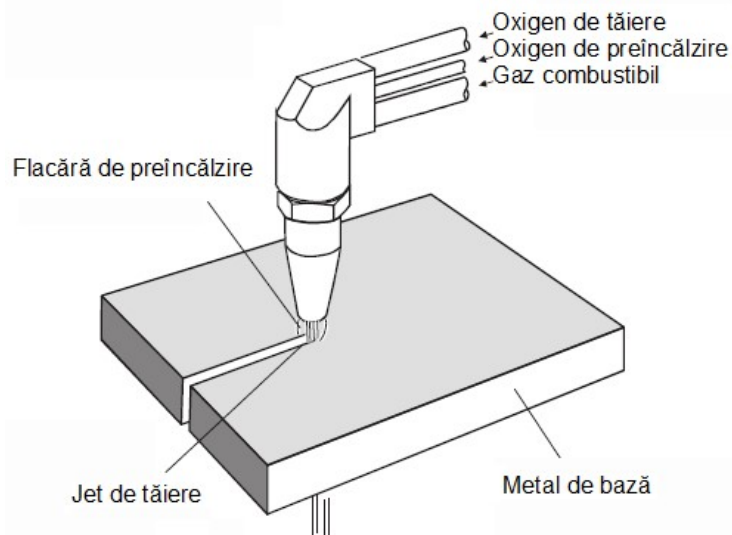


Fig. 8.2 Schema de principiu a tăierii cu oxigen.

Selecția arzătorului și a duzei de tăiere se face în funcție de grosimea și calitatea materialului tăiat. La tăierea cu flacără este necesară compensarea pierderilor termice, pentru a asigura temperatura necesară de aprindere a materialului. Materialul de bază nu trebuie să se topească în procesul de ardere, iar oxizii rezultați în urma reacției de ardere a metalului trebuie să fie ușor fuzibili și cu fluiditate ridicată, pentru a putea fi îndepărtați ușor prin suflare. Aceste condiții sunt respectate în cazul oțelurilor cu conținut redus de carbon, care pot fi ușor tăiate cu flacără.

Oțelurile cu conținut redus de carbon au o temperatură de topire de peste 1480°C, iar temperatura acestora de aprindere în oxigen, este de cca. 1100°C, conform figurii 8.3. Pe măsură ce crește concentrația de carbon, crește temperatura de aprindere și scade temperatura de topire. La o concentrație de carbon de cca. 0,7 % și la o temperatură de aproximativ 1300°C, temperatura de aprindere în oxigen devine egală cu temperatura de topire. Astfel, oțelurile cu conținut mare de carbon și fontele nu mai pot fi tăiate cu flacără, decât dacă se folosesc suplimentar fluxuri, care să fluidizeze oxizii formați și să micșoreze temperatura de formare a acestora.

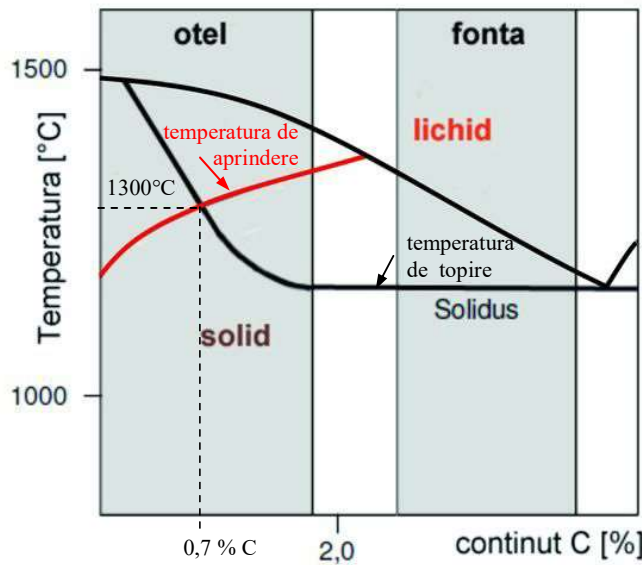
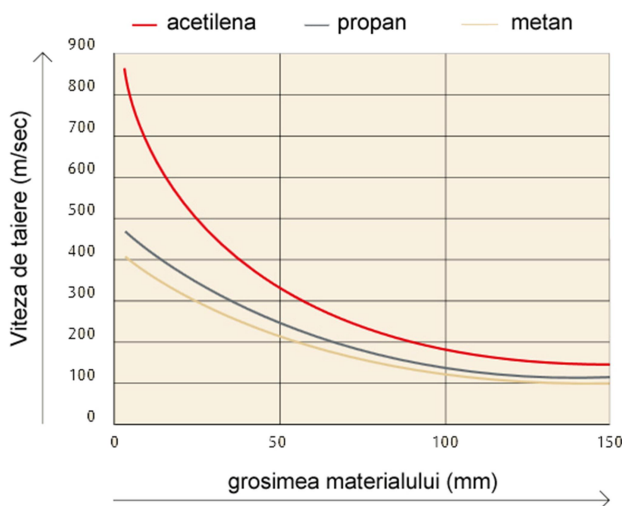


Fig. 6.3 Temperatura de aprindere pentru aliajele Fe-C [60].

De exemplu, la fonta cu 2,5% C, temperatura de topire este de circa 1250°C, iar cea de aprindere în oxigen este de 1400°C. În acest caz, deoarece temperatura de aprindere este superioară temperaturii de tăiere, tăierea cu flacără nu mai poate fi aplicată. Totuși, dacă se insuflă pulbere de fier în flacăra de tăiere, se modifică favorabil raportul dintre temperatura de aprindere și cea de topire, astfel că în aceste condiții, tăierea cu flacără a fontelor devine posibil. Această variantă de tăiere, se numește tăiere cu flacără cu pulbere.

Prin urmare, condițiile necesare pentru a putea efectua tăierea cu flacără, sunt:

- Temperatura de **aprindere** a metalului trebuie să fie mai mică decât temperatura de **topire** a acestuia;
- Temperatura de topire a oxizilor trebuie să fie inferioară temperaturii de topire a metalului;
- Temperatura de aprindere trebuie menținută permanent, pierderile termice din zona de tăiere trebuie să fie compensate de flacăra de tăiere.



Oțelurile cu conținut de C < 0,45% pot fi tăiate cu flacără fără preîncălzire. Peste această concentrație de carbon este nevoie de preîncălzirea metalului de bază, deoarece creșterea conținutului de carbon necesită o energie termică mai ridicată pentru tăiere. Ca urmare a tăierii cu flacără se produce carburarea stratului superficial de material, prin arderea gazului carburant, uzual acetilena (C_2H_2). Efectul, va fi creșterea durității pe suprafețele de tăiere, având efecte negative asupra prelucrabilității mecanice ulterioare a acestor suprafețe.

Fig. 8.4 Viteza de tăiere cu flacără a oțelurilor carbon, C < 0,3%.

Caracteristicile de productivitate la tăiere termică, depind de calitatea și grosimea materialului tăiat, respectiv de tipul de gaz combustibil utilizat la tăiere, figura 8.4. În cazul în care s-au efectuat tratamente termice anterior operației de tăiere cu flacără, există riscul apariției unor fisuri în zona afectată termic de operația de tăiere. Elementele de aliere influențează considerabil comportarea oțelurilor la tăierea termică, datorită formării unor oxizi greu fuzibili și a creșterii temperaturii de aprindere. Un exemplu în acest sens, este cazul oțelurilor inoxidabile, a căror temperatură de aprindere, depășește 1500 °C. Mai jos, sunt precizate concentrațiile unor elemente de aliere în raport cu concentrația de carbon, pentru care se poate considera tăierea cu flacără:

- C max. 1,6%;
- Si până la 2,5% , C < 0,2%;
- Mn până la 13% , C < 1,3%;
- Cr < 1,5%;
- W < 10% și Cr < 5%, Ni < 0,2%, C < 0,8%;
- Ni < 7% sau Ni < 35% dacă C < 0,3%;
- Cu < 0,7% și Mo < 0,8%.

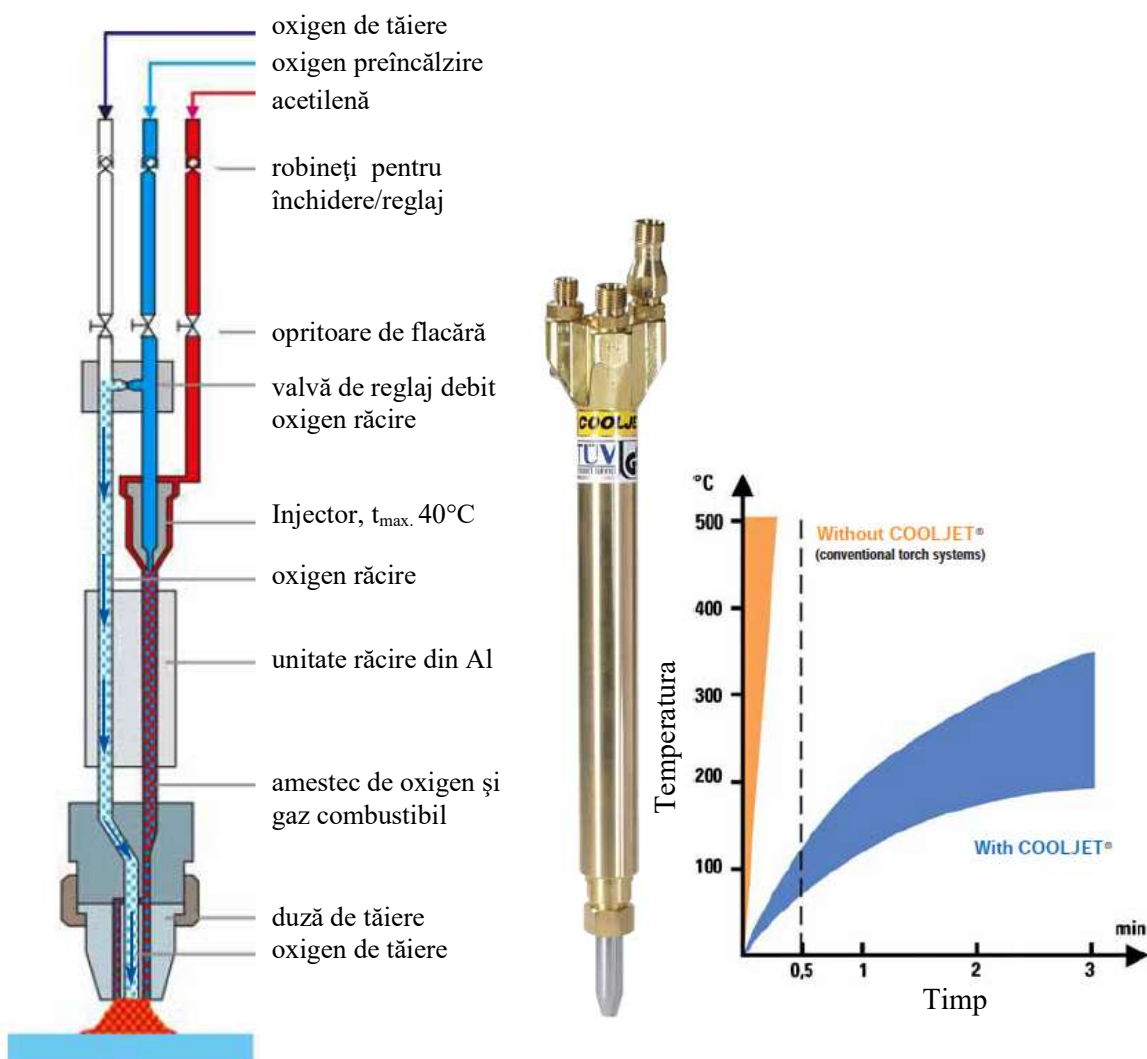


Fig. 8.5 Principiul de funcționare al suflaiurilor cu tehnologie de răcire CoolJet, pentru tăiere cu flacără mecanizată [60].

Calitatea gazelor utilizate reprezintă un element esențial pentru procesul de tăiere, puritatea oxigenului trebuie să fie de min. 99,5%. O reducere a purității oxigenului cu doar 1%, va reduce viteza de tăiere cu 25% și va crește consumul de gaz combustibil cu 25%. Datorită vitezei de ardere mai ridicată, acetilena permite atingerea unor viteze de tăiere superioare, în special la grosimi de material sub 50 mm, aspect ilustrat și în figura 8.4.

Principiul constructiv al suflaiurilor pentru tăiere mecanizată este prezentat în figura 8.5, unde pot fi observate elementele constructive ale acestuia, esențiale pentru răcirea gazelor și asigurarea unei temperaturi maxime de 40°C în camera injectorului. O parte din oxigenul de tăiere este introdus în injector, în vederea realizării amestecului cu acetilena, iar cealaltă fracțiune de oxigen este condusă într-o cameră de răcire confecționată din aluminiu, care va disipa căldura preluată de la corpul suflaiului supraîncălzit. În acest fel, este posibilă păstrarea unor temperaturi reduse în interiorul suflaiului, chiar și în cazul tăierii termice a pieselor cu grosime mare. Prin urmare, cresc performanțele de tăiere și se prelungește durata de exploatare a duzelor de tăiere. Vitezele de tăiere pot atinge valori cu până la 35% mai ridicate, comparativ cu cele obținute pentru suflaiurile convenționale [60].

Cauzele care stau la baza obținerii unor calități necorespunzătoare pentru calitatea suprafețelor tăiate, sunt: alegerea unor parametri de lucru incorecți, utilizarea unor duze de tăiere neadecvate grosimii materialului, întreținerea necorespunzătoare a componentelor esențiale pentru formarea flăcării și a jeturilor de gaze la ieșirea din duza de tăiere. Defectele și abaterile de neconformitate ale suprafețelor tăiate, pot fi: abateri importante de la planeitate și perpendicularitate, rizuri pronunțate, zgură aderentă pe muchii, supratopiri ale marginilor, creștături, tăieturi întrerupte etc. Acestea, precum și alte imperfecțiuni întâlnite la tăierea termică, precum și cauzele probabile care au stat la baza generării acestora, sunt prezentate în figura 8.6 și 8.7. În general, defectele de tăiere și calitatea necorespunzătoare a suprafețelor de tăiere, rezultă ca urmare a necorelării dimensiunii duzei de tăiere în raport cu grosimea de material, a vitezei de tăiere cu debitele de gaz și grosimea materialului, a utilizării unei distanțe incorecte între duză și suprafața piesei tăiate, a curgerii neuniforme de gaz, (furtune ștrangulate sau prea lungi, echipamente defecte, uzarea sau obturarea duzelor de tăiere, ca urmare a depunerii stropilor de metal topit sau de zgură), nepregătirea suprafețelor de tăiere etc.



a) Suprafețe de tăiere normale, perpendiculare, netede, fără zgură aderentă, rizuri de tăiere uniforme.



b) Viteză de tăiere mare, rizuri de tăiere adânci, curbate în direcția de avans, depuneri de zgură aderentă pe muchia inferioară. Debit de oxigen insuficient în jumătatea inferioară.



c) Distanță prea mare între duza de tăiere și piesă. Suprafața de tăiere neregulată, cu topirea muchiei superioare, rizuri adânci și neregulate în zona inferioară. Flacăra de preîncălzire nu este concentrată pe suprafața piesei, jetul de oxigen de tăiere nu este de formă cilindrică și este turbulent.



d) Debit de oxigen prea mare. Zgură excesivă aderentă la suprafețele de tăiere, întreruperi locale de tăiere, topirea excesivă a muchiei superioare. Se creează o turbulență între flacăra de preîncălzire și jetul de tăiere.

Fig.8.6 Aspectul suprafețelor de tăiere cu flăcără a oțelurilor carbon.

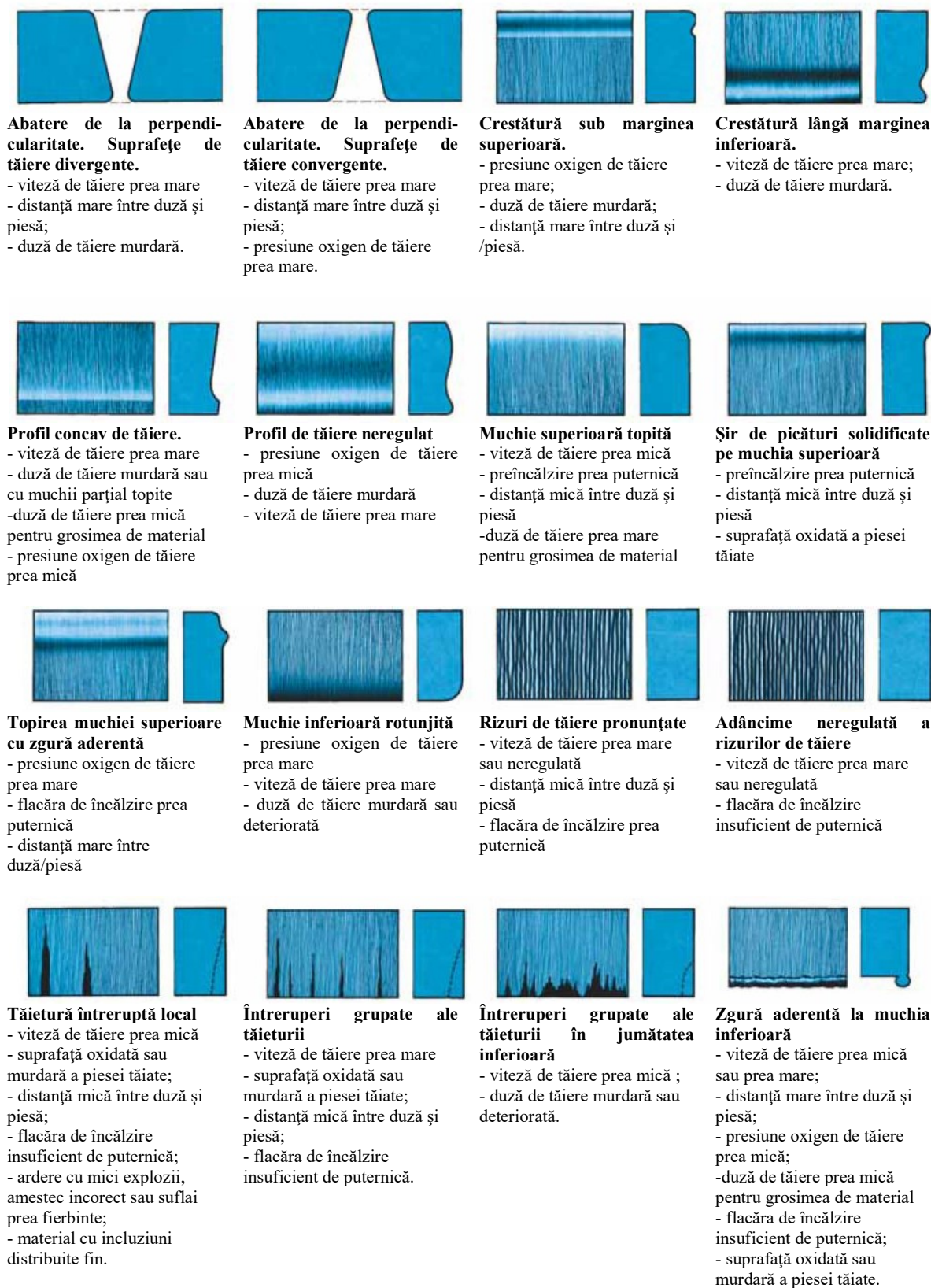


Fig.8.7 Defecte și imperfecțiuni la tăierea termică.

Așa cum s-a menționat, tăierea cu flacără a oțelurilor cu conținut de carbon sub 0,45% se poate face în bune condiții, fără riscul apariției fisurilor în zona influențată termic sau în suprafața de tăiere. Lucrurile se schimbă însă, dacă oțelul a suferit în prealabil un tratament termic sau dacă se taie oțeluri mediu și bogat aliate. Astfel, în cazul oțelurilor cu carbon echivalent ridicat, sau în cazul oțelurilor tratate termic Q&T (călite și revenite), la tăierea termică cu flacără se pot forma și propaga fisuri în vecinătatea muchiilor de tăiere. Cauzele apariției acestor fisuri, sunt în general similare cu cele care produc fisuri la rece la sudare, respectiv:

- Conținut ridicat de hidrogen difuzibil în material;
- Tensiuni reziduale concentrate în zona muchiilor de tăiere;
- Conținut ridicat de carbon echivalent.

Fenomenul de fisurare în oțelurile tratate termic QT se produce cu un efect de întârziere, datorită fenomenelor de difuzie a hidrogenului atomic în rețeaua cristalină metalică. Fisurile pot apărea în decurs de ore sau zile, de la momentul tăierii. Acest fapt, reprezintă un factor de risc în fabricația structurilor sudate, deoarece timpul prevăzut între debitarea componentelor metalice și integrarea lor în structurile sudate este relativ scurt. În general furnizorii au un termen de respectat, timpul pentru execuția lucrărilor este limitat, iar penalitățile de întârziere în onorarea comenzilor, putând fi semnificative.

Prin urmare, în cazul unor parametrii de tăiere sau sudare incorecți, crește riscul apariției unor situații neprevăzute, precum fisurarea sau apariția unor deformări în structura metalică. Dacă intervin astfel de aspecte nedorite, corectarea lor este dificilă și de cele mai multe ori presupun costuri suplimentare, decalarea termenelor de predare a lucrării etc. Situația de complică și mai mult, dacă aceste probleme intervin la scurt timp de la recepționarea produselor, unele structuri fiind transportate la distanțe mari, fiind montate în ansamble complexe, costurile de transport și de montaj, fiind de cele mai multe ori foarte ridicate. Dacă mai apar și costuri legate de oprirea producției la beneficiar, a materialelor prime compromise, penalități etc, avem deja o imagine asupra unui incident financiar, care se rezolvă de cele mai multe ori prin instanță, cu costuri extrem de ridicate. Probabil că această imagine reprezintă o situație de coșmar pentru furnizorii de construcții metalice sudate, toate aceste incidente putând avea ca și sursă de plecare, un regim incorect ales, pentru parametrii de tăiere termică sau la sudare. Reducerea riscului de fisurare datorat tăierii cu flacără, se poate face prin:

- Alegerea unei metode de tăiere, cu impact mai redus asupra ZIT și a metalului de bază;
- Efectuarea unei preîncălziri înainte de tăiere, în funcție de calitatea și grosimea materialului;
- Utilizarea unei viteze optime de tăiere;
- Reducerea vitezei de răcire după tăiere, efectuarea unor operații de post-încălzire;
- Detensionarea materialului după tăiere.

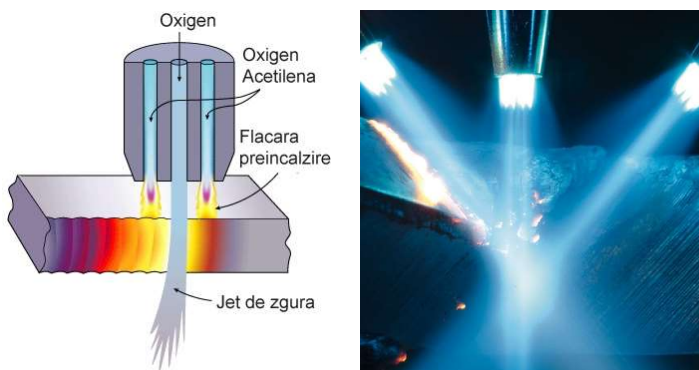


Fig. 8.8 Aspecte ale flăcării de preîncălzire și a celei de tăiere cu oxigen.

Preîncălzirea este extrem de importantă pentru succesul operației de tăiere cu flacără, alegerea temperaturii de preîncălzire, fiind funcție de material și grosimea acestuia, arzătoarele având o construcție specială pentru reglarea flăcării de preîncălzire, figura 8.8.



Trebuie făcută distincție între preîncălzirea locală realizată direct de flacăra arzătorului de tăiere, necesară aducerii metalului de bază la temperatura de aprindere (figura 8.8) și preîncălzirea materialului executată pe zone largi, a tablei din care se decupează prin tăiere piesele dorite, în vederea diminuării riscului de fisurare la rece, prin reducerea vitezei de răcire.

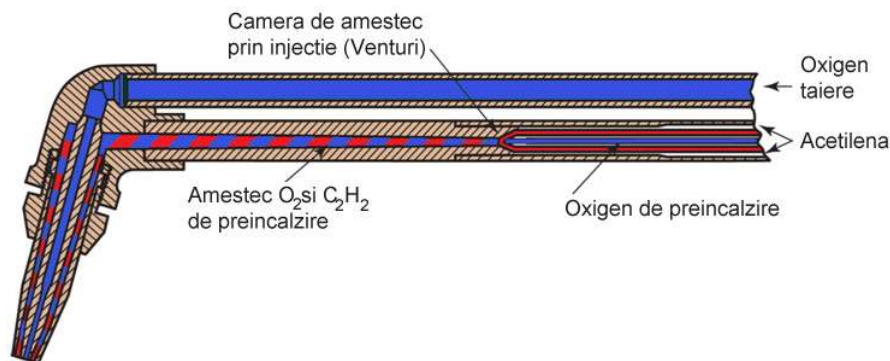


Fig. 8.9 Arzător de tăiere cu injecție.

Amestecul dintre gazul combustibil și oxigen se poate realiza în țeava de amestec a suflaiului (figura 8.9), în capul suflaiului sau în duza suflaiului (figura 8.10), iar în anumite situații mai speciale, în fața duzei, când se lucrează pe mașini de tăiere automatizate de putere ridicată. Duzele de tăiere sunt specifice tipului de gaz combustibil, fiecare producător de echipamente de tăiere și-a dezvoltat propriile modele, existând o varietate foarte mare disponibile pe piață. Caracteristicile performanțelor de tăiere depind de tipul arzătoarelor¹ utilizate, geometria duzei, modul de amestec al gazelor și debitele efective de gaz. În funcție de principiul de amestec al gazelor, arzătoarele se clasifică în:

- Arzătoare cu injector (cu cameră de amestec, de presiune joasă, figura 8.9);
- Arzătoare cu presiune (de presiune ridicată, figura 8.10).

Arzătorul din figura 8.9 este cu injecție, gazul combustibil este aspirat în duza de amestec, conform principiului lui Venturi, datorită vitezei ridicate de curgere a oxigenului prin ajutorul injectorului. **Arzătoarele cu injecție** pot opera până la presiuni de 1,5 bar pentru oxigen și sunt cel mai frecvent utilizate la noi în țară.

Arzătorul cu presiune prezentat în figura 8.10, operează la presiuni mai ridicate, și asigură o cantitate de căldură mai însemnată comparativ cu arzătoarele cu injecție, motiv pentru care se utilizează pe instalații automatizate de putere ridicată, la tăierea unor materiale cu grosimi ridicate.

Uzual se pot tăia oțeluri de construcție cu grosimi până la 500 mm, însă pe instalații de putere ridicată, se pot tăia oțeluri și cu grosimi de 1000 mm, figura 8.11. Duzele au prevăzute canale interioare divergente, care măresc viteza de curgere a gazelor, contribuind astfel la creșterea vitezei de ardere și la îmbunătățirea calității suprafețelor tăiate, în condiții de securitate ridicată și cu consumuri specifice de gaz mai reduse.

¹ arzătoarele se mai numesc brenere

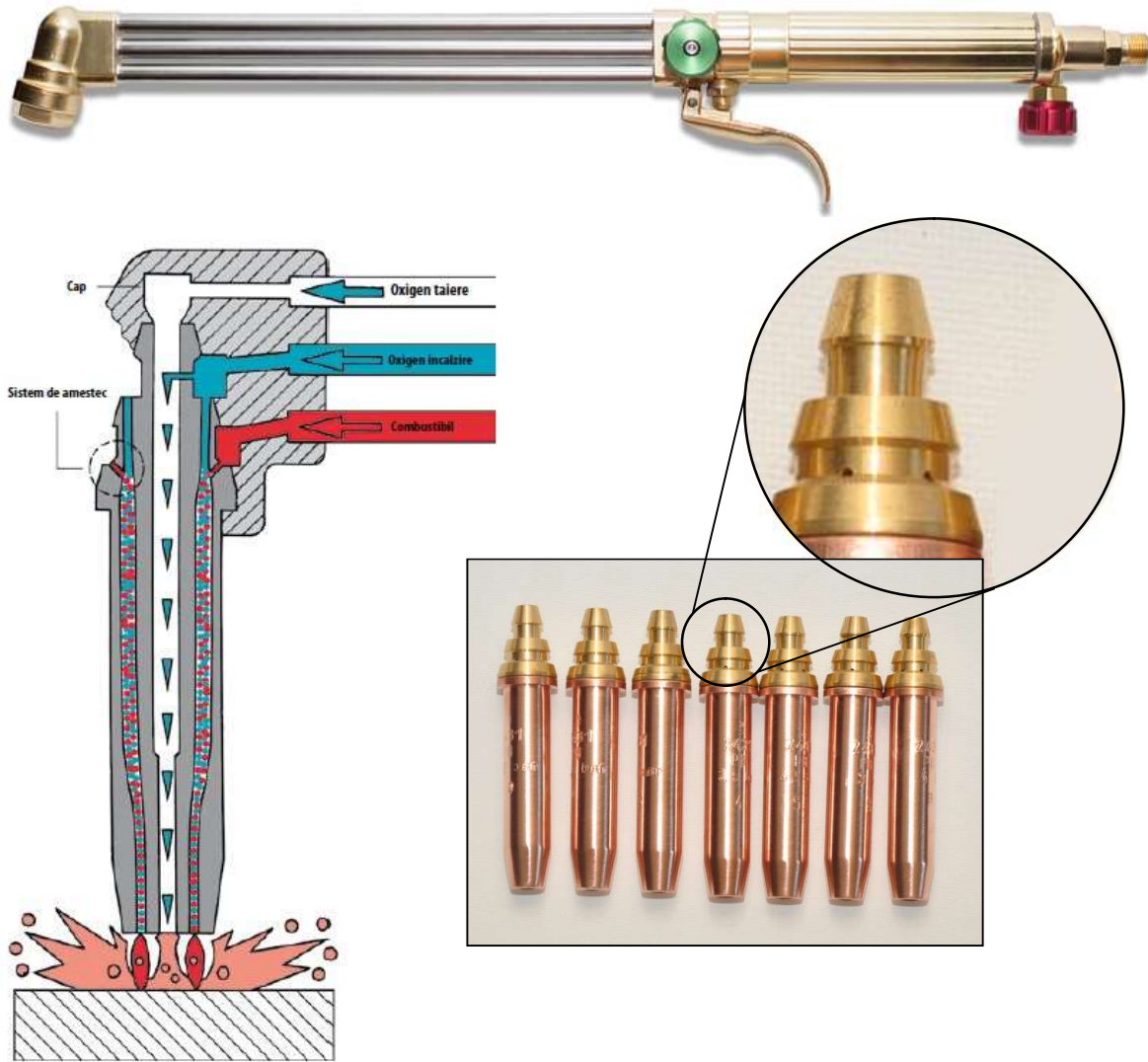


Fig. 8.10 Arzător de tăiere cu presiune și duzele de tăiere aferente [62].



Fig. 8.11 Tăierea oxiacetilenică a unui bloc de oțel carbon, cu grosime de 850 mm.
Sanso Kogyo Co. Ltd. Japan.

8.1.2 Tăierea cu cu flacără și cu pulbere metalică

Creșterea temperaturii de aprindere a oțelurilor aliate sau a fontelor, face improprie tăierea cu flacără. Pentru a crește efectul termic al procesului, în flacără se insuflă pulbere de fier sau flux granulat, în funcție de tipul materialului tăiat, conform normei BS499:Part1:1991. Deasemenea, în cazul oțelurilor aliate, la tăierea cu flacără se formează oxizi cu punct de topire mai ridicat decât cel al metalului de bază, împiedicând arderea metalului în jetul de oxigen. Aceste impedimente pot fi înlăturate prin insuflarea unei pulberi metalice în flacăra de tăiere, modificând tipul și fluiditatea oxizilor formați. Ca urmare a efectului exoterm produs la arderea pulberii insuflate, crește temperatura din flacăra de tăiere. Prin urmare, se disting două variante de lucru după cum urmează:

- **Injecție de flux:** fluxul sub formă de pulbere este insuflat în jetul de ardere și îndepărtează chimic, oxizii de crom greu fuzibili;
- **Injecție de pulbere bogată în fier:** pulberea fină de fier este insuflată în jetul flăcării de ardere, reacția exotermă de ardere a pulberii crește temperatura flăcării, contribuind la creșterea fluidității produșilor de reacție. Pulberea de fier este insuflată, fie cu ajutorul aerului comprimat, fie cu azot, conform figurii 8.12.

Tăierea cu flacără și pulbere de fier poate fi utilizată pentru tăierea cuprului, nichelului, aluminiului și aliajelor acestora, precum și la tăierea fontelor. Calitatea suprafețelor de tăiere cu flacără și pulbere de fier, în cel mai bun caz, este apropiată de calitatea suprafețelor tăiate cu flacără a oțelurilor carbon, dar cu creșterea conținutului elementelor de aliere greu fuzibile, calitatea suprafețelor tăiate se reduce semnificativ.

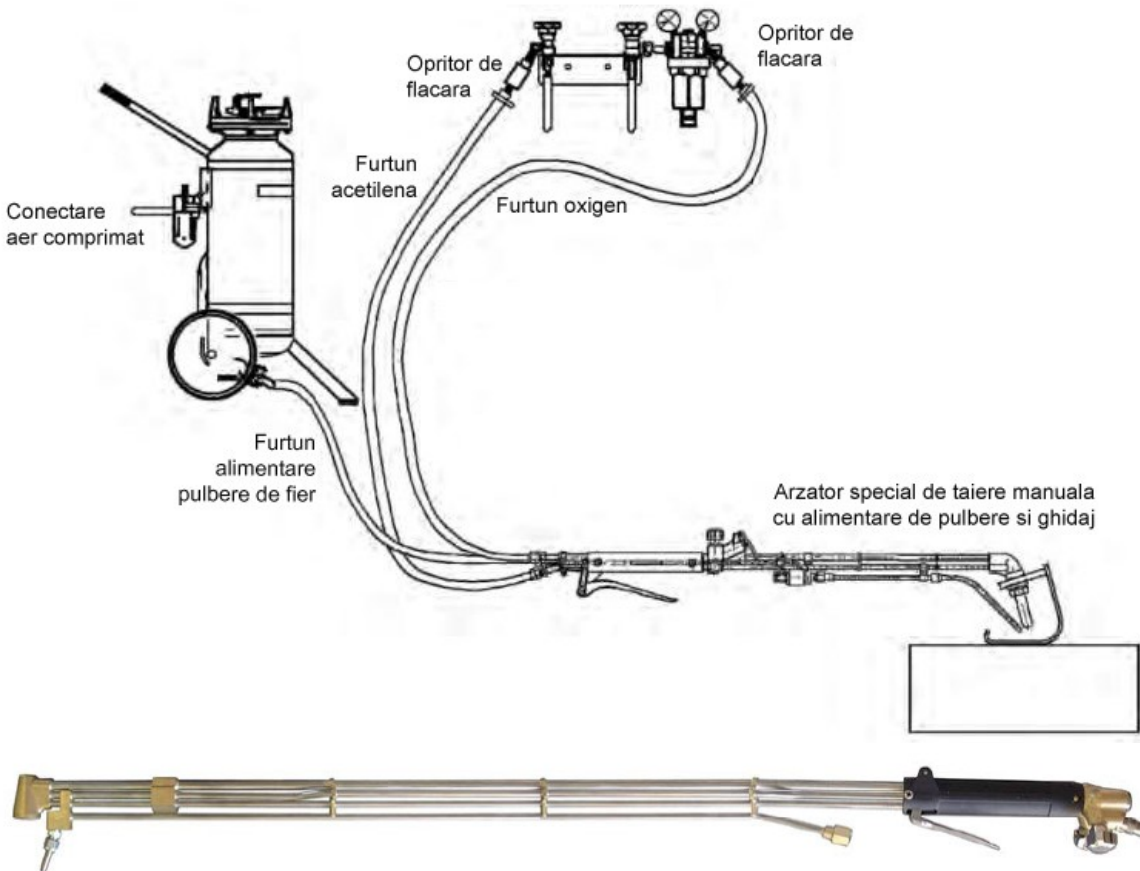


Fig. 8.12 Principiul de tăiere cu flacără și cu pulbere.

Injecția pulberii de fier se poate realiza, fie la ieșirea din duza de ardere, situație prezentată în figura 8.12, fie direct în duza de ardere care prezintă o construcție specială, prezentată în figura 8.13. Pentru a păstra distanța constantă față de material, se utilizează un sistem de ghidare montat în capătul arzătorului, așa cum poate fi observat în figura 6.12.

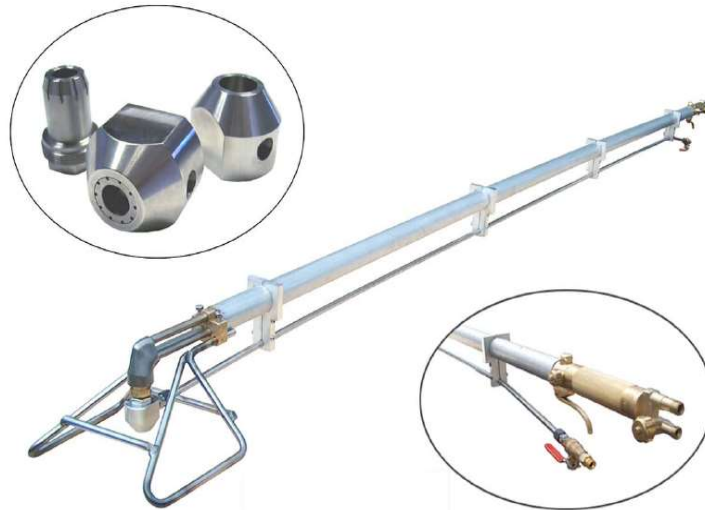


Fig. 8.13 Arzător de tăiere cu flacără și cu pulbere, cu alimentare de pulbere în duză.

8.1.3 Tăierea prin topire cu laser

Procedeul de tăiere prin topire cu laser, poate fi aplicat la tăierea oțelurilor înalt aliate, aluminiului sau a materialelor ceramice. Uzual, grosimea materialelor este limitată la 15 mm și depinde de tipul gazului utilizat pentru protecție și îndepărtarea materialului topit, figura 8.14. În cazul instalațiilor de tăiere echipate cu laseri pe bază de diode, viteza de tăiere este superioară vitezei de tăiere a laserilor cu CO₂. Energia necesară topirii materialului este asigurată de fascicolul laser, iar un gaz inert, argon sau azot, este insuflat în zona de tăiere cu o presiune de până la 20 bar. Gazul inert asigură protecția suprafețelor de tăiere și a metalului de bază, în același timp având și rol de îndepărtare a metalului topit prin suflare. Faptul că nu este necesar ca materialul să fie vaporizat la tăiere, permite ca puterea instalației să fie redusă cu un factor de până la 10 ori.

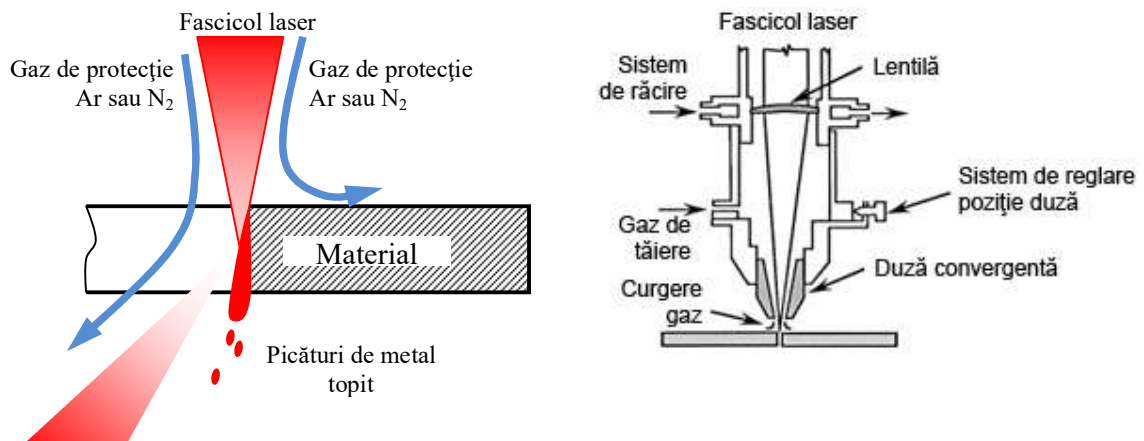


Fig. 8.14 Principiul de tăiere prin topire cu laser.

În cazul utilizării azotului ca și gaz de tăiere, la grosimi de peste 4 mm încep să apară depuneri de material pe muchiile de tăiere. Prin urmare, grosimea materialului este limitată la valori sub 5 mm, figura 8.15.

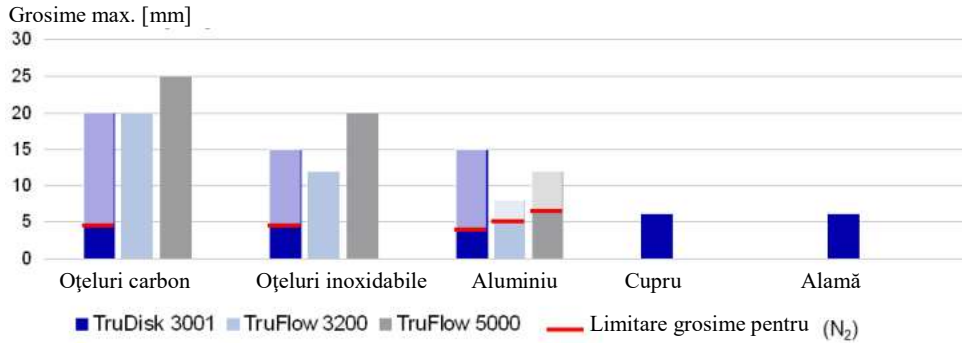
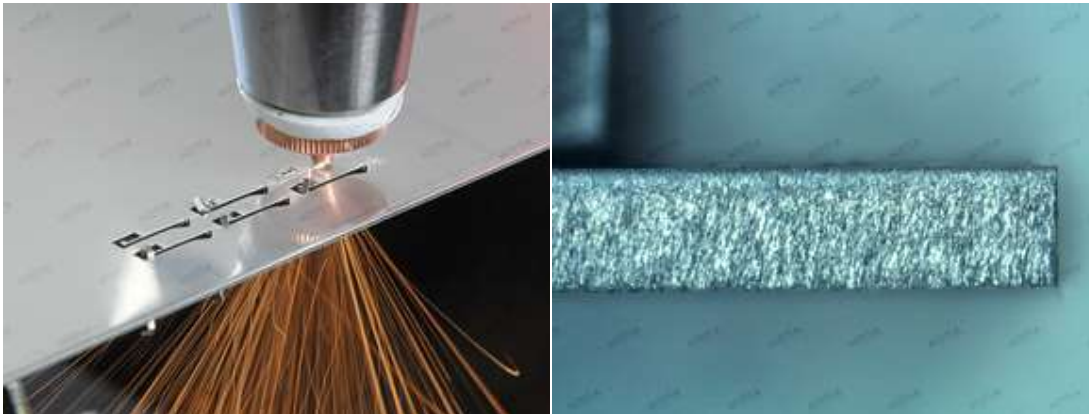


Fig. 8.15 Grosimea maximă a materialelor, la tăierea prin topire cu laser [62].

Suprafețele tăiate rezultă curate, lipsite de oxizi și zgură, având o calitate foarte bună și o precizie dimensională ridicată. Elementele metalice tăiate nu mai necesită operații suplimentare de prelucrare sau de tratament termic. Datorită ZIT extrem de redusă ca lățime, materialul tăiat, chiar și în cazul unor grosimi foarte mici, nu se deformează și nu acumulează tensiuni, ca urmare a operației de tăiere, figura 8.16.



a) oțel inoxidabil $s=1$ mm

b) muchiile de tăiere a unui oțel de grosime $s=2$ mm.

Fig. 8.16 Tăierea prin topire cu laser a tablelor subțiri [61].

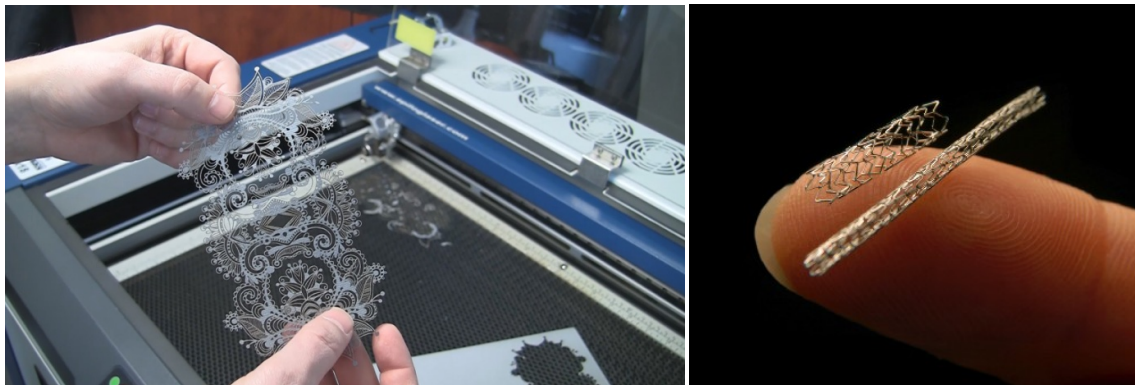
8.1.4 Tăierea cu laser prin vaporizare

Tăierea prin vaporizare¹ este un procedeu de tăiere, de precizie foarte ridicată. Fascicolul laser produce vaporizarea materialului, iar presiunea de vapori creată, ajută la îndepărtarea materialului din canalul de tăiere, volumul de material topit fiind extrem de redus. Ca și gaz de protecție se utilizează azotul, argonul sau heliul, care asigură protecția muchiilor materialului, împotriva contaminării cu oxizi. Presiunea gazului de protecție este cuprinsă între 1 și 3 bar. Materialul de bază absoarbe energia de la fascicolul laser, astfel că pe lățimea tăieturii se vaporizează, iar jetul vaporilor metalici creat la incidența fascicolului laser cu suprafața piesei, asigură îndepărtarea materialului din canalul de tăiere.

¹ sublimation laser cutting (lb.eng.)

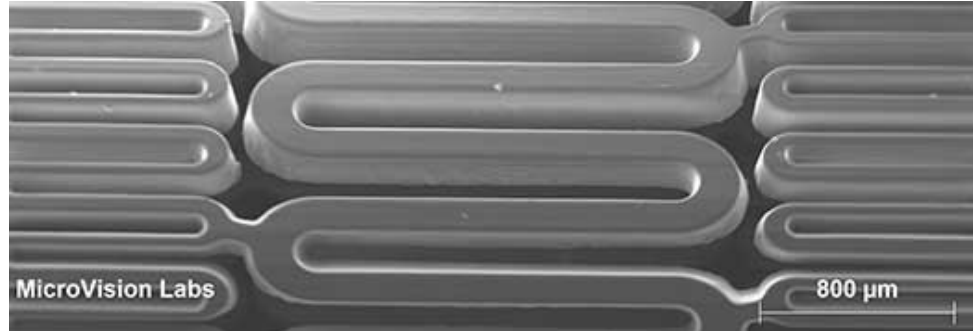
La o singură trecere, adâncimea de tăiere se situează la aproximativ 10 μm adâncime, astfel că frecvent tăierea decurge în mai multe treceri. În general, grosimea materialelor tăiate este sub 1 mm. Pentru materialele metalice, ceramice sau a diamantului se utilizează laseri cu mediu solid, iar pentru tăierea materialelor ceramice sau polimerice, se folosesc laseri cu CO_2 .

Deoarece tăierea prin vaporizare necesită puteri ale instalațiilor laser mult mai ridicate, aplicabilitatea acestui procedeu de tăiere la fabricația elementelor metalice este limitată, dar devine mult mai atractiv la tăierea materialelor nemetalice, precum cele polimerice, textile, cartoane, lemn. Din categoria materialelor metalice tăiate cu laser prin vaporizare, putem aminti stent-urile metalice folosite în intervențiile chirurgicale cardiovasculare, care sunt prelucrate cu precizie foarte mare, calitatea suprafețelor tăiate, fiind extrem de ridicată, figura 8.17.



a) tăiere hârtie cu laser CO_2

b) stent pentru implanturi medicale



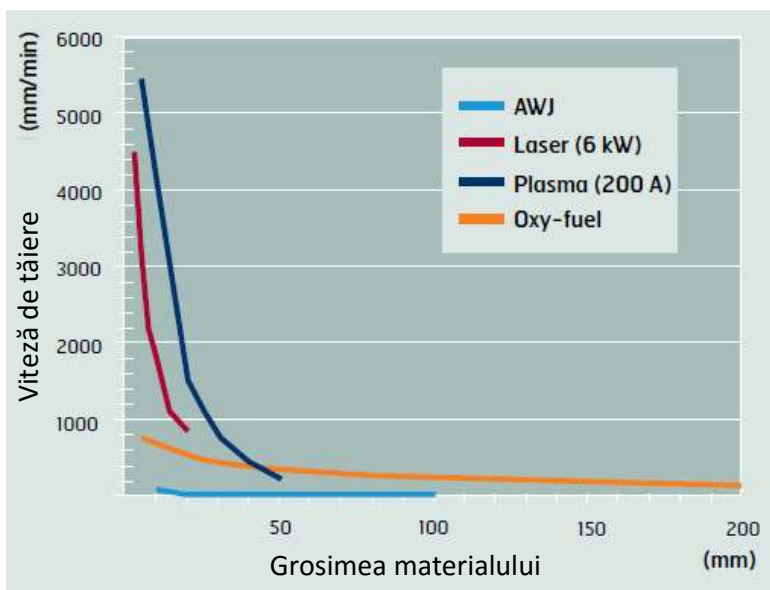
c) detaliu stent medical

Fig. 8.17 Tăierea de precizie cu laser, prin vaporizare [63].

8.1.5 Tăierea cu plasmă

Tăierea cu plasmă este un procedeu de tăiere prin topire, comparativ cu tăierea oxigaz care este un procedeu de tăiere prin ardere. Tăierea cu plasmă poate fi aplicată la materiale ce nu pot fi tăiate prin procedeu oxigaz, precum aluminiul sau oțelul inoxidabil. Avantajele față de procesele de tăiere oxigaz, sunt calitatea și productivitatea de tăiere mult superioară, în cazul tăierii unor materiale cu grosimi de până la 40 mm, alături de reducerea costurilor de fabricație. La grosimi mari, peste 50 mm, tăierea oxiacetilenică devine mai avantajoasă față de celelalte procedee de tăiere, așa cum este ilustrat și în figura 8.18. În arcul de plasmă se pot atinge temperaturi de peste 30.000°C , însă aceasta scade rapid pe măsură ce crește distanța față de capul plasmagen, motiv pentru care, grosimea materialelor tăiate este limitată la aproximativ 40-50 mm. Dealtfel, acest aspect se poate observa în figura 8.18, unde viteza de tăiere cu plasmă scade foarte rapid, odată cu creșterea grosimii materialului tăiat.

La instalațiile de tăiere cu arc de plasmă de putere ridicată, nivelul de zgomot este foarte ridicat, astfel încât, este necesar un echipament adecvat de protecție auditiv al personalului operator. Nivelul de zgomot poate depăși 100 dB și este comparabil cu cel al unui motor cu reacție, cu care sunt dotate aparatele de zbor moderne. Și din acest motiv, s-au dezvoltat o serie de variante de tăiere cu plasmă sub apă, care reduc substanțial nivelul de zgomot și cantitatea de noxe eliberate în timpul operației de tăiere.



AWJ - tăierea cu jet de apă, tăierea cu laser (6kW), tăierea cu plasmă (200 A), tăiere oxo-acetilenică
Fig. 8.18 Parametrii de productivitate la tăiere termică [64].

Alegerea gazului plasmagen se face în funcție de tipul și grosimea materialului tăiat, calitatea suprafețelor de tăiere și costul gazului. În cazul tăierii cu plasmă a materialelor subțiri se utilizează sisteme simple de tăiere, cu un singur gaz, dar în cazul tăierii materialelor cu grosime ridicată, se folosesc sisteme cu două gaze, un gaz plasmagen și unul de protecție. Sistemele care operează cu un singur gaz, utilizează ca și gaz plasmagen aerul, azotul sau argonul. Sistemele dual, cu două gaze, utilizează azotul, argonul sau amestecuri de argon cu hidrogen.

Sursa de curent pentru arcul de plasmă, furnizează curentul necesar menținerii plasmei termice. În cazul tăierii manuale curentul se situează între 20-100 A, iar în cazul tăierii mecanizate, sursa poate furniza curent cu valori cuprinse între 100 - 1000 A.

Valorile maxime ale curentului, depind de tipul gazului plasmagen utilizat:

- Azot (600A) - tăierea cu plasmă sub apă a aluminiului;
- Argon/Hidrogen (1000 A) - tăierea uscată cu plasmă a aluminiului;
- Aer (300 A).

Tipul de gaz utilizat la tăiere, influențează mărimea și caracteristicile microstructurale ale ZIT. Creșterea conținutului de hidrogen în amestec cu argon, contribuie la creșterea conductivității termice a plasmei și prin urmare, permite utilizarea unor viteze de tăiere mai ridicate, concomitent cu reducerea zonei afectată termic. Cele mai bune rezultate s-au obținut pentru amestecuri de 80% argon cu 20% hidrogen. În alegerea gazului de tăiere, trebuie luate în considerare și aspectele metalurgice referitor la riscul fragilizării suprafeței materialului tăiat, datorită difuziei hidrogenului atomic sau azotului, în straturile superficiale ale materialului.

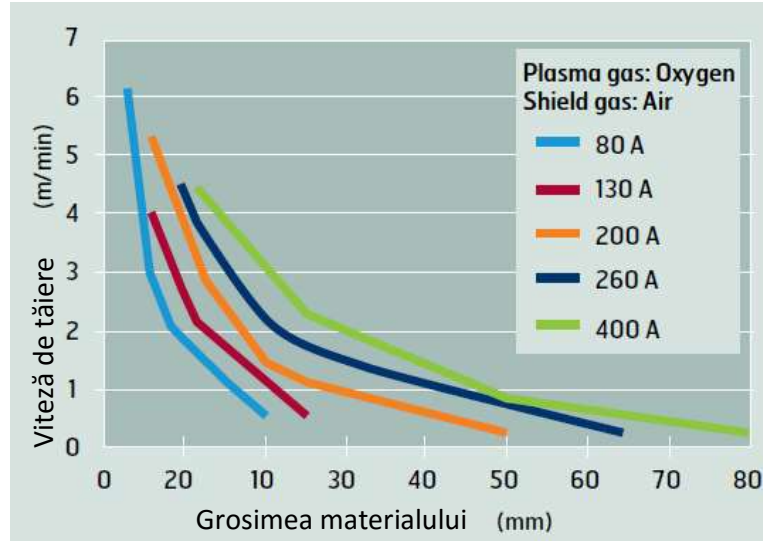


Fig. 8.19 Tăierea cu plasmă cu sistem dual. Gaz de protecție utilizat: aer [64].

Tăierea cu plasmă sub apă se utilizează de mai mult timp, cu rezultate foarte bune. În cazul tăierii aluminiului, se folosește azotul ca și gaz plasmagen, prezența oxigenului conducând la un fenomen de oxidare intensă a suprafețelor tăiate. O problemă importantă la tăierea aluminiului sub apă este riscul de explozie datorat hidrogenului. În urma interacțiunii dintre aluminiul topit și apă se formează bule de hidrogen sub piesă, care se autoaprind în momentul în care arcul de plasmă traversează zona de deasupra sau din vecinătatea acestora. Dacă baia de apă se agită sau dacă zgura este evacuată periodic, riscul producerii acestor evenimente este redus. Deasemenea, se pot înregistra microfisuri în zona muchiilor de tăiere. Aliajele de aluminiu din seriile 2XXX, 6XXX și 7XXX (tratabile termic) sunt sensibile în mod particular la fisurare la cald, în vreme ce aliajele din seriile 1XXX, 3XXX și 5XXX nu prezintă această problemă. Tendința de fisurare, crește odată cu creșterea grosimii materialului tăiat, astfel că este o practică curentă de a considera un adaos de prelucrare prin așchiere de 3 mm, pentru îndepărtarea porțiunilor de material ce conțin microfisuri.

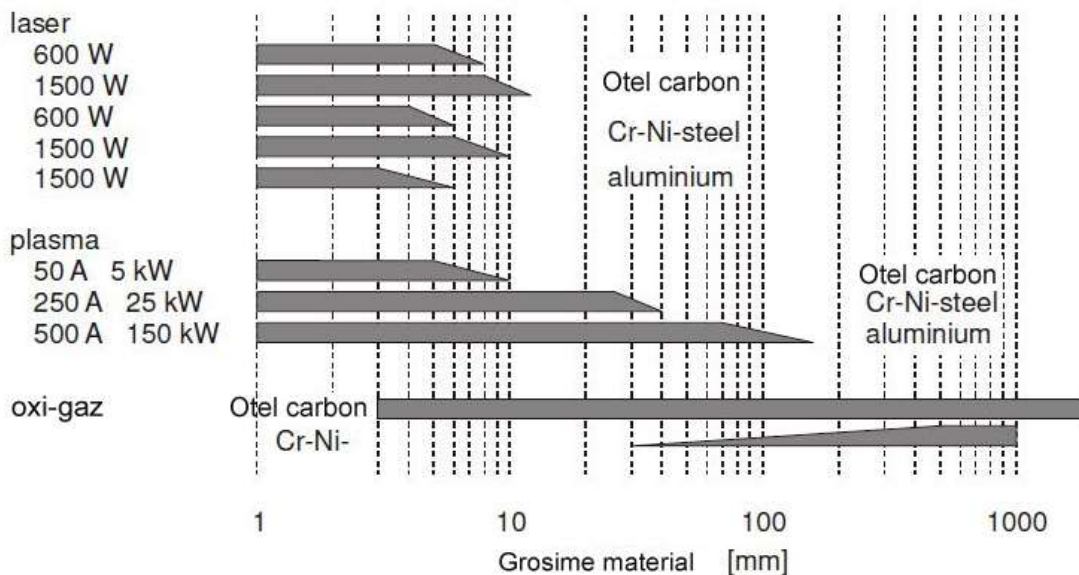


Fig. 8.20 Domenii de aplicare pentru tăierea metalelor[48].

Calitatea suprafețelor tăiate este bună, însă muchiile de tăiere sunt rotunjite. Mecanizarea procesului de tăiere, creșterea vitezei de tăiere sau utilizarea variantelor de tăiere cu injecție de apă în plasma termică, conduc la îmbunătățirea calității suprafețelor de tăiere.

Un factor important în asigurarea calității pieselor tăiate cu arc de plasmă, este starea duzelor și a electrodului din capul plasmagen. În timpul procesului de tăiere, se produce o uzură abrazivă a acestor elemente, care trebuie verificate și înlocuite periodic. Alegerea unui procedeu de tăiere pentru o aplicație dată, se face în primul rând, în funcție de calitatea materialului ce urmează a fi tăiat, de grosimea acestuia și desigur de caracteristicile echipamentelor de tăiere disponibile. În figura 8.20 sunt ilustrate limitele și domeniile de aplicare ale procedeelor de tăiere, în funcție de calitatea materialelor și puterea instalațiilor utilizate. Procedeu de tăiere cu plasmă a fost perfecționat continuu, încă de la introducerea¹ lui în 1957. În tabelul 8.1 este prezentată evoluția în timp a procedurii de tăiere cu plasmă, precum și variantele derivate ale acestuia.

Tabel 8.1 Istoricul dezvoltării proceselor de tăiere cu plasmă [65].

Anul	Varianta de proces	Anul	Varianta de proces
1957	Conventional Plasma Arc Cutting	1977	Underwater Cutting, Underwater Muffler
1962	Dual Flow Plasma Arc	1980	Low-Amp Air Plasma Cutting
1963	Air Plasma Cutting	1983	Oxygen Plasma Cutting
1965	Water Shield Plasma Cutting	1985	Oxygen Injection Plasma Cutting, Deep Water Plasma Cutting
1968	Water Injection Cutting	1990	High Density Plasma Cutting
1972	Water Muffler and Water Table	1990	Laser Lasting Consumable Parts

Tăierea cu arc de plasmă, varianta convențională prezentată în figura 8.21, poate fi aplicată în varianta mecanizată în cazul oțelurilor inoxidabile și a aluminiului, până la grosimi ale materialului de 250 mm.

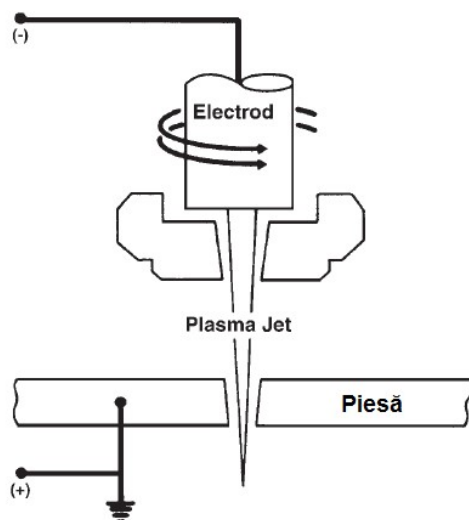


Fig. 8.21 Tăierea convențională cu arc de plasmă (1957).

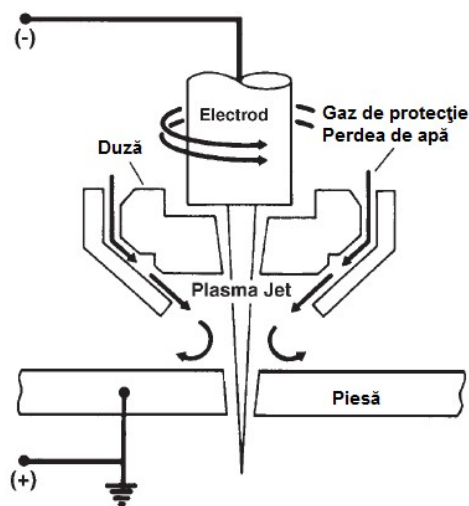


Fig. 8.22 Tăiere cu arc de plasmă dual-flow, (1962).

¹ Union Carbide's Linde Division (USA)[65].

Limitele privind grosimea maximă a materialului ce poate fi tăiat sunt impuse de curentul maxim ce poate fi asigurat de sursa de curent și suportat de capul plasmagen. Sistemele mecanizate de mare putere pot suporta curenți cu intensitatea de până la 1000 A. Datorită pierderilor termice însemnate în jetul de plasmă, creșterea distanței Standoff determină rotunjirea pronunțată a muchiei superioare de tăiere și obținerea unor suprafețe de tăiere, dispuse înclinat în raport cu planul normal de separație dintre componentele tăiate. Pentru a compensa acest efect nedorit, capul plasmagen trebuie apropiat cât mai mult de suprafața pieselor tăiate și asigurarea unei constricții a arcului plasmagen cât mai ridicată. Astfel, se asigură un profil al distribuției de temperaturi mai uniform în arcul de plasmă și implicit o geometrie mai convenabilă a suprafețelor și a muchiilor de tăiere, care se apropie de un profil cu muchii drepte și suprafețe normale.

Constricția arcului de plasmă peste anumite limite, conduce însă la tendința de inițiere a arcului în serie, un arc între electrodul de wolfram și duza de constricție din cupru, iar cel de-al doilea arc între duza de constricție și piesă. Acest fenomen este cunoscut sub denumirea de "arc dublu" și produce avarierea capului plasmagen și a electrodului. Prin urmare, prin tăierea convențională cu arc de plasmă se pot tăia oțeluri carbon, inoxidabile și aluminiu, pentru fiecare tip de material fiind necesare însă, diferite debite și gaze plasmagene (amestec de Ar și H₂). Limitele de calitate sunt impuse de evitarea fenomenului de producere a arcului dublu, ca urmare a constricției arcului de plasmă și a distanței minime dintre piesă și capul plasmagen.

Tăierea cu arc de plasmă dual-flow, este o variantă ușor modificată a procesului convențional de tăiere cu arc de plasmă, figura 8.22. Practic, se utilizează un gaz secundar de protecție, însuflat în jurul arcului de plasmă. Gazul principal plasmagen este azotul, iar tipul de gaz secundar se alege în funcție de calitatea metalului ce trebuie tăiat. Pentru tăierea oțelurilor carbon se utilizează aer sau oxigen, CO₂ în cazul oțelurilor inoxidabile și amestecuri de argon și hidrogen pentru tăierea aluminiului. Principalul avantaj al acestei variante este utilizarea unei duze ceramice de formare a gazului secundar, dispusă la exteriorul capului plasmagen, care are ca și efect răcirea mai eficientă a capului plasmagen și reducerea riscului de producere a arcului dublu.

Tăierea cu arc de plasmă și injecție de apă (1968) este o variantă derivată din sistemul dual-flow, doar că în locul gazului secundar se injectează o perdea de apă care determină o constricție suplimentară a arcului de plasmă, figura 8.23.

S-au dezvoltat două variante de injectare a apei, un sistem care injectează apa după o direcție radială și un al doilea sistem, care injectează apa și imprimă acesteia o traiectorie elicoidală, asemenea gazului plasmagen.

Creșterea constricției arcului de plasmă se datorează presiunii jetului de apă injectat radial în arcul de plasmă, temperaturile urcând până la cca. 50.000 K, practic fiind de două ori mai mari, decât în cazul arcului de plasmă convențional.

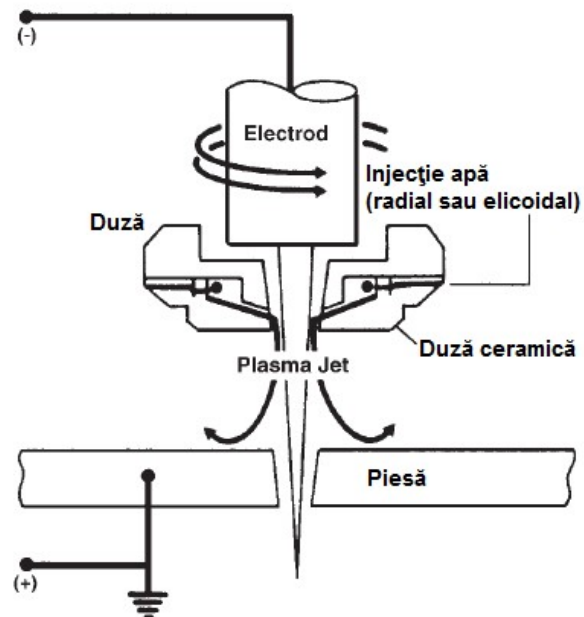


Fig. 8.23 Tăierea cu arc de plasmă și injecție de apă (1968).

Ca urmare, se îmbunătățește calitatea suprafețelor tăiate, abaterea unghiulară de la planul normal se micșorează, se reduce raza de curbură a muchiiilor de tăiere concomitent cu creșterea vitezei de tăiere. Mai mult, apa injectată în arcul de plasmă asigură o răcire mai eficientă a capului plasmagen, prelungind durata de exploatare a acestuia.

Tăierea cu arc de plasmă sub apă (1977) elimină unele din inconvenientele proceselor de tăiere cu plasmă, respectiv cantitatea ridicată de noxe și gaze, precum și nivelul de zgomot foarte mare, situat între 105-115 dB. Nu în ultimul rând, se micșorează și cantitatea de radiații în domeniul UV. Procesul de tăiere este condus cu ajutorul unor echipamente CNC, ceea ce asigură o precizie și productivitate ridicată la tăiere. Materialul este scufundat la o adâncime de aproximativ 50-75 mm sub nivelul apei, echipamentul de tăiere fiind prevăzut cu un senzor, care detectează suprafața superioară a materialului pentru automatizarea procesului de tăiere. Senzorul respectiv, măsoară tensiunea arcului de plasmă și astfel poate trimite instrucțiuni echipamentului, pentru ajustarea nivelului apei din bazin.

Procesul de tăiere cu arc de plasmă sub apă prezintă și o serie de dezavantaje, dintre care putem aminti faptul că piesa nu este vizibilă pe durata procesului de tăiere, iar viteza de tăiere este redusă cu cca. 10-20%. În plus, operatorul nu mai poate aprecia pe baza sunetului produs de arc, dacă procesul de tăiere decurge în parametrii normali cu rezultatele aferente asupra calității suprafețelor tăiate. În cazul tăierii aluminiului și aliajelor ușoare, oxigenul obținut în urma disocierii apei are tendința de a se combina cu metalul topit formând oxizi, iar hidrogenul degajat se poate acumula sub piesa metalică, formând bule de dimensiuni mari, mărin d riscul producerii unor explozii. Din acest motiv, este necesară agitarea apei din bazin pentru prevenirea acumulărilor de hidrogen.

Tăierea cu arc de plasmă sub apă și insuflare de aer¹ (*Bubble Muffer* Ib.eng., 1972) dislocă apa din fața generatorului de plasmă scufundat la cca. 50 mm sub nivelul apei, prin insuflarea unui jet de aer ce produce formarea bulelor de aer, ce separă și protejează arcul de plasmă de apa din bazin, figura 8.24.

Se păstrează pe de o parte avantajele obținute la tăierea cu arc de plasmă sub apă, precum reducerea noxelor, a zgomotului intens, reducerea emisiei de radiații UV și prelungirea duratei de exploatare a capului plasmagen, iar pe de altă parte, se recuperează parțial din viteza de tăiere specifică tăierii convenționale cu arc de plasmă.



Fig. 8.24 Tăierea cu arc de plasmă sub apă și insuflare de aer, *Hypertherm*² [65].

Tăierea cu arc de plasmă și oxigen³ (1983), se bazează pe principiul utilizării oxigenului în procesele de tăiere oxigaz. Primele încercări de tăiere cu arc de plasmă și insuflare de oxigen ce au avut loc la începutul anilor 1970, nu au condus la rezultate acceptabile, datorită duratei de viață extrem de scurte a electrodului din capul plasmagen.

¹ Water Muffler and Water Table [65].

² Underwater Muffler, Hypertherm, 1977.

³ Oxygen Plasma Cutting

Utilizarea hafniului și zirconului pentru confecționarea electrozilor a permis prelungirea duratei de viață a acestora și astfel varianta de tăiere cu arc de plasmă și oxigen, a trezit din nou interesul. Firma Hypertherm [65] a reușit să confecționeze un sistem de tăiere sub apă, în care gazul plasmagen este oxigenul.

Viteza de tăiere a crescut cu 30% în condițiile în care au crescut și parametrii de calitate a suprafețelor tăiate, cu suprafețe normale de tăiere și muchii ușor rotunjite. Prin acest procedeu se pot tăia oțeluri de înaltă rezistență, slab aliate, obținându-se suprafețe netede, fără depuneri pe muchia inferioară, îmbunătățindu-se condițiile de prelucrare mecanică a pieselor astfel tăiate. Partea critică a procesului, rămâne în continuare durata mai scurtă a electrodului din capul plasmagen, însă raportul cost-calitate pentru suprafețele tăiate, rămâne unul convenabil.

Tăierea cu plasmă de înaltă densitate¹ (1990), s-a dezvoltat ca urmare a concurenței în domeniul tăierii termice a metalelor cu grosime mică, generată de apariția pe piață a echipamentelor de tăiere cu laser. S-a avut în vedere atingerea performanțelor echipamentelor de tăiere cu laser, atât în ceea ce privește viteza de tăiere, cât și calitatea suprafețelor tăiate. Avantajul echipamentelor de tăiere cu arc de plasmă față de cele cu laser, ar fi costul mai mic de achiziție a echipamentelor, precum și condițiile de mentenanță mai puțin pretențioase. Prin urmare, îmbunătățirea performanțelor și tehnologiei de realizare a constricției arcului electric, a condus la creșterea densității de energie în arcul de plasmă la un nivel comparabil cu cel al echipamentelor laser. Prin menținerea unei viteze de tăiere convenabile, a crescut nivelul de precizie și calitate a suprafețelor tăiate, comparabil cu cel obținut în urma tăierii cu fascicul laser. Schema de principiu a unui cap plasmagen de tăiere cu arc de plasmă de înaltă densitate este ilustrată în figura 8.25.

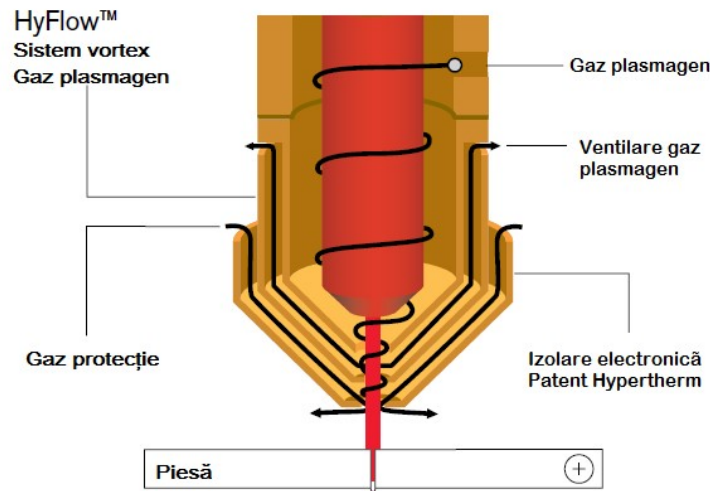


Fig. 8.25 Schema capului plasmagen de tăiere cu arc de plasmă de înaltă densitate [65].

Elementele constructive care asigură performanța ridicată de tăiere ale capului plasmagen, sunt sistemul vortex pentru gazul plasmagen și sistemul de izolare electronică pentru gazul de protecție. Curgerea gazului de protecție trebuie să fie laminară, pentru a proteja materialul de acțiunea oxigenului din atmosfera ambiantă, care ar putea fi antrenat în coloana gazului.

¹ High Density Plasma Cutting

8.2 Tăierea cu jet de apă abraziv

Începând cu anii 1960 s-au realizat primele echipamente de tăiere cu jet de apă de înaltă presiune asistate de echipamente cu comandă numerică¹, dar istoricul acestui procedeu de tăiere datează din prima parte a sec. XX. Jetul de apă de înaltă presiune (1300-6200 bar) este amestecat cu particule abrazive și este forțat să iasă printr-un orificiu cu diametrul cuprins între 0,18 și 0,4 mm. Acest jet mixt de apă și particule abrazive formează un fascicul foarte subțire, uneori denumit "*laser de apă*" care atinge viteze apropiate de cea a sunetului, de până la 960 km/h. Viteza foarte mare de curgere a apei prin ajutorul capului de tăiere, creează un fenomen de aspirație prin efectul Venturi și antrenează particulele abrazive în jetul de apă într-o cameră de amestec, conform figurii 8.26.

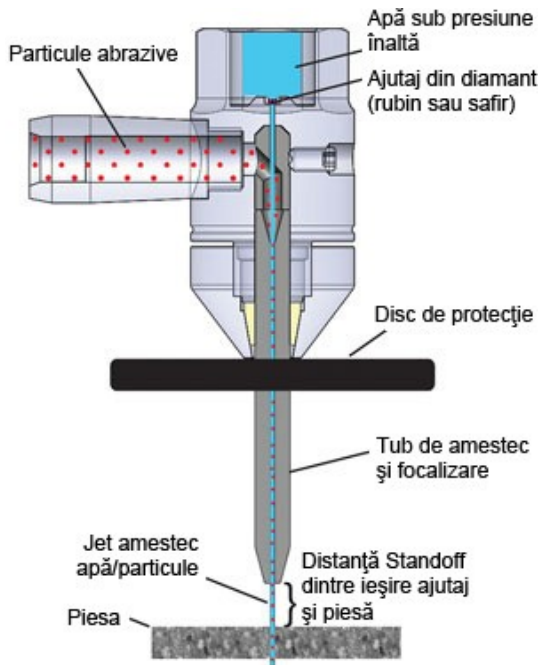


Fig. 8.26 Schema de principiu a capului de tăiere cu jet de apă și particule abrazive [66].

În cazul tăierii unor materiale mai moi precum lemn, spume, cauciuc etc. nu este necesară introducerea de particule abrazive în jetul de apă, tăierea efectuându-se doar sub acțiunea presiunii înalte a jetului de apă. Practic, se poate tăia orice fel de material, de la neferoase la materiale metalice, până la materiale foarte dure, precum piatra sau sticla.

Nu se poate tăia diamantul și sticla special tratată termic, utilizată pentru geamuri securizate. Diamantul este extrem de dur, iar sticla securizată se sparge în procesul de tăiere. Sticla securizată este concepută să se spargă în condiții de siguranță, fiind o proprietate specială a acesteia și astfel este utilizată pentru realizarea parbrizelor la autoturisme, vitrine etc.

Unele materiale compozite laminate pot avea deasemenea o comportare nesatisfăcătoare la tăiere cu jet de apă abraziv, datorită posibilității delaminării acestora, în cursul procesului de tăiere.

Tăierea cu jet de apă prezintă o serie de avantaje în raport cu procedeele de tăiere termică, dintre care se pot enumera: materialul nu suferă transformări structurale, nu avem zonă influențată termic, nu avem zgură sau depuneri de material pe muchiile de tăiere, nu se produc deformații, nu avem stare de tensiuni remanente, suprafețele nu se oxidează sau carburează etc. Componentele critice ale instalației de tăiere ce asigură calitatea și productivitatea, sunt unitatea de asigurare a presiunii foarte înalte a apei și orificiul de ieșire din ajutorajul capului de tăiere. Acesta asigură coerența și forma jetului de apă de înaltă presiune și se confecționează uzual din diamant, rubin sau safir, având un diametru sub 0,4 mm. Diamantul are o duritate de patru ori superioară durezza rubinului sau safirului și este utilizat cel mai frecvent pe instalațiile moderne de tăiere cu jet de apă abraziv. Alegerea tipului de particule abrazive, a dimensiunii și densității de particule din jet se face în funcție de calitatea materialului tăiat, determinând durabilitatea și fenomenul de eroziune a suprafețelor interioare ale ajutorajului, unde se realizează amestecul dintre apă și particulele abrazive.

¹ Machining & CNC Manufacturing: A brief history". Worcester Polytechnic Institute

Viteza de tăiere este influențată de calitatea, dimensiunea și duritatea particulelor abrazive, respectiv crește proporțional cu cantitatea de particule abrazive din jet. Peste o anumită densitate a particulelor abrazive din jetul de apă, există riscul de înfundare a ajutorului din capul de tăiere. Datorită faptului că aproximativ 60-70% din costul operației de tăiere, îl reprezintă costul achiziției particulelor abrazive, se recomandă ca dozarea particulelor abrazive să se facă precis, pentru a asigura condiții optime de tăiere, prelungirea duratei de exploatare a componentelor instalației, reducerea costurilor aferente particulelor abrazive, precum și diminuarea risipei acestora.



Fig. 8.27 Vedere generală a capului de tăiere cu jet de apă și particule abrazive [66].
1- racord de apă, 2-intrare particule abrazive, 3-racord fixare tub ajutor

În condiții de exploatare eficientă a instalației de tăiere, ajutorul tubului de amestec (figura 8.27) are o durată uzuală de funcționare de cca. 120 ore de tăiere. Dacă apare o uzură asimetrică a duzei de ieșire, fasciculul de apă la ieșire nu mai are o formă rotundă, se pierde din coerența jetului de apă, din energia acestuia, cu efecte negative asupra calității pieselor tăiate, fiind necesare operații de înlocuire a componentelor uzate. Un jet de apă coerent își păstrează forma jetului pe o distanță mai mare de la ieșirea din ajutor.

Tab. 8.2 Particule abrazive utilizate la tăierea cu jet de apă [67].

Particule abrazive	Formulă chimică	Duritatea Knoop
Carbură de siliciu	SiC	2500
Oxid de aluminiu	Al ₂ O ₃	2100
Garnet X (Ca, Mg, Fe, Mn) ²⁺ Y (Al, Fe, Cr) ³⁺ X - cationi bivalenți Y - cationi trivalenți	X ₃ Y ₂ (SiO ₄) ₃	1350
Oxid de siliciu	SiO ₂	700
Pulbere de oțel obținută prin atomizare din fază lichidă		600
Sticlă		500
Oxid cupru (zгурă)	Cu ₂ O CuO	-

Caracteristicile și tipul particulelor abrazive determină eficiența și costul procesului de tăiere, dar și calitatea suprafețelor tăiate. În tabelul 6.2 sunt prezentate particulele abrazive utilizate la tăierea cu jet de apă abraziv, iar în figurile 8.28 și 8.29 sunt prezentate aspectul morfologic al unora dintre acestea.



Fig. 8.28 Aspectul morfologic al particulelor abrazive garnet, $X_3Y_2(SiO_4)_3$.

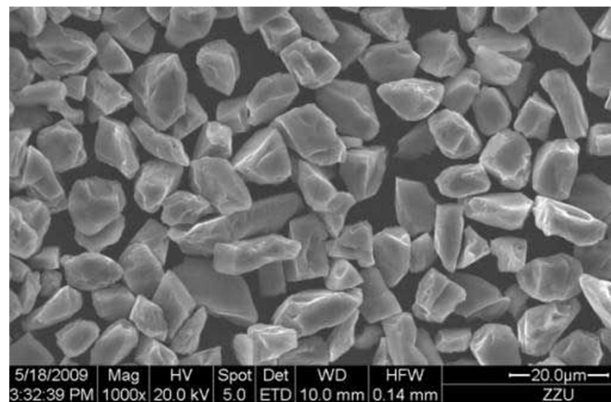


Fig. 8.29 Aspectul morfologic al particulelor din carbură de siliciu.

Deși la fabricarea discurilor și a pietrelor abrazive utilizate la prelucrarea metalelor, particulele garnet sunt considerate prea moi, utilizându-se particule de oxid de aluminiu sau carbură de siliciu, la aplicațiile de tăiere cu jet de apă abraziv, se utilizează foarte frecvent particulele de garnet. Explicația constă în eficiența acestor particule abrazive la tăierea în jetul de apă, care se situează la cca. 90% din eficiența particulelor din oxid de aluminiu, însă costul lor este de doar 10% din costul particulelor din oxid de aluminiu.

Eficiența sporită a particulelor garnet la tăierea cu jetul de apă se datorează diferențelor de viteză la care are loc procesul de tăiere. Discurile abrazive, pietrele de polizor, operează la viteze de așchiere de cca. 35 m/sec, iar la tăierea cu jetul de apă, viteza acestuia atinge valori de 600 m/sec.

La viteze foarte mari ale jetului de apă se creează turbulențe pe suprafața exterioară a acestuia, care se dezvoltă cu amplitudini tot mai ridicate, odată cu creșterea lungimii jetului liber. Efectul acestor turbulențe se face resimțit asupra stabilității formei jetului de apă. Se produce o antrenare a aerului în jet, ce va contribui la o fragmentare rapidă și la diminuarea substanțială a energiei lui cinetice. Pierderile de energie datorate frecărilor aerodinamice cu aerul vor fragmenta jetul tot mai puternic, iar energia lui la impactul cu materialul de tăiat, va fi disipată pe o suprafață mult mai mare, ceea ce va afecta negativ atât calitatea suprafețelor tăiate, precum și restul indicatorilor de performanță.

La alegerea unui proces de tăiere, trebuie să fie luate în considerare aspecte multiple, pe care inginerul tehnolog trebuie să le cunoască: caracteristicile și proprietățile materialului ce trebuie tăiat, grosimea acestuia, detaliile și complexitatea conturului de tăiere, fenomenele de durificare sau de modificare a compoziției chimice în straturile superficiale ale materialului tăiat, deformațiile și starea de tensiuni indusă în material, nivelul de radiații și noxe degajate, normele de protecția muncii, nivelul de zgomot etc. Nu în ultimul rând, se iau în considerare indicatorii de productivitate și calitate a suprafețelor tăiate, precum și costurile operației de tăiere, care se regăsesc în costul produsului final. Aceste informații sunt absolut necesare în luarea unei decizii, privind alegerea unui procedeu de tăiere, în baza unei analize tehnico-economice. Pentru a sintetiza aceste informații, în tabelul 8.3 se prezintă o analiză comparativă, pentru principalele procese de tăiere: oxigaz, cu plasmă, cu laser și cu jet de apă.

Tab. 8.3 Analiza comparativă a procedeelor de tăiere.

Parametrul	Tăiere oxigaz	Tăiere cu plasmă	Tăiere cu laser	Tăiere cu jet de apă
Viteza de tăiere	redușă	rapidă	rapidă	redușă
Grosimea materialului, [mm]	uzual < 500 max. cca. 1000	uzual < 50	max. 30 (6 kW)	de la foarte subțiri la foarte groase
Restricții material	t°C de ardere < t°C de topire a oxizilor t°C de aprindere a metalului < t°C de topire metal	materiale conductive electric, nu se pot tăia materiale ceramice	reflectivitatea optică a materialului (probleme ptr. cupru, aluminiu, metale prețioase)	nu sunt (anumite mat. compozite laminate se pot delamina)
Detalii contur tăiere	foarte simple	uzual simple	complicate	complicate
Starea suprafeței, peliculă de oxizi	bună	medie	bună	foarte bună
Durificarea materialului	ridicată carburarea suprafeței pe lățime mare	da pe lățime redusă	da pe lățime foarte redusă	nu
Deformații termice	da importante	da reduse	da foarte reduse	nu
Depuneri de zgură pe muchiile de tăiere	da cantități importante	da redus	da foarte redus	nu
Margini supratopite	da rază semnificativă	da rază mică	da rază redusă	nu
Abatere suprafeței tăiate de la planul normal	mică	considerabilă odată cu creșterea grosimii materialului	nu	nu
Tăiere în mai multe treceri	nu	nu	nu	da
Cost de tăiere	redus	mic	mai mare comparativ cu tăierea cu plasmă	mare

Procesul de tăiere cu jet de apă și particule abrazive poate fi modelat matematic, principalele relații de calcul pentru parametrii procesului fiind prezentate mai jos. Considerând energia care se pierde datorită frecărilor în ajutorul capului de tăiere, viteza jetului de apă v_{jet} se poate calcula cu relația 8.1, unde:

$$v_{jet\ apa} = \psi \sqrt{\frac{2p_a}{\rho_a}} \quad [\text{m/sec}] \quad (8.1)$$

ψ - coeficient ce depinde forma orificiului de ieșire și pierderile prin frecare,
 p_a - presiunea apei, [MPa] și ρ_a - densitatea apei, [$\text{kg}\cdot\text{m}^3$].

Debitul de apă poate fi calculat în funcție de viteza de curgere a apei prin ajutoraj, secțiunea acestuia și un coeficient ϕ ce ține seama de fenomenul de strangulare a jetului în ajutoraj de curgere, la modificarea secțiunii acestuia, relația 8.2, unde c_d reprezintă un coeficient de pierderi energetice¹ în jetul de apă, datorat frecărilor din ajutoraj și contracției jetului de apă la variații de secțiune.

$$q_{apa} = \phi \cdot v_{jet\ apa} \cdot S_{orificiu} = \sqrt{\frac{2p_a}{\rho_a}} \cdot \frac{\pi d^2}{4} = c_d \cdot \frac{\pi d^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2p_a}{\rho_a}} \quad [\text{l/min}] \quad (8.2)$$

¹ discharge coefficient (lb.eng.)

Puterea jetului de apă se calculează cu relația 8.3, înlocuind în aceasta expresiile pentru viteza și debitul jetului de apă, calculate cu relațiile 8.1 și 8.2:

$$P_{jet} = p_a \cdot q_{\dot{a}pa} = p_a \cdot c_d \cdot \frac{\pi d^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2p_a}{\rho_a}} = c_d \cdot \frac{\pi d^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2p_a^3}{\rho_a}} \quad (8.3)$$

Neglijând pierderile de energie datorate fenomenului de amestec al particulelor abrazive cu jetul de apă, se poate considera conservarea impulsului jetului de apă, înainte și după introducerea particulelor abrazive în jet, prin relația 8.4. Se obțin astfel, următoarele relații valabile înainte și după introducerea particulelor abrazive în jetul de apă:

$$\Sigma(mv_a)_{\dot{inainte}} = \Sigma(mv_a)_{\dot{dupa}} \quad (8.4)$$

După introducerea debitelor masice antrenate de aer, apă și particule abrazive, relația 8.4 devine:

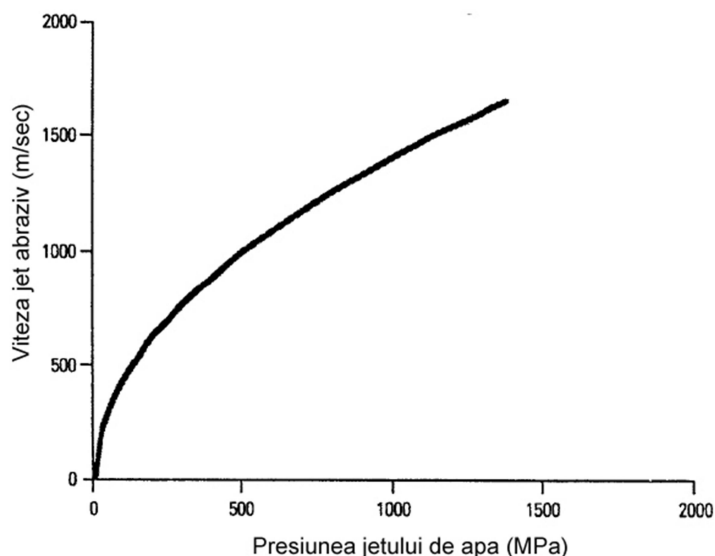
$$\Sigma(\dot{m}_{aer} \cdot v_{aer} + \dot{m}_{\dot{a}pa} \cdot v_{jet\ apa} + \dot{m}_p \cdot v_p) = constant\ \dot{inainte}\ \dot{și}\ \dot{după}\ amestec \quad (8.5)$$

Deoarece debitul de aer poate fi neglijat atât înainte, cât și după amestec, datorită densității reduse a aerului, se poate considera că după amestecul în jetul de apă, particulele abrazive primesc aceeași viteză ca și cea a jetului, iar contribuția impulsului inițial al particulelor abrazive la impulsul final al jetului abraziv poate fi neglijată. Prin urmare, după aceste simplificări relația 8.5 devine:

$$\dot{m}_{\dot{a}pa} \cdot v_{jet\ apa} = (\dot{m}_{\dot{a}pa} + \dot{m}_p) \cdot v_{jet\ abraziv} \quad (8.6)$$

Din relația 8.6 se poate exprima viteza jetului de apă abraziv, în funcție de viteza jetului de apă și debitele masice de apă și de particule abrazive, respectiv în funcție de factorul de încărcare R ce exprimă participarea particulelor abrazive în jetul de tăiere.

$$v_{jet\ abraziv} = \frac{\dot{m}_{\dot{a}pa}}{\dot{m}_{\dot{a}pa} + \dot{m}_p} \cdot v_{jet\ apa} = \frac{1}{1+R} \cdot v_{jet\ apa} \quad (8.7)$$



Unde: $R = \frac{\dot{m}_p}{\dot{m}_{\dot{a}pa}}$, reprezintă factorul de încărcare.

Relația 8.7 poate fi corectată cu un factor subunitar, ce ține seama de pierderile energetice prin ciocnirile particulelor abrazive cu suprafața interioară a ajutorajului capului de tăiere. Variația vitezei jetului abraziv în funcție de presiunea jetului de apă, este ilustrată în figura 8.30.

Fig. 8.30 Variația vitezei jetului abraziv de apă, în funcție de presiunea jetului de apă.

8.3 Lipirea



Lipirea este un procedeu conex sudării prin care se îmbină la cald două materiale metalice utilizând un material adaos cu proprietăți diferite față de cele ale materialului de bază. În procesul de lipire se topește doar materialul adaos.

În funcție de temperatura de lucru se definesc două variante de lipire. Sub temperatura de 450°C se realizează **lipirea moale**, iar peste pragul de 450°C se numește **lipire tare** sau **brazare**. Aplicațiile acestui procedeu de îmbinare la cald a materialelor metalice sunt extrem de diverse. Dintre acestea, se pot aminti:

- Industria electrotehnică și electronică;
 - fabricarea componentelor și dispozitivelor electronice;
 - îmbinarea componentelor electronice pe plăcile de circuite imprimate.
- Industria construcțiilor de mașini/autovehicule;
 - realizarea de radiatoare, rezervoare;
 - îmbinarea elementelor de caroserie;
 - fabricarea unor scule așchietoare, brazarea pastilelor din carburi metalice sau mineralo-ceramice, pe corpul de oțel al sculei.
- Industria aerospațială;
 - realizarea diverselor structuri metalice sau a unor componente;
 - brazarea unor materiale cu sudabilitate redusă.

Procesul de lipire este determinat de o serie de procese fizico-chimice care apar la interfața de contact dintre metalul de bază, aliajul de lipit și fluxul de lipire. Aici au loc o serie de reacții chimice de dizolvare și de îndepărtare a oxizilor prezenți pe suprafața materialelor, precum și procese de difuzie a atomilor, în imediata vecinătate a zonei de îmbinare. Procesul de lipire se bazează pe fenomenul de capilaritate, când aliajul topit pătrunde în interstițiile foarte înguste ale îmbinării și asigură realizarea unor legături metalice de rezistență, chiar și în condițiile în care pătrunderea aliajului topit în rostul îmbinării, se face contrar forțelor de gravitație.

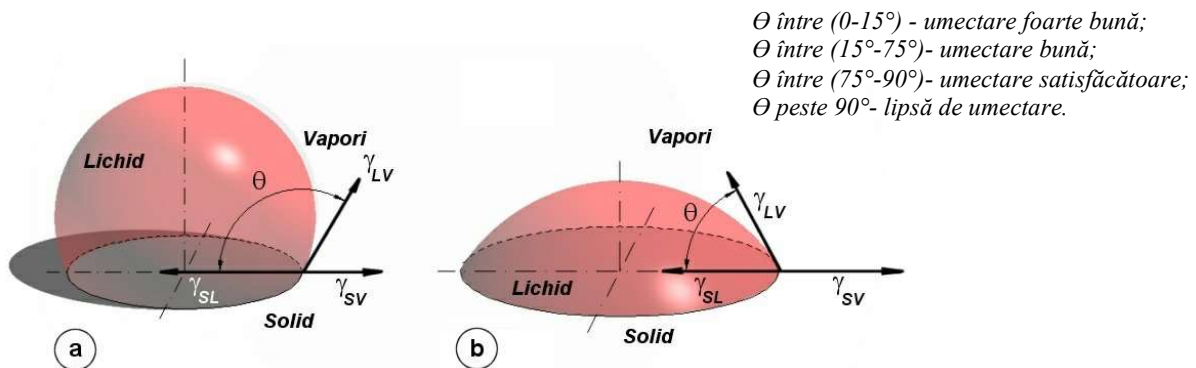


Fig. 8.31 Fenomenul de umectare. Unghiul de umectare θ .

a) lipsă umectare, b) umectare bună.

Aliajul adaos în stare topită umectează suprafața metalului de bază, între tensiunile interfazice care acționează la contactul cu metalul de bază și mediul de gaze în care se realizează procesul de lipire, există relația 8.8, cunoscută sub numele de ecuația lui Young-Depré:

$$\gamma_{sv} = \gamma_{sl} + \gamma_{lv} \cdot \cos\theta \quad [J/m^2] \quad (8.8)$$

unde s-au folosit următoarele relații:

γ_{sl} - tensiunea superficială datorată adeziunii solid-lichid;

γ_{sv} - tensiunea superficială datorată adeziunii dintre metalul de bază și moleculele de gaz;

γ_{lv} - tensiunea superficială datorată adeziunii dintre aliajul topit și moleculele de gaz.

Relația 8.8 este valabilă atunci când sistemul este la echilibru și când vectorii γ_{sl} și γ_{sv} sunt situați în același plan, figura 8.31. Umectarea este totală pentru $\Theta=0^\circ$, iar la valori ale lui $\Theta > 90^\circ$ avem lipsă de umectare. Impuritățile superficiale micșorează puternic procesul de umectare, în timp ce creșterea temperaturii reduce unghiul de umectare, datorită creșterii solubilității aliajului topit în metalul de bază.

Fenomenul de capilaritate joacă un rol esențial în cazul rosturilor mici (sub 0,25 mm) și este influențat puternic de rugozitatea suprafețelor îmbinate. Dacă acestea prezintă rizuri, capilaritatea este pozitiv influențată, față de cazul suprafețelor lustruite, unde fenomenul de capilaritate este redus. Acest aspect este important în etapa de pregătire a suprafețelor, înaintea operației de lipire.

Fluxurile pentru topire sunt aplicate pe suprafața metalului de bază, în zona de lipire, asigurând următoarele funcții:

- Dizolvă și îndepărtează impuritățile de pe suprafețele metalelor, asigură o suprafață metalică de contact lipsită de oxizi;
- Protejează suprafața metalului de bază împotriva impurificării și oxidării pe durata procesului de lipire. De cele mai multe ori acțiunea acestor fluxuri decapante este corozivă, fiind necesară îndepărtarea reziduurilor de flux după executarea lipirii, pentru a preveni corodarea metalului în timp;
- Controlează fenomenul de capilaritate, prin modificarea tensiunii superficiale dintre aliajul de topit și mediul solid/gazos, respectiv prin înlăturarea impurităților din aliajul topit.

8.3.1 Lipirea moale

Lipirea moale se întâlnește foarte frecvent în industria electrotehnică și electronică, unde este esențială conductivitatea electrică a îmbinării. Deasemenea, procedeul mai este utilizat la realizarea instalațiilor termice care lucrează la temperaturi joase, precum instalațiile sanitare sau de încălzire a locuințelor. Rețeaua este realizată din țevi de cupru, lipite cu aliaje a căror temperatură de topire este inferioară pragului de 450°C .

Cele mai utilizate aliaje de lipit sunt pe bază de Sn și Pb, sau cositor cum mai sunt cunoscute. În funcție de compoziția chimică, materialul adăos pentru lipirea moale, prezintă un domeniu larg de temperaturi de topire, utilizându-se în diverse tipuri de aplicații. Conținutul de Pb, în general trebuie să fie în limite reduse, datorită gazelor toxice emenate în procesul de lipire. Staniul este un element activ care promovează fenomenul de capilaritate și asigură bune proprietăți de umectare pentru aliajul de lipit. Cantități limitate de cupru, argint sau stibiu pot asigura aliajelor de lipit rezistența mecanică necesară a îmbinării, în cazul în care, aceasta reprezintă o cerință de funcționare. În tabelul 8.4 și 8.5 sunt prezentate o serie de aliaje de lipit, împreună cu caracteristicile specifice.

În general, alegerea unui aliaj de lipit se face în funcție de temperatura de topire a metalului de bază și condițiile de funcționare ale ansamblului lipit. Creșterea punctului de topire a aliajului asigură caracteristici de rezistență mecanică superioară. Recent, legislația din Europa limitează utilizarea plumbului în electronică, datorită impactului negativ asupra mediului, precum și a efectelor nefaste asupra organismelor, intoxicația cu Pb fiind extrem de nocivă. Intoxicația cu plumb are efect cumulativ, plumbul din organism nu mai este eliminat și boala cronică se numește saturnism.

Tab. 8.4 Aliaje pentru lipire moale și exemple de aplicații.

Grupa	Marca aliajului	Indicații de utilizare
Aliaje Sn - Pb	S-Sn63Pb37 S-Sn63Pb37E	Lipire în industria electronică pe mașini speciale, în val, pentru circuite electronice.
	S-Sn60Pb40 S-Sn60Pb40E	Lipiri în industria electrotehnică și electronică la circuite imprimate, oțeluri aliate.
	S-Pb50Sn50 S-Pb50Sn50E	Lipiri în industria electrotehnică, stanări.
	S-Pb55Sn45	Lipire la aparate electrice (casnice).
	S-Pb60Sn40	Lipiri la ambalaje de tablă subțire, piese metalice.
	S-Pb65Sn35	Lipiri la învelișurile de cabluri.
	S-Pb70Sn30	Lipiri la ambalaje din tablă subțire.
	S-Pb90Sn10	Lipiri la capetele de conexiune a componentelor electronice pasive (rezistențe și condensatoare).
	S-Pb92Sn8	Lipiri la termostate, frigidere, refrigeratoare.
	S-Pb98Sn2	Lipiri în instalații cu țevi de cupru, tinichigerie.
Aliaje Sn - Pb - Sb	S-Sn63Pb37Sb	Lipiri în val pentru plăci de circuite imprimate și tehnică miniaturală.
	S-Sn60Pb40Sb	Stanări, lipiri fine, lipiri tablă zincată, industria electrotehnică.
	S-Pb50Sn50Sb	Lipiri în industria electronică, stanări.
	S-Pb58Sn40Sb2	Lipiri la frigidere, refrigeratoare.
	S-Pb69Sn30Sb1	Lipiri prin frecare, lipiri plumb.
	S-Pb74Sn25Sb1	Lipiri prin frecare.
	S-Pb78Sn20Sb2	Lipiri piese de uz general din: oțel, Cu, aliaje Cu-Zn-Pb.
Aliaje Sn - Sb	S-Sn95Sb5	Lipiri la frigidere și refrigeratoare.
Aliaje Sn - Pb - Bi	S-Sn60Pb38Bi2	Lipiri aparate electrice și electronice, tehnică miniaturală, circuite imprimate.
	S-Pb49Sn48Bi3	Lipiri aparate electrice și electronice, tehnică miniaturală, circuite imprimate.
Aliaje Bi - Sn	S-Bi57Sn43	Lipituri speciale.
Aliaje Sn - Pb - Cd	S-Sn50Pb32Cd16	Lipituri la întrerupătoare termice, lipiri succesive în trepte.
Aliaje Sn - Cu	S-Sn99Cu1	Lipituri speciale.
	S-Sn97Cu3	Lipiri în instalații cu țevi de cupru, tinichigerie, piese metalice.
Aliaje Sn - Pb - Cu	S-Sn60Pb38Cu2	Lipiri la aparate electrice, electronică, tehnică miniaturală, circuite imprimate.
	S-Sn50Pb49Cu1	Lipiri în construcții de aparate electrice, electronică, tehnică miniaturală.
Aliaje Sn - In	S-Sn50In50	Lipituri speciale la temperaturi relativ scăzute.
Aliaje Sn - Ag	S-Sn96Ag4 S-Sn97Ag3	Lipituri speciale. Lipituri speciale.
	S-Sn62Pb36Ag2	Lipituri în construcția de aparate electrice, electronică, tehnică miniaturală, circuite imprimate.
Aliaje Sn - Pb - Ag	S-Sn60Pb36Ag4	Lipituri speciale.
	S-Pb93Ag2 S-Pb95Ag5	Lipituri speciale. Lipituri speciale.
Aliaje Pb - Sn - Ag	S-Pb93Sn5Ag2	Lipiri în aviație, la motoare electrice de clasă F.

Tab. 8.5 Compoziția chimică și temperatura de topire a unor aliaje de lipit, pentru lipirea moale.

Compoziția aliajului de lipire (%)					Punct de topire	Aplicații industriale
Sn	Pb	Ag	Zn	Sb		
	96	4			305°C	Îmbinări lipite ce lucrează la temperaturi ridicate
60	40				188°C	Circuite electronice
50	50				199°C	Lipirea conductorilor
40	60				208°C	Radiatoare automobile
91			9		200°C	Lipirea conductorilor de aluminiu
95				5	238°C	Instalații termice, sanitare

Anual sunt utilizate peste 75.000 tone de plumb, doar pentru realizarea cablajelor imprimate, plumbul regăsindu-se în compoziția aliajelor de lipit. La nivel mondial, industria folosește cinci milioane de tone Pb, din care 10% este folosit în industria electronică [69]. Astfel, directiva 2002/95/EC restricționează substanțele cu caracter periculos din cadrul echipamentelor electrice și electronice, care depășesc nivelurile stabilite prin lege pentru: Pb, Cd, Hg, Cr hexavalent, difenili polibrominați (PBB), substanțe anti-inflamabile pe bază de eteri difenil polibrominat. Aliajele de lipit fără plumb, care înlocuiesc aliajele SnPb, conțin Sn ca metal de bază și unul sau mai multe din următoarele metale: Bi, Ag, In, Zn, Cu, Sb, tabelul 8.6.

Tabel 8.6 Aliaje pentru lipire moale, cu baza staniu și fără plumb [69].

Bi	In	Zn	Ag	Cu	Sb
Sn-58Bi	Sn-42In		Sn-2.5Ag	Sn-0.7Cu	Sn-25Ag-10Sb
Sn-9.5Bi-0.5Cu	Sn-50In		Sn-3.5Ag	Sn-1Cu	Sn-1Sb
Sn-Zn-Bi-In			Sn-5Ag	Sn-3Cu	Sn-5Sb
		Sn-Zn-P	Sn-3.4Ag-1.2Cu		
	Sn-8.8In-27.6Zn		Sn-3.5Ag-0.7Cu		
			Sn-4Ag-0.5Cu		
			Sn4.7Ag-1.7Cu		

Conform standardului SR EN 29454-1:1994, fluxurile pentru lipirea moale se clasifică în funcție de tipul fluxului în trei categorii, conform tabelului 8.7.

Tab. 8.7 Fluxuri chimice pentru lipirea moale, SR EN 29454-1:1994.

Tipul fluxului	Baza fluxului	Activare flux	Forma de aplicare a fluxului
PE BAZĂ DE RĂȘINI	Colofoniu (rășină)	Fără agent activant	A Lichidă
	Rășină fără colofoniu	Agent activant halogenat	
ORGANIC	Solubil în apă	Agent activant fără halogen	
	Insolubil în apă		
ANORGANIC	Săruri	Cu clorură de amoniu	B solidă
		Fără clorură de amoniu	
	Acizi	Acid fosforic	C pastă
		Alți acizi	
Baze	Amine și/sau amoniac		

Din punct de vedere al activității chimice, fluxurile utilizate la lipirea moale pot fi clasificate conform acțiunii corozive, după cum urmează:

- **Fluxuri active** (corozive, acide sau decapante), de regulă obținute din substanțe anorganice acide precum: acidul clorhidric, acidul fosforic, cloruri de zinc sau de amoniu, care curăță

suprafețele prin atac chimic, formând compuși neaderenți, solubili. Fluxurile active trebuie înlăturate imediat după lipire, deoarece acțiunea corozivă continuă în timp și după terminarea procesului de lipire;

- **Fluxuri slab active (activate)** cu acțiune decapantă redusă, curăță suprafețele preponderent prin dizolvarea impurităților și într-o mai mică măsură prin atac chimic. Acestea sunt formate din substanțe organice (rășini naturale combinate cu activanți organici slab acizi);
- **Fluxuri neactivate (necorozive, fără acizi)** fără acțiune decapantă, curăță suprafețele numai prin dizolvarea impurităților și sunt formate din substanțe organice, de obicei rășini naturale, adesea combinate cu solvenți și agenți de îmbunătățire a umectării.

În electronică se utilizează foarte mult fluxuri fără acizi și fluxuri activate, fluxurile acide se folosesc numai pentru părți mecanice, unde intervin și solicitări mecanice asupra componentelor lipite. Fluxurile cele mai utilizate în electronică, pentru lipiri cu aliaje SnPb, sunt pe bază de colofoniu, o rășină naturală obținută prin distilarea uleiurilor rășinoase de conifere.

Colofoniul este un amestec de acid abietic ($C_{20}H_{30}O_2$, peste 80%) cu alți acizi și esteri [40]. Este o substanță solidă, cu aspect sticlos, translucid, colorat de la galben deschis la maro închis, insolubil în apă dar solubil în majoritatea solvenților organici (alcool, eter, glicerina). Se înmoaie la o temperatură de 70°C și este complet lichid la 125°C. Colofoniul dizolvă oxizii, la 150°C dizolvă foarte bine oxizii cuprului. La temperaturi de peste 210°C, colofoniul fierbe și arde, degajând fum cu miros caracteristic, practic netoxic. Colofoniul se poate folosi ca flux neactivat în stare solidă, preluat sub formă topită pe vârful ciocanului de lipit, sau ca peliculă rezultată în urma depunerii lacului de colofoniu. Fluxurile activate pentru electronică, sunt realizate pe bază de colofoniu cu adaosuri de activanți, de obicei, compuși de clor (1–2%), uzuali fiind anilina clorhidrică și dietilamină clorhidrică [40].

Gradul de „activare” al fluxului depinde de natura și conținutul de agent activ. După lipire, reziduurile de flux cu compuși de clor sunt potențial active și trebuie înlăturate. Colofoniul și activantul se amestecă cu diluanți formând paste sau soluții. Ca solvent se folosește alcoolul pur sau în amestec cu alcool izopropilic, izobutilic, metilic, ...), glicoli (glicerina) sau terebentină cu alcool [40]. O categorie aparte de fluxuri activate sunt cele numite organo-fluxuri, fără rășini, formate din amestecuri de acizi organici (butiric, lactic, ...) cu adaosuri de activanți (compuși de clor), totul în solvent, uzual apă, apă cu alcool, glicoli etc. Organo-fluxurile sunt utilizabile cam pentru toate metalele și aliajele folosite în electronică (și acolo unde fluxurile cu rășini nu sunt eficiente), dar reziduurile sunt corozive și trebuie îndepărtate după lipire, de obicei prin spălare cu apă [40].

Depunerea fluxului pe suprafețele care se vor lipi se numește **fluxare** și se poate face:

- **Concomitent cu aportul de aliaj;**
 - în cazul lipirii cu ciocanul, preluând o picătură de colofoniu pe vârful ciocanului sau utilizând aliaj tubular, figura 8.34 și 8.35.
- **Înainte de aportul de aliaj;**
 - în cazul lipirii pieselor cu montare pe suprafață, când se folosesc paste de lipit sau preforme fluxate.

Pentru depunerea fluxului **înainte de aportul de aliaj**, se folosesc mai multe procedee [40]:

1. *Fluxarea prin pensulare* se realizează cu o pensulă, aplicând fluxul lichid pe suprafețele care se vor lipi. Procedeele sunt simple, dar lente, neproductive și nu permit dozarea fluxului depus. Se face cu o perie cilindrică rotativă cu fire din plastic, care se rotește preluând flux din baie

și îl depune pe plăci. Procedeu este foarte simplu, dar nu permite dozarea fluxului, firele periei se pot agăța pe terminale sau componente, se poate depune flux și unde nu trebuie, din aceste motive, procedeul este foarte rar utilizat în prezent;

2. *Fluxarea prin imersie* se face scufundând foarte puțin plăcile (cu fața de lipire în jos) în băi cu flux lichid. Procedeu este simplu dar cu multe dezavantaje, cum ar fi: adâncimea de scufundare trebuie controlată foarte bine, cantitatea de flux depusă nu se poate controla precis, se poate depune flux și unde nu trebuie (în găuri, pe componente, pe contacte, ...), fluxul se impurifică rapid, fluiditatea trebuie controlată permanent etc. În prezent, procedeul se aplică foarte rar pentru plăci, dar se folosește pentru fluxarea capetelor conductoarelor;
3. *Fluxarea cu jet prin pulverizare* se face pulverizând flux lichid sau pulbere, cu pulverizatoare cu aer comprimat, prin ajutoraje potrivite. Pulverizarea este comandată manual sau automat, când plăcile sunt deasupra pulverizatorului. Procedeu este eficient, destul de frecvent utilizat. Printre dezavantaje sunt: blocarea frecventă a ajutorajelor cu flux scurs, imposibilitatea recuperării fluxului în exces și posibila oxidare a fluxului în aer;
4. *Fluxarea cu jet prin pulverizare fără aer* se face cu jeturi foarte fine de flux, obținute la ieșirea ajutorajelor, prin care fluxul sub presiune este forțat să iasă. Procedeu este eficient, ajutorajele nu se blochează, oxidarea în aer este evitată; totuși procedeul nu este foarte răspândit;
5. *Fluxarea prin împrôșcare cu picături* se face cu o sită cilindrică, în rotație lentă. Ochiurile sitei sunt umplute cu flux lichid la trecerea prin baia de flux, apoi ajung deasupra unui ajutoraj cu deschidere lungă și îngustă în formă de „cuțit”, prin care se suflă aer sub presiune, conform figurii 8.32. Jetul de aer forțează fluxul din ochiuri să iasă sub formă de picături mici, care se depun pe plăcile de cablaj. Presiunea aerului și viteza de rotație a sitei pot fi controlate, reglând cantitatea de flux depusă. Dezavantajul constă în faptul că fluxul în exces, eventual impurificat, se întoarce în baie.

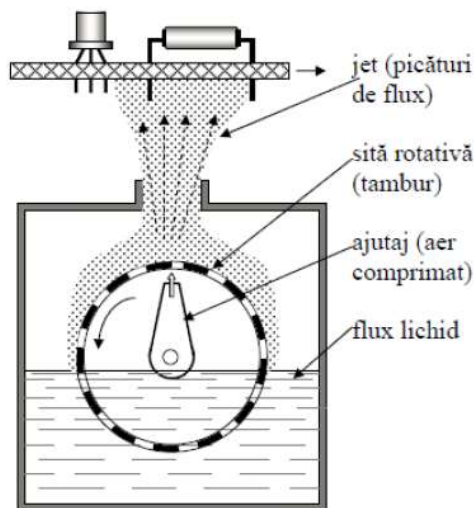


Fig.8.32 Fluxare prin împrôșcare cu picături [40].

6. *Fluxarea în val* se realizează trecând plăcile printr-un „val” sau undă staționară, formată prin pomparea fluxului printr-o fantă cu deschidere dreptunghiulară, figura 8.30. Procedeu este relativ simplu, permite controlul cantității de flux depus prin reglarea înălțimii valului, iar fluxul în exces recade în rezervor. Impurificarea fluxului este relativ redusă, însă pentru asigurarea unei rate a defectelor de lipire ce tinde spre zero, se impun toate măsurile posibile pentru eliminarea eventualelor cauze a apariției defectelor de lipire.

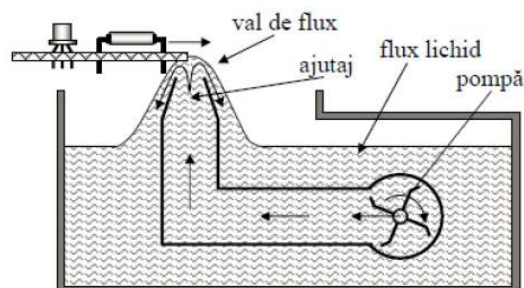


Fig.8.33 Fluxarea în instalații cu val [40].

7. *Fluxarea cu spumă* se face trecând plăcile printr-un val de spumă de flux. Spuma se obține trecând aer sub presiune printr-o piatră poroasă plasată în baia cu flux, într-un vas deschis la partea superioară. La ieșirea din vas se formează un val de spumă cu înălțime constantă și mică (sub 6 mm și mai rar până la 10–12mm). Excesul de spumă se scurge în baia de flux sau într-un vas colector, ori este înlăturat cu ajutorul unui jet de aer comprimat, mai rar folosind perii. Fluxarea cu spumă este foarte utilizată, echipamentul este simplu, ușor de întreținut, asigură fluxare bună, dar terminalele nu pot fi mai lungi de 6–10 mm.

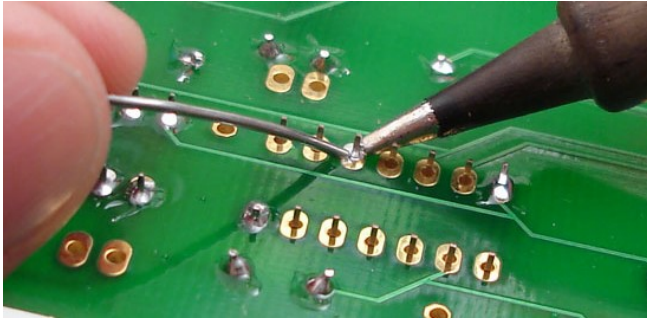


Fig.8.34 Lipirea sau cositorirea componentelor electronice pe o placă imprimată.

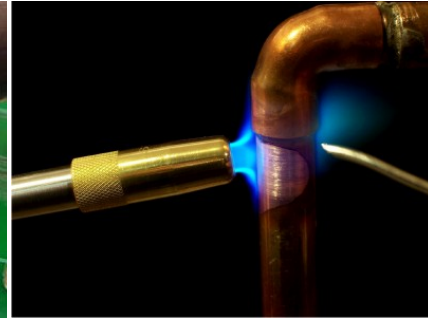


Fig.8.35 Lipirea fittingurilor de cupru într-o instalație de termoficare.

În figurile 8.34 și 8.35 sunt ilustrate aspecte din operația de lipire a componentelor electronice pe plăcile imprimate, respectiv îmbinarea unor țevi de cupru din instalații sanitare sau termoficare, care lucrează la temperaturi joase. Uzual, temperatura agentului termic nu depășește 90°C.

8.3.2 Brazarea

Așa cum s-a arătat mai devreme, brazarea este un proces conex sudării prin care legătura metalică de rezistență dintre piesele îmbinate, se obține prin topirea materialului adaos la temperaturi superioare de 450°C, însă fără a se atinge temperatura lichidus a metalelor de bază. Materialele adaos, în general, sunt aliaje de Cu, Co, Ni, Ag sau Au în funcție de tipul aplicației.

Dintre cele mai importante avantaje ale procesului de brazare, putem enumera:

- Brazarea se poate realiza simultan pe un lot de piese, în cuptoare de brazare;
- Productivitate ridicată și costuri mici de fabricație;
- Deformațiile pieselor componente îmbinării sunt reduse sau eliminate;
- Diluția metalului de bază este scăzută;
- Ciclul termic este controlat cu precizie;
- Pot fi îmbinate materiale diferite;
- Gamă foarte variată de grosimi ale componentelor îmbinate, inclusiv piese subțiri cu piese de grosime ridicată;
- Rostul de brazare poate varia în limite largi;
- Nu sunt necesare în general, pregătiri de execuție complicată a suprafețelor de îmbinare.

Aspectele asupra cărora se acordă atenție, la controlul calității îmbinărilor brazate, sunt:

- Asigurarea legăturii metalice, pe întreaga suprafață a îmbinării;
- Pătrunderea aliajului de brazare pe toată lungimea interstițiilor, prin fenomenul de capilaritate. Un factor important este dozarea cantității exacte de aliaj, în funcție de dimensiunile îmbinării. O dozare insuficientă va conduce la pătrunderi incomplete, formă și dimensiuni necorespunzătoare ale îmbinării, iar o dozare excesivă la prelingeri de material, aspect necorespunzător;

- Reducerea porozității din îmbinarea brazată;
- Asigurarea unei adâncimi de difuzie corespunzătoare în metalul de bază;
- Reducerea incluziunilor nemetalice, din metalul depus;
- Asigurarea unei microstructuri favorabile corespunzătoare solicitărilor mecanice și termice la care va fi supusă îmbinarea, figura 8.37.

Sursele termice și parametrii pentru brazare se aleg în funcție de calitatea și reactivitatea chimică a metalului de bază și a aliajului de brazare, temperatura de brazare, gabaritul pieselor îmbinate, seria de producție etc. În figura 8.36 sunt prezentate schematic elementele și caracteristicile importante care trebuie luate în considerare, într-un proces tehnologic de brazare.

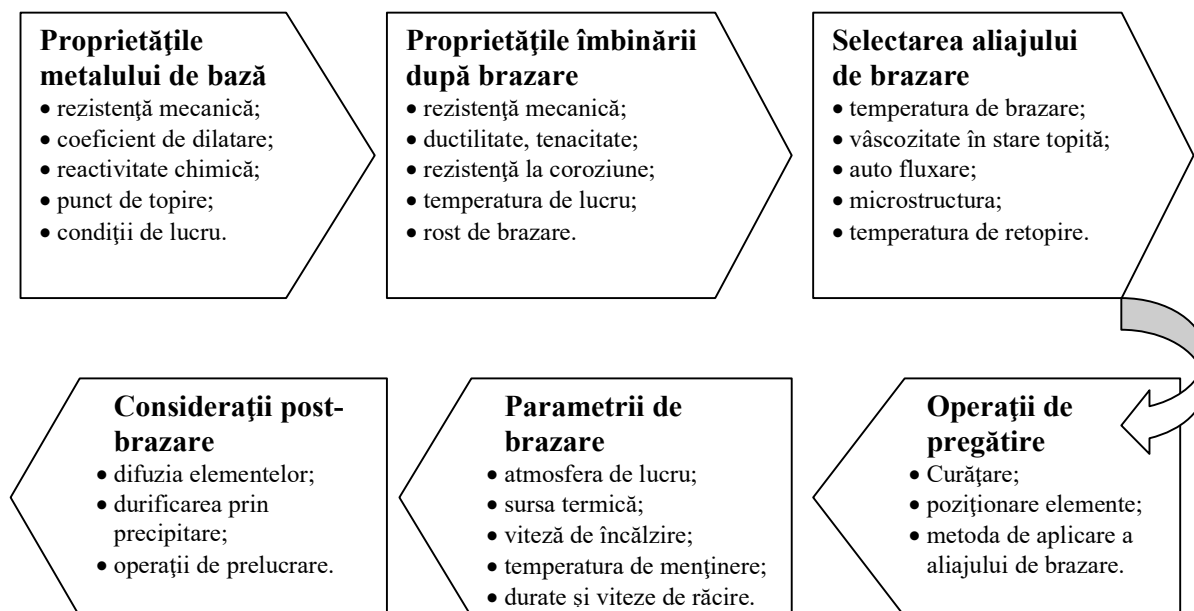


Fig. 8.36 Considerații generale privind procesul de brazare.

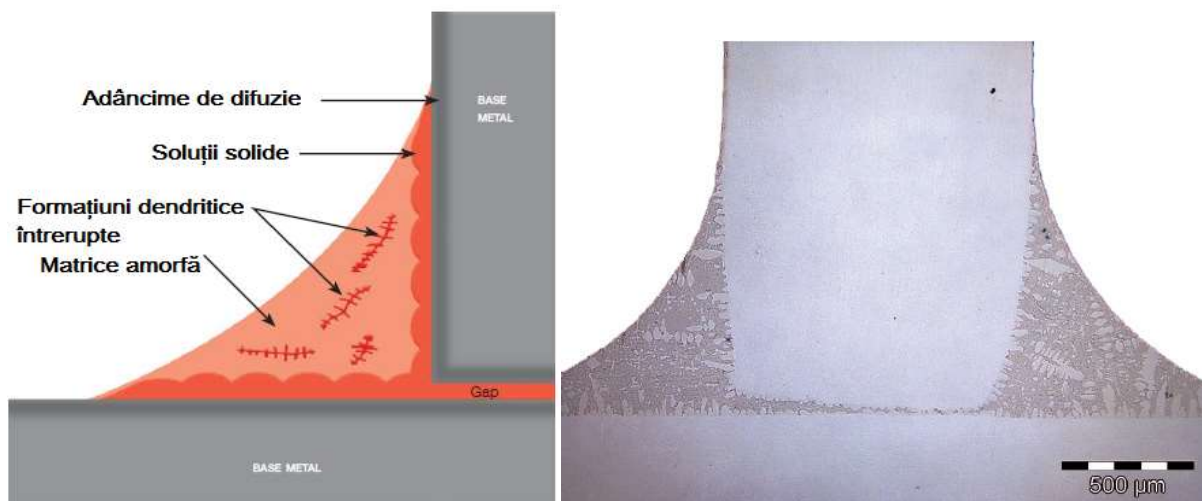


Fig. 8.37 Microstructură tipică pentru îmbinări prin brazare [71].



Fig. 8.38 Aspecte din procesul de brazare prin inducție.

Brazarea cu flacără se utilizează în general la instalații termice pe bază de cupru, care lucrează la temperaturi mai ridicate. De exemplu, arzătoarele din camerele de ardere sau fixarea unor fittinguri pe țevi de cupru, în care agentul termic este la temperaturi ridicate. Gazele utilizate sunt: acetilena, propanul sau hidrogenul. Aliajele de lipit sunt pe bază de cupru sau argint.

Brazarea prin inducție se aplică în general produselor tubulare, bobina de inducție trebuie să aibă formă și dimensiuni adecvate geometriei elementelor brazate, figura 8.38. Piesele metalice se încălzesc prin inducție până la temperaturi la care aliajul de brazare se topește și pătrunde în interstițiile îmbinării, prin fenomene de capilaritate. Aliajele de brazare sunt uzual pe bază de cupru și argint, având o temperatură de topire de cca. 950°C.

Brazarea în cuptoare tunel se aplică în cazul unor producții de serie mare. Piesele se poziționează pe banda transportoare a cuptorului, preasamblate la forma și poziția dorită, iar aliajele de brazare sunt aplicate în prealabil pe elementele și suprafețele de brazare, în cantități precise. Pentru asigurarea formei și dimensiunilor ansamblurilor brazate, se utilizează rame sau dispozitive în care piesele sunt fixate în poziția corectă, care trebuie menținută pe toată durata procesului. Trebuie menționat faptul că în funcție de coeficientul de dilatare liniară al materialelor pentru piese și dispozitivul de fixare, se pot modifica diferențiat lungimile acestora, iar în timpul operației de brazare la temperaturi ridicate, să nu mai fie asigurată strângerea componentelor. În aceste situații, se recomandă ca dispozitivul de fixare să fie executat din același material ca și cel de bază.

Un avantaj al acestei metode este încălzirea și răcirea uniformă a structurii metalice brazate, precum și controlul precis al temperaturii și atmosferei de protecție. Și în această variantă este esențială pregătirea corectă a suprafețelor de brazare, curățarea acestora de oxizi și grăsimi, pătrunderea aliajului de brazare în interstițiile rostului, efectuându-se pe baza fenomenului de capilaritate. În figura 8.39 sunt ilustrate câteva aspecte din itinerarul tehnologic de brazare, a unor componente metalice în cuptoare tunel. Dozarea materialului adaos se face manual, acesta fiind sub formă de pastă ce conține cantitatea de flux necesară, piesele astfel pregătite, fiind așezate pe banda transportoare a cuptorului tunel.



a) dozare manuală pastă brazare

b) pregătirea îmbinării

c) brazarea în cuptorul tunel

Fig. 8.39 Aspecte din brazarea cu flacără a unor componente din oțel inoxidabil.

Brazarea în cuptoare clopot se aplică în cazul unor piese realizate din materiale metalice cu reactivitate chimică mărită. Cuptoarele pot fi încălzite cu gaz, obținându-se atmosfere de brazare endoterme sau exoterme sau pot fi încălzite electric în atmosferă de argon, azot sau hidrogen. În general, se utilizează aliaje de brazare pe bază de cupru, argint, nichel sau aur.

Brazarea în vid este o variantă care se aplică în cazul pieselor realizate din materiale puternic reactive la temperaturi ridicate. Cuptorul de brazare este încălzit electric, iar aliajul de brazare pătrunde în interșiții prin fenomenul de capilaritate. Cuptorul este prevăzut cu agregat de vidare, care asigură un vid tehnic ce previne oxidarea pieselor la temperaturile ridicate de brazare. Se pot utiliza aliaje de brazare pe bază de aur, argint, cupru, nichel.

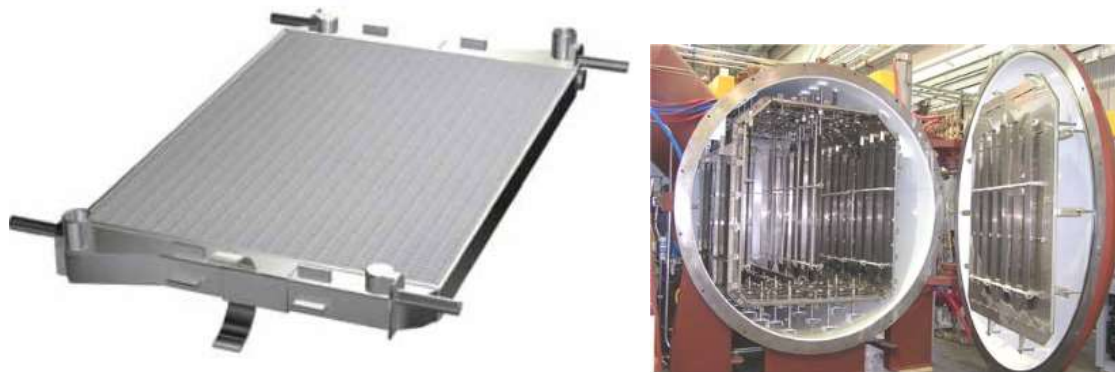
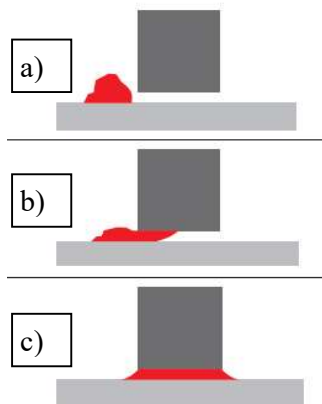


Fig. 8.40 Brazarea radiatoarelor de aluminiu în cuptoare cu vid [72, 73].

Un exemplu de brazare în vid, este fabricația radiatoarelor de aluminiu utilizate în industria auto sau frigorifică, figura 8.40. Aluminiul este cunoscut pentru reactivitatea chimică foarte mare față de oxigen, precum și pentru stabilitatea termică foarte ridicată a peliculei de oxizi, extrem de aderentă pe suprafața metalică. Brazarea în vid a aluminiului se bazează pe efectul combinat dintre temperatura ridicată și vidul înalt (10^{-5} mbar) din cuptor, care produc fragmentarea peliculei de oxizi, datorată presiunii de vapori și a tensiunilor termice produse de dilatarea diferențiată dintre oxizi și metalul de bază. La interfața cu pelicula de oxizi, în material iau naștere tensiuni termice ce contribuie la procesul de fragmentare a oxizilor. Înainte ca aliajul de brazare pe bază de magneziu să se topească, oxizii de aluminiu fragmentați sunt transportați de vaporii de magneziu și eliminați din cuptor de către agregatul de vidare. În acest fel, se asigură un contact metalic curat, lipsit de oxizi, între suprafețele ce urmează să fie brazate prin topirea aliajului de brazare [73].



În figura 8.41 este ilustrat procesul prin care aliajul de brazare, depus inițial într-o parte a îmbinării, pătrunde în rostul de brazare prin acțiune capilară, asigurând umplerea completă și uniformă a rostului, de fiecare parte a îmbinării. Dozarea cantității exacte a aliajului de brazare, temperatura și durata de menținere, alături de mărimea și lungimea interșițiilor capilare, constituie elemente cheie pentru a obține îmbinări brazate de calitate.

Fig. 8.41 Mecanismul de pătrundere capilară a aliajului de brazare în interșițiile rostului de brazare.

a) aliaj brazare aplicat inițial; b) pătrundere aliaj prin capilaritate; c) uniformizare aliaj de brazare în rost.

Brazarea în baie de săruri¹ este un procedeu foarte versatil de realizare a unor structuri metalice de formă complexă, realizate uzual din aluminiu sau aliaje ușoare pe bază de aluminiu, din categoria (AlMgSi).

¹ Dip brazing (lb.eng.)

Aliajul de brazare are o compoziție uzuală de Al cu 12% Si, având o temperatură de topire cuprinsă în intervalul de 575-582 °C. Procesul de brazare poate fi aplicat atât unor piese cu secțiune redusă, cât și unor piese cu secțiune mare sau piese turnate, care trebuie asamblate împreună, fără să se producă deformații sau tensiuni structurale.



Fig. 8.42 Etapele procesului de brazare a unui ansamblu dintr-un schimbător de căldură.

Piesele ce urmează să fie îmbinate prin brazare sunt curățate chimic și asamblate la forma finală, utilizând cadre metalice din oțel, care asigură poziționarea corectă a elementelor și rigidizarea construcției până la sfârșitul operației de brazare, figura 8.42. Aliajul adaos se plasează în prealabil cât mai aproape de rostul îmbinării, pentru a asigura o pătrundere corectă și completă a acestuia în rosturile îmbinărilor, prin fenomene de capilaritate. Ansamblul astfel pregătit este încălzit în cuptoare fără atmosferă protectoare la o temperatură de 552°C, asigurând o încălzire uniformă a întregii structuri metalice. După uniformizarea temperaturii structurii metalice, aceasta se imersează într-o baie de săruri topite, care sunt menținute la o temperatură constantă, de 590 °C ±2°C.

Pe durata imersiei, structura metalică intră în contact cu fluxul de brazare pe toată suprafața, inclusiv în rosturile suprafețelor de brazare. Baia de săruri îndeplinind și funcția de flux de brazare, încălzește foarte rapid structura metalică peste punctul de topire al aliajului de brazare, care prin capilaritate, pătrunde în toate rosturile îmbinărilor simultan. Timpul de imersie este funcție de gabaritul structurii, în general, fiind de ordinul minutelor. Fluxul de brazare asigură îndepărtarea și curățarea suprafețelor de impurități sau oxizi, fiind asigurate condițiile obținerii unor îmbinări brazate de calitate, uniforme și cu proprietăți mecanice foarte bune.

Dintre avantajele procedurii de brazare în baie de săruri, se pot aminti:

- Obținerea unor îmbinări etanșe;
- Nu sunt restricții privind grosimea și variațiile de secțiune ale pieselor componente. Piese de la 1 mm, până la zeci de mm grosime, se pot braza fără probleme, dacă durata de menținere la temperatura de brazare este suficientă. Trebuie avut în vedere faptul că piesele cu grosime ridicată, prezintă o anumită inerție termică la încălzire;
- Structura metalică are o conductivitate termică excelentă, ce nu poate fi obținută în cazul îmbinărilor demontabile sau cu adezivi, fiind o proprietate foarte importantă, în cazul schimbătoarelor de căldură;
- Deformațiile sunt minime. Acest fapt se explică prin uniformitatea procesului de încălzire a întregii structuri, ceea ce nu se întâmplă de exemplu, în cazul îmbinărilor sudate;
- Costuri mai reduse de fabricație, comparativ cu procedeele care implică turnarea sau prelucrarea mecanică a pieselor turnate;
- Datorită costurilor reduse, este o variantă frecvent utilizată pentru construcția de prototipuri în producția de serie, cât și cea de unicate. De exemplu, monoposturile de formula unu sau alte structuri ușoare performante, se obțin prin acest procedeu;
- Se pot realiza îmbinări care nu sunt accesibile pentru un operator sau robot;
- Flexibilitatea în realizarea unor structuri metalice de formă și complexitate ridicată.

În tabelul 8.8 sunt prezentate o serie de aliaje utilizate la brazarea unor metale, alături de compoziția chimică și temperatura de brazare.

Tab. 8.8 Principalele caracteristici ale materialelor adaos pentru brazare.

Materiale adaos	Compoziția chimică [%]	Temperatura de brazare [°C]	Metalul de bază
Aluminiu și siliciu	90Al10Si	600	Aluminiu
Cupru	99.9Cu	1120	Nichel, cupru
Cupru și fosfor	95Cu5P	850	Cupru
Cupru și zinc	60Cu40Zn	925	Oțel, Fonte, Nickel
Aur și argint	80Au20Ag	950	Oțel inoxidabil, Aliaje Ni
Aliaje bază nichel	Ni,Cr,...	1120	Oțel inoxidabil, Aliaje Ni
Aliaje de argint	Ag, Cu, Zn, Cd...	730	Titan, Monel, Inconel, Ni, oțeluri de scule

Aliajele destinate brazării conțin o serie de elemente ale căror influență și acțiune asupra caracteristicilor acestora, sunt prezentate succint mai jos:

Nichelul asigură proprietăți foarte bune aliajului de brazare, atât din punct de vedere chimic, cât și din punct de vedere al comportării îmbinării brazate la temperaturi ridicate. Este compatibil metalurgic, cu majoritatea elementelor uzuale din materialele metalice.

Cobaltul are o comportare similară cu cea a nichelului și poate fi substituit de acesta în diferite concentrații. Când este prezent alături de nichel, asigură o solubilitate ridicată, temperaturi ridicate de lucru și mărește rezistența mecanică a matricei metalice.

Manganul coboară temperatura de topire a aliajului de brazare și contribuie la creșterea rezistenței matricei metalice.

Borul coboară punctul de topire a aliajului de brazare, contribuind la eliminarea oxizilor, creșterea fenomenului de umectare și de auto-fluxare. Deasemenea, asigură rezistență mecanică și la oxidare la temperaturi ridicate. Din punct de vedere metalurgic, acționează ca și dezoxidant și promovează procesele de difuzie în metalul de bază.

Siliciul acționează similar cu borul. Funcția principală este de auto-fluxare și dezoxidare, iar în plan secund, acționează ca și element de rafinare a microstructurii, mărește rezistența la oxidare și coroziune, la temperaturi ridicate. Difuzează mai greu în metalul de bază.

Fierul promovează creșterea rezistenței mecanice a îmbinării brazate și împiedică difuzia elementelor de aliere din metalul de bază, în aliajul de brazare.

Cromul contribuie la creșterea rezistenței mecanice și la oxidare la temperaturi ridicate.

Wolframul contribuie la creșterea rezistenței mecanice a matricei metalice și la creșterea rezistenței la coroziune. Prin participarea la formarea unor soluții solide, mărește rezistența la deformare la temperaturi ridicate.

Aluminiul este un element ce promovează rafinarea microstructurii și conduce și la creșterea rezistenței la oxidare.

Cuprul îmbunătățește capacitatea de umectare, micșorează vâscozitatea aliajului de brazare și mărește rezistența la coroziune.

Molibdenul formează cu carbonul carburi complexe, ce oferă rezistență și duritate aliajului brazat, mărește rezistența la deformare a matricei metalice, respectiv, împiedică creșterea grăunților la încălzire și astfel, îmbunătățește comportarea la temperaturi ridicate a îmbinării brazate.

Carbonul este menținut în concentrații scăzute, poate micșora temperatura de topire a aliajului.

Titanul și **niobiul** formează carburi în prezența carbonului, conferind aliajului de brazare rezistență mecanică la temperaturi ridicate, fără efecte secundare negative. Dizolvat în soluții solide, mărește rezistența la coroziune a matricei metalice.

Germaniul coboară temperatura de topire și are influență pozitivă asupra tenacității aliajului. Microscopic apare sub forma unei faze cu aspect nodular.

Pământurile rare (lantanidele), precum **Lantan, Ytriu, Neodim, Praseodim, Ceriu** pot fi prezente în compoziția aliajelor de brazare, promovând procesul de degazare și prin acesta, reducerea porozității din îmbinarea brazată. Deasemenea, aceste elemente contribuie la rafinarea microstructurii, măresc fluiditatea aliajului topit și îmbunătățesc capacitatea de umectare, stimulând fenomenul de pătrundere interstițială, datorat capilarității. Termenul de pământuri rare se datorează mineralelor rare pe care le conțin, de tipul oxizilor "*pământ*". Acestea au fost descoperite în anul 1787, într-un minereu numit gandolinit, extras dintr-o mină din satul Ytterby, din Suedia.

Fluxurile pentru brazare se aleg în funcție de calitatea metalului brazat, respectiv în funcție de temperatura de exploatare a construcției metalice și de metoda de brazare. Fluxurile sub formă de pulbere sunt utilizate uzual la brazarea în cuptor, iar cele sub formă de pastă la brazarea cu flacără. Fluxarea suprafețelor permite îndepărtarea oxizilor de pe suprafețele metalice, asigurând calitatea și rezistența mecanică a îmbinării. Totodată, previne oxidarea suprafețelor pe durata preîncălzirii și contribuie prin elementele active din compoziția sa, la reducerea tensiunii superficiale a aliajului de brazare, facilitând pătrunderea acestuia în interstiții și rosturi, prin fenomene de capilaritate.

În Europa și la noi în țară, fluxurile pentru brazare sunt standardizate, notarea acestora cuprinzând denumirea, simbolul fluxului și standardul de referință. De exemplu: FH20/SR EN 1045: 2002, reprezintă flux activ de brazare pentru metale grele, cu o temperatură de lucru cuprinsă între 700 și 1000°C, conform tabelului 8.9. Din punct de vedere al acțiunii corozive, fluxurile pentru brazare pot fi clasificate în trei grupe, similar cu clasificarea fluxurilor pentru lipire:

- **Fluxuri active.** Se obțin din substanțe anorganice acide (acid clorhidric, cloruri de zinc, cloruri de amoniu etc.) care decapează suprafețele metalice prin atac chimic care formează compuși chimici neaderenți, solubili. După brazare, excesul de flux și compușii rezultați trebuie îndepărtați prin spălare pentru a preveni acțiunea lor corozivă ulterioară;
- **Fluxuri slab active** (activate). Au acțiune decapantă redusă, suprafețele metalice sunt curățate prin dizolvarea impurităților și sunt pe bază de substanțe organice precum: rășinile naturale cu activanți organici slab acizi;
- **Fluxuri neactivate** (necorozive, fără acizi). Sunt fără acțiune decapantă, dizolvă doar impuritățile și sunt pe bază de rășini naturale combinate cu solvenți și agenți de umectare.

Fluxurile active pentru brazare sunt clasificate în funcție de temperatura de lucru, care se alege în raport cu calitatea metalului de bază și a aliajului de brazare. Astfel, avem **clasa FH** de fluxuri pentru brazarea metalelor grele (oțeluri carbon și inoxidabile, cupru împreună cu aliajele sale, molibden, wolfram și metalele prețioase). Pentru brazarea aluminiului și aliajelor de aluminiu, se utilizează fluxuri de brazare din **clasa FL**, prezentate în tabelul 8.10.

Tab. 8.9 Fluxuri clasa FH pentru brazarea metalelor grele, conform SR EN 1045: 2002.

Codul fluxului	Interval de utilizare [°C]
FH-10	550-800
FH-11	550-800
FH-12	550-850
FH-20	700-1000
FH-21	750-1100
FH-30	> 1000
FH-40	600-1000

Tab. 8.10 Fluxuri clasa FH pentru brazarea aliajelor de aluminiu, conform SR EN 1045: 2002.

Codul fluxului	Interval de utilizare [°C]	Formula chimică	Observații
FL-10	500-660	$KAlF_4 + K_2AlF_5 \cdot H_2O$	Conține până la 2% aditivi, reziduul de flux este coroziv.
FL-20	570-660		Conține până la 2% aditivi, reziduul de flux nu este coroziv.

O tehnologie de brazare relativ nouă¹, a fost dezvoltată pentru îmbinarea unor materiale cu sudabilitate redusă sau care prezintă anumite particularități, care nu le recomandă pentru sudare. Din această categorie, fac parte: oțelurile galvanizate, oțelurile înalt aliate și tratate termic, oțelurile aliate cu bor, fontele cenușii sau cu grafită nodular etc. Datorită ciclului termic la sudare apar probleme la sudarea acestora, precum evaporarea zincului și astfel este compromisă rezistența la coroziune, emisii de fum, porozitate, fisuri, deformații etc. Utilizând echipamente moderne de sudare, dotate cu programe de brazare, sursa de curent tip inverter furnizează curenți de sudare cu intensitate redusă 40-130 A, cu un curent de background de 20 A sau mai mic, la frecvențe de 100 kHz, asigurând stabilitatea coloanei arcului electric și energie liniară de sudare foarte redusă.

Spre exemplu, în figura 8.43, este prezentată o lucrare de recondiționare prin brazare, a unei cutii de viteze din fontă, ce aparține unui strung. Materialul de adaos este un aliaj pe bază de cupru, SG-CuSi3 sau SG-CuAl8, cu o temperatură de topire cuprinsă între 900-1100°C, astfel încât nu se atinge temperatura de topire a metalului de bază. Brazarea în aceste condiții, este cunoscută și sub denumirea de "*Bronze welding*" și are loc în atmosferă protectoare de Ar sau în amestec cu 1% CO₂. Transferul de material se face prin picături foarte fine cu ajutorul arcului în impulsuri, fără stropire, cu o viteză de brazare cuprinsă între 70-100 cm/min [74].

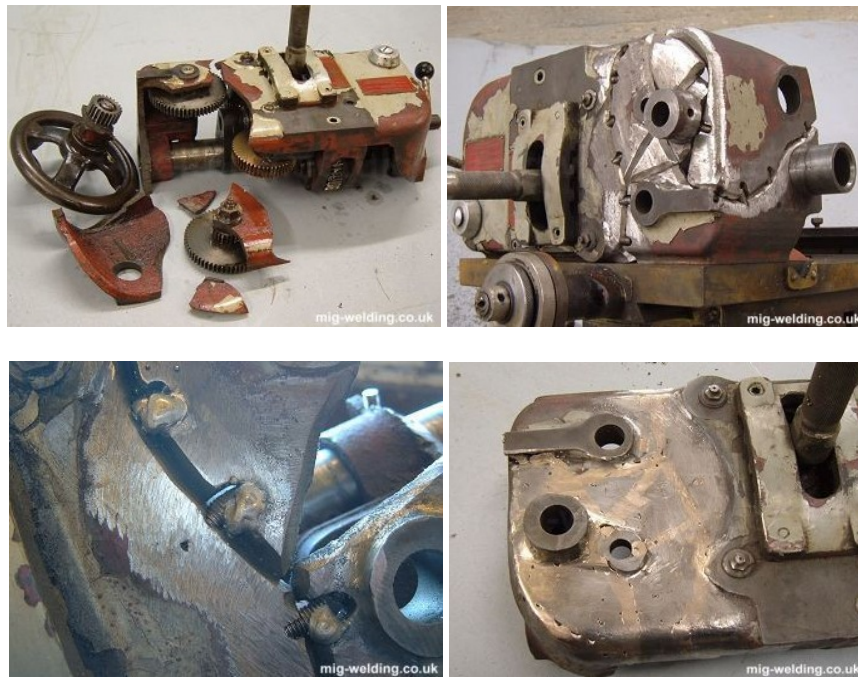


Fig. 8.43 Brazarea unei carcase de fontă de la cutia de viteze a unui strung [75].

¹ MIG brazing [74].

8.4 Metalizarea termică



Realizarea unor straturi superficiale obținute prin depunere, utilizând diferite procedee, cu scopul de a asigura piesei metalizate anumite proprietăți, precum: rezistență la uzare, rezistență la coroziune sau alte caracteristici speciale.

Suportul pe care se execută metalizarea se mai numește substrat. Straturile depuse datorită caracteristicilor speciale pe care le dețin, se mai numesc straturi funcționale, iar metodele prin care se realizează industrial procesul de metalizare, fac parte din două grupe mari:

- Procedee de tipul pulverizării termice;
- Procedee de tipul încărcării prin sudare.

O clasificare a proceselor de pulverizare termică, din punct de vedere al energiei utilizate în proces, este prezentată în figura 8.44. Dintre procedeele de pulverizare termică, se vor prezenta acelea care sunt mai frecvent utilizate în practica industrială.

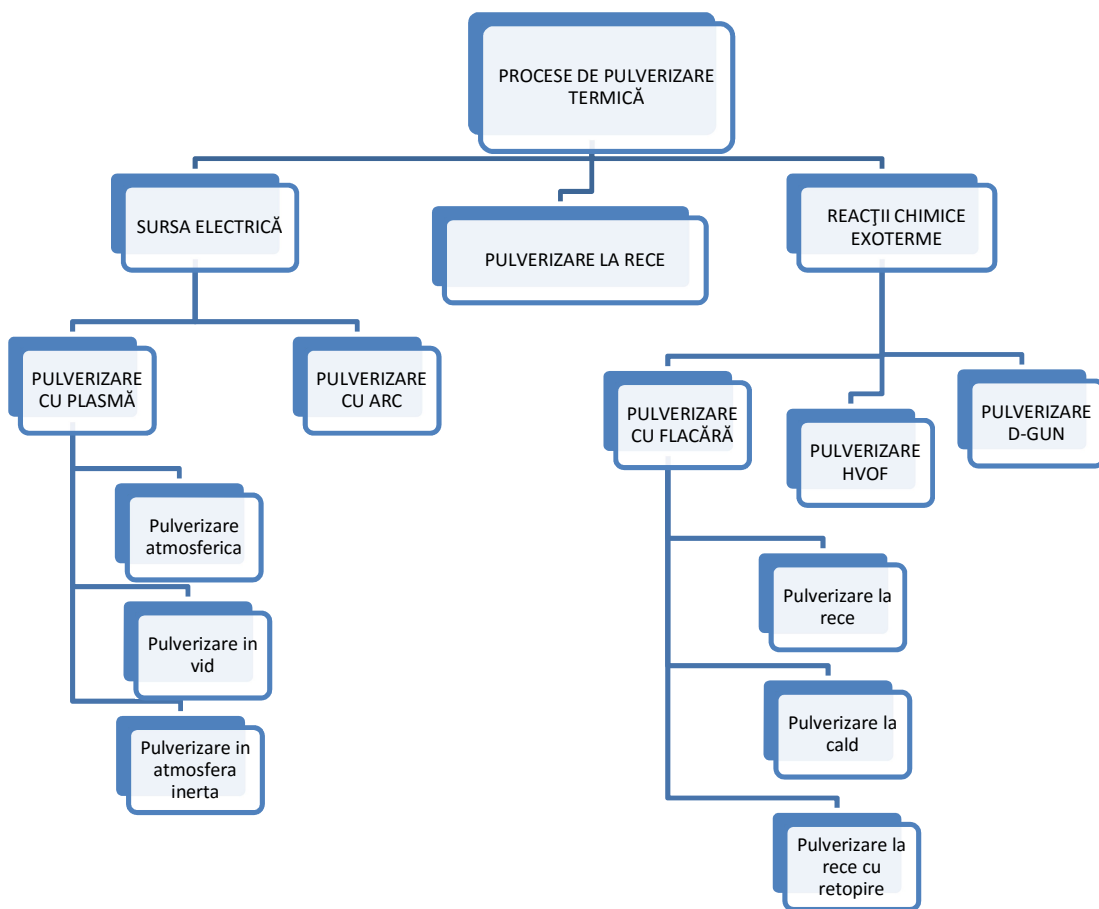


Fig. 8.44 Clasificarea procedeeleor de pulverizare termică.

Proprietățile straturilor depuse depind de foarte mulți factori, dintre care amintim: caracteristicile și proprietățile fizico-chimice ale materialului de pulverizare și ale substratului, caracteristicile sursei termice, ale atmosferei de protecție, de grosimea metalului depus, condițiile de răcire etc.

Prin **pulverizare la rece** se înțeleg acele procedee de metalizare, în care straturile depuse nu sunt reîncălzite pentru a obține retopiri intermediare ale particulelor metalice, în vederea consolidării legăturilor dintre acestea.

La fel ca și în cazul altor procedee conexe sudării, pregătirea suprafețelor înainte de operația de pulverizare termică, este esențială pentru asigurarea unor calități corespunzătoare pentru straturile depuse. În esență, se urmăresc două obiective majore:

- Asigurarea unui contact metalic între metalul depus și substrat, ceea ce constă în îndepărtarea impurităților, oxizilor și a urmelor organice, uleiuri, grăsimi etc. de pe suprafața substratului;
- Asigurarea unei bune aderențe între substrat și straturile depuse, prin mărirea suprafeței de contact, aplicând procedee mecanice de polizare, sablare. Se asigură astfel, o rugozitate optimă pentru ancorarea stratului depus pe substrat.

Aderența stratului depus depinde și de procesele metalurgice care au loc la interfața cu substratul, respectiv, de procesele de difuzie. În aceste procese, un parametru esențial este temperatura, difuzia fiind un proces activat termic. Prin urmare, preîncălzirea substratului poate conduce la obținerea unei aderențe superioare, dar și la controlul proceselor metalurgice și al microstructurii, ca urmare a vitezelor de răcire, ce pot varia în limite foarte largi.

Elementele morfologice ale microstructurii straturilor depuse, determină de altfel și caracteristicile de rezistență mecanică, rezistența la coroziune sau cea de uzare. Acestea pot fi:

- Porozitatea ce poate fi închisă sau deschisă;
- Distribuția porozității;
- Incluziunile nemetalice, mărimea și distribuția lor;
- Particule netopite din materialul pulverizat;
- Carburile și interfața dintre acestea și matricea metalică;
- Caracterul amorf sau cristalin al matricei metalice;
- Soluțiile solide sau eutecticele care sunt prezente în microstructura straturilor depuse.

Aceste elemente morfologice și de microstructură, determină proprietățile funcționale ale straturilor depuse și au un rol cheie în comportarea la solicitări dinamice și la oboseală a pieselor metalizate. Incluziunile nemetalice, porozitatea etc. pot constitui puncte de amorțire a microfisurilor, care pot compromite funcționarea corectă a pieselor, în cadrul ansamblurilor sau echipamentelor din care fac parte.

8.4.1 Pulverizarea cu flacără

Pulverizarea cu flacără este un procedeu de pulverizare termică foarte răspândit, care nu necesită achiziția unor echipamente scumpe. Procesul constă în introducerea în flacăra unui pistol sau a unui arzător de construcție specială, a unui flux de pulbere metalică, topirea parțială a particulelor în camera de combustie a pistolului și proiectarea acestora pe substrat, figura 8.45.

Deoarece viteza jeturilor de ardere este redusă și nu au loc procese secundare de accelerare a picăturilor topite în jetul de gaze, energia cinetică imprimată particulelor este mică, tabelul 8.11. Ca urmare a temperaturilor scăzute și a vitezelor de impact reduse, stratul metalizat conține cantități ridicate de oxizi, porozitate și incluziuni nemetalice. Gazele combustibile utilizate în acest procedeu, pot fi: acetilena, hidrogenul, propanul, gazul natural, iar materialul adaos poate fi sub formă de pulbere, sârmă plină sau sârmă tubulară. În general, materialul de pulverizat are un punct de topire mai scăzut, decât cel al aliajelor de brazare.

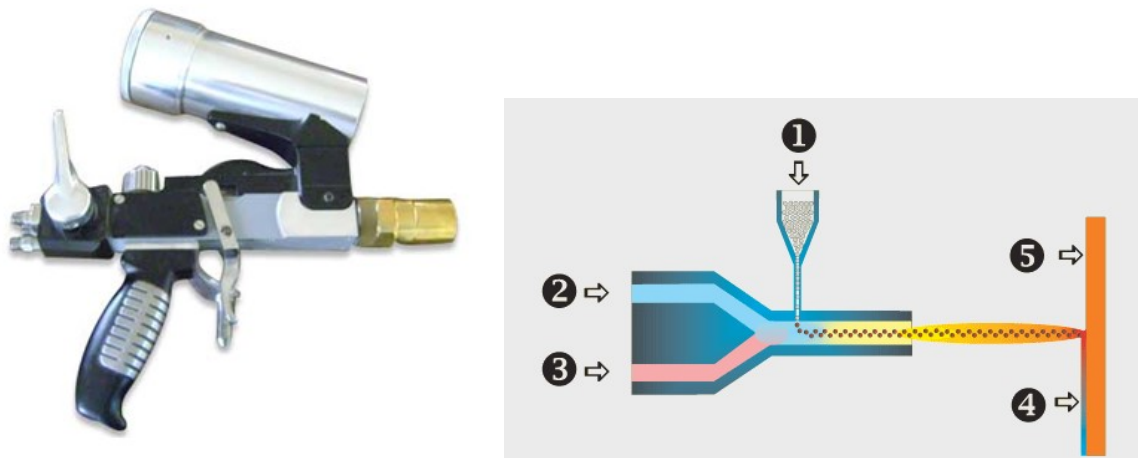


Fig. 8.45 Pistol de metalizare cu flacără cu pulbere metalică [79].
1) rezervor pulbere metalică; 2) oxigen; 3) acetilenă; 4) strat depus; 5) substrat.

Tab. 8.11 Caracteristicile procesului de pulverizare termică cu flacără [79].

Viteză particule [m/sec]	Aderență [MPa]	Conținut oxigen [%]	Porozitate [%]	Metal depus [kg/h]	Grosimi uzuale strat [mm]
< 40 m/sec	< 200	10	10÷15	1÷10	0,2÷10

Dintre aplicații, putem aminti metalizarea unor piese utilizate în sectorul agricol sau în sectorul de forare. Materialele pentru pulverizarea cu flacără pot fi foarte diverse, precum:

- Zincul sau aluminiul pentru asigurarea protecției catodice a structurilor de oțel;
- Aliaje NiAl pentru formarea unui strat aderent, în cazul depunerilor multistrat;
- Cromul sau molibdenul pentru straturi de uzură, aderente;
- Bronzurile pentru recondiționarea/îmbunătățirea performanțelor lagărelor de alunecare;
- Nichelul sau aliaje monel pentru straturi anticoroziune sau rezistente la uzare;
- Materialele ceramice, cermeții sub formă de sârmă tubulară, pentru creșterea rezistenței la uzare sau la coroziune, a rezistenței la temperaturi ridicate etc.

8.4.2 Pulverizarea cu flacără și topire intermediară

Acest procedeu face parte din categoria procedeelor de pulverizare cu flacără, unde metalizarea termică cuprinde trei etape:

- Preîncălzirea metalului de bază;
- Depunerea materialului prin pulverizare;
- Sinterizarea stratului depus.

Materialele pentru pulverizare se realizează din aliaje de tipul NiCrBSi sau NiCrBSi/WC, utilizate pentru depunerea prin metalizare a unor straturi cu rezistență ridicată la uzare, abraziune, eroziune și coroziune. Procedeu este frecvent utilizat în operațiile de recondiționare ale unor piese, organe de mașini, axe, came, cămăși cilindru etc. După încărcarea cu material a substratului, urmează faza de sinterizare, piesa fiind încălzită la o temperatură cuprinsă între punctul solidus și lichidus al materialului depus. Pe durata sinterizării materialului depus, se realizează consolidarea legăturilor metalurgice între particulele de pulbere, respectiv între acestea și metalul de bază. Ca urmare, porozitatea stratului depus este redusă, obținându-se un strat compact cu proprietăți mecanice bune și cu aderență ridicată.

Compozițiile chimice ale pulberilor de tipul NiCrBSi oscilează în jurul punctelor eutectice, deoarece, datorită punctelor de topire scăzute se evită supraîncălzirea substratului la depunere, iar topirea particulelor se produce rapid în procesul de combustie, caracterizat prin temperaturi joase. Microstructura aliajelor NiCrSiFeB este formată dintr-o matrice de soluție solidă α cu aspect dendritic, unde nichelul reprezintă componentul principal și un eutectic fin globular, de culoare mai închisă. Cromul conduce la formarea unor faze dure, iar borul și siliciul formează boruri și siliciuri cu nichelul și cromul. Fierul este prezent ca urmare a utilizării ferocromului și feroborului la elaborare și nu modifică esențial microstructura și proprietățile aliajelor, fiind dizolvat în cea mai mare parte în soluția solidă pe bază de nichel. La concentrații de peste 2%, borul are o influență favorabilă, reducând temperatura de fuziune a aliajului, precum și tensiunea superficială. Pentru concentrații de 4% B corespunzătoare eutecticului, distanța dintre curbele lichidus și solidus se micșorează, diminuând tendința de segregare dendritică, compoziția soluției solide rezultând mai omogenă, figura 8.46.

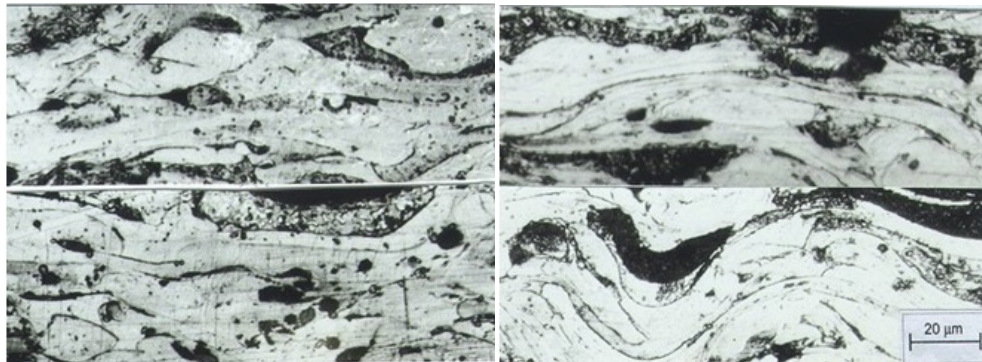


Fig. 8.46 Microstructura aliajelor NiCrFeSiBC metalizate [77].

8.4.3 Pulverizare cu flacără HVOF¹

Acest procedeu de pulverizare termică este o variantă specială de pulverizare, în care viteza jetului de gaze arse atinge valori supersonice, de cca. 2500÷2700 m/sec. Lichidul combustibil este kerosen, fiind utilizat în aviație, datorită vitezelor de ardere foarte ridicate. Oxigenul și kerosenul sunt injectate în camera de combustie, unde sunt aprinse cu ajutorul unor scânteie produse de o bujie. Gazele postcombustie intră într-un ajutoraj convergent-divergent, (denumite ajutoraje LAVAL), unde sunt accelerate la valori ale vitezei de 1÷2 Mach.

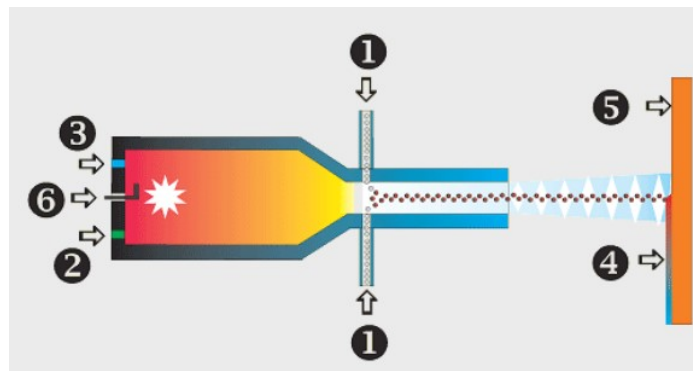


Fig. 8.47 Principiul de funcționare a pistolului de pulverizare HVOF [79].

1) alimentare cu pulbere metalică; 2) alimentare cu kerosen; 3) oxigen; 4) strat metalizat; 5) substrat; 6) bujie.

¹ HVOF - high velocity oxygen fuel

Presiunea gazelor este precis controlată în camera de combustie, pentru a asigura funcționarea uniformă și stabilă a procesului de ardere. Datorită temperaturilor ridicate de funcționare, pistolul de pulverizare și camera de combustie sunt răcite cu ajutorul unui circuit de apă. Pulberea metalică este transportată de un gaz de transport (azot) și este insuflată radial, în jetul de gaze arse ce sunt evacuate la viteze supersonice, unde se topește și este accelerată la viteze cuprinse între 600÷1000 m/sec. În jetul flăcării de ardere se formează unde de compresie și expansiune, ce creează niște efecte optice de forma unor romboedre cunoscute sub numele de "*shock diamonds*", figura 8.48.



Fig.8.48 Pulverizarea cu flacără HVOF (high velocity oxygen fuel).

Viteza foarte mare a particulelor de pulbere la impact cu substratul conduce la o uniformizare și o compactizare ridicată a stratului metalizat, la reducerea porozității și la un fenomen de ancorare între particulele adiacente, ceea ce asigură o aderență foarte bună a stratului metalizat, tabelul 8.12. Procesele de oxidare și de ardere a elementelor de aliere în timpul de rezidență extrem de scurt în jetul de gaze, sunt practic eliminate, ceea ce constituie un avantaj față de alte procedee de metalizare termică.

În stratul metalizat iau naștere tensiuni de compresie, fenomen unic față de restul procedeeleor de metalizare, oferind o rezistență sporită a stratului metalizat la oboseală.

Pulberile utilizate pentru metalizare au punct de topire mediu și scăzut. Temperaturile de cca. 2600°C atinse în jetul de gaze supersonic, limitează această tehnologie pentru acoperirile cu materiale ceramice. Cel mai adesea, se utilizează pulberi de tip cermet (metalo-ceramice), pulberi de carburi de wolfram, sau pulberi cu baza crom. Aplicațiile uzuale ale straturilor metalizate prin acest procedeu, sunt în domenii unde se impun rezistențe ridicate la uzură și coroziune.

Tab. 8.12 Caracteristicile procesului de pulverizare termică cu flacără HVOF [79].

Viteză particule [m/sec]	Aderență [MPa]	Conținut oxigen [%]	Porozitate [%]	Metal depus [kg/h]	Grosimi uzuale strat [mm]
600÷1000	< 70	1÷2	1÷2	3÷6	0.2÷2

8.4.4 Pulverizare cu flacără HVAF¹

Procedeul de pulverizare HVAF este similar cu procedeul HVOF, unde oxigenul este înlocuit cu aer comprimat, iar ca și gaz combustibil sunt folosite diverse hidrocarburi precum: propanul, propilena sau gazul natural. Temperatura din flacăra de ardere este mai redusă, comparativ cu cea atinsă la HVOF, respectiv se ating valori de 1900-1950°C, iar viteza limită în jetul de gaze la HVAF atinge 1400 m/sec, în cazul utilizării unor compresoare ce pot asigura o presiune de lucru de 8 bar. Avantajul principal al procedeului HVAF constă în oxidarea foarte redusă a pulberii metalizate (figura 8.49), dar și a costurilor mai mici, comparativ cu pulverizarea cu flacără HVOF. Datorită temperaturilor mai mici din jetul HVAF, nu se pot pulveriza materiale ceramice. Schema de principiu a pistolului de metalizare prin HVAF, este prezentată în figura 8.50.

¹ HVAF - High velocity air fuel

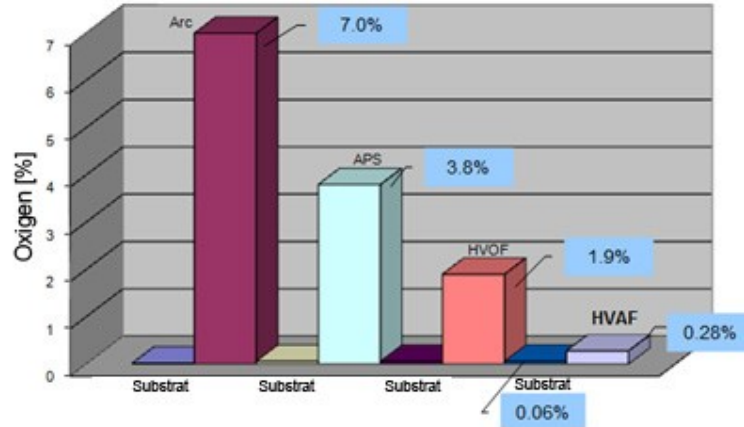


Fig. 8.49 Nivelul de oxidare la pulverizarea termică HVOF [80].

Straturile metalizate prin HVOF prezintă un nivel foarte redus de oxidare, comparativ cu cel obținut la pulverizarea la rece (*cold spray*). Ca urmare a temperaturilor mai mici de pulverizare, particulele de pulbere sunt practic în stare solidă în momentul impactului cu substratul, fapt ce împiedică semnificativ procesul de difuzie al oxigenului în acestea. Viteza de difuzie a oxigenului în stratul depus, este cu câteva ordine de mărime mai mică față de difuzia acestuia, în picăturile aflate în fază lichidă.

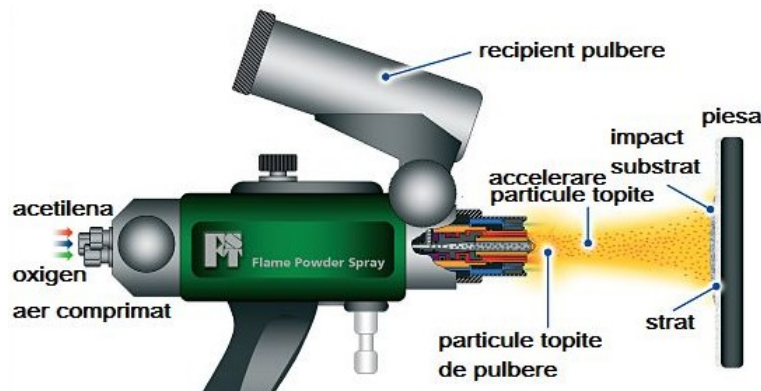


Fig. 8.50 Schema de principiu a unui pistol de metalizare cu flacără HVOF [79].

Tab. 8.13 Pulverizarea cu flacără HVOF comparativ cu HVOF [80].

Echipament de pulverizare cu flacără	HVOF pistol JP500 TM Praxair S.T. Technology	HVOF Diamond Jet TM Sulzer Metco	HVOF M3 TM Uniquocoat Technologies
Viteza particulelor de pulbere, [m/sec]	600÷700		> 1000
Combustibil	Kerosen	Hidrogen	Propan, propilenă sau gaz natural
Consum kerosen, [litri/h]	30	-	-
Consum oxigen, [m ³ /h]	60	13,85	-
Consum aer, [m ³ /h]	-	22,26	430
Consum propan, [kg/h]	-	-	28.8
Consum hidrogen, [m ³ /h]	-	41,6	-
Tip răcire	apă	aer/apă	aer
Rată de depunere, [kg/h], aliaje dure	7	5,4	23
Rată de depunere, [kg/h], pulbere WC	9	4,2	28
Cost de pulverizare 1 kg pulbere	13,40 \$	31,70 \$	3,35 \$

Datorită faptului că particulele de pulbere se topesc parțial în jetul flăcării de pulverizare HVAF, la impactul acestora cu substratul se produce un efect de sablare a acestuia, determinând apariția unor tensiuni de compresiune în stratul metalizat. Tensiunile de compresiune din strat, acționează favorabil asupra rezistenței la oboseală a piesei metalizate.

Prin urmare, se pot reține următoarele aspecte specifice metalizării cu HVAF:

- Nu se formează peliculă de oxizi la interfața dintre particulele de pulbere;
- Nu apare porozitate în stratul metalizat, ca urmare a contracțiilor de solidificare specifice picăturilor metalice topite;
- Carburile primare din pulbere rămân neafectate termic în stratul metalizat;
- Prezența benefică a tensiunilor de compresiune în straturile superficiale ale materialului depus;
- Rata de depunere este ridicată;
- Costuri specifice mici;

În tabelul 8.13 sunt prezentați comparativ, o serie de parametri de productivitate și de consum, pentru pulverizarea cu flacără HVOF și HVAF.

8.4.5 Pulverizarea în arc electric

Acest procedeu de pulverizare termică utilizează căldura produsă de arcul electric, pentru a topi materialul de pulverizat sub formă de sârmă, temperaturile în arc, fiind în jurul valorii de 4000°C. Temperatura ridicată a arcului electric topește capătul sârmei sau a sârmelor utilizate ca și material de pulverizare, picăturile formate fiind pe urmă accelerate către substrat, de către un jet de aer comprimat sau de argon, insuflat axial în arcul electric. Un avantaj specific acestui procedeu de pulverizare, este faptul că se pot folosi simultan două sârme de compoziții diferite, obținându-se un pseudo aliaj, figura 8.51. Există și varianta utilizării unor sârme tubulare, caracteristicile procesului de pulverizare în arc electric, fiind prezentate în tabelul 8.14.

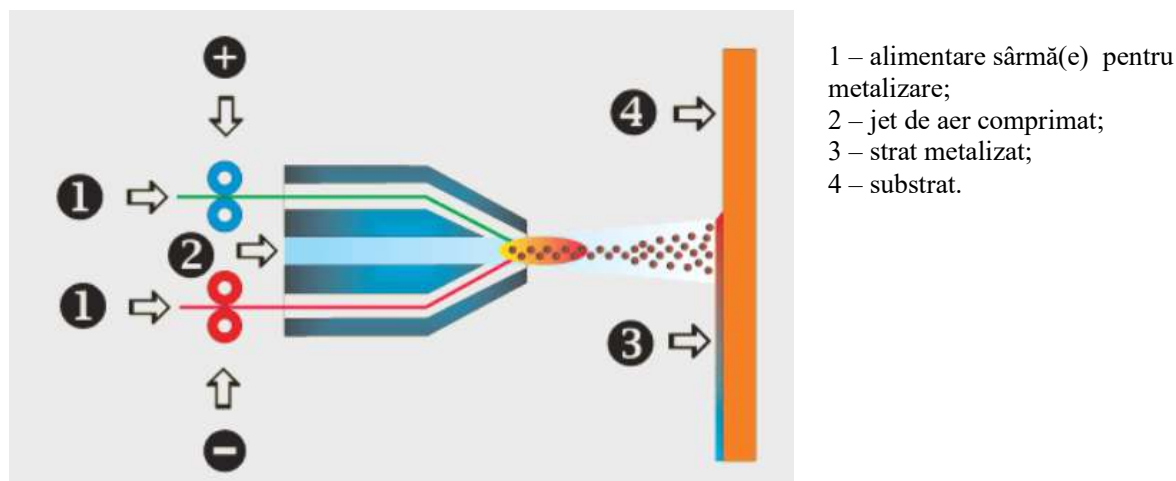


Fig. 8.51 Schema principiului de pulverizare în arc cu două sârme [79].

Tab. 8.14 Caracteristicile procesului de pulverizare în arc electric [79].

Viteză particule [m/sec]	Aderență [MPa]	Conținut oxigen [%]	Porozitate [%]	Metal depus [kg/h]	Grosimi uzuale strat [mm]
< 100	10÷30	10÷20	5÷10	6÷60	0,2÷10

Procedeul de pulverizare în arc electric cu sârmă, se aplică uzual în cazul metalizării unor piese metalice cu suprafață mare, care în general necesită rezistență la coroziune. Sursa de energie este o sursă de curent continuu de intensitate mare (de obicei peste 350 A), care amorsează și menține arcul electric între cele două sârme, alimentate de două sisteme de avans independente, figura 8.51 și 8.52. Cele două viteze de avans sunt corelate în funcție de natura celor două materiale, respectiv de amplasarea petei anodice și catodice (polaritatea curentului). Materialul metalic este topit și proiectat pe substrat, folosind de obicei un jet de aer comprimat, sau mai rar, azot. Particulele se solidifică pe substrat, formând stratul pulverizat. Procesul condus corect este „rece”, deoarece amprenta termică a procedurii este foarte redusă [40].

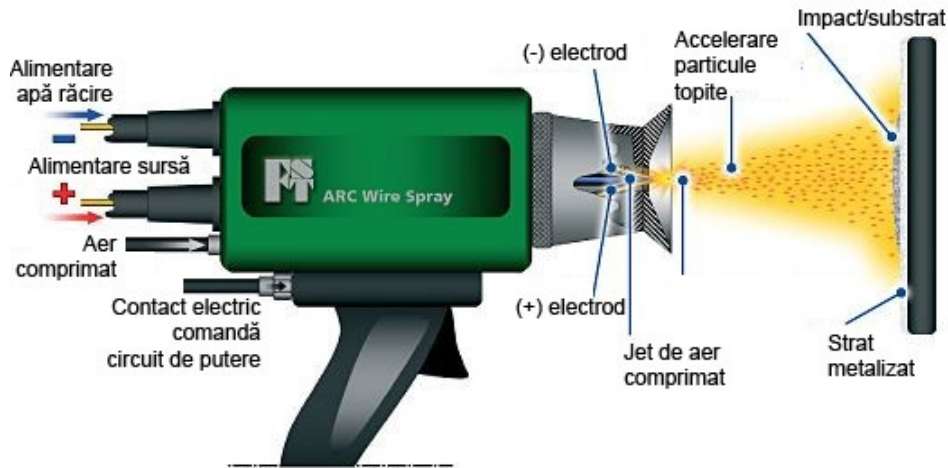


Fig. 8.52 Pistolet de pulverizare în arc electric cu două sârme [79].

Tab. 8.15 Parametrii de lucru la pulverizarea în arc [40].

Parametrul	UM	Oțel	Aluminiu	Bronzuri
Tensiunea	[V]	60÷80	30÷40	40÷80
Intensitate curent	[A]	100÷400	100÷400	100÷400
Presiune aer comprimat	[Bar]	4,5÷6	3,5÷6	3,5÷6
Rata de depunere	[kg/h]	5÷20	3,5÷12	5÷20

8.4.6 Pulverizarea în jet de plasmă

Plasma termică generează suficientă energie, pentru a putea topi și pulveriza orice fel de material. Un gaz plasmagen, uzual Ar, N₂ sau amestecuri de Ar/H₂ sau Ar/He este introdus sub presiune în capul plasmagen, fiind obligat să traverseze coloana arcului electric ce arde între catod și anod, ambii electrozi fiind parte integrantă din capul plasmagen. Pe măsură ce gazul plasmagen este încălzit de arcul electric, acesta intră într-un proces de expansiune și este accelerat la ieșirea din ajutoraj, unde poate atinge viteze supersonice Mach 2. Temperatura dezvoltată în jetul de plasmă este extrem de ridicată, uzual 20.000 K în zona arcului electric, iar la câțiva cm de la ieșirea din ajutorajul capului plasmagen, temperatura jetului de plasmă scade la 10.000 K.

Sursa de curent trebuie să asigure curenți de intensitate mare, 800÷1.000 A, care generează suficientă energie pentru a topi majoritatea materialelor. Pentru pulberile ceramice este necesar utilizarea unui amestec de gaze Ar/H₂ sau Ar/He, ce prezintă conductivitate termică și electrică îmbunătățită. Aceste proprietăți ale gazului plasmagen sunt necesare, datorită faptului că timpul de rezidență al pulberilor ceramice în jetul de plasmă este extrem de scurt, iar punctul de topire al acestora este foarte ridicat. Arcul electric dintre electrozi se inițiază cu ajutorul unei surse de curent de medie/înaltă frecvență și tensiune ridicată, care preionizează spațiul dintre electrozi.

După inițierea arcului pilot, se cuplează sursa de curent de putere și se decuplează sursa de curent de înaltă frecvență. Creșterea intensității curentului conduce la creșterea nivelului de ionizare a gazului plasmagen, a ratei de expansiune a gazului și a vitezei jetului de plasmă. Proprietățile jetului de plasmă pot fi controlate de geometria și caracteristicile sistemului format din catod-anod-ajutaj, tipul gazului plasmagen și parametrii arcului electric, figura 8.53.

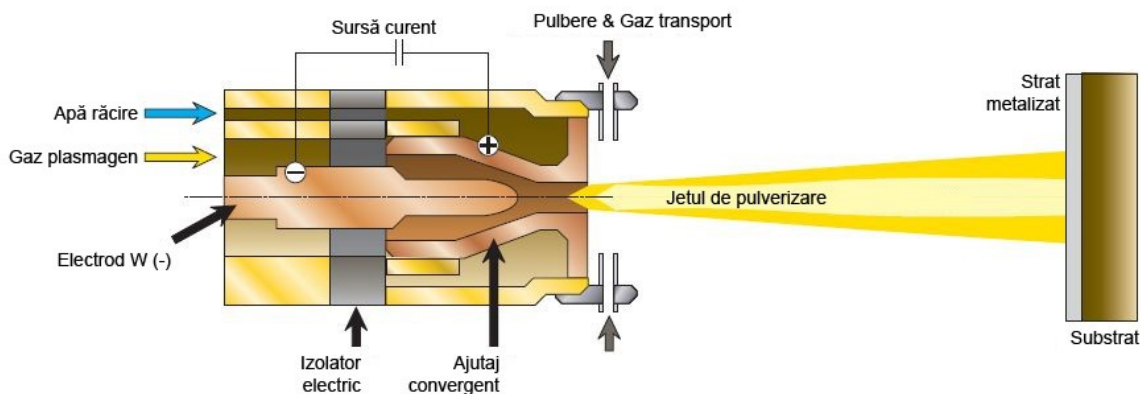


Fig. 8.53 Schema capului plasmagen utilizat la pulverizarea termică în jet de plasmă [81].

Pulberea pentru pulverizare are în general, dimensiuni cuprinse între 20÷90 μm și este injectată în jetul de plasmă la ieșirea din ajutoraj, cu ajutorul unui gaz de transport, uzual argon. În jetul de plasmă pulberea este foarte rapid accelerată, la viteze de aproximativ 450-500 m/sec către substrat. Topirea pulberilor în jet, poate fi parțială sau completă, în funcție de tipul pulberii și a parametrilor de proces, care determină proprietățile jetului de plasmă.

În prezent, există o varietate mare de echipamente de pulverizare cu plasmă, ce utilizează tehnici de pulverizare îmbunătățite față de varianta de bază, prezentată mai sus. O astfel de variantă larg utilizată în industrie este și pulverizarea cu plasmă în atmosferă¹.

Pulverizarea în jet de plasmă este utilizată îndeosebi, pentru metalizarea materialelor structurale [81]. Straturile pulverizate conferă pieselor respective rezistență la temperaturi înalte, dar și rezistență la coroziune și eroziune. Astfel, se pulverizează materiale ceramice, precum oxidul de ytriu și zirconiu (Y_2O_3 și ZrO_2), pe suprafețele unor componente ce fac parte din motoarele cu reacție ale avioanelor, care sunt expuse acțiunii gazelor de combustie extrem de fierbinți. Aplicațiile tipice pentru pulverizarea cu plasmă sunt:

- Domeniul aerospațial (turbine motoare și componente structurale);
- Domeniul auto și transporturi (motoare termice, scule);
- Industria energetică (turbine și carcase, componente pentru turbine hidro sau pe gaze, celule de combustie);
- Echipamente (role, axuri, came etc.);
- Procesare materiale (role, matrițe extruziune, poansoane etc.);
- Industria petrochimică (componente pompe, valve, tubulatură);
- Industria electronică (scuturi RF, izolatori, echipamente pentru producție chip-uri);
- Multe alte domenii din diferite industrii.

¹ atmospheric plasma spraying [81]

În funcție de proprietățile chimice, fizice și mecanice ale materialului pulverizat, se obțin straturi metalizate funcționale, cu proprietăți extrem de variate, dintre care se pot aminti:

- Rezistență la uzură, adeziune, eroziune (suprafețe abrazive);
- Rezistență la fenomene de cavitație;
- Rezistență la coroziune în medii acide, alcaline, săruri și atacuri chimice;
- Rezistență la coroziune la temperaturi ridicate;
- Rezistență la impact prin șoc;
- Conductivitate electrică și termică ridicată;
- Proprietăți de izolare electrică/termică ridicată;
- Proprietăți bune de fricțiune;
- Proprietăți antifricțiune;
- Estetice, obținerea unor suprafețe decorative.

Echipamentele utilizate la pulverizarea termică au fost perfecționate constant, urmărindu-se extinderea capacității acestora, atât în ceea ce privește condițiile de operare, cât și caracteristicile de performanță ale straturilor metalizate obținute. Astfel, în figura 8.54 este prezentat un cap plasmagen cu triplu electrod și arc electric în cascadă, fiind o inovație în domeniul echipamentelor și tehnologiilor de pulverizare în plasmă [81]. Avantajele pe care le prezintă acest sistem, sunt:

- Se obțin valori ridicate ale tensiunii pentru curenți mici de alimentare;
- Lungimea arcului este determinată;
- Proprietățile arcului electric sunt independente de tipul și debitul gazului.

Aceste caracteristici conduc la obținerea unui jet de plasmă alungit, foarte stabil, crește fiabilitatea echipamentului de pulverizare, care poate opera în condiții extrem de variate. Se pot obține astfel, grosimi ale straturilor pulverizate cuprinse între 0,075 și 5 mm, având temperaturi ale substratului cuprinse între 38 și 260°C [81].

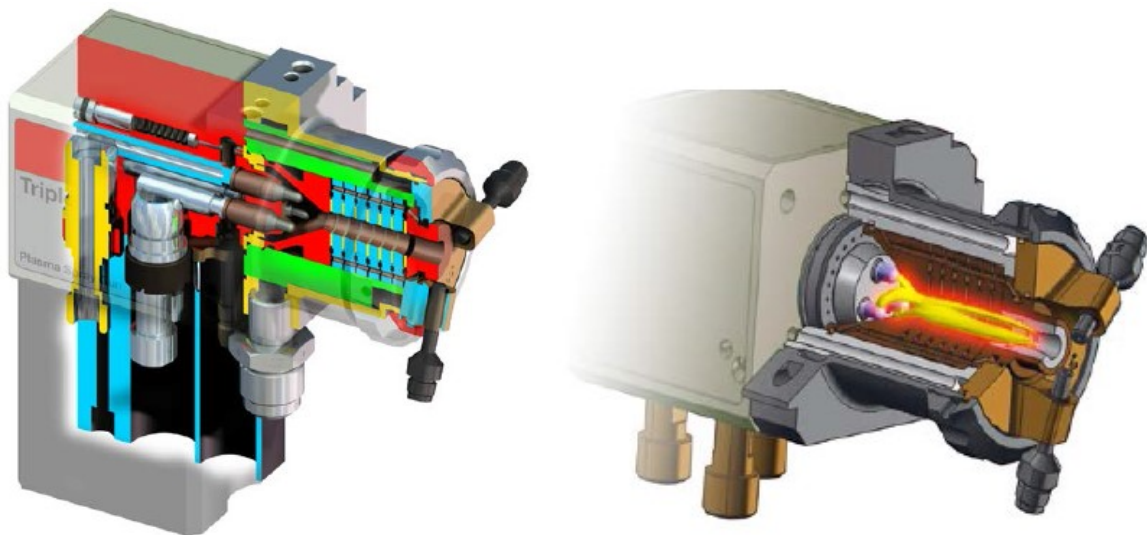


Fig. 8.54 Schema capului plasmagen cu arc electric în cascadă și triplu electrod [81].

Pentru a ilustra importanța controlului avansat al parametrilor de pulverizare, să considerăm efectul controlului porozității. Nivelul acesteia în stratul pulverizat poate fi controlat la valori inferioare de 1%, iar prin operații post-pulverizare se pot obține straturi compacte 100%. În anumite aplicații este necesară obținerea unor porozități mari, de 20 %, ca de exemplu, în straturile termo-izolatoare.

Legăturile metalurgice și mecanice se obțin prin întrepătrunderea particulelor pulverizate, conform figurii 8.55, rezistența acestora fiind cuprinsă între 17 MPa în cazul aliajelor ușoare și 83 MPa în cazul carburilor metalice. Un alt avantaj important este eliminarea zonei influențate termic, reducerea tensiunilor din strat și substrat, fapt ce favorizează o comportare a piesei la oboseală foarte bună și eliminarea deformațiilor termice [81].

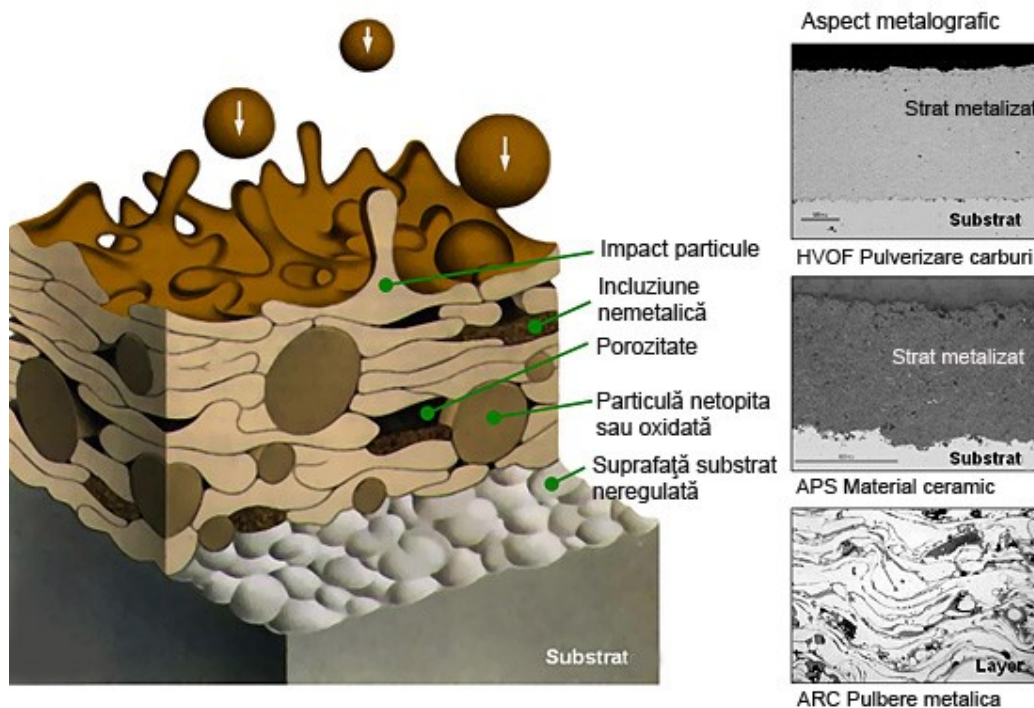


Fig. 8.55 Principiul formării legăturilor metalurgice și mecanice la pulverizarea termică [81]. Aspect microstructuri ale straturilor metalizate cu HVOF, APS (Atmospheric Plasma Spray) și în arc electric.

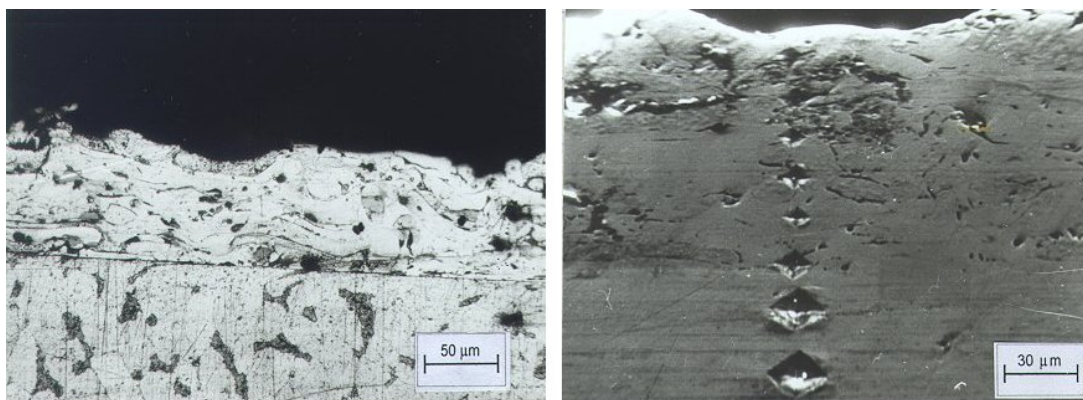


Fig. 8.56 Aspectul straturilor metalizate din fontă aliată pulverizată în jet de plasmă [78]. Se observă amprenta variabilă a măsurătorilor de microduritate, indicând creșterea microdurității la interfața dintre substrat și fonta pulverizată.

În figura 8.56 este prezentată microstructura unui strat de fontă obținut prin pulverizare în jet de plasmă pe un substrat din oțel carbon. Pulberea de fontă a fost obținută prin pulverizare din fază lichidă, utilizând un jet de apă de înaltă presiune. Analizele de măsurare a microdurității, relevă un maxim al acestora în vecinătatea substratului, datorită vitezei de răcire mai mare pe substrat.

Primele particule de fontă topită la impact cu substratul de oțel, se răcesc cu viteză mare, datorită conducției termice ridicată din substrat. Ca urmare, va crește proporția de martensită din structura stratului depus, în zona de interfață cu substratul metalic. Straturile superioare de material pulverizat, prezintă o microduritate mai mică, deoarece condițiile de îndepărtare ale căldurii sunt mai nefavorabile. Impactul particulelor se face pe granule aplatizate depuse anterior, între care sunt intercalați pori, iar temperatura substratului este mai mare. Microduritatea mare se explică prin existența în structură a martensitei și austenitei suprarăcite, suprasaturate cu carbon, fiind prezente în matricea metalică faze dure, precum carburi și siliciuri de crom de duritate mare.

Pentru aplicații speciale, firma Oerlikon Metco, a brevetat un procedeu special de pulverizare cu plasmă în atmosferă controlată¹ [82]. Procesul se desfășoară într-o încălț închisă, uzual vidată. Se obțin straturi pulverizate de înaltă densitate sau cu porozitate foarte precis controlată și cu o contaminare extrem de redusă a materialului pulverizat. Prin această metodă se obțin rezultate foarte bune, care nu pot fi atinse cu nici un alt procedeu de pulverizare termică. Metoda se aplică pentru pulverizarea straturilor foarte subțiri, cu materiale ceramice, în domeniul materialelor refractare.

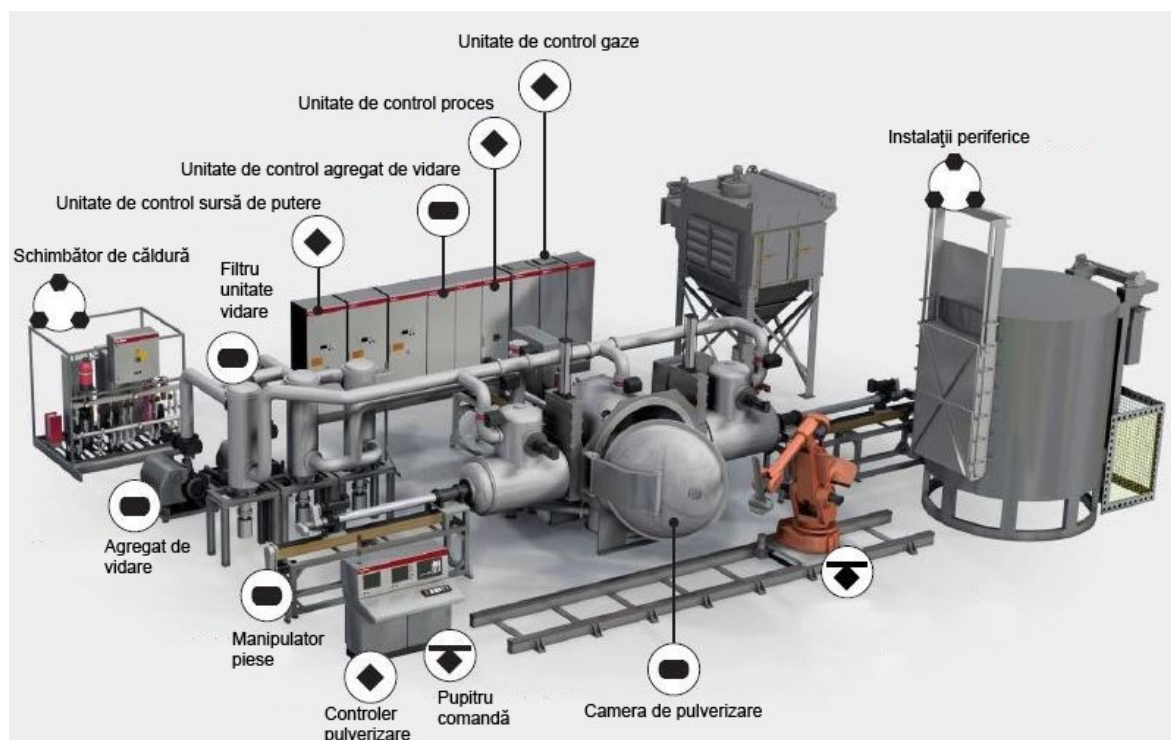


Fig. 8.57 Instalația de pulverizare cu plasmă ChamPro™ [82].

În figura 8.57 este prezentată instalația de pulverizare ChamPro™ care poate avea diferite nivele de automatizare. Varianta prezentată se utilizează pentru pulverizarea termică în proces continuu. Instalația este echipată cu camere de preîncălzire separate și mecanisme de manipulare robotizată, care asigură încărcarea/descărcarea și manipularea pieselor între diferite camere. Camera de pulverizare este menținută vidată permanent, procesul de pulverizare desfășurându-se fără întreruperi. Datorită faptului că pulverizarea termică se realizează în vid, este împiedicată formarea peliculei de oxizi între particulele de pulbere, iar porozitatea va fi redusă aproape complet.

¹ Controlled atmosphere plasma spraying (ChamPro) lb.eng.

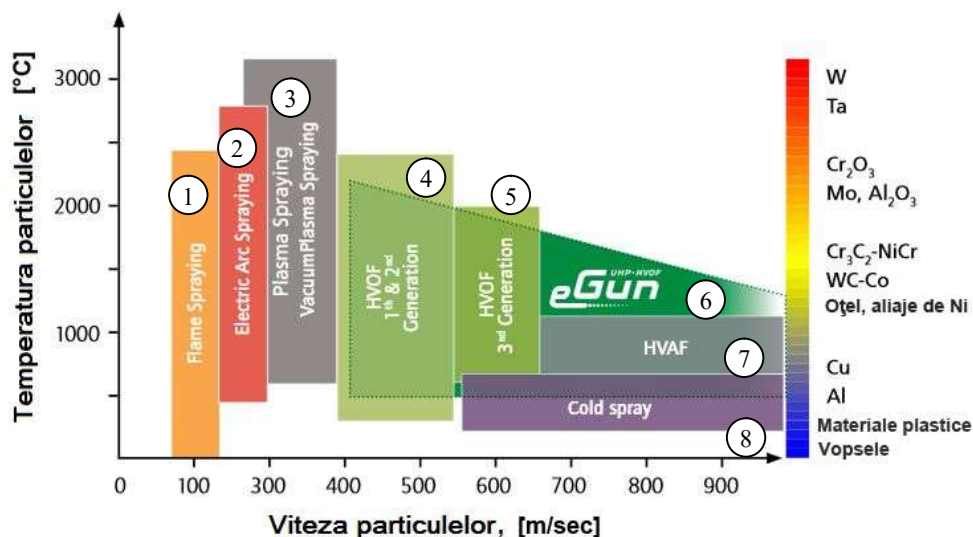


Fig.8.58 Caracteristicile proceselor de metalizare termică [76].

- 1 - Flame Spraying (pulverizare cu flacără), 2 - Electric Arc Spraying (pulverizare cu arc electric),
 3 - Plasma Spraying (pulverizare cu plasmă), 4,5 - HVOF¹ (pulverizare cu flacără de mare viteză),
 6 - procedeul eGUN sau HVOF de înaltă presiune, 7 - HVAF² (pulverizare cu flacără),
 8 - Cold Spray (pulverizare la rece).

Tab. 8.16 Indicatori de performanță și de productivitate la pulverizarea termică [81].

Parametrul	Tipul acoperirii	Pulverizare cu flacără	HVOF	Pulverizare în arc	Pulverizare în plasmă
Temperatura, [°C]		3000	2600÷3000	4000	12000÷16000
Rata de depunere, [kg/h]		2÷6	1÷9	10÷25	2÷10
Viteza particulelor, [m/s]		< 50	< 700	~ 150	< 450
Rezistență legătura particule, [MPa]	Aliaje feroase	14÷21	48÷62	28÷41	21÷34
	Aliaje neferoase	7÷34	48÷62	14÷48	14÷48
	Aliaje auto fluxante	> 83	70÷80	15÷50	
	Ceramice	14÷34			21÷41
	Carburi metalice	34÷48	> 83		55÷69
Grosime strat, [mm]	Aliaje feroase	0,05÷2	0,05÷2,5	0,1÷2,5	0,4÷2,5
	Aliaje neferoase	0,05÷5	0,05÷2,5	0,1÷5	0,05÷5
	Aliaje auto fluxante	0,15÷2,5	0,05÷2,5		
	Ceramice	0,25÷2			0,1÷2
	Carburi metalice	0,15÷0,8	0,05÷5		0,15÷0,8
Duritatea, HRC	Aliaje feroase	65	60	40	40
	Aliaje neferoase			35	50
	Aliaje auto fluxante				30÷60
	Ceramice				45÷65
	Carburi metalice				50÷65
Porozitatea, [%]	Aliaje feroase	3÷10	< 2	3÷10	2÷5
	Aliaje neferoase	3÷10	< 2	3÷10	2÷5
	Aliaje auto fluxante	< 2	< 2		
	Ceramice	5÷15			1÷2
	Carburi metalice	5÷15	< 1		2÷3

¹ HVOF - high velocity oxygen fuel (lb.eng.)

² HVAF - high velocity air fuel (lb.eng.)

În figura 8.58 sunt prezentate domeniile de variație a vitezei și temperaturii particulelor pulverizate, în raport cu principalele procedee de pulverizare termică.

În tabelul 8.16 sunt prezentate comparativ, pentru diferite procedee de pulverizare termică, indicatorii de performanță și de productivitate, iar în tabelul 8.17 sunt ilustrate principalele aplicații ale diferitelor materiale utilizate în procesele de pulverizare.

Tab. 8.17 Materiale pentru pulverizare termică. Aplicații [81].

Proprietăți		Abrazive					Aliaje, superaliaje, compozite							Carburi		Ceramice				Auto fluxante		
Element		Al	Co	Cu	Ni	ZrO ₂	Al	Co	Cu	Fe	Mo	Ni	Ti	Cr	W	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	TiO ₂	ZrO ₂	Co	Ni	
Electrice	Izolare																					
	Conductivitate																					
Termice	Izolare																					
	Conductivitate																					
	Rez. oxidare																					
Dimensionale	Recondiționări																					
	Strat tampon																					
	Stab. abrazivă																					
	Stab. abradable																					
Rezistență la uzură	Eroziune																					
	Fretare																					
	Abraziune																					
	Impact																					
	Adeziune																					
	Alunecare																					
	Cavitație																					
Coroziune chimică	Mediu salin																					
	Mediu acid																					
	Mediu alcalin																					
	Atac chimic																					
	Coroz. la cald																					

Domeniul de temperaturi de lucru în exploatare.

9. IMPERFEȚIUNI DE SUDARE ȘI CONTROL NEDISTRUCTIV

Un aspect foarte important la realizarea construcțiilor sudate este asigurarea calității. Calitatea unui produs, fie el o construcție sudată, comportă o serie de trăsături și caracteristici specifice, care corespund într-o anumită măsură cu cele specificate în planificarea calității. Desigur, primează acele caracteristici esențiale pentru exploatarea în siguranță a construcției sudate, însă se iau în considerare și alte aspecte, care definesc în ansamblu conceptul de calitate, conform SR EN ISO 9000:2006. Din categoria aspectelor esențiale, privind comportarea construcțiilor sudate în exploatare, fac parte defectele sau imperfecțiunile de sudare. Pentru prevenirea apariției lor, este necesar înțelegerea mecanismelor care conduc la apariția acestora și adoptarea unor soluții, care să reducă influența factorilor de risc, îmbunătățind astfel calitatea produsului.

Defecte de sudare sau imperfecțiuni? În normativele mai vechi se utiliza termenul de **defect de sudare**, însă în normativele recente, precum în SR EN ISO 9000-2001, se recomandă utilizarea termenului de **neconformitate**, iar în prezent, se utilizează termenul de **imperfecțiune**. Astfel, conform SR EN ISO 5817:2015, se utilizează termenul de imperfecțiune, pentru toate abaterile de formă, dimensiuni și alte neconformități întâlnite în îmbinările sudate. Probabil, această opțiune provine din faptul că anumite imperfecțiuni pot fi acceptate la controlul de calitate, fără să fie nevoie de operații suplimentare de corectare sau de înlăturare a acestora. Dacă aceste imperfecțiuni le numim în ansamblu defecte de sudare, se pot crea anumite confuzii în aplicarea sistemului de asigurare a calității a construcțiilor sudate.

Într-o economie globală, implementarea unui sistem de asigurare a calității prin seria de standarde ISO 9000, a devenit imperios necesară și reprezintă o condiție esențială pentru o companie, ca să fie eligibilă de a participa la licitații, de a primi comenzi, deci în esență pentru a exista pe piață.

9.1 Clasificarea imperfecțiunilor de sudare

În domeniul construcțiilor metalice sudate, identificarea imperfecțiunilor specifice proceselor de sudare și conexe, clasificarea și codificarea numerică a acestora, reprezintă un instrument foarte util în terminologia de specialitate, întocmirea caietelor de sarcini, a rapoartelor de control și calitate, expertize etc. Denumirea, clasificarea, simbolizarea și definiția imperfecțiunilor îmbinărilor sudate, sunt reglementate prin standarde specifice, după cum urmează:

- SR EN ISO 6520-1:2007 “Clasificarea imperfecțiunilor geometrice din îmbinările sudate ale materialelor metalice. Partea 1: Sudare prin topire” ;
- SR EN ISO 6520-2:2014 “Clasificarea imperfecțiunilor geometrice ale îmbinărilor sudate ale materialelor metalice. Partea a 2-a: Sudarea prin presiune”.

Tab.9.1 Imperfecțiunile îmbinărilor sudate [40].

Grupa	Imperfecțiunile îmbinărilor sudate prin topire	Imperfecțiunile îmbinărilor sudate prin presiune
1.	Fisuri	Fisuri
2.	Cavități	Cavități
3.	Incluziuni solide	Incluziuni solide
4.	Lipsă de topire și de pătrundere	Imperfecțiuni de legătură
5.	Imperfecțiuni ale formei și imperfecțiuni dimensionale	Imperfecțiuni ale formei și imperfecțiuni dimensionale
6.	Alte imperfecțiuni	Alte imperfecțiuni

În conformitate cu standardele amintite mai sus, imperfecțiunile îmbinărilor sudate sunt împărțite în **6 grupe caracteristice**, precizate în tabelul 9.1. Standardele referitoare la imperfecțiunile îmbinărilor sudate și a celor lipite nu sunt limitative. Constatarea unor imperfecțiuni care nu se găsesc în aceste standarde, mai ales la îmbinările sudate prin procedee speciale de sudare, se vor semnala prin descrierea acestora și a amplasării lor [40].

Imperfecțiunile îmbinărilor sudate pot fi clasificate din punct de vedere al criteriilor de accesibilitate (ISO 5817, ISO 10042 și EN 12062) conform unui sistem de calitate. Sistemul de calitate pentru realizarea îmbinărilor sudate, cuprinde **trei clase de calitate**, conform SR EN ISO 5817-2015. Nivelurile de calitate sunt notate cu B, C și D, nivelul B corespunzând celor mai înalte condiții de calitate. Alegerea nivelului de calitate pentru orice aplicație trebuie să ia în considerare:

- Modul de încărcare (static sau dinamic);
- Condițiile de exploatare (temperaturi, mediu, coroziune etc.);
- Factorii de risc și consecințele asociate cu ruperea îmbinării;
- Costul de fabricație, inspecție, control și reparații.

În tabelele 9.2 – 9.18, se vor prezenta succint pentru procedeele de sudare prin topire, denumirea imperfecțiunilor, codul de referință al acestora conform ISO 6250-1, alături de schița imperfecțiunii ce cuprinde mărimea, localizarea acesteia în MB (metalul de bază), CS (cusătura sudată) sau ZIT. Deasemenea, sunt prezentate și o serie de imagini macro sau metalografice, pentru ilustrarea în detaliu a caracteristicilor imperfecțiunilor respective.

Grupa 1 - Fisuri

Tab. 9.2 Fisuri longitudinale.

Cod Referință ISO 6520-1	Denumirea imperfecțiunii	Schiță imperfecțiune (mărime, localizare)	Microstructuri imagini macro, microscopie electronică, film control cu raze X, lichide penetrante
101	Fisură longitudinală		
1011	în sudură		
1012	în zona de trecere		
1013	în ZIT		
1014	în metalul de bază		

Tab. 9.3 Fisuri transversale.

Cod Referință ISO 6520-1	Denumirea imperfecțiunii	Schiță imperfecțiune (mărime, localizare)	Microstructuri imagini macro, microscopie electronică, film control cu raze X, lichide penetrante
102	Fisură transversală		
1021	în sudură		
1022	în ZIT		
1023	în metalul de bază		

Tab. 9.4 Fisuri radiale (în stea).

Cod Referință ISO 6520-1	Denumirea imperfecțiunii	Schiță imperfecțiune (mărime, localizare)	Microstructuri imagini macro, microscopie electronică, film control cu raze X, lichide penetrante
103	Fisură radială		
1031	în sudură		
1033	în ZIT		
1034	în metalul de bază		

Tab. 9.5 Fisuri în crater.

Cod Referință ISO 6520-1	Denumirea imperfecțiunii	Schiță imperfecțiune (mărime, localizare)	Microstructuri imagini macro, microscopie electronică, film control cu raze X, lichide penetrante
104	Fisură în crater		
1045	longitudinală		
1046	transversală		
1047	în stea		

Tab. 9.6 Rețea de fisuri marmorate (ansamblu de fisuri grupate, cu orientare oarecare).

105	Rețea de fisuri		
1051	în sudură		
1053	în ZIT		
1054	în metalul de bază		

Tab. 9.7 Fisuri ramificate (ansamblu de fisuri legate între ele, cu originea într-o fisură comună și care sunt distincte de o rețea de fisuri marmorate).

106	Rețea de fisuri		
1061	în sudură		
1063	în ZIT		
1064	în metalul de bază		

Grupa 2. Cavități

Tab. 9.8 Pori, sufluri.

Cod Referință ISO 6520-1	Denumirea imperfecțiunii	Schiță imperfecțiune (mărime, localizare)	Microstructuri imagini macro, microscopie electronică, film control cu raze X, lichide penetrante
201	Suflură		
2011	Por, Suflură sferoidală		
2012	Porozitate uniform distribuită		
2013	Cuib de sufluri		
2014	Sufluri aliniate		
2015	Suflură alungită		
2016	Suflură vermiculară		
2017	Por de suprafață		

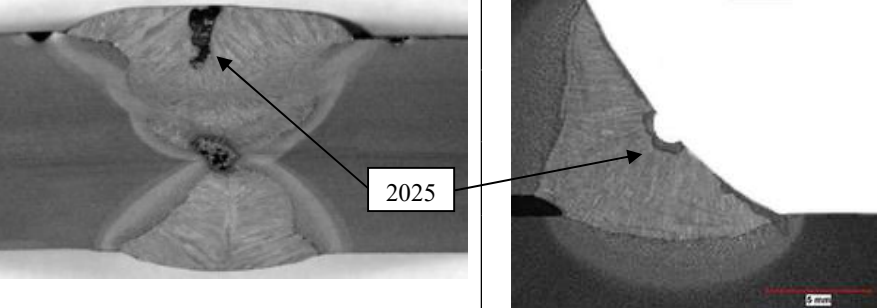
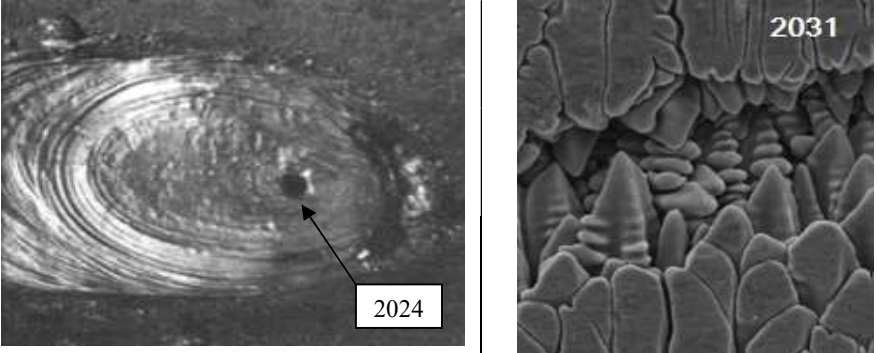
Porul este sinonim cu suflura și reprezintă o cavitate de formă sferoidală, formată datorită gazelor incorporate în cusătura sudată. Există mai multe cauze care pot conduce la apariția porozității. Pe de o parte avem gaze care se dizolvă în baia de sudare și care pot proveni de la umezeala higroscopică din învelișul electrozilor, fluxul de sudare sau datorită protecției insuficiente la sudarea în atmosferă de gaze protectoare. Pe de altă parte, putem avea cauze care provin din alegerea incorectă a parametrilor de sudare, precum viteza de sudare ridicată sau alți parametri, care determină o vâscozitate ridicată a băii de sudare. În esență, porozitatea este legată de degazarea insuficientă a băii de sudare.

Pe măsură ce temperatura scade, solubilitatea gazelor dizolvate în baia de sudare scade foarte rapid, astfel că la cristalizarea băii de sudare, o parte din gazele dizolvate rămân captive în cusătură și dau naștere la porozitate.

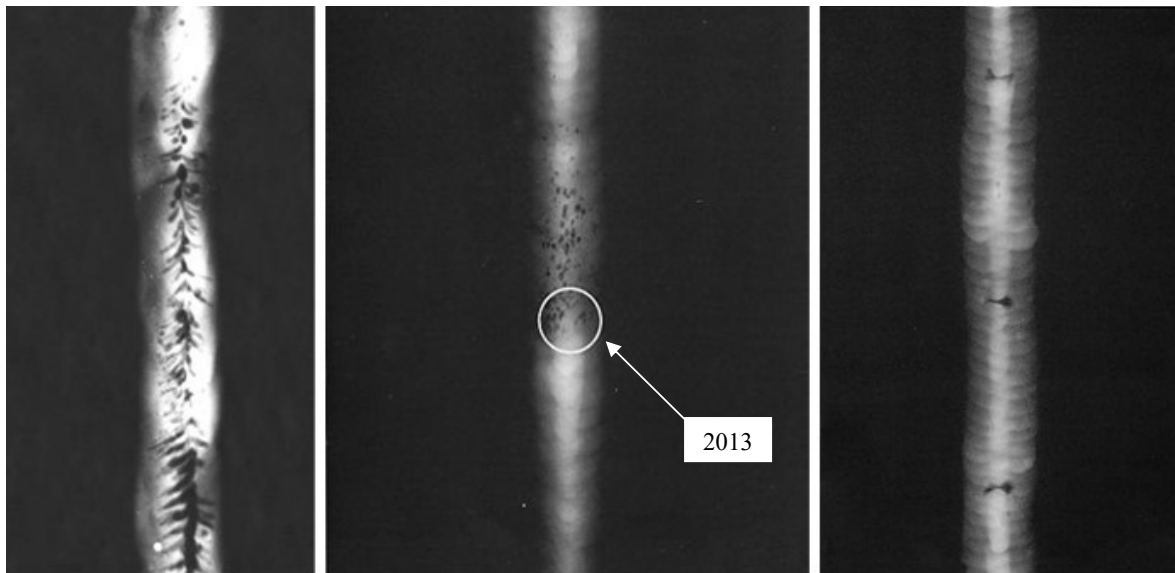
Cuiburile de sufluri sunt repartizate grupat, fără ca să existe o orientare preferențială a acestora, spre deosebire de suflurile aliniate care sunt orientate paralel cu axa longitudinală a cusăturii. O formă mai neobișnuită a suflurilor este cea vermiculară (cod 2016) care seamănă cu o galerie de vierme¹ și care a inspirat denumirea acesteia în limba engleză. Forma tubulară alungită se datorează gazelor prinse între grăunții cristalini, care în procesul de cristalizare conduc la acest tip de porozitate cu formă mai exotică, ce seamănă cu un schelet de pește.

¹ wormholes porosity

Tab. 9.9 Retasuri

Cod Ref. ISO 6520-1	Denumirea imperfecțiunii	Microstructuri imagini macro, microscopie electronică, film control cu raze X, lichide penetrante
202	Retasă	
2021	Retasă interdendritică	
2024	Retasă de crater	
2025	Retasă de crater deschisă	
203	Microretasă	
2031	Microretasă interdendritică	
2032	Microretasă transgranulară	

Retasurile sunt cavități care se formează la solidificarea băii de sudare ca urmare a contracției volumice. Apariția lor este favorizată la materialele care au un coeficient mare de contracție la solidificare. Retasura interdendritică (2031) este perpendiculară pe suprafața cusăturii sudate, iar retasura de crater (2025) se formează la sfârșitul cusăturii sudate și reduce din secțiunea transversală efectivă a cusăturii sudate, tabelul 9.9.



a) suflură vermiculară (2016) b) cuib de sufluri (2013) c) incluziuni de zgură (3012)
Fig. 9.1 Filme radiografice cu defecte de sudare [92]

Microretasurile pot fi observate doar la microscopul optic sau electronic, datorită dimensiunilor reduse și reprezintă concentratori de tensiune, în special pentru piesele sudate sollicitate dinamic.

Grupa 3. Incluziuni solide

Tab. 9.10 Corpuri solide incorporate în metalul depus (300).

Cod Referință ISO 6520-1	Denumirea imperfecțiunii	Schiță imperfecțiune (mărime, localizare)	Microstructuri imagini macro, microscopie electronică, film control cu raze X, lichide penetrante
301	Incluziune de zgură		<p>Incluziune de zgură de suprafață</p>
3011	Incluziuni aliniate		
3012	Incluziuni izolate		
3013	Incluziuni împrăștiate		
3014	Incluziuni în cuib		

Incluziunile de zgură (oxizi, compuși de fosfor și nitruri) sunt defecte de sudare care se datorează curățirii insuficiente a stratului de zgură la sudarea în mai multe treceri sau datorită unei tehnici de sudare greșită a sudorului, tabelul 9.10. Poziția incorectă a electrodului poate împiedica zgura formată în baia de sudare să se ridice la suprafața băii și astfel, să rămână prinsă în metalul depus ca și incluziune solidă (datorită curgerii băii de sudare înaintea electrodului). Incluziunile de zgură reprezintă discontinuități de material și afectează negativ caracteristicile de rezistență ale îmbinărilor sudate, în special ductilitatea. Pe filmul radiografic apar de culoare închisă sub forma unor pete neregulate sau linii, în funcție de mărimea și distribuția acestora, figura 9.1.

Tab. 9.11 Incluziuni de flux.

Cod Referință ISO 6520-1	Denumirea imperfecțiunii	Schiță imperfecțiune (mărime, localizare)	Microstructuri imagini macro, microscopie electronică, film control cu raze X, lichide penetrante
302	Incluziune de flux		<p>control cu raze X</p>
3021	Incluziuni flux aliniate		
3022	Incluziuni flux izolate		
3023	Incluziuni împrăștiate		
3024	Incluziuni flux în cuib		

Incluziunile de oxizi apar sub formă neregulată, iar pe filmul radiografic apar sub forma unor pete întunecate care se disting față de sufluri (porozitate) prin forma neregulată specifică, tabelul 9.12. Porii au în general o formă sferoidală sau sub formă de elipsoid, suprafața acestora fiind netedă și rotunjită, tabelul 9.8.

Tab. 9.12 Incluziuni de oxizi.

Cod Referință ISO 6520-1	Denumirea imperfecțiunii	Schiță imperfecțiune (mărime, localizare)	Microstructuri imagini macro, microscopie electronică, film control cu raze X, lichide penetrante
303	Incluziune de oxid		
3031	Incluziuni oxizi aliniate		
3032	Incluziuni oxizi izolate		
3033	Incluziuni oxizi împrăștiate		
3034	Incluziuni oxizi în cuib		
3035	Peliculă de oxizi		

Cauza generală de apariție a incluziunilor de oxizi este suprafața oxidată a pieselor sudate, iar remedierea acestora se poate realiza prin polizarea suprafețelor pieselor înainte de sudare, până la luciu metalic sau prin sablarea acestora cu nisip. Riscul apariției acestui defect crește în cazul sudării materialelor reactive, ca de exemplu, la sudarea aluminiului și aliajelor sale. Aluminiul are afinitate foarte mare față de oxigen, iar o protecție insuficientă a băii de sudare, poate conduce la apariția acestui tip de defecte. Eliminarea peliculei de oxizi în acest caz, se face prin sablare cu electroni, pe durata alternanțelor pozitive ale curentului de sudare, la sudarea WIG.

Tab. 9.13 Incluziuni de metal.

Cod Referință ISO 6520-1	Denumirea imperfecțiunii	Microstructuri imagini macro, microscopie electronică, film control cu raze X, lichide penetrante
304	Incluziune metalică	
3041	Incluziuni de wolfram	
3042	Incluziuni de cupru	
3043	Incluziuni de alte metale	

Incluziunea de wolfram, figura 9.2, intervine la procesul de sudare WIG și se produce prin atingerea accidentală a vârfului electrodului de wolfram cu metalul de bază sau cu baia de sudare. Wolframul are punctul de topire cel mai ridicat dintre toate metalele (3422°C), însă prin impurificare cu metalul de bază, punctul de topire scade și astfel, mici cantități din vârful electrodului se topesc și sunt transferate prin arc în baia de sudare. Topirea vârfului electrodului va determina modificarea caracteristicilor coloanei arcului electric. Lățimea acesteia va crește, iar temperaturile din axa coloanei se vor micșora, ceea ce va determina reducerea adâncimii de pătrundere a cusăturii în metalul de bază.

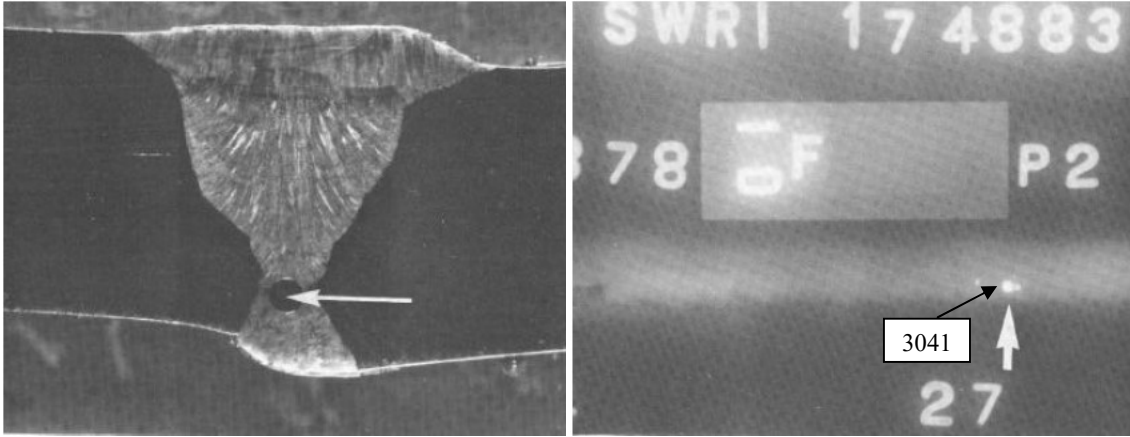


Fig. 9.2 Incluziune de wolfram. Aspect metalografic și pe filmul radiografic[93].

Această problemă se corectează prin reascuțirea electrodului de wolfram, însă contaminările repetate ale electrodului conduc la un consum excesiv al acestuia și la prezența imperfecțiunilor de sudare de tipul incluziunilor metalice. Pe filmul radiografic, incluziunile de wolfram apar de culoare deschisă, densitatea dublă a wolframului față de oțelul carbon, determină o atenuare a radiației penetrante mai pronunțată și astfel are loc o imprimare diferențiată a filmului radiografic, figura 9.2.

Grupa 4. Lipsă de topire și de pătrundere (400)

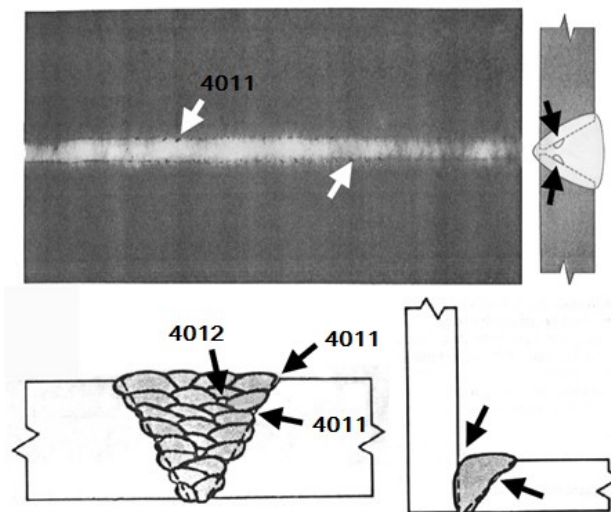
Tab. 9.14 Lipsa de topire.

Cod Referință ISO 6520-1	Denumirea imperfecțiunii	Microstructuri	
		imagini macro, microscopie electronică, film control cu raze X, lichide penetrante	
401	Lipsă de topire		
4011	Lipsă de topire a marginilor		
4012	Lipsă de topire între rânduri		
4013	Lipsă de topire la rădăcină		
4014	Lipsă topire pe muchia rostului ¹		

Lipsa de topire este o imperfecțiune de sudare care constă într-o lipsă de legătură parțială între metalul deșus și metalul de bază, sau între diferite straturi ale cusăturii. Dintre cauzele care pot conduce la apariția lipsei de topire, se amintesc:

- Viteza prea mare de sudare sau energia liniară de sudare prea mică;
- Geometrie necorespunzătoare a rostului;
- Acces dificil al electrodului de sudare;
- Diametrul electrodului prea mare.

¹ Cold laps (lb.eng.)



Pe filmul radiografic lipsa de topire apare ca și o linie groasă întunecată sau difuză și cu ondulații, în funcție de poziția imperfecțiunii în raport cu radiația X incidentă. Dacă lipsa de topire este localizată pe suprafața pereților laterali ai rostului de sudare, pe filmul radiografic indicațiile apar sub forma unor benzi subțiri întunecate intermitente și paralele cu cusătura sudată, figura 9.3.

Fig. 9.3 Aspectul imperfecțiunilor de sudare 4011, lipsă de topire a marginilor.

Evitarea apariției imperfecțiunilor tip lipsă de topire se poate face prin ajustarea parametrilor de sudare, a vitezei de sudare, a poziției pistolului de sudare sau prin forma rostului. Reducerea vitezei de sudare favorizează creșterea adâncimii de pătrundere, însă la viteze de sudare prea mici se formează un front de metal topit în fața arcului ce conduce la un efect opus, de reducere a adâncimii de pătrundere și de creștere a riscului de apariție a lipsei de pătrundere la rădăcină. Accesul și poziția corectă a pistolului de sudare este un aspect foarte important în prevenirea apariției lipsei de topire pe pereții laterali ai rostului sau între rânduri, figura 9.4. Deasemenea, forma rostului de sudare poate juca un rol important în prevenirea acestui tip de imperfecțiune, de exemplu, la sudarea orizontală pe perete vertical (PC) sau orizontală peste cap (PD).

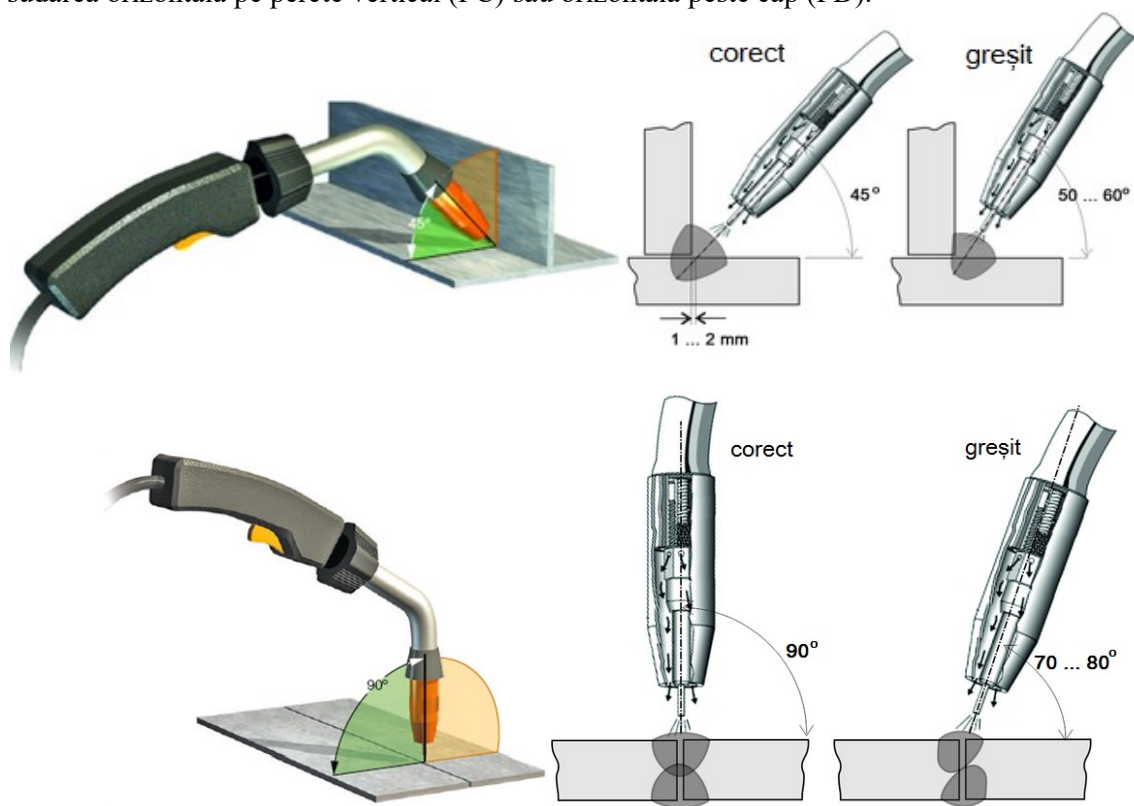
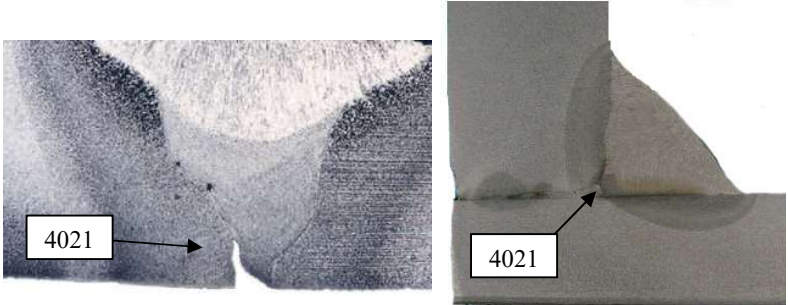
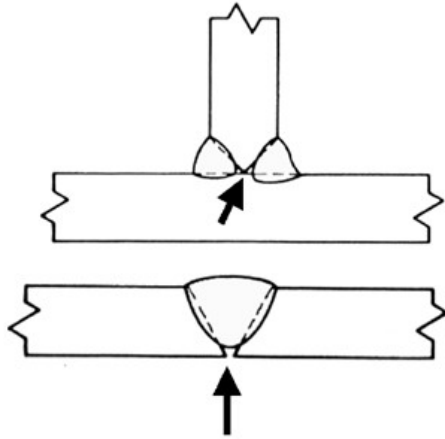


Fig. 9.4 Poziția corectă a pistolului de sudare pentru evitarea lipsei de pătrundere.

Tab. 9.15 Lipsa de pătrundere.

Cod Referință ISO 6520-1	Denumirea imperfecțiunii	Microstructuri imagini macro, microscopie electronică, film control cu raze X, lichide penetrante
402	Lipsa de pătrundere	
4021	Pătrunderea incompletă la rădăcină	
403	Imperfecțiune sub formă de dinți de ferăstrău	



Lipsa de pătrundere la rădăcină apare în cazurile în care avem o pătrundere insuficientă a cusăturii în metalul de bază, figura 9.5 și tabelul 9.15. Practic, apare când avem o diferență între pătrunderea reală și pătrunderea nominală specificată de către proiectant pe baza calculelor de rezistență, condiții de funcționare etc.

Fig. 9.5 Imperfecțiuni de sudare.
Pătrundere incompletă la rădăcină (4021).

Cauzele de apariție a pătrunderii incomplete, pot fi:

- Nivelul ridicat de bridare a construcției sudate ;
- Geometrie și deschidere rost de sudare insuficientă. Forma rostului de sudare trebuie optimizată, deoarece o deschidere prea mare conduce la defomații și tensiuni în structura sudată și la consum excesiv de materiale adaos și auxiliare, manoperă etc. ;
- Energie liniară insuficientă ;
- Poziție greșită a pistolului de sudare etc.

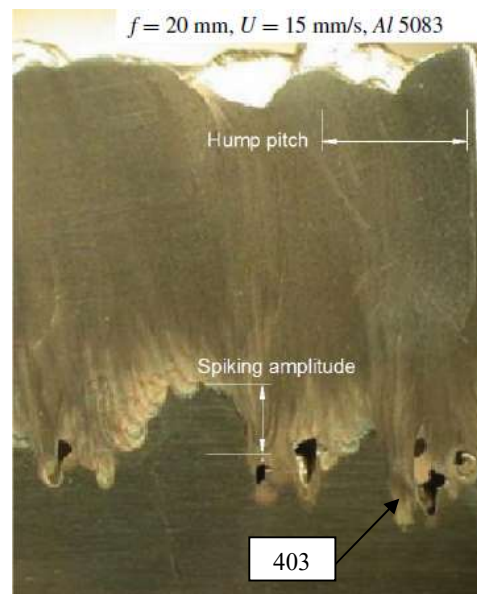
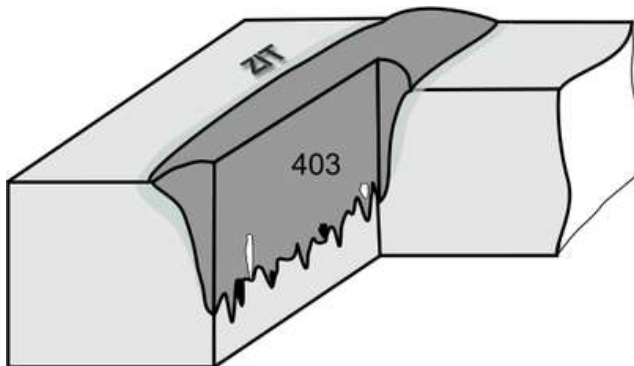
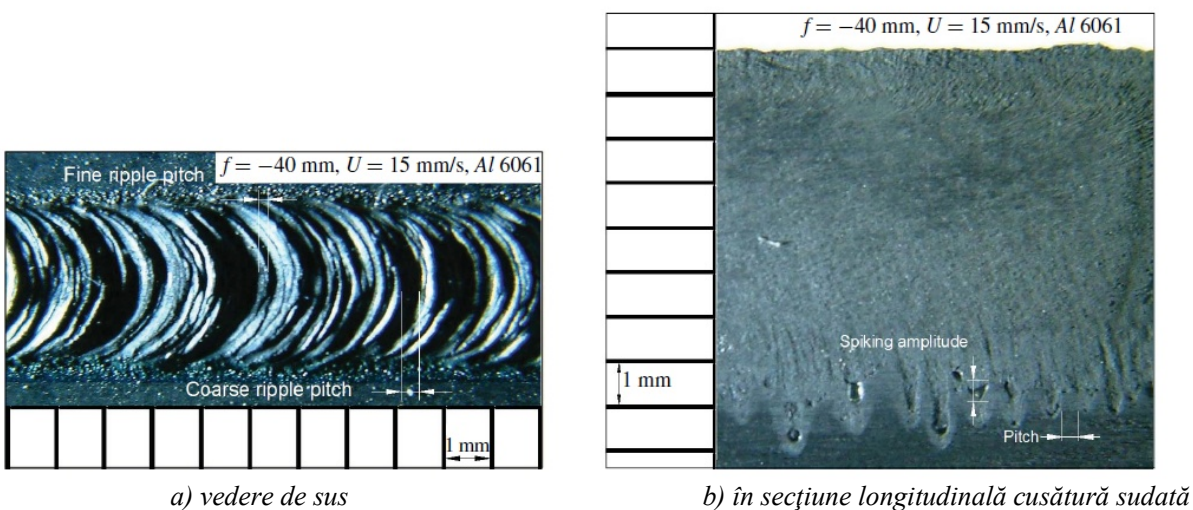


Fig. 9.6 Imperfecțiuni sub formă de dinți de ferăstrău (cod 403) [96].

Un caz particular al imperfecțiunilor tip lipsei de pătrundere este întâlnit la sudarea cu fascicul de electroni sau la sudarea cu laser, când se poate forma o sudură cu adâncime de pătrundere variabilă, ce prezintă un aspect de dinți de ferăstrău (*Spiking lb.eng.*), care poate să cuprindă în secțiune longitudinală cavități, fisuri sau retasuri, figura 9.6. Imperfecțiunea sub formă de dinți de ferăstrău (403) este determinată de creșterea bruscă a pătrunderii față de adâncimea medie de pătrundere, considerată sub forma unei linii de nivel. La examinarea rădăcinii cusăturii sudate se pot observa o serie de cavități ce apar la intervale neregulate și care rezultă din instabilitatea găurii de cheie la sudarea cu laser sau cu fascicul de electroni. Practic, aceste imperfecțiuni de sudare sunt generate de procesul de topire intermitent în profunzimea materialului de bază. Amplitudinea și pasul în direcția de sudare a imperfecțiunilor tip dinți de ferăstrău cresc în raport cu:

- Concentrația elementelor volatile din metalul de bază ;
- Scăderea vitezei de sudare, respectiv cu creșterea energiei liniare la sudare (creșterea gradientului de temperatură și presiune, creșterea cantității de vapori generate ;
- Creșterea adâncimii găurii de cheie și convecției datorită forțelor termocapilare.

Deasemenea, variația energiei absorbite datorită caracteristicilor de focalizare și reflecțiilor multiple în gaura de cheie, introduce un factor aleator ce determină aspectul neregulat al adâncimii de pătrundere sub forma unor dinți de ferăstrău, figura 9.7 și figura 9.8.



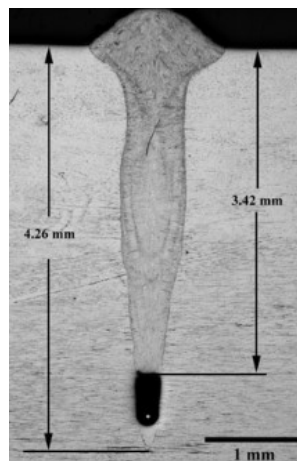
a) vedere de sus

b) în secțiune longitudinală cusătură sudată

Fig. 9.7 Aspectul cusăturii sudate la sudarea aliajului de aluminiu Al 6061 cu fascicul de electroni [96].

Deplasarea petei de focalizare de la suprafața pieselor spre interior, determină creșterea frecvenței denivelărilor suprafeței cusăturii (figura 9.7 a), a adâncimii neregularităților de suprafață, gaura de cheie prezentând un fenomen de variație pulsatoriu. Ca urmare a oscilației periodice a găurii de cheie, se produce un proces de degazare mai intensă a băii de sudare, însă fenomenul trebuie controlat riguros, în caz contrar, având un efect opus, figura 9.8. Trebuie corelată viteza de sudare, factorul de formă a cusăturii sudate, cu grosimea materialului, mărimea și poziția petei de focalizare etc.

Fig.9.8 Secțiune transversală într-o îmbinare sudată cu fascicul de electroni, material 304L, 15.7 kW/mm² [96]. Datorită oscilației adâncimii găurii de cheie s-a format o cavitate la rădăcina cusăturii.



Grupa 5. Imperfecțiuni ale formei și imperfecțiuni dimensionale (500).

Tab. 9.16 Formă imperfectă a suprafețelor exterioare ale cusăturii sudate sau geometrie necorespunzătoare a îmbinării.

Cod Referință ISO 6520-1	Denumirea imperfecțiunii	Microstructuri imagini macro, microscopie electronică, film control cu raze X, lichide penetrante
501	Crestătură ¹	
5011	Crestătură continuă	
5012	Crestătură intermitentă	
5013	Crestătură la rădăcină	
5014	Crestătură între rânduri	
5015	Crestătură locală intermitentă	

5013	5014	5011

Fig. 9.9 Diferite tipuri de crestături, constituie risc de producere a incluziunilor de zgură.

Crestătura este o adâncitură neregulată la nivelul liniei de racordare a sudurii cu metalul de bază, situată fie în metalul de bază, fie în metalul depus. După continuitate, pot fi crestături continue (5011) sau intermitente (5012). În raport cu poziția față de cusătura sudată, crestăturile pot fi poziționate la rădăcină (5013), între rânduri (5014) sau izolate (5015). Dintre cauzele care pot provoca formarea crestăturilor, se pot menționa:

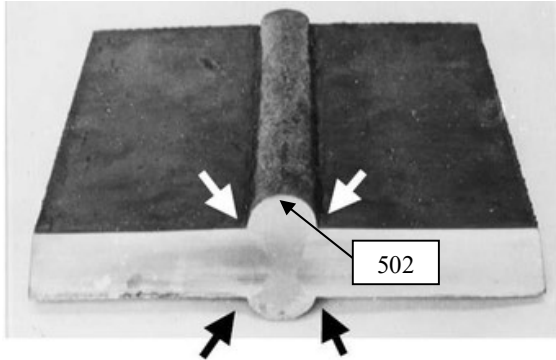
- Tensiunea, curentul de sudare prea mare ;
- Poziționare greșită a electrodului de sudare ;
- Manipulare incorectă a pistolului de sudare ;
- Viteză de sudare prea mare, viteză mare de răcire a băii de sudare.

Crestăturile pot fi o cauză de apariție a incluziunilor de zgură, deoarece împiedică curățirea zgurei care rămâne captivă în interiorul acestora, iar rândurile următoare o acoperă, figura 9.9.

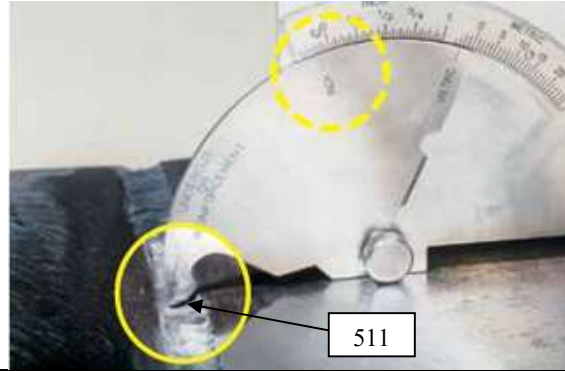
¹ Undercut (lb.eng.)

Tab. 9.17 Diverse imperfecțiuni de formă și geometrie ale îmbinărilor sudate.

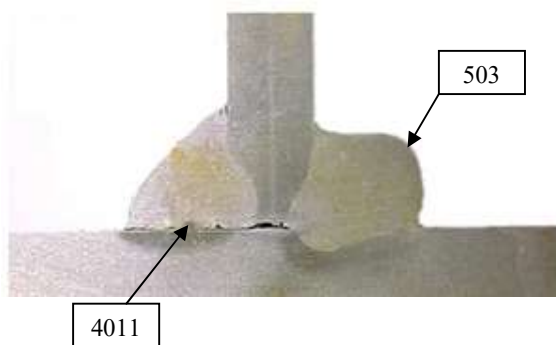
502 Îngroșare excesivă - Exces al grosimii materialului deșus la suprafața unei suduri cap la cap.



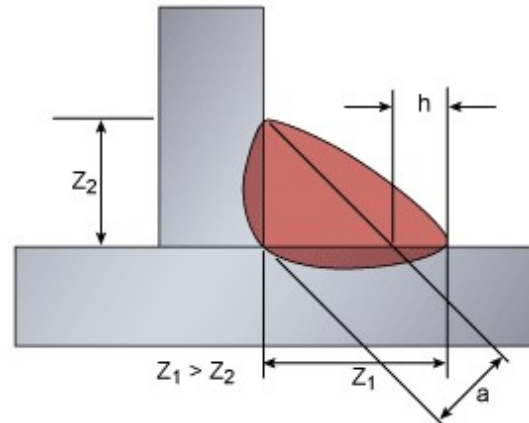
511 Subțiere - Insuficiență locală sau continuă de metal deșus, conducând la un profil al sudurii redus în raport cu profilul corect.



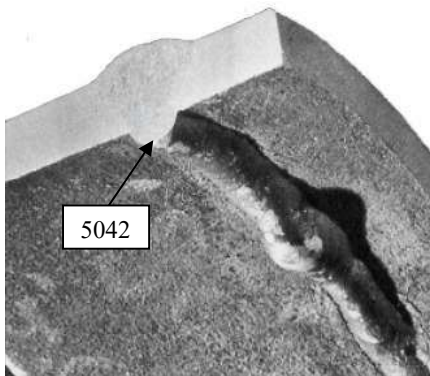
503 Convexitate excesivă - Exces al grosimii metalului deșus la suprafața unei suduri în colț.



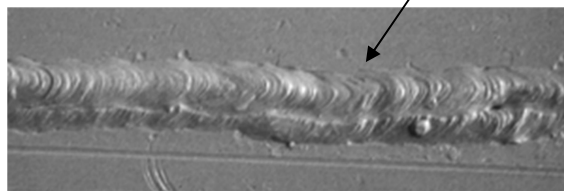
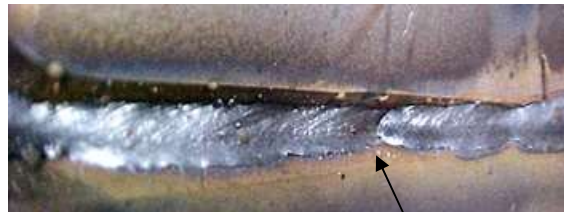
512 Asimetrie excesivă a sudurii în colț



504 Exces de pătrundere - Exces de metal care produce o protuberanță la rădăcina unei suduri.
5041 exces de pătrundere local;
5042 exces de pătrundere continuu;
5043 pătrundere totală



513 Lățime neregulată - Variație excesivă a lățimii sudurii.

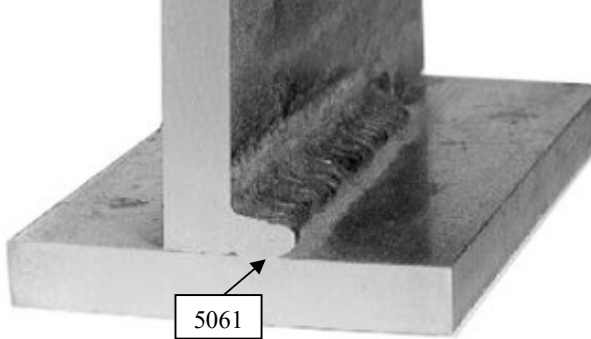


505 Defect de racordare - Unghi (α) prea mare între planul tangent la suprafața metalului de bază și planul tangent la suprafața sudurii, care trece prin linia de racordare.

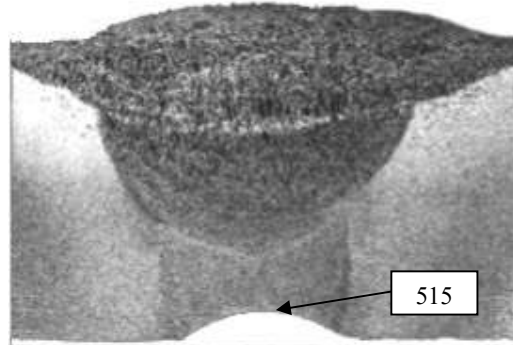
514 Suprafață neregulată - Neregularitate excesivă a suprafeței.

506 Scurgere de metal - Exces de metal deșus care acoperă suprafața metalului de bază, fără legătură intimă cu acesta. Acesta poate fi:

- 5061 Scurgere de metal pe muchia cusăturii
5062 Scurgere de metal la rădăcină

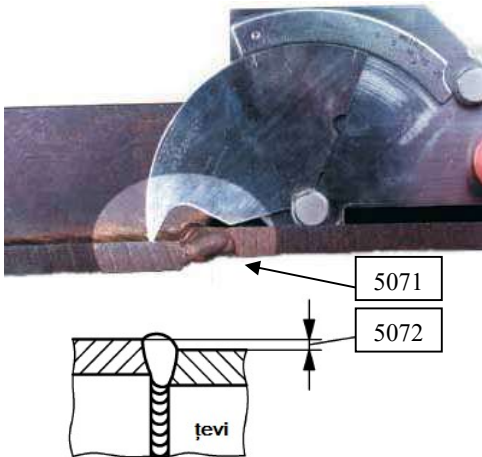


515 Concavitate la rădăcină - Adâncitură la rădăcina unei suduri cap la cap datorată contracției metalului deșus la solidificare.

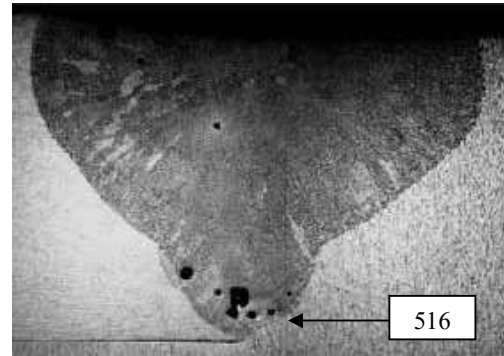


507 Nealinierie axială - Nealinierie între două piese sudate astfel încât, deși suprafețele exterioare ale acestora sunt paralele, nu sunt la nivelul cerut. Aceasta poate fi:

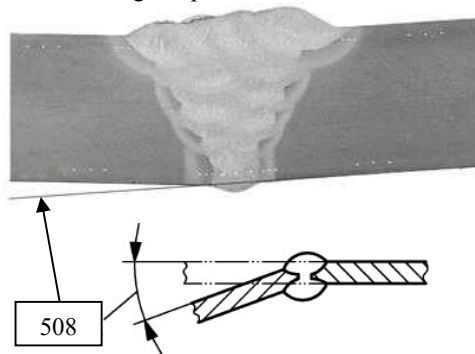
- 5071 Nealinierie axială între table
5072 Nealinierie axială între țevi



516 Porozitate la rădăcină - Formațiune spongioasă la rădăcina sudurii, provocată de fierberea metalului topit în momentul solidificării acestuia. Se întâlnește la sudarea oțelurilor necalmate.

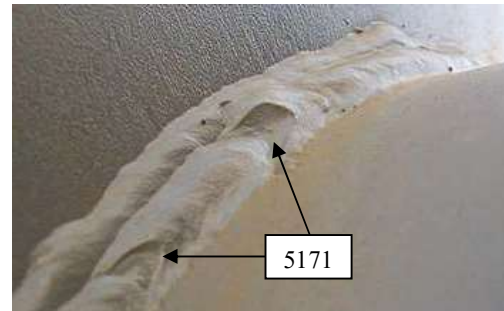


508 Nealinierie unghiulară - Nealinierie între două piese sudate astfel încât, suprafețele exterioare nu sunt paralele sau la unghiul prescris.



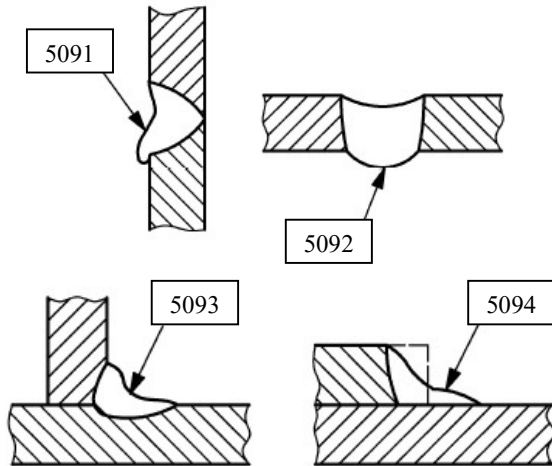
517 Reluare defectuoasă - Neregularitate locală de suprafață la reluarea sudării. Aceasta poate să se găsească:

- 5171 în rândul final;
5172 în rândul de la rădăcină.



509 Supratopire - Scurgere a metalului depus datorată unei topiri excesive, conducând prin efect gravitațional la un exces și/sau o lipsă de metal.

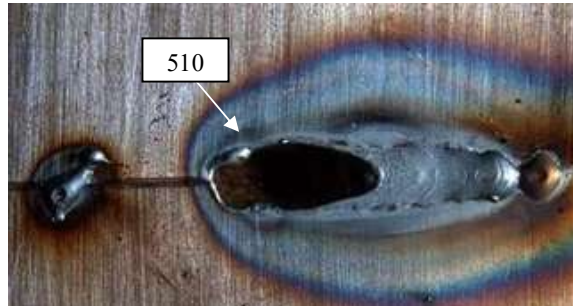
5091 supratopire în poziție orizontală cu perete vertical;
5092 supratopire în poziție orizontală sau peste cap;
5093 supratopirea la o sudură în colț;
5094 supratopirea muchiei.



520 Deformare excesivă - Abatere dimensională din cauza contracției și deformării structurii metalice sudate.



510 Străpungere - Căderea băii topite care conduce la perforarea sudurii.



521 Dimensiuni incorecte ale sudurii - Abatere de la dimensiunile prescrise pentru sudură.

5211 Grosime excesivă a sudurii
5212 Lățime excesivă a sudurii
5213 Grosime insuficientă a sudurii în colț
5214 Grosime excesivă a sudurii în colț

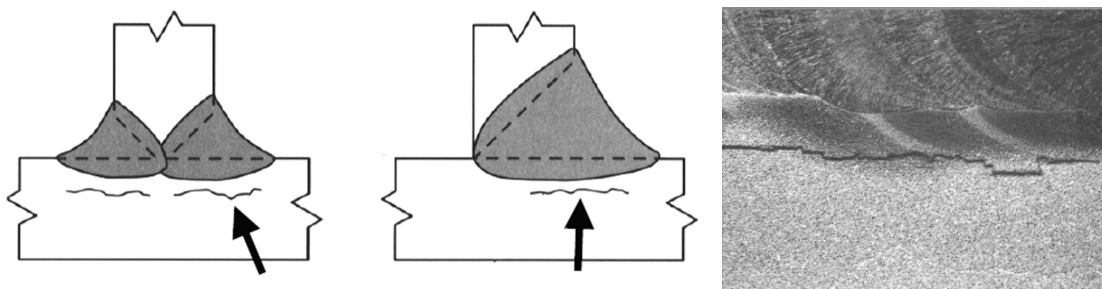
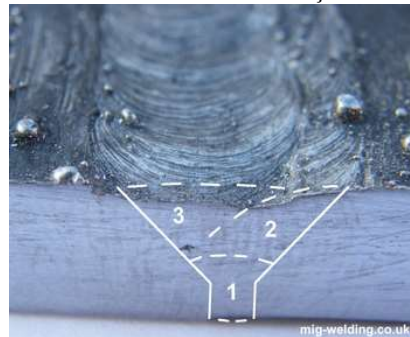


Fig. 9.10 Destrămare lamelară.

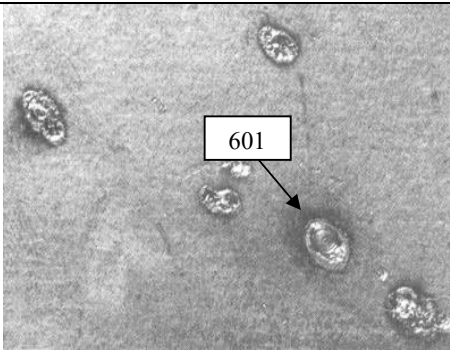
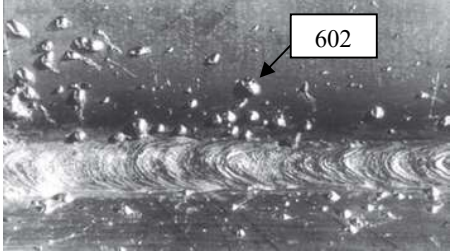
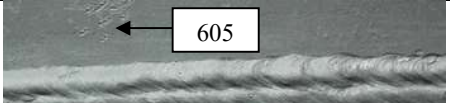
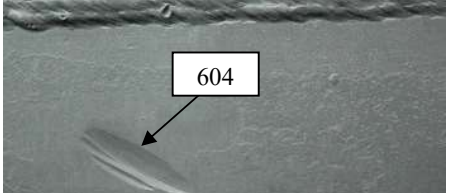
Destrămarea lamelară se întâlnește doar în cazul semifabricatelor laminate din oțel și constă în apariția unei fisuri care se propagă în trepte în direcția de laminare, figura 9.10, fapt ce constituie o particularitate după care aceste defecte sunt ușor de recunoscut.

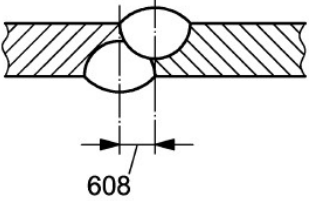
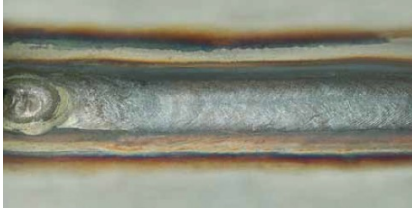
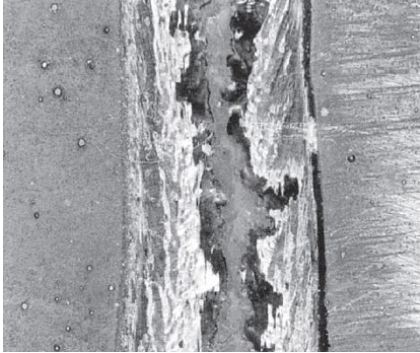
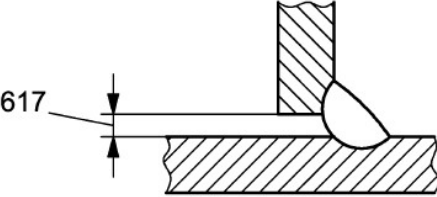
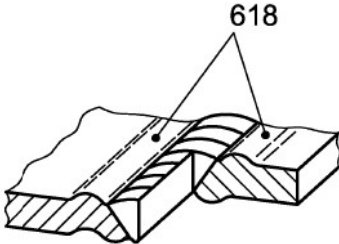
Fisura se propagă în plane dispuse paralel datorită zonelor cu concentrații mai ridicate în incluziuni nemetalice, orientate după direcția de laminare. Se întâlnește la îmbinările sudate în T sau în cruce, asupra cărora acționează forțe de tracțiune, orientate după o direcție perpendiculară în raport cu structura orientată în benzi a materialului. Destrămarea lamelară este considerată o rupere ductilă, care este localizată în straturile superficiale ale materialului, sub cusătura sudată și uzual nu poate fi pusă în evidență prin examinare vizuală.

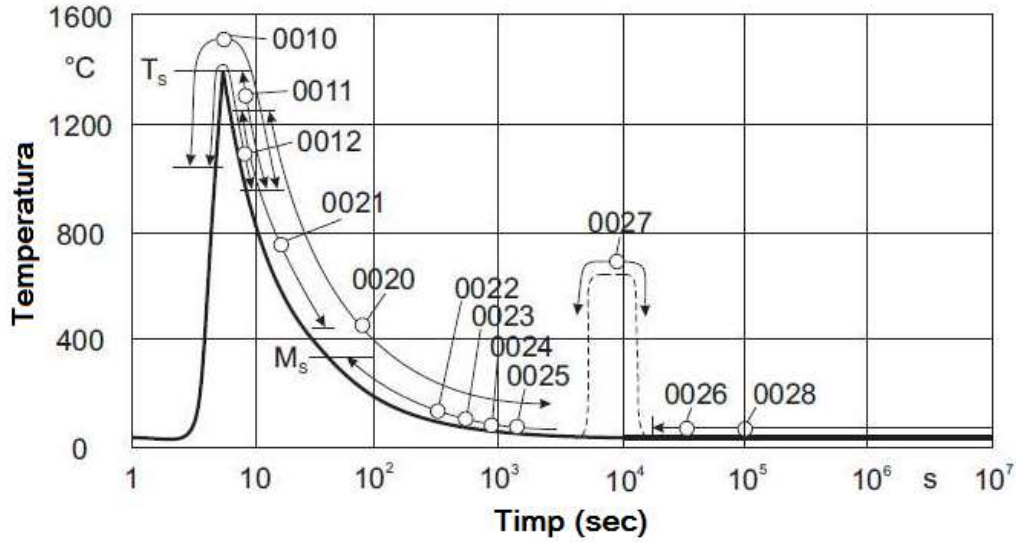
În tabelul 9.18 sunt prezentate o serie de imperfecțiuni de sudare care, nu se încadrează în grupele 1-5. Deși unele dintre acestea pot apărea inofensive la o primă vedere, pot conduce la compromiterea prematură a construcției sudate sau afectează negativ rezistența la coroziune a acesteia. Prin urmare, se recomandă evitarea acestora pe cât posibil.

Grupa nr. 6 – Alte imperfecțiuni (600).

Tab. 9.18 Imperfecțiuni care nu se încadrează în grupele 1...5

Cod de referință ISO 6250-1	Schiță, Imagini macro	Descriere imperfecțiune
601 <i>Arsură</i>		Deteriorare locală și superficială a metalului de bază, ca rezultat al amorsării unui arc electric în vecinătatea sudurii.
602 <i>Strop</i>		Strop de metal topit proiectat în timpul sudării și care aderă la metalul de bază sau pe sudura deja solidificată. 6021 Strop de wolfram. Particulă de wolfram care provine de la electrod, proiectată în timpul sudării pe metalul de bază sau pe sudura deja solidificată.
603 <i>Ruptură locală</i>		Deteriorare locală și superficială a metalului de bază produsă ca urmare a îndepărtării pieselor auxiliare sudate.
604 <i>Urmă de polizare</i>		Deteriorare locală produsă de polizare.
605 <i>Urmă de dăltuire</i>		Deteriorare locală cauzată de acțiunea unei dălți sau a unei alte scule.

606 <i>Polizare excesivă</i>	Reducerea grosimii datorate unei polizări excesive.	
607 <i>Imperfecțiune a sudurii de prindere</i>	Imperfecțiune din cauza unei suduri de prindere incorecte, de exemplu: 6071 sudura de prindere este întreruptă sau nu a pătruns; 6072 s-a sudat peste o sudură de prindere defectuoasă.	
608 <i>Nealiniere între treceri opuse</i>		Abatere între liniile mediane ale două treceri executate din părți opuse ale îmbinării.
610 <i>Culoare de revenire</i>		Peliculă de oxid vizibilă. Oxidare superficială a suprafeței în zona de sudare, de exemplu la oțelurile inoxidabile.
613 <i>Suprafață arsă</i>	Oxidarea puternică a suprafeței în zona de sudare.	
614 <i>Reziduu de flux</i>	Îndepărtarea insuficientă a reziduurilor de flux de pe suprafață.	
615 <i>Reziduu de zgură</i>		Îndepărtarea insuficientă a reziduurilor de zgură de pe suprafață.
617 <i>Deschidere incorectă a rostului unei suduri în colț</i>		Distanță excesivă sau insuficientă între piesele care se sudează.
618 <i>Umflare</i>		Imperfecțiune datorată unei arderi a îmbinării sudate din aliaje ușoare, ca rezultat al menținerii prelungite în intervalul de solidificare.



- | | |
|--|--|
| 0010 fisurare la cald | 0023 fisurare datorate hidrogenului difuzibil |
| 0011 fisurare la solidificare | 0024 fisurare datorită durificării |
| 0012 fisurare la retopire | 0025 fisurare datorită contracției și raportului incorect lățime/adâncime secțiune cusătură sudată |
| 0020 fisurare la rece | 0026 fisurare datorită durificării prin îmbătrânire |
| 0021 fisurare datorită constituenților fragili | 0027 fisurare datorită durificării prin precipitare |
| 0022 fisurare datorită contracției termice | 0028 fisurare datorită destrămării lamelare |

Fig. 9.11 Diagrama formării fisurilor la sudarea oțelurilor [48, 95]

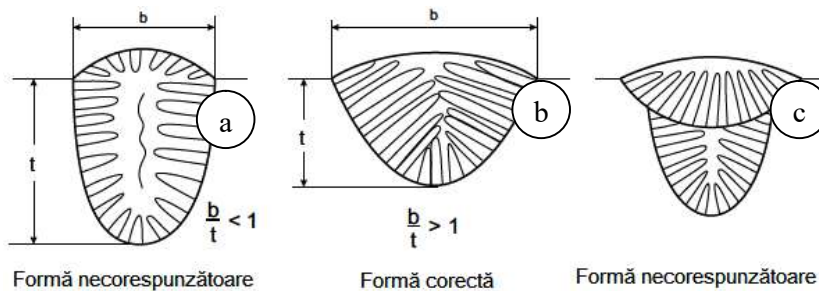


Fig. 9.12 Forma cusăturii sudate și riscul de fisurare [95].

În figura 9.11 este prezentată o diagramă care ilustrează intervalul de temperaturi și de timp în care se manifestă fenomenul de fisurare, la sudarea oțelurilor carbon. Mecanismul de producere a fisurilor este diferit și este influențat de ciclul termic la sudare, nivelul de bridare, compoziția chimică, impuritățile din material, în special fosforul și sulfurul, care au o tendință de segregare ridicată. De asemenea, forma și dimensiunile cusăturii sudate în secțiune transversală, figura 9.12 joacă un rol important în prevenirea formării fisurilor.

Un rost îngust și adânc (varianta a), când raportul dintre $b/t < 1$, favorizează apariția fisurilor la cald. Procesul de cristalizare a băii de sudare începe pe suprafețele laterale ale rostului și se încheie în axa mediană a cusăturii, unde rămâne o cantitate de fază lichidă bogată în impurități precum fosfor și sulf. Acestea formează eutectice cu fierul având punct de topire scăzut și nu pot asigura coeziunea între grăunții cristalini în cursul fazei de răcire, când contracțiile termice generează forțe de tracțiune exercitate perpendicular pe frontul filmului de fază lichidă, care se solidifică la temperaturi joase.

În varianta c) din figura 9.12, prin retopirea stratului depus anterior se favorizează din nou manifestarea fenomenului de segregare internă în zona mediană a cusăturii sudate, prezentând deasemenea, un risc ridicat de producere a fisurării la cald.

Riscul de fisurare la cald este redus în cazul variantei b, deoarece ultimele cantități de fază lichidă se solidifică la suprafața cusăturii sudate, tensiunile de contracție fiind suportate de partea deja solidificată a cusăturii, fără ca să fie preluate de filmul de metal aflat încă în fază lichidă. Fisurile survenite în urma sudării materialelor sunt extrem de periculoase și nu sunt acceptate în nici o clasă de calitate. Prin urmare, detectarea cât mai devreme a acestor imperfecțiuni de sudare, este extrem de importantă pentru siguranța în exploatare a construcției sudate.

CLASIFICAREA IMPERFEȚIUNILOR ÎMBINĂRILOR SUDATE		
Cauze principale de producere		
Imperfecțiuni interne volumice	Imperfecțiuni interne plane	Imperfecțiuni de formă și suprafață
<p>Cavitătea (porul, suflura). Cauze: exces de sulf în metalul de bază sau adaos, conținut ridicat de hidrogen în baie, viteza de răcire prea mare, rost oxidat, utilizarea electrozilor sau fluxurilor umede, arc electric prea lung.</p>	<p>Lipsa de topire (reprezintă o lipsă de legătură parțială între metalul depus și metalul de bază sau între diferite straturi ale cusăturii). Cauze: viteza de sudare prea mare, energia liniară prea mică, geometrie necorespunzătoare rost, acces necorespunzător, diametrul electrodului prea mare.</p>	<p>Crestătura este o adâncire la marginea cusăturii (crestătura marginală) Cauze: sudarea cu curent prea mare, sudarea cu viteză prea mare, număr insuficient de straturi, înclinarea greșită a electrodului.</p>
<p>Retasura este o cavitate produsă la interiorul sau la suprafața cusăturii în urma contracției metalului la solidificare. Cauze: scăderea temperaturii băii, conținutul ridicat de azot și fosfor în metalul de adaos, dezoxidarea necorespunzătoare a băii.</p>	<p>Lipsă de pătrundere Cauze: viteza de sudare prea mare, energia liniară prea mică, geometrie necorespunzătoare a rostului, acces necorespunzător, diametrul electrodului prea mare.</p>	<p>Excesul de pătrundere Cauze: curent de sudare prea mare, diametrul electrodului prea mic, rost cu deschidere prea mare. Convexitate excesivă Îngroșare excesivă Cauze: viteza de sudare prea mică, curent prea mare, nr. prea mare de straturi Subțierea</p>
<p>Incluziunea solidă (de flux, de oxid, metalică, de zgură). Cauze: temperatura scăzută a băii de sudare (Is prea mic), curățire insuficientă după sudare la sudarea în mai multe straturi, conducerea greșită a electrodului (curgerea zgurii înainte electrodului).</p>	<p>Fisura este considerată cel mai periculos defect de sudare. Cauze: utilizarea unei viteze de răcire prea mari, incompatibilitate dintre metalul de bază și cel de adaos, lipsa preîncălzirii, aplicarea unui tratament termic după sudare necorespunzător, rigidizarea excesivă a structurii, prezența hidrogenului difuzibil, ordine de sudare necorespunzătoare, utilizarea unor rosturi de formă neadecvată.</p>	<p>Nealiniera axială Nealiniera unghiulară Cauze: prinderi provizorii sau asamblări necorespunzătoare, ordine de sudare greșită, încălzirea excesivă a materialului. Stropii Cauze: sudare cu curent prea mare sau arc electric prea lung, efectul suflajului magnetic sau umezelii din materiale de sudare inveliș, flux.</p>

Fig. 9.13 Cauze generale de producere a imperfecțiunilor la sudare.

9.2 Metode de control nedistructiv

Structurile metalice sudate sunt extrem de diverse, precum: podurile, tancurile petroliere, navele care transportă gaz natural lichefiat, zgârie norii sau structurile moderne arhitecturale realizate din grinzi de diferite secțiuni, ce se întâlnesc în noduri și susțin sarcini impresionante, ca de ex. acoperișul glisant al unor stadioane etc. Pe de altă parte, s-a văzut deja diversitatea foarte mare a imperfecțiunilor și defectelor apărute la sudare, multe dintre acestea reprezentând un pericol ridicat pentru integritatea structurii metalice sudate. Nedetectarea acestora în timp util, conduce inevitabil la evenimente nedorite, precum cele ilustrate în figura 9.14. De obicei, cedarea elementelor metalice sudate, se face ca urmare a acțiunii combinate a mai multor factori: solicitări la oboseală, coroziune, flujaj sau ca urmare a unor fenomene de fragilizare etc.



*Platforma Thunder Horse, 2005
în Golful Mexic*



*Pod prăbușit în Minneapolis, Minnesota 2007
soldat cu 13 victime și pagube de 52,4 milioane \$.*

Fig.9.14 Evenimente produse ca urmare a unor structuri metalice sudate care au cedat.

De-a lungul timpului s-au înregistrat multe astfel de evenimente care s-au soldat cu victime omenești și pagube materiale extrem de mari. De fiecare dată s-au analizat cauzele care au stat la baza producerii lor și s-au luat măsuri pentru evitarea producerii unor evenimente similare în viitor. O cauză frecvent întâlnită care poate să conducă la astfel de evenimente, sunt fisurile care se propagă în material foarte rapid și pe distanțe mari. În rafinării există recipienti de reacție, zeci sau sute de km de tubulatură sudată, prin care se transportă fluide volatile extrem de inflamabile. În astfel de condiții, imperfecțiunile de la sudare care rămân nedetectate din momentul fabricației sau cele care apar ca urmare a exploatării instalațiilor respective, constituie o bombă cu ceas. Vaporii supraîncălziți aflați la presiuni ridicate, solicitările dinamice, fenomenele de coroziune și alți factori care în timp afectează rezistența structurilor metalice, constituie o sursă permanentă de risc, pentru apariția fisurilor în aceste construcții sudate. Prin urmare, se impune atât la fabricație, cât și în exploatare, operații de control nedistructiv, menite să depisteze imperfecțiunile de sudare, cu risc ridicat asupra integrității construcției sudate.



Defectosopia reprezintă un ansamblu de procedee pentru examinarea materialelor, pieselor și îmbinărilor, cu scopul depistării defectelor și imperfecțiunilor prin metode nedistructive.

Acceptarea sau respingerea unor imperfecțiuni de sudare, se face cu ajutorul standardelor, în funcție de clasa de calitate a sudurii, prin prescripții tehnice, manual de calitate etc. În funcție de rolul funcțional, riscul în exploatare, importanța construcției, pentru construcțiile sudate sunt prevăzute o serie de metode de control nedistructiv, prezentate în tabelul 9.19.

Tab. 9.19 Metode de control nedistructiv.

Simbolul metodei de control nedistructiv	Principiul de detectare a imperfecțiunilor din îmbinările sudate SR EN ISO 17635:2010 și ISO 9712:2012
VT	Examinare vizuală, se pot folosi sisteme de iluminare și o lupă după caz, endoscoape (visual testing lb. eng.).
TT	Examinare cu camera în infraroșii (infrared thermographic testing lb. eng.).
PT	Examinare cu lichide penetrante, (penetrant testing lb. eng.).
RT	Examinare cu radiații penetrante și film radiografic.
	Examinare cu radiații penetrante prin radioscopie în timp real pe ecrane fluorescente.
	Examinare cu radiații penetrante prin ionizare.
ET	Examinare cu ajutorul curenților turbionari (curenți Eddy lb. eng.).
UT	Examinare cu ultrasunete (ultrasonic testing lb. eng.).
ST	Strain gauge testing.
AT	Examinare prin emisie acustică (acoustic testing lb. eng.).
MT	Examinare cu pulberi magnetice (magnetic testing).
	Examinare cu traductor feromagnetic.
	Examinare magnetografică.
LT	Examinare privind etanșeitatea construcției sudate (leak testing lb. eng.).

Aparent, alegerea unei metode de control nedistructiv pare o opțiune simplă, însă, este extrem de importantă în ceea ce privește capacitatea de a detecta anumite defecte, în funcție de localizare și geometria pieselor sudate. Prin urmare, alegerea metodei de control nedistructiv se face în funcție de sensibilitatea de detecție, procedeul de sudare, metalul de bază și adaos, tratamentul termic, tipul și geometria îmbinării, accesibilitate, starea suprafeței, nivelul de calitate, tipul și orientarea discontinuităților probabile. Astfel, mai jos sunt prezentate câteva exemple în care se prezintă o serie de limitări de aplicabilitate, a metodelor de control nedistructiv:

- Metodele magnetice nu sunt aplicabile la oțelurile cu structură austenitică, la aluminiu, cupru și aliajele acestora, la materialele neferoase;
- Metoda cu ultrasunete nu este indicată la structuri grosolane și nu poate fi aplicată la materiale cu grosimi mici până la $6 \div 8$ mm, datorită zonelor moarte;
- Metoda cu control radiografic întâmpină dificultăți la grosimi ale materialelor peste 80 mm, datorită tensiunilor de accelerare foarte mari necesare și care nu sunt asigurate de sursele convenționale;
- Metodele magnetice pot identifica defecte doar în proximitatea suprafețelor controlate;
- Metoda cu lichide penetrante poate identifica doar defecte ce comunică cu suprafața examinată;
- Starea suprafeței, grosimea pieselor, structura și natura materialului, mărimea și orientarea defectului, pot limita sau exclude anumite metode de control nedistructiv.

Metodele radiografice asigură o precizie ridicată în ceea ce privește identificarea defectelor, însă nu oferă aceeași precizie când este vorba de a evalua extinderea defectului în interiorul piesei, în profunzime. Deasemenea, detectarea defectelor plane prin aceleași metode radiografice, depinde de orientarea defectului și de poziția acestuia față de sursa de iradiere. Metodele de control cu ultrasunete permit aprecierea mărimii defectului, însă nu oferă informații asupra naturii defectului.

În baza acestor informații preliminare, se poate spune că identificarea defectelor nu este tocmai o problemă simplă și formală. În funcție de particularitățile construcției sudate, materialele utilizate, grosimi, tipul de îmbinare, starea suprafețelor etc. se stabilește o metodă de control nedistructiv, care poate fi aplicată integral pe lungimea cusăturilor sudate, sau doar pe anumite secțiuni.

Uneori, accesul la îmbinare este posibil doar dintr-o singură parte, ceea ce complică detectarea tuturor defectelor potențial existente. Pe urmă, mai trebuie luate în considerare anumite aspecte specifice, precum gabaritul construcției, locul de examinare, costuri aferente etc.

9.2.1 Metoda de control nedistructiv cu lichide penetrante (PT)

Controlul cu lichide penetrante este o metodă simplă de control nedistructiv ce se aplică materialelor metalice (în cazul materialelor plastice, metoda nu este indicată) și urmărește punerea în evidență a imperfecțiunilor de suprafață sau care comunică cu suprafața din imediata vecinătate a cordonului de sudură, a zonei influențată termic sau a metalului de bază, cum ar fi:

- Fisuri comunicante cu suprafața apărute datorită ciclului termic la sudare, solicitării la oboseală sau datorită coroziunii;
- Pori deschiși;
- Exfolieri;
- Sufluri deschise;
- Bavuri, creștături marginale, cratere;
- Suprapuneri;
- Reprize;
- Străpungeri;
- Lipsă de topire.

Metoda constă în aplicarea pe suprafața supusă examinării, a unui lichid capilar activ penetrant care pătrunde în discontinuitățile existente, punându-le în evidență prin contrast, după aplicarea unui dezvoltant. Fac excepție de la această metodă, produsele poroase și cele care reacționează chimic cu aceste lichide. În funcție de tipul penetrantului, se disting următoarele metode de control cu lichide penetrante :

- **Metoda colorării** – lichidul penetrant conține un colorant (uzual de culoare roșie), pentru a putea fi pus în contrast cu ajutorul dezvoltantului (culoare albă);
- **Metoda cu lichide fluorescente** – lichidul penetrant este vizibil în incinte întunecate prin examinare cu lumină ultravioletă (radiație cu $\lambda = 330-390$ nm), contrastul fiind de obicei galben/verde pe un fond violet închis;
- **Metoda cu trasori radioactivi** – defectele sunt puse în evidență prin impresionarea unui film radiografic lichid, de către substanțe radioactive introduse în soluția folosită ca și penetrant;
- **Metoda activării cu ultrasunete** – efectul de penetrare a lichidului este mărit de acțiunea ultrasunetelor, care induc un efect de vibrație în mediul de penetrare.

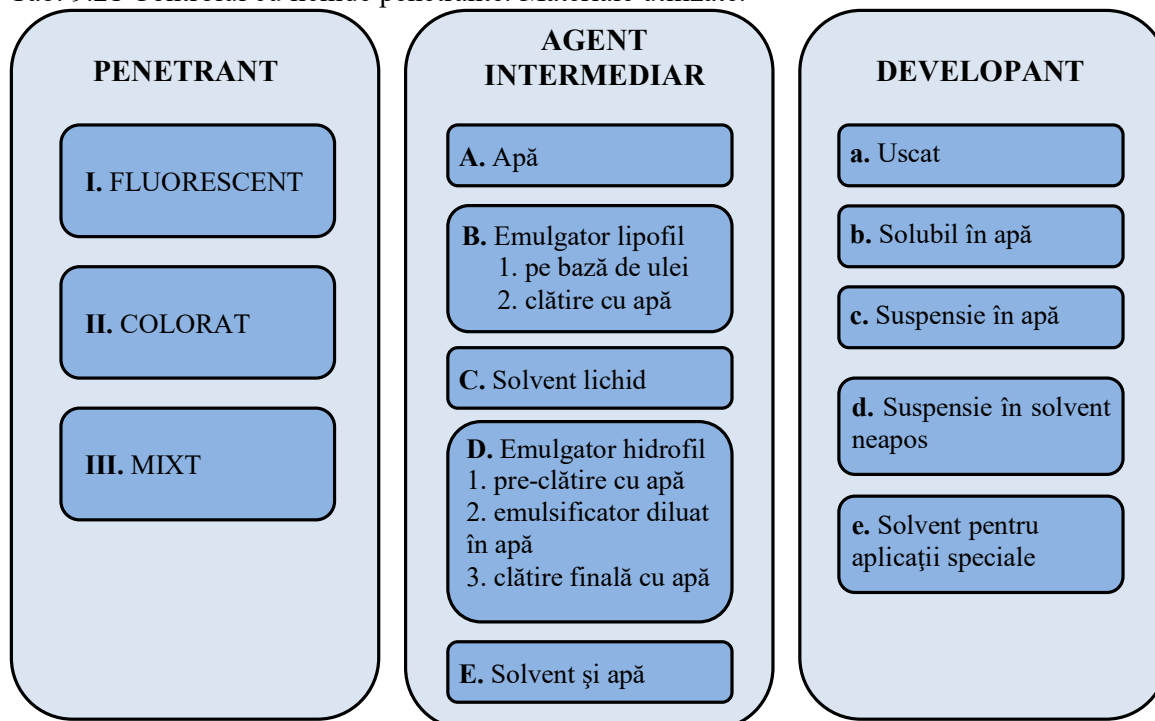
Penetrarea lichidului în discontinuități se produce datorată efectului de capilaritate, iar dezvoltarea penetrantului are la bază efectul de absorbție, punând astfel în evidență locul și forma defectului. Metoda se aplică cu succes, la toate tipurile de oțeluri, fonte, aliaje de Al și Mg, materiale neferoase și ceramice. Prezența unei cantități de penetrant pe fondul dezvoltantului, indică posibilitatea existenței unei discontinuități. Pentru stabilirea naturii discontinuității se recomandă îndepărtarea dezvoltantului și examinarea vizuală cu o lupă.

Discontinuitățile plane (fisuri, suprapuneri, stratificări) dau indicații sub formă de linii continue, întrerupte sau punctate. Suflurile izolate apar sub formă de puncte, iar cele grupate, ca o grupare de puncte sau ca o pată. Fisurile de oboseală apar sub forma unor linii punctate. Poziția și forma defectelor se poate înregistra prin fotografiere sau printr-o schiță, care se anexează la buletinul de analiză al încercării. Principalele etape în efectuarea controlului sunt prezentate în tabelul 9.20.

Tab. 9.20 Etape de desfășurare a controlului cu lichide penetrante.

ETAPA CONTROL PT	Descrierea operațiilor intermediare și indicații de aplicare
CURĂȚIREA SUPRAFEȚELOR	Suprafața se curăță de oxizi, zgură, stropi, grăsimi, uleiuri, vopsea, etc. având grijă să nu se obtureze eventualele defecte. Se recomandă curățirea chimică cu solvenți, detergenți sau acizi.
APLICAREA PENETRANTULUI	Se aplică prin pulverizare, turnare, imersarea piesei sau cu ajutorul unei pensule. Timpul de penetrare trebuie să fie cuprins între 5-30 min. în funcție de tipul penetrantului.
SPĂLAREA INTERMEDIARĂ	Pentranții solubili în apă se îndepărtează cu ajutorul unui jet de apă sau cu tampoane umezite. Pentranții cu post-emulsione se îndepărtează după aplicarea unui emulgator.
USCAREA SUPRAFEȚEI	Imediat după îndepărtarea excesului de penetrant, suprafața piesei se usucă prin : ștergere, evaporare naturală sau evaporare forțată. În acest scop se poate folosi și aer comprimat.
APLICAREA DEVELOPANTULUI	Developanții uscați sub formă de pulbere se aplică prin pulverizare, cei sub formă de suspensie se agită pentru a se omogeniza cu lichidul purtător iar cei sub formă de soluție se aplică prin pulverizare sau imersare.
EXAMINAREA SUPRAFEȚEI	Suprafețele controlate cu pentranți fluorescenți se examinează în incinte întunecate cu ajutorul unor lămpi cu UV iar pentru pentranții colorați se va utiliza lumina naturală, examinarea efectuându-se la anumite intervale de timp.
CURĂȚIRE POSTOPERATORIE	Suprafața examinată se curăță de developant și penetrant, prin spălare cu apă sau ștergere cu solvent, imediat după ce s-a terminat procesul de examinare.

Tab. 9.21 Controlul cu lichide penetrante. Materiale utilizate.



Notă : Pentru notare, de exemplu în cazul utilizării unui lichid penetrant colorat, lavabil într-un solvent lipofil și developant sub formă de suspensie în solvent, se va scrie : control cu lichide penetrante II-B2-d. Cei mai des utilizați developanți solizi sunt : oxidul de magneziu (MgO), silicagelul, talcul, praful de cretă.

Sensibilitatea de detecție a metodei cu lichide penetrante depinde direct de caracteristicile lichidului penetrant:

- Tensiune superficială cât mai mică ($\tau_{LG} \leq 0,1 \text{ N/m}$), lichide tensioactive;
- Capacitate mare de umectare ($\cos \theta \rightarrow 1$);
- Presiune capilară cât mai ridicată ($p_c \approx 2 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$);
- Coeficient de formă cât mai mic ($K = 2 \div 3,14$) de la fisuri la pori sferoidali.

Limita de detecție se calculează cu relația (9.1) și poate ajunge la cca. 2÷3 microni [97]:

$$\text{Limita detecție} = \frac{K \cdot \tau_{LG} \cdot \cos\theta}{P_c}$$

O metodă mai sensibilă de control nedistructiv, care are la bază fenomenul de pătrundere capilară în discontinuități de material deschise, comunicante cu suprafața pieselor, se poate face cu penetranți gazoși. Metoda se aplică la controlul paletelor de turbină și poate pune în evidență micro discontinuități cu dimensiuni de 0,1 μm , ce corespund unor nuclee de fisuri [97]. Ca și agent penetrant se folosește kriptonul (95%) și un izotop radioactiv al kriptonului Kr_{85} (5 %), un gaz rar mai greu ca și aerul, care este introdus într-o cameră vidată unde se află în prealabil piesa de verificat. Kriptonul pătrunde prin procese de difuzie în cele mai fine discontinuități de pe suprafața piesei și rămâne captiv, datorită forțelor de atracție moleculară la interfața dintre gaz și material. Prin aplicarea prin pulverizare a unei pelicule fotosensibile care joacă rol de absorbant, se obțin indicații prin contrast, datorită izotopului radioactiv al kriptonului care este captiv în discontinuitatea de material. Indicația radiografică este amplificată dimensional cu un factor de cca. 10 ori, față de mărimea reală a discontinuității.

Tab. 9.22 Examinare cu lichide penetrante. Nivele de calitate și acceptare imperfecțiuni.

Niveluri de calitate conform ISO 5817 sau ISO 10042	Tehnici și niveluri de examinare conform ISO 3452-1	Niveluri de acceptare conform ISO 23277
B	Nivel nespecificat	2 X
C		2 X
D		3 X

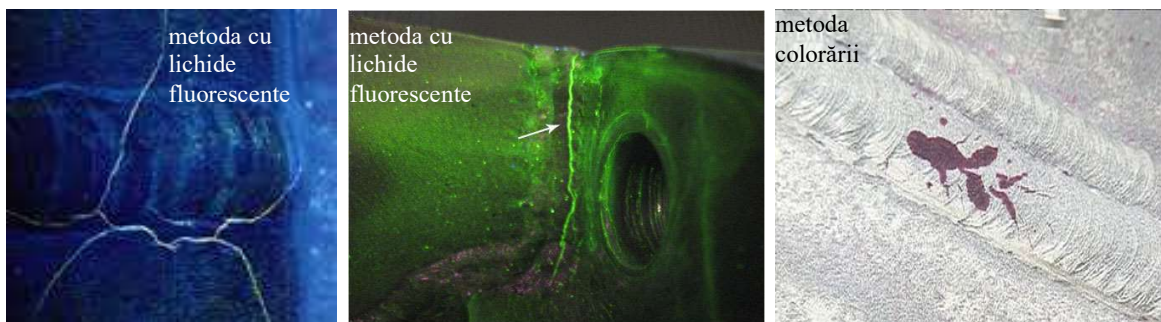


Fig. 9.15 Indicații de fisuri obținute prin control cu lichide penetrante fluorescente.

9.2.2 Metoda de control nedistructiv cu flux magnetic (MT)

Defectosopia cu flux magnetic se poate aplica materialelor feromagnetice ce conțin Fe, Co, Ni și aliajelor acestora. În cazul oțelurilor, doar cele austenitice nu pot fi controlate cu flux magnetic, deoarece austenita este paramagnetică. Principiul metodei constă în magnetizarea piesei și aplicarea unor pulberi/suspensie de pulberi magnetice foarte fine pe suprafața cusăturii sudate și în imediata vecinătate a acesteia.

Modificările de permeabilitate magnetică superficială, datorită prezenței unor discontinuități de material ce se interpun în calea liniilor de flux magnetic, determină o dispersie a liniilor de câmp magnetic care se închid la suprafața piesei. Fluxul magnetic de dispersie este pus în evidență cu ajutorul pulberilor magnetice, care se aglomerează în zona discontinuității din material. Uzual, se pot detecta discontinuități de material cu dimensiuni cuprinse între 0,5 și 1 mm, dar în anumite condiții, se pot detecta defecte cu deschideri de până la 1 μm.

Pentru punerea în evidență a discontinuităților fine, suprafața controlată trebuie prelucrată la o rugozitate de cel mult R_a 6,3 μm. Deoarece această metodă se bazează pe orientarea liniilor de flux magnetic, sensibilitatea sa va depinde de orientarea acestora față de dispunerea discontinuităților. Sensibilitatea maximă se obține atunci când discontinuitățile sunt orientate perpendicular pe liniile de flux magnetic. Pentru detectarea tuturor discontinuităților, suprafața examinată se va magnetiza după cel puțin două direcții perpendiculare (examinări succesive).

Mărimea câmpului magnetic de dispersie este în funcție de mărimea și poziția discontinuităților de material întâlnite, iar densitatea fluxului magnetic se micșorează odată cu distanța față de discontinuitate, conform relației 9.2. Din acest motiv, metoda este aplicabilă doar pentru adâncimi de detectare ce nu depășesc $b < 3\div 5$ mm, figura 9.16.

$$H_d = B_{Fe} \cdot \frac{\frac{l}{b} + 1}{\frac{l}{b} + \mu} \quad \text{unde:} \quad \begin{array}{l} H_d - \text{mărimea câmpului magnetic de dispersie;} \\ B_{Fe} - \text{densitatea fluxului magnetic;} \\ l/b - \text{mărime discontinuitate (lungime/lățime);} \\ \mu - \text{permeabilitatea magnetică.} \end{array} \quad (9.2)$$

Câmpul de dispersie este maxim atunci când liniile de flux magnetic intersectează perpendicular suprafața discontinuității. Dacă liniile de flux coincid cu direcția discontinuității, nu se mai formează câmpul de dispersie și ca urmare discontinuitatea de material nu mai poate fi detectată.

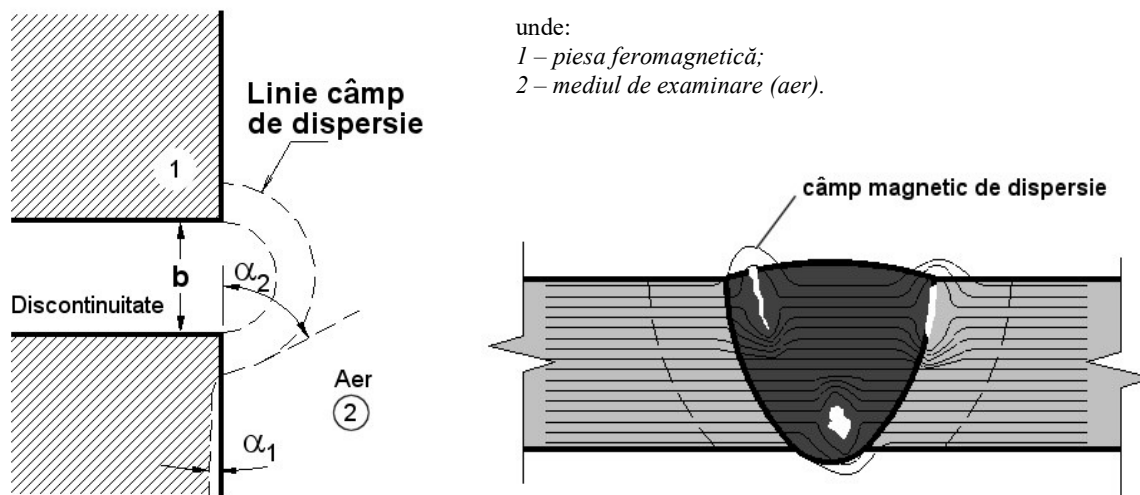


Fig. 9.16 Metoda de control cu particule magnetice.

Liniile de flux magnetic sunt închise. Prin urmare, în momentul în care liniile de flux magnetic întâlnesc o discontinuitate, o vor ocoli, iar dacă discontinuitatea este situată în proximitatea suprafeței, liniile de flux vor ieși din piesa metalică după o direcție practic perpendiculară pe suprafața piesei, figura 9.16.

Pe baza legii refracției liniilor de câmp, între unghiurile formate cu suprafața de separație dintre aer și piesă, de către componentele tangențiale ale inducției (tangente la liniile de flux magnetic) și permeabilitatea celor două medii, se poate scrie relația 9.3, conform figurii 9.16.

$$\frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{\operatorname{tg} \alpha_2} = \frac{\mu_2}{\mu_1} \quad (9.3)$$

Cum permeabilitatea aerului este mult mai mică comparativ cu cea a piesei metalice ($\mu_2 \ll \mu_1$), rezultă $\operatorname{tg} \alpha_2 \rightarrow \infty$, ceea ce înseamnă că $\alpha_2 = \pi/2$. Prin urmare, în mediul 1 (piesa metalică), liniile de flux magnetic părăsesc suprafața piesei feromagnetice aproximativ perpendicular pe aceasta și la marginea discontinuității. În zona discontinuității, de exemplu în cazul fisurilor unde raportul $b/L \ll 1$, (L fiind lungimea discontinuității), câmpul de dispersie este semnificativ mai lat decât fisura, ceea ce înseamnă că prin această metodă se mărește capacitatea de detectare a defectelor. Practic, se aplică două variante de control magnetic, după cum este prezentat în tabelul 9.23.

Tab. 9.23 Metode de control cu flux magnetic.

Controlul cu pulberi magnetice	Metoda magnetografică
Se aplică un flux magnetic intens asupra materialului feromagnetic. Discontinuitățile de material întâlnite în calea sa, determină devierea fluxului magnetic, generând un câmp magnetic de dispersie la suprafața piesei. Câmpul de dispersie generat este vizualizat prin intermediul unor pulberi feromagnetice (colorate sau fluorescente) aplicate uscat sau în suspensie lichidă, foarte fin pulverizate pe suprafața de examinare. Aglomerațiile de particule feromagnetice indică o semnătură particulară ce caracterizează defectul. Principalul avantaj al acestei metode este obținerea de rezultate imediate.	Utilizează o bandă feromagnetică flexibilă care se așează peste sudura ce trebuie examinată. Prin aplicarea unui scurt puls magnetic de cca. 15 ms, prin intermediul unui acumulator ce magnetizează un jug, câmpurile de dispersie sunt puse în evidență prin imprimarea lor pe bandă. Banda este examinată cu ajutorul unui traductor magneto-electric, iar după forma indicațiilor, putându-se aprecia natura defectelor din îmbinarea sudată. Echipamentul constă din jugurile pentru diferite geometrii ale îmbinărilor sudate, sursa de curent, banda feromagnetică, magneții de fixare ai benzii și traductorii magnetoelectrice.

Magnetizarea cu flux magnetic (polară) se poate realiza cu ajutorul unui dispozitiv ce conține un magnet permanent sau un electromagnet alimentat cu curent continuu, generând astfel un flux magnetic, care creează un câmp magnetic longitudinal în piesa examinată, figura 9.17.

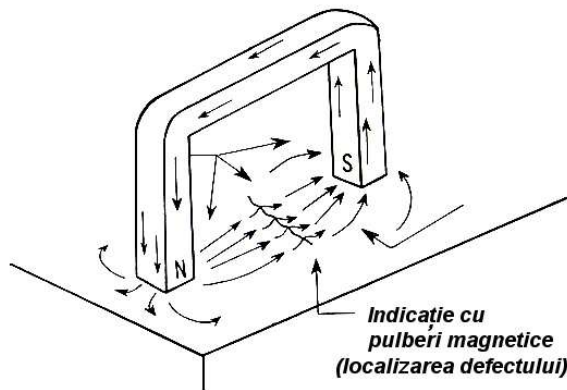


Fig. 9.17 Examinare cu pulberi magnetice colorate prin magnetizare polară.

Îmbinarea sudată trebuie să fie în contact corespunzător cu suprafața de așezare a polilor magnetici. În acest scop, suprafața examinată trebuie pregătită, respectând următoarele reguli :

- Suprafața examinată se curăță de oxizi, zgură, stropi, grăsimi sau orice material străin. În unele condiții este admisă existența unor straturi de vopsea de contrast (culoare albă) cu grosime mai mică de 50 μm . Curățirea suprafeței poate fi efectuată cu ajutorul soluțiilor de decapare, degresare cu vapori, sablare, alicare etc. Pentru degresarea suprafețelor supuse examinării se vor utiliza solvenți organici;
- Suprafața trebuie să fie uscată înainte de examinare;
- Rugozitatea suprafeței examinate nu trebuie să depășească $R_a = 12,5 \mu\text{m}$.

Culorile cele mai folosite pentru pulberile magnetice sunt: negru, rosu, gri deschis sau galben. Pulberile magnetice trebuie să aibă o permeabilitate magnetică mare, astfel încât să fie magnetizate cu ușurință și să prezinte o remanență mică, pentru a nu produce aglomerări de pulberi din cauza atracției dintre ele. Aplicarea pulberii magnetice în varianta uscată, se realizează prin prăfuire ușoară, având grijă ca depunerea să fie uniformă. Excesul de pulbere se îndepărtează înainte de interpretarea indicațiilor, cu ajutorul unei pompe manuale de aer din cauciuc, astfel încât să nu se îndepărteze eventualele indicații, figura 9.18.

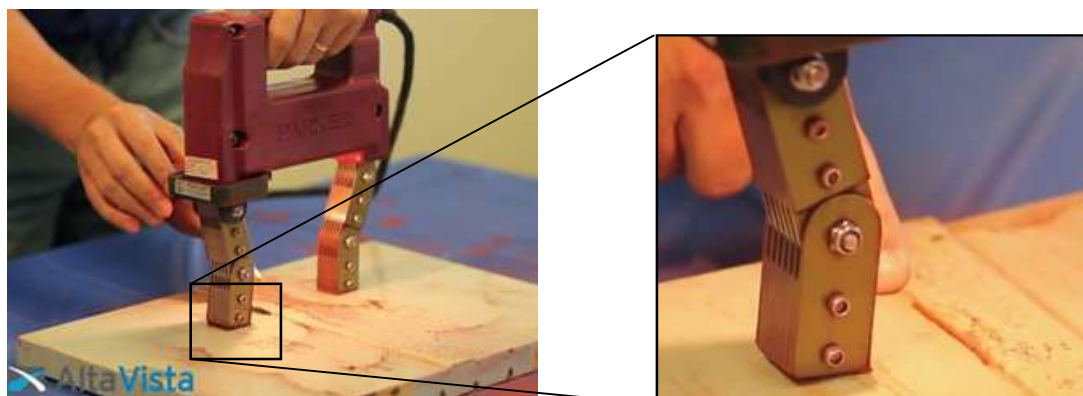


Fig. 9.18 Indicații la controlul MT, după îndepărtarea excesului de pulbere magnetică prin suflare [98].

Temperatura piesei pe care se aplică pulberea nu va depăși valoarea de 57°C, iar dacă instrucțiunile furnizorului de pulberi magnetice recomandă un anumit interval de temperatură în timpul examinării, operatorul le va respecta pe acestea. Este important de reținut că se interzice refolosirea pulberii uscate. Pulberea magnetică se poate impurifica în timpul examinării cu praf, nisip, pilitură, impurificare care îi alterează proprietățile magnetice.

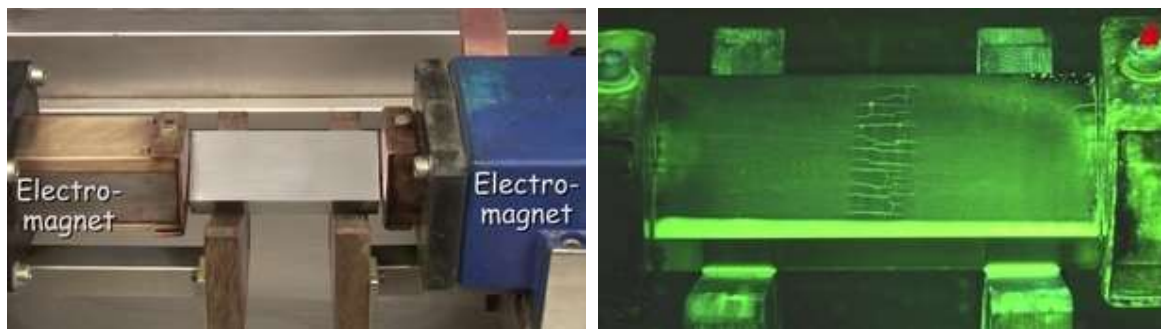
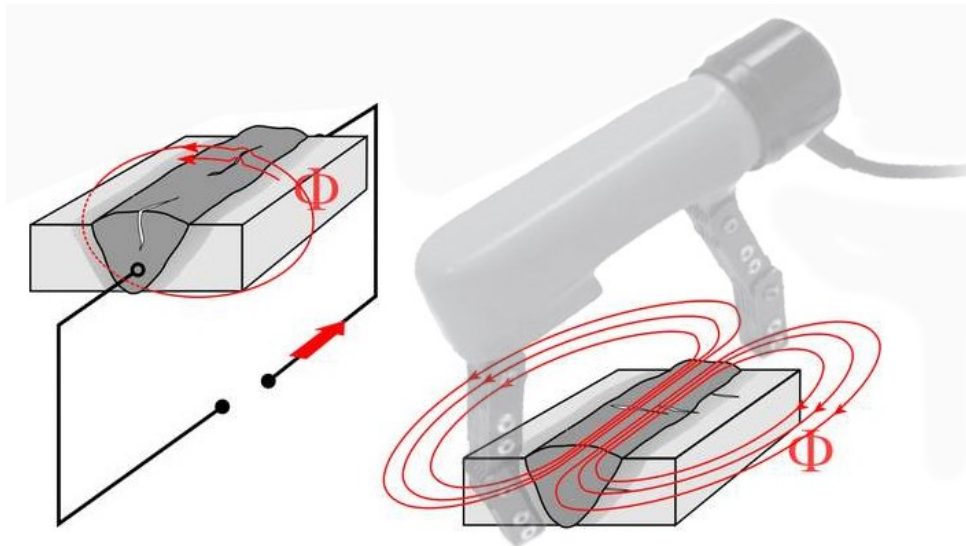


Fig. 9.19 Controlul cu pulberi magnetice fluorescente aplicate în suspensie și examinare în UV [99].

În cazul examinării cu pulberi magnetice fluorescente, operațiile de pregătire a piesei și metoda de aplicare a pulberii sunt similare cu cele prezentate anterior pentru pulberi magnetice colorate. Examinarea indicațiilor se va face în spectrul ultraviolet, pulberile magnetice fluorescente având o strălucire galben verzui. Condițiile de iluminare, intensitatea luminii ultraviolete, fondul luminos unde se fac citirile și alte condiții specifice, sunt precizate în standardul SR EN ISO 17638:2010 și SR EN ISO 23278:2010, iar criteriile de acceptare/respingere se fac conform SR EN 5817/2006.

Magnetizarea pieselor se face în funcție de dimensiunile piesei și de tipul defectelor urmărite, respectiv orientarea imperfecțiunilor în raport cu liniile de flux magnetic. Astfel, după orientarea liniilor de câmp magnetic avem:

- Magnetizare polară (longitudinală)
 - cu jug magnetic;
 - cu bobină de magnetizare.
- Circulară (transversală)
 - electrozi de contact;
 - conductor interior;
 - prin inducție.
- Mixtă.



a) magnetizare circulară; b) magnetizare longitudinală;
Fig. 9.20 Orientarea liniilor de flux magnetic Φ , în funcție de tipul magnetizării.

Câmpul magnetic se realizează cu ajutorul unor electromagneți, figura 9.19 și figura 9.20, între polii căruia se așează piesa de examinat. Dacă electromagneții sunt alimentați în curent continuu se obține o magnetizare a cărei câmp de dispersie, este de 8 ori mai mare decât cel obținut în cazul alimentării în curent alternativ. Ca urmare, crește sensibilitatea de detecție a imperfecțiunilor situate în profunzimea materialului și se aplică în cazul examinării pieselor de lungime mare.

Magnetizarea în curent alternativ generează în material curenți turbionari și este maximă la suprafața piesei. Metoda se folosește când se urmărește detectarea fisurilor de oboseală sau coroziune, respectiv discontinuități de material foarte fine, situate în straturile superficiale ale piesei. Deasemenea, prin magnetizare în curent alternativ cu frecvență ridicată, liniile de flux magnetic urmăresc riguros profilul piesei examinate, datorită efectului pelicular intens. Metoda se aplică la examinarea pieselor cu profil complicat.

9.2.3 Metoda de examinare cu ajutorul curenților turbionari (ET)

Metoda curenților turbionari este folosită ca o alternativă sau extensie a controlului nedistructiv cu particule magnetice, fiind utilizată în special, pentru controlul țevelor cu diametrul exterior de maxim 140 mm și cu grosimi ale peretelui de până la 5 mm. O dată cu creșterea grosimii pereților, scade eficiența metodei de evidențiere a defectelor interne, ea rămânând eficientă pentru evidențierea defectelor de suprafață și din imediata apropiere a acesteia.

Un avantaj important al acestei metode de examinare este faptul că materialele examinate nu trebuie să fie feromagnetice, astfel că metoda de examinare cu curenți turbionari, se aplică pentru materiale precum: aluminiu, oțeluri inoxidabile, oțeluri aliate, superaliaje, aliaje de Cu, Mg, Ti etc. utilizate în industria aeronautică, construcții de mașini.

Metoda constă în inducerea unor curenți turbionari în pereții piesei controlate. Câmpul magnetic al curenților turbionari induși, datorită prezenței unor discontinuități și neomogenități în material, modifică impedanța bobinei de măsurare, ceea ce afectează amplitudinea și faza curenților turbionari. Amplitudinea, defazajul și adâncimea de pătrundere a curenților turbionari, depind de amplitudinea și frecvența curentului de excitație, de conductibilitatea electrică, de permeabilitatea magnetică a materialului, de forma piesei controlate, de poziția relativă a bobinelor față de piesă, precum și de omogenitatea materialului controlat.

Metoda mai este denumită și a curenților Foucault, după numele fizicianului francez, Léon Foucault, care a descoperit fenomenul în anul 1851.

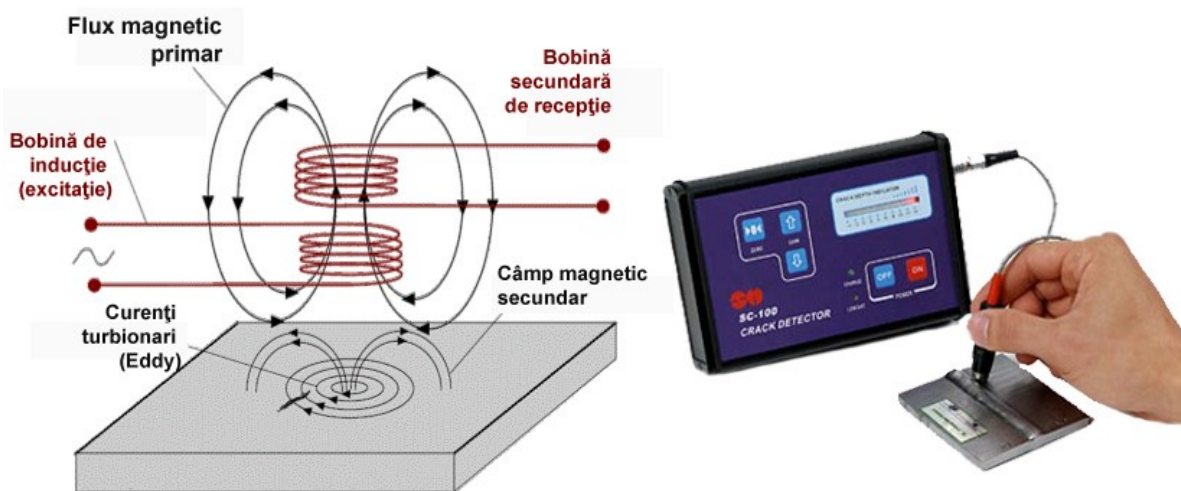


Fig. 9.21 Principiul examinării cu curenți turbionari (Eddy).

Factorii principali care influențează metoda de examinare cu curenți turbionari, sunt:

- Efectul pelicular (*skin effect*);
- Frecvența curentului;
- Permeabilitatea magnetică a materialului;
- Conductivitatea electrică;
- Distanța dintre electrod și piesă;
- Efectul de margine (*proximity effect*).

Când o bobină este alimentată în curent alternativ (bobină de inducție sau excitație) se generează un câmp magnetic alternant, a cărui linii de flux magnetic sunt concentrate în interiorul bobinei, figura 9.21. Dacă bobina excitată este adusă în proximitatea unui material electric conductiv, câmpul magnetic pătrunde în material și generează curenți circulari de inducție (Eddy). Curenții turbionari sunt maximi în straturile superficiale ale materialului și scad în intensitate odată cu creșterea adâncimii din material. Legea de distribuție a curenților turbionari în secțiune transversală, este de formă exponențială, relația 9.4:

$$I = I_0 \cdot e^{-x(\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \lambda)}$$

unde:

I_0 este densitatea de curent de la suprafața piesei ($x = 0$), [$A \cdot m^2$];

x este profunzimea față de suprafața, [m];

f este frecvența curentului de excitație, [Hz];

μ_r este permeabilitatea relativă;

λ este conductivitatea electrică a materialului, [$m/\Omega mm^2$].

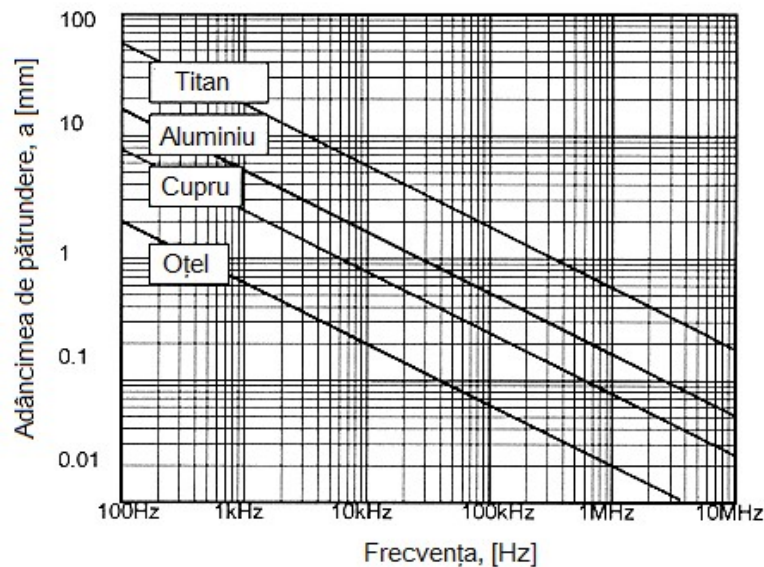
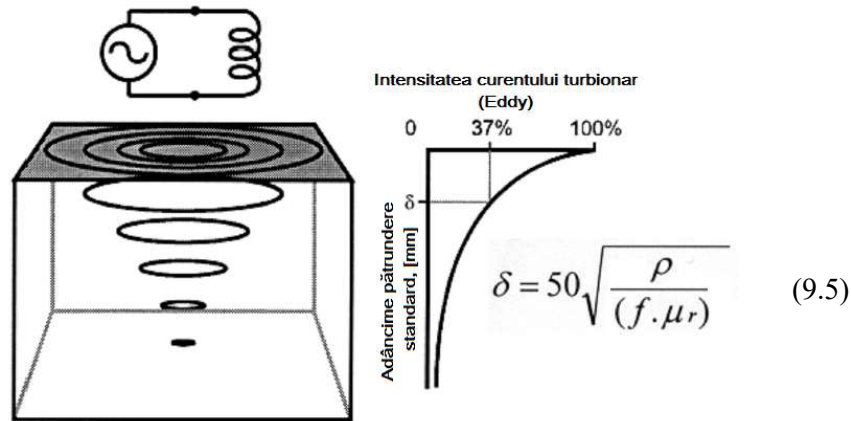


Fig. 9.22 Adâncime de pătrundere a curenților turbionari în funcție de material și frecvență.

Adâncimea de pătrundere standard, δ [mm] a câmpului electromagnetic este definită ca distanța la care densitatea de curent se micșorează la $1/e$ (cca. 37%) față de suprafața piesei, figura 9.22, unde ρ este rezistivitatea în [$mW \cdot cm$], iar f este frecvența [Hz]. Analizând relația 9.5 pentru adâncimea de pătrundere, figura 9.22, observăm că aceasta scade, odată cu:

- creșterea frecvenței f curentului de excitație;
- creșterea conductivității electrice;
- creșterea permeabilității relative magnetice μ_r .

Nomograma din figura 9.22 (nomograma Förster) ne indică faptul că dacă se examinează două piese identice ca formă și dimensiuni, însă având conductivități electrice diferite (de ex. aluminiu și oțel), pentru obținerea aceleiași adâncimi de pătrundere suntem nevoiți să folosim frecvențe diferite, pentru a compensa diferența de conductivitate electrică.

Orice modificare în curenții turbionari este detectată prin interacțiunile dintre câmpurile magnetice primare și cele secundare. Prezența unei fisuri sau discontinuități superficiale în piesa examinată, determină ca liniile de flux magnetic secundare să ocolească discontinuitatea, măbind distanța parcursă de curenții turbionari. Ca urmare, intensitatea câmpului magnetic secundar se va reduce corespunzător. Variațiile câmpului magnetic secundar sunt detectate de traductorul care este conectat la aparatul de măsură și control, figura 9.21 și figura 9.22. Se pot depista imperfecțiuni precum fisuri de oboseală și coroziune, porozitate, incluziuni nemetalice, exfolieri, dar se pot măsura indirect și grosimea materialului, conductivitatea electrică, permeabilitatea magnetică, duritatea etc. care pot fi exprimate în funcție de variația curenților turbionari.

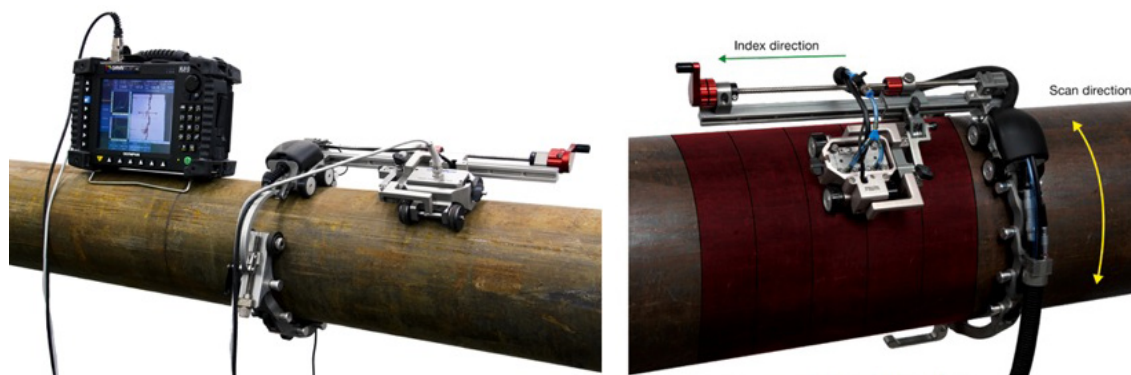


Fig. 9.23 Aplicație pentru examinarea țevelor prin metoda curenților turbionari. Scanare după două axe cu o viteză de achiziție de 2 m/sec [100].

9.2.4 Metoda de control nedistructiv pe baza emisiei acustice (AT)

Examinarea prin emisie acustică este o tehnică tot mai mult utilizată în domeniul controlului integrității structurale ale unor construcții metalice civile sau de mari dimensiuni precum:

- Poduri de cale ferată sau de autostrăzi;
- Recipiente și tancuri de stocare a gazelor naturale, hidrocarburilor sau diverselor substanțe chimice;
- Autocisterne pentru transport combustibili sau gaze lichefiate, etc.

Comportarea dinamică a defectelor este extrem de importantă în exploatarea unor structuri metalice de mari dimensiuni, deoarece un defect de mici dimensiuni care crește rapid, poate avea efecte mult mai severe decât un defect mare stabil în timp.

Emisia acustică este un test efectuat asupra structurilor sub sarcină, ușor superioară sarcinii maxime nominale, prin aplicarea unor forțe, presiuni sau fluxuri termice, în funcție de condițiile de exploatare ale structurii. În aceste condiții de sarcină, creșterea fisurilor, curgerea locală a materialului sau propagarea fisurilor de coroziune, se produc prin eliberare bruscă de energie, parțial sub forma unor unde elastice care se propagă prin material. Undele elastice sunt pe urmă captate de un sistem de traductori piezoelectrice, care prin metoda triangulării, localizează poziția defectului în raport cu cea a traductorilor. Amplitudinea semnalelor recepționate este utilizată pentru a estima rata de creștere a fisurii.

Metoda de examinare prin emisie acustică este foarte sensibilă, poate acoperi suprafețe sau zone mari din structura examinată (figura 9.24), putând fi detectate o serie de imperfecțiuni, precum:

- Fisuri,
- Porozități,
- Incluziuni nemetalice,
- Lipsă de topire,
- Delaminări în cazul materialelor compozite.

Deși detectează aceste discontinuități și defecte de material, metoda nu poate preciza tipul defectului, dar poate monitoriza evoluția lui în timp, prin compararea rezultatelor înregistrate la intervale de timp diferite.

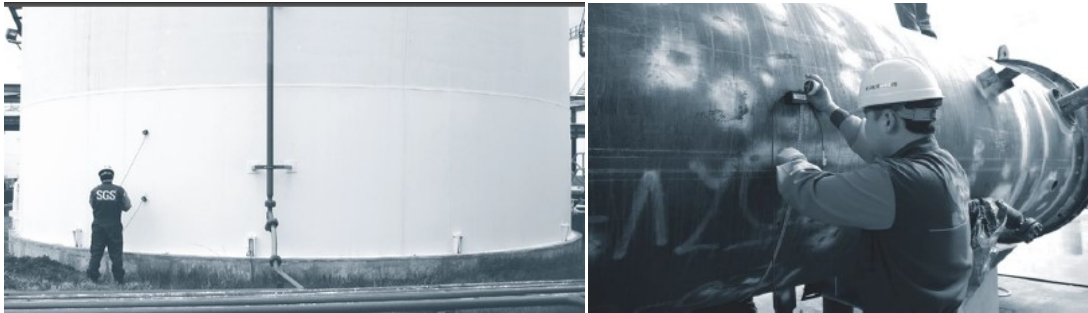


Fig. 9.24 Examinarea prin emisie acustică a unor structuri metalice: tanc de stocare combustibili, recipiente sub presiune.

9.2.5 Metoda de control nedistructiv cu radiații în infraroșu (TT)

Termografia în infraroșu este o metodă modernă de control nedistructiv care s-a dezvoltat pe baza aplicațiilor și cercetărilor efectuate inițial în domeniul militar, în perioada 1960÷1970. La sfârșitul anilor 1980, o tehnologie îmbunătățită¹ dezvoltată pentru sectorul militar, care utiliza senzori termici suprarăciți² din materiale semiconductoare, a devenit accesibilă comercial. Astfel, camerele în infraroșu au devenit un instrument important pentru multe aplicații industriale, medicale și în domeniul controlului nedistructiv al materialelor. A crescut nivelul rezoluției sensorului termic, de la 80 x 60 la 640 x 480, iar în prezent pentru anumite aplicații speciale, poate ajunge și la 1000 x 1000 pixeli, cu o sensibilitate de măsurare de 0,04°C @ 30°C [101]. Imaginile termice pot fi achiziționate până la temperaturi de 2000°C, cu o rată de 500 frame/sec și arhivate digital, transmise prin internet în diverse locații din lume și analizate cu diverse programe software de analiză de imagine. Procesul de achiziție și de interpretare în timp real a datelor, poate fi integrat în procese de fabricație automatizate, figura 9.25.

¹ The Focal Plan Array (FPA)

² Inițial sensorul trebuia răcit cu azot lichid



Fig. 9.25 Controlul cu IR în procesul de fabricație[102].

Tehnicile de investigare nedistructivă folosind IR¹ se folosesc pentru detecția imperfecțiunilor situate la suprafață și din vecinătatea suprafeței unei piese, examinarea straturilor depuse prin pulverizare termică, determinarea imperfecțiunilor structurale sau a proprietăților termofizice ale materialului. Principiul termografiei în infraroșu pentru examinarea nedistructivă, constă în evidențierea diferențelor relevante de temperatură înregistrate de termocameră, datorită emisivității termice diferite a suprafețelor examinate. Diferența de emisivitate rezultă ca urmare a prezenței unor imperfecțiuni care modifică local, fluxul termic prin piesa examinată. Fisurile, porozitatea, incluziunile nemetalice sau cele metalice, lipsa de topire etc. constituie o discontinuitate de material, afectând și conductivitatea termică locală, ce se reflectă prin variații de temperatură la suprafața piesei.

Examinarea se face fără contact fizic, nu este nevoie de substanțe chimice, rezultatul examinării se obține imediat, în timp real. Pentru aceasta, nu sunt nevoie de măsuri speciale de protecția muncii, se poate examina orice fel de material, inclusiv cele compozite, nu sunt necesare operații de pregătire a pieselor înainte de examinare. Orice obiect emite natural radiație termică la suprafața acestuia, în funcție de temperatura la care se află. Relația care descrie dependența dintre radiație și temperatura corpului, este cunoscută sub numele de legea lui Stefan-Boltzman, relația 9.6:

$$\frac{q}{A} = \varepsilon \sigma \cdot T^4$$

unde:

- q este rata de emisie a energiei prin radiație termică, [W];*
- A este suprafața prin care se emite radiația termică, [m²];*
- ε este coeficientul de emisivitate termică a materialului;*
- σ este constanta lui Stefan-Boltzman (5.676 x 10⁻⁸ W/m²K⁴);*
- T este temperatura absolută a suprafeței materialului, [K].*

Se utilizează două metode de examinare: **pasivă** și **activă**. Atunci când temperatura materialului sau a structurii testate este în mod natural, diferită de temperatura ambiantă, se poate utiliza schema pasivă. Ca de exemplu, se poate examina într-un timp foarte scurt rețelele de înaltă tensiune dintr-un elicopter, care survolează aerian zone accidente greu accesibile, pentru a depista contacte electrice imperfecte. Contactul electric imperfect generează căldură prin efect Joule și devine un pericol iminent pentru rețeaua electrică de distribuție.

¹ IR abreviere pentru Infrared Radiation

Un alt exemplu este examinarea instalațiilor energetice, rețele de conducte de aburi etc. care pot să devină potențial periculoase, prin fisurarea unor zone ale materialului afectate datorită: coroziunii, fenomenului de fluaj sau solicitărilor la oboseală.

Metoda activă de examinare utilizează diverse surse de excitație pentru obținerea contrastului termic, precum lămpi optice, fasciculul laser, becuri flash, ventilatoare cu aer cald/rece sau surse bazate pe inducția electromagnetică, figura 9.26.

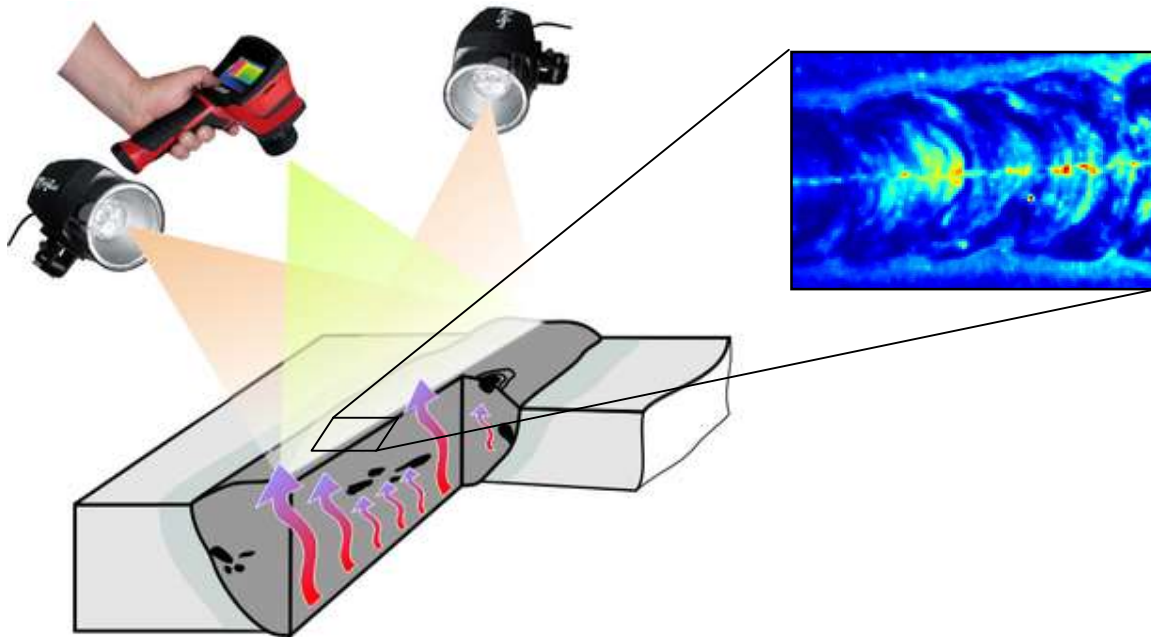


Fig. 9.26 Principiul examinării IR utilizând metoda activă.

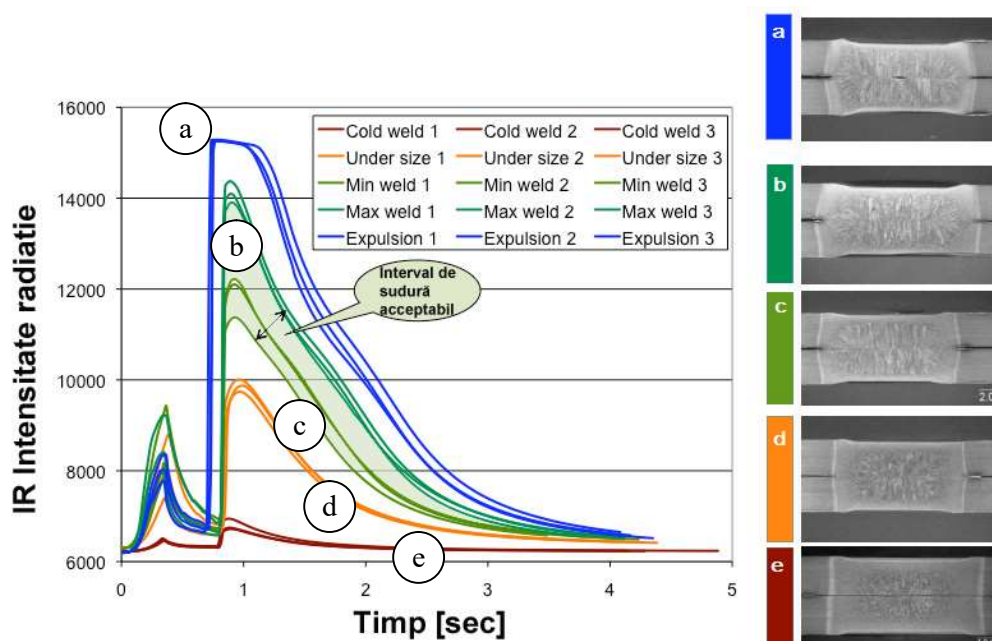


Fig. 9.27 Examinarea IR a îmbinărilor sudate în puncte [102].

Limita de detecție este influențată de sensibilitatea camerei IR, mărimea discontinuității, localizarea în profunzimea materialului, tipul discontinuității, orientarea acesteia, dar și de modul de excitație și timpul scurs între momentul excitației și achiziției de imagini.

Sursa de excitație, de exemplu, în cazul becurilor flash (blitz), emite radiație termică și după impulsul de lumină, datorită supraîncălzirii becului care lucrează la temperaturi ridicate, astfel că pe suprafața probei se vor înregistra reflexiile de la sursa de excitație, ce vor masca parțial amprenta termică provenită de la discontinuitățile de material, făcând procesul de detecție mai dificil, mai ales în cazul fisurilor [103]. S-a demonstrat că utilizând becuri flash, s-au putut pune în evidență amprente termice de la fisuri cu dimensiuni minime cuprinse între 5 și 10 μm [103]. Utilizând impulsuri laser, se elimină problema radiației termice a sursei de excitație după momentul opririi alimentării cu curent, însă este nevoie de un sistem optic suplimentar pentru dispersia fascicului laser pe suprafața probei, iar sursele laser sunt mai scumpe și mai puțin accesibile companiilor mici.

În figura 9.27 este ilustrată variația intensității radiației în infraroșu a îmbinărilor sudate în puncte prin presiune și rezistență electrică. Se poate observa cu ușurință, că zona acceptabilă de sudare este cuprinsă între curbele de variație notate cu *b* și *c* pe diagramă. Cazul *a* corespunde unor expulzări de material, iar cazurile *d* și *c* corespund unor dimensiuni și pătrunderi incomplete ale nucleului topit, în ambele situații, rezistența mecanică a îmbinării fiind nesatisfăcătoare. Sistemul de control cu IR poate fi adaptat la serii de fabricație mari, pe linii automatizate de sudură, ca de exemplu la fabricarea caroseriilor auto, figura 9.25.

Alte cercetări recente au demonstrat că examinarea IR poate fi utilizată în controlul calității îmbinărilor sudate prin frecare cu element activ rotitor [104-106].

9.2.6 Metoda de control nedistructiv cu ultrasunete (UT)

Ultrasunetele sunt unde elastice care se propagă în diverse medii lichide și solide, care au frecvențe de oscilație cuprinse între 16 kHz și 10^4 MHz. Undele de frecvență foarte joase, imperceptibile omului, având frecvențe sub 16 Hz se numesc **infrasunete**, cele cu frecvențe cuprinse între 16 Hz și 16 kHz se numesc **sunete**, iar undele de înaltă frecvență $10^4 \div 10^8$ MHz se numesc **hipersunete**.

Defectoscopia cu ultrasunete se bazează pe legile de propagare, reflexie și refracție a ultrasunetelor în materialele metalice. Ultrasunetele se propagă în materiale cu viteze diferite, iar dacă pe direcția lor de propagare întâlnesc discontinuități de material, au loc reflexii ce sunt captate de traductori piezoelectrice, ce convertesc semnalele recepționate în semnale electrice. Fenomenul piezoelectric a fost descoperit de Jaques și Pierre Curie în anul 1882, studiind cristalele de cuarț, iar defectoscopia cu ultrasunete are origini ce datează din anul 1950 [97].

Prin defectoscopia cu ultrasunete se pot pune în evidență discontinuități de material volumice și plane, se pot măsura grosimi de material sau ale stratului de vopsea, lungimea semifabricatelor sau se pot determina o serie de constante elastice ale materialelor. Astfel de măsurători sunt extrem de utile pentru mentenanța echipamentelor energetice, măsurarea nivelului de coroziune și depistarea timpurie a unor defecte, prevenind astfel avarii și accidente în domeniul aerospațial, transporturi, industria energetică, petrochimică, construcții de mașini etc.

Sensibilitatea de detecție este considerată ca fiind egală cu jumătate din lungimea de undă a ultrasunetelor. Orice imperfecțiune mai mică decât această limită va fi invizibilă. De exemplu, pentru un traductor de 2 MHz, în cazul undelor longitudinale propagate în structurile din oțel, lungimea de undă corespunzătoare este de 3 mm, iar defectul minim ce poate fi detectat este de 1,5 mm.

Relația dintre lungimea de undă λ , viteza sunetului în materialul respectiv și frecvența de oscilație f este dată prin relația 9.7:

$$\lambda = \frac{v_{\text{sunet}}}{f}$$

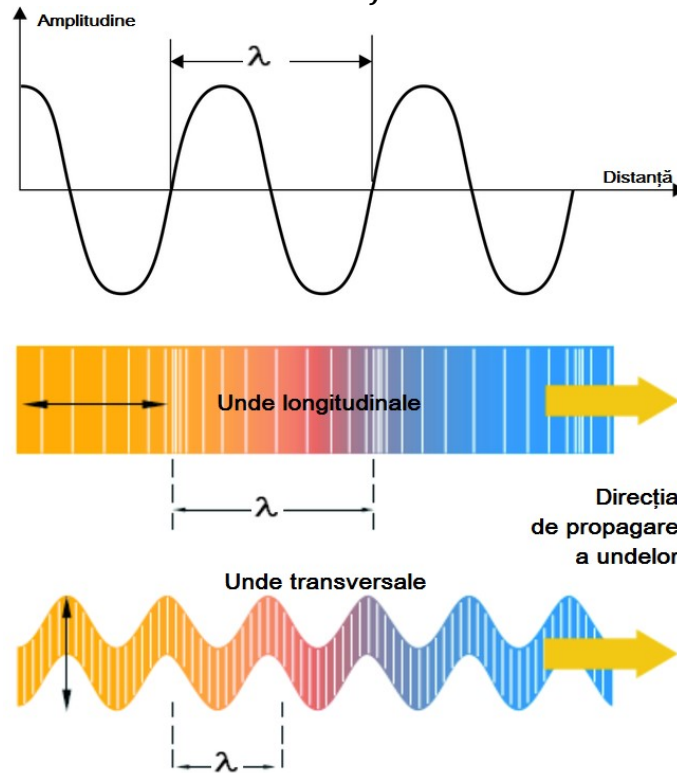


Fig. 9.28 Unde ultrasonice longitudinale și transversale.

În cazul undelor **longitudinale**, atomii materialului execută mișcări vibratorii în direcția de deplasare a undei (zonele de compresiune alternează cu cele de expansiune, figura 9.28), iar în cazul undelor **transversale**, atomii execută mișcări vibratorii perpendicular pe direcția de deplasare a undei în material. Viteza de propagare a undelor transversale este cca. 1/2 din viteza de propagare a undelor longitudinale. În afara celor două modele de propagare a undelor prezentate în figura 9.28, mai există undele de suprafață **Rayleigh** și undele **Lamb**.

Undele de suprafață (Rayleigh) sunt caracterizate de un model de mișcare vibratorie eliptică al atomilor, însă care se propagă în material doar pe o profunzime egală aproximativ cu o lungime de undă. Viteza de propagare a undelor este cca. 0,9 din viteza de propagare a undelor transversale și se utilizează pentru depistarea defectelor de suprafață și din imediata vecinătate a acestora, conform figurii 9.29.

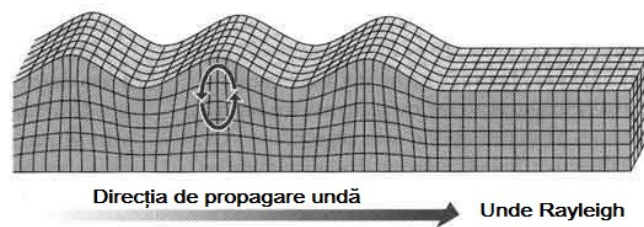


Fig. 9.29 Unde de suprafață Rayleigh.

Undele Lamb apar în plăci, tuburi de grosime aproximativ egală cu o lungime de undă și pot forma unde simetrice de dilatare, când deplasările atomilor au loc în direcții opuse pe fețele plăcii și unde antisimetrice sau de încovoiere, când deplasările atomilor pe fețele plăcii sunt de același sens.

Proprietățile ultrasunetelor depind de mediul pe care îl traversează. Pentru a avea o imagine mai clară asupra diverselor metode de examinare, parametrilor de lucru, configurațiilor traductorilor, interpretarea rezultatelor, mai jos sunt prezentate cele mai importante caracteristici ale undelor ultrasonice, care determină comportarea acestora în diverse medii:

- **Perioada (T)** este timpul necesar unei particule pentru descrierea unei oscilații complete și se exprimă în secunde;
- **Frecvența (f)** este numărul de oscilații efectuate în unitatea de timp. Unitatea de frecvență este Hertz, [Hz]. O frecvență de 1 Hz corespunde unei oscilații pe secundă ($f=1/T$);
- **Amplitudinea** oscilației este valoarea absolută a distanței maxime parcurse de particulă în jurul poziției de echilibru;
- **Lungimea de unda** este distanța dintre două maxime sau dintre două puncte succesive aflate în aceeași fază;
- **Viteza** ultrasunetelor exprimă distanța parcursă de undă în unitatea de timp. Viteza de propagare a ultrasunetelor este de 331 m/s în aer, de 1430 m/s în apă și mult mai mare în corpurile solide, fiind dependentă de densitatea și modulul de elasticitate a materialului. Undele sonore nu se propagă în vid, iar în gaze se atenuază rapid datorită distanței mari dintre molecule;
- **Energia acustică.** Unda ultrasonică transportă și cedează o parte din energia sa mediului străbătut, determinând oscilații ale particulelor din mediu. Se măsoară în Jouli, [J];
- **Puterea acustică** este cantitatea de energie care străbate o suprafață în unitatea de timp. Se măsoară în watt, [W];
- **Intensitatea** ultrasunetelor este cantitatea de energie care străbate unitatea de suprafață în unitatea de timp. Se exprimă în $[W/cm^2]$. Intensitatea undelor scade proporțional cu distanța parcursă, atenuarea acustică fiind cu atât mai mare, cu cât frecvența este mai ridicată. Deci, pe măsură ce crește frecvența, scade adâncimea de pătrundere.
- **Atenuarea** se produce prin: **absorbție, dispersie, reflexie**. Atenuarea este direct proporțională cu pătratul distanței parcurse și cu frecvența fasciculului de ultrasunete.
- **Impedanța acustică** exprimă rezistența la trecerea undelor, fiind produsul dintre densitatea mediului și viteza ultrasunetelor în mediul respectiv. Impedanța acustică (Z) este deci o constantă de material și se măsoară în [rayl], ($1 \text{ rayl} = 1 \text{ Kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$). Limita de separare între două medii cu densitate diferită, deci cu impedanță acustică diferită, se numește **interfață**. La nivelul interfețelor, impulsul ultrasonic este: **reflectat, refractat, dispersat, absorbit** sau **atenuat**.
- **Reflexia** constă în întoarcerea în mediul inițial, a unei părți a fasciculului de ultrasunete la traversarea unei interfețe, în funcție de impedanța acustică a celor două medii. Direcția fasciculului reflectat, depinde de unghiul pe care îl face fasciculul incident cu interfața.

- **Refracția** reprezintă schimbarea direcției fasciculului incident după ce a străbătut o interfață. Valoarea unghiului de refracție este proporțională cu diferența de viteză a ultrasunetelor în cele două medii și invers proporțională cu unghiul de incidență.
- **Dispersia** constă în emisia de noi unde în zone cu impedanțe acustice diferite și cu dimensiuni mai mici decât lungimea de undă.
- **Difracția** se manifestă când fasciculul de unde ultrasonore trece la o distanță mai mică de una sau două lungimi de undă de un obstacol, direcția de propagare a undelor fiind deviata în spatele acestuia. În spatele obstacolului apar zone de umbră acustică, iar în fața lui se produce fenomenul de interferență a undelor. Dacă undele sunt în aceeași fază, efectul se cumulează și avem de a face cu o interferență constructivă, iar dacă sunt în antifază efectul se anulează, interferența fiind distructivă.

Interacțiunea ultrasunetelor cu materialul străbătut conduce la o pierdere de energie acustică ce este convertită în căldură (mișcare vibratorie a atomilor). Căldura generată pe unitatea de volum a mediului străbătut este proporțională cu intensitatea acustică și cu coeficientul de absorbție și invers proporțională cu densitatea mediului și cu căldura lui specifică.

Metoda de examinare cu ultrasunete are unele limitări de aplicabilitate, ce includ:

- Suprafețele examinate trebuie să fie accesibile, trebuie să existe contact între traductor și piesă, ultrasunetele fiind tranferate și recepționate din material la traductorul piezoelectric, prin intermediul unui cuplant, ulei mineral de regulă;
- Îndemânarea și calificarea operatorului este esențială pentru obținerea unor rezultate corecte, calificarea operatorului necesitând o pregătire mai îndelungată;
- Materialele cu suprafețe neprelucrate, de formă complexă, de dimensiuni mici sau foarte subțiri, neomogene structural sunt dificil sau chiar imposibil de examinat;
- Materiale precum fonta sau aliaje cu structură grosolană sunt dificil de verificat datorită atenuării puternice a ultrasunetelor și a nivelului de zgomot foarte ridicat, ce maschează semnalul unor eventuale defecte;
- Defectele plane orientate paralel cu direcția de propagare a ultrasunetelor, pot rămâne nedetectate;
- Este nevoie de calibrare precisă a echipamentului pentru fiecare tip de material examinat, alegerea unei frecvențe optime a ultrasunetelor este critică pentru succesul operațiunii de control și pentru care trebuie considerate: grosimea materialului, caracteristicile microstructurii, tipul discontinuității și poziția probabilă în raport cu traductorul.

Pe măsură ce frecvența ultrasunetelor crește, există o tendință de împrăștiere a ultrasunetelor în material, datorită structurii grosolane sau prezenței unor mici imperfecțiuni. Piesele turnate au în general, o structură mai grosolană, pentru care este nevoie de utilizarea unor frecvențe reduse.

Odată cu scăderea frecvenței se reduce și limita de detecție, care așa cum s-a precizat anterior este teoretic egală cu jumătate din lungimea de undă, dar depinde și de diferența de impedanță acustică, dintre cea a imperfecțiunii și a materialului din jurul acesteia. Astfel, o cavitate precum suflura sau retasura, reflectă mai puternic semnalul incident decât o incluziune metalică, deoarece diferența de impedanță acustică este mai mare dintre aer și metal, decât între cele două metale.

O măsură a sensibilității de detecție a imperfecțiunilor este dată de **raportul dintre semnal-nivel de zgomot**¹. Acest indicator ilustrează cum semnalul care provine de la o imperfecțiune, se distinge de semnalul care provine din false indicații, reflexii datorate structurii policristaline și care generează un zgomot de fond. Un raport semnal-nivel de zgomot de 3:1 este considerat ca valoare minimă, pentru a confirma prezența unei imperfecțiuni.

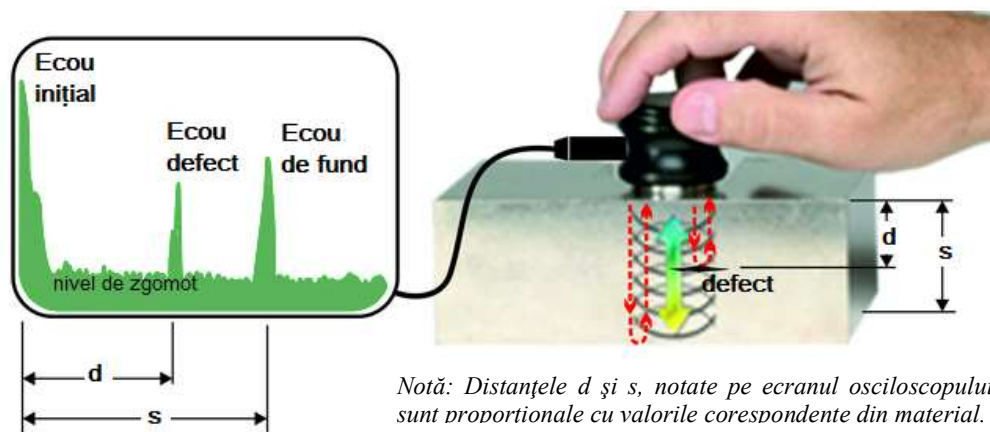


Fig. 9.30 Schema de principiu pentru examinarea cu ultrasunete metoda puls-ecou.

Raportul dintre semnalul provenit de la o imperfecțiune și nivelul de zgomot inerent materialului examinat, depinde de o serie de factori:

- Mărimea traductorului și proprietățile focale;
- Frecvența traductorului și lărgimea de bandă;
- Caracteristicile materialului examinat, microstructura;
- Localizarea imperfecțiunii în raport cu traductorul;
- Geometria piesei examinate, suprafețe curbe, etc.;
- Caracteristicile imperfecțiunii (capacitate de reflexie, impedanța acustică, mărime, formă, orientare). Imperfecțiunile delimitate de suprafețe poligonale (multi fațetă) tind să împrăștie, să disperseze undele în material, îngreunând procesul de detecție.

Raportul semnal-nivel de zgomot este exprimat matematic, prin relația 9.8:

$$\frac{S}{N} = \sqrt{\frac{16}{\rho \cdot v_s \cdot w_x \cdot w_y \cdot \Delta t}} \cdot \frac{A(f_0)}{FOM(f_0)}$$

unde: ρ este densitatea materialului;
 v_s este viteza sunetului în materialul examinat;
 w_x lărgimea fascicolului de unde ultrasonore la adâncimea imperfecțiunii (w_y);
 Δt este durata pulsului de unde;
 $A(f_0)$ amplitudinea semnalului reflectat de imperfecțiune la frecvența centrală f_0 ;
 $FOM(f_0)$ zgomotul la frecvența centrală f_0 .

Măsurarea variației relative a amplitudinii undelor ultrasonice poate servi la caracterizarea discontinuităților de material detectate sau la măsurarea atenuării din materialul examinat.

¹ signal-to-noise ratio (S/N)

Variația relativă a amplitudinii semnalului se măsoară în decibeli, [dB]. Scara de măsurare este logaritmică și se calculează cu ajutorul relației 9.9, unde: A_1 este amplitudinea semnalului 1, iar A_2 este amplitudinea semnalului 2.

$$\text{dB} = 20 \log_{10} (A_1/A_2)$$

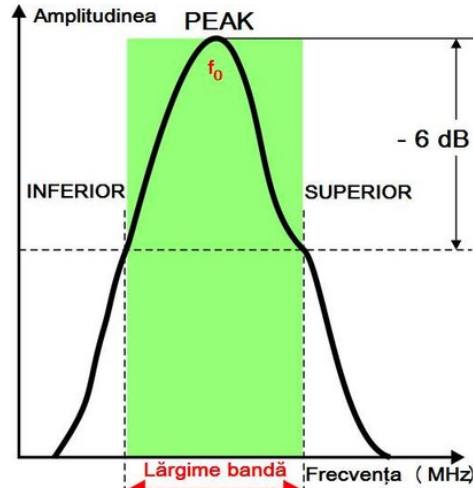


Fig. 9.31 Banda de frecvență a traductorilor.

Lățimea de bandă este intervalul de frecvențe pentru care traductorul operează, figura 9.31. Pentru traductori ce funcționează după metoda ecoului reflectat, lățimea de bandă se definește ca fiind diferența dintre frecvența superioară și cea inferioară, pentru care amplitudinea semnalului puls/ecou este de 6 dB, măsurată de la nivelul maxim al amplitudinii, corespunzător frecvenței centrale f_0 . Undele ultrasonore se obțin prin metode mecanice, magnetostrictive și piezoelectrice. Corpul care vibrează și generează unde ultrasonice este denumit sursă acustică. Efectul piezoelectric sau efectul Curie, constă în inducerea sarcinilor electrice de către unele cristale, când asupra lor se aplică sarcini mecanice de compresiune sau întindere. Fenomenul se numește polarizare electrică a cristalului sau **efect piezoelectric direct**.

Efectul piezoelectric invers se obține prin aplicarea unui câmp electric pe suprafața cristalului, care va conduce la dilatarea/contractia cristalului însoțită de emisii acustice. Cele mai utilizate materiale piezoelectrice sunt: titanatul de bariu (BaTiO_3), titanatul de plumb, zirconatul de plumb, acestea făcând parte din grupa materialelor piezoceramice. Din clasa materialelor plastice se utilizează fluorura de poliviniliden. Cuarțul natural sau cel sintetic, sulfatul de litiu, niobat de litiu și tantalat de litiu fac parte din categoria monocristalelor. Materialele piezoceramice posedă o eficiență superioară a conversiei energiei electrice în energie mecanică, sunt ieftine, se prelucrează ușor și necesită tensiuni scăzute.

Efectul magnetostrictiv constă în modificarea dimensiunilor unor materiale feromagnetice la magnetizare. Dacă aceste materiale se află într-un câmp magnetic variabil, ele încep să oscileze mecanic, devenind surse de unde acustice.

Traductoarele piezoelectrice asigură conversia reciprocă și succesivă a energiei electrice, în energie mecanică, în funcție de starea momentană: emițător sau receptor. Ecourile undelor ultrasonore din material sunt captate de traductor și convertite în semnale electrice analogice, procesate de unitatea echipamentului de control și afișate pe un display cu cristale lichide sub forma unor peak-uri ce corespund ecoului inițial, ecoului de fund și ecoului produs de eventuale defecte din material.

Elementul activ al traductorilor piezoelectrice este constituit de cristalul piezoelectric. Acesta are forma unui disc și este acoperit pe ambele fețe cu două straturi metalice, bune conducătoare de electricitate, pe care se aplică doi electrozi, câte unul pe fiecare suprafață, figura 9.32. Aplicarea unei tensiuni electrice între cei doi electrozi, va provoca deformarea cristalului și va genera energie mecanică, sub formă de vibrații transmise spre ambele suprafețe ale cristalului.

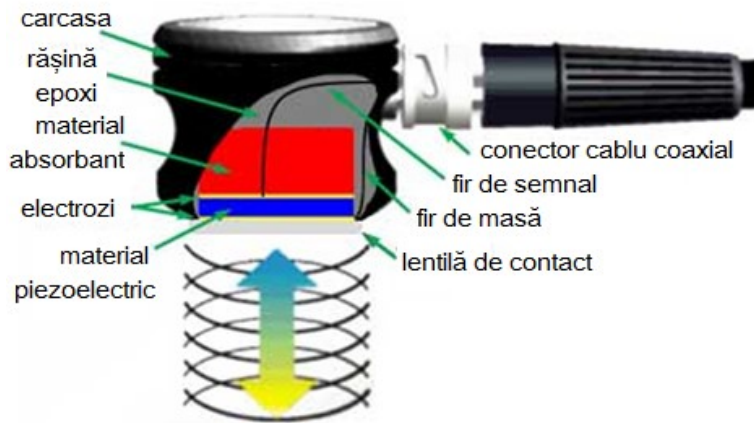


Fig. 9.32 Schema de principiu a unui traductor piezoelectric.

Grosimea discului piezoelectric determină frecvența nominală a traductorului. Vibrațiile discului piezoelectric au o lungime de undă egală cu dublul grosimii acestuia. Din acest motiv, discurile din cristalele piezoelectrice sunt prelucrate la o grosime egală cu jumătate din lungimea de undă dorită. Pentru frecvențe ridicate discul piezoelectric devine extrem de subțire și foarte fragil, motiv pentru care frecvența până la care acestea pot opera uzual, este limitată la 10 MHz.

Pe suprafața de contact se montează uneori o lentilă acustică, cu o grosime egală cu un sfert din lungimea de undă a frecvenței de excitație electrică. Lentila este denumită și strat adaptiv de sfert de lungime de undă, rolul său fiind acela de focalizare și de mărire a randamentului traductorului. În spatele discului piezoelectric este introdus un material¹, ce absoarbe undele ultrasonore emise pe fața posterioară a discului piezoelectric.

Dacă impedanța acustică a materialului fonoabsorbant este apropiată de cea a discului piezoelectric, se obține un efect de atenuare² rapidă a amplitudinii semnalului emis, ceea ce este benefic pentru rezoluția de detecție (se pot decela tipuri diferite de imperfecțiuni datorită lărgimii mari de bandă), însă se reduce amplitudinea semnalului.

Dacă diferența dintre impedanța acustică a materialului fonoabsorbant și cel activ crește, mai multă energie este transferată în piesa examinată, cu efecte negative asupra rezoluției de detecție, durata pulsului de undă crește, precum și amplitudinea semnalului, îmbunătățind însă raportul dintre semnal și nivelul de zgomot. Tot ansamblul este introdus într-o carcasă de material plastic sau de metal, figura 9.32 și poate funcționa până la temperaturi de 300°C. În prezent se utilizează materiale noi pentru confecționarea traductorilor, precum polimerii sau materialele compozite.

¹ backing material (lb.eng.)

² damping characteristics of a transducer

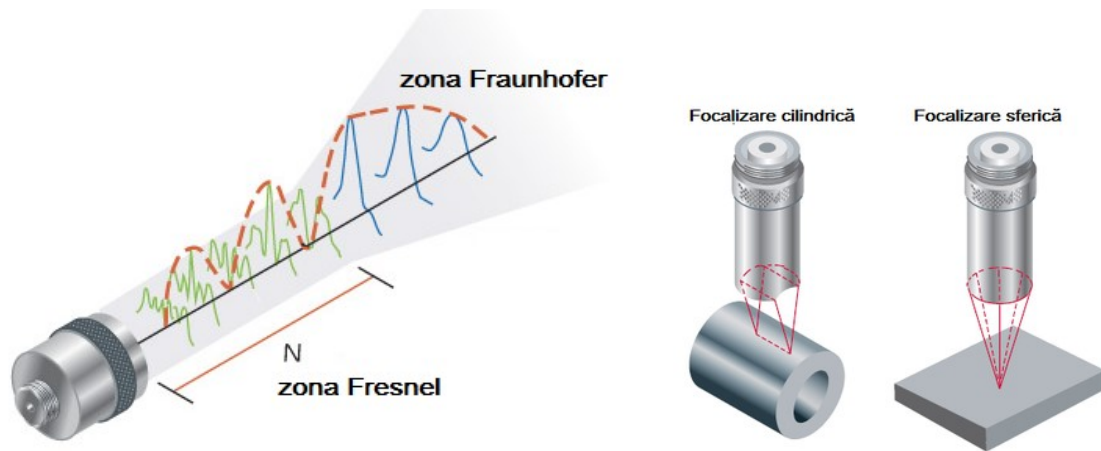


Fig.9.33 Aspectul fascicului de unde ultrasonore. Tipuri de focalizare [108].

Materialul piezoelectric nu emite o singură undă ultrasonică, ci un fascicul care pornește de pe toată suprafața discului piezoelectric. Pe o lungime de câțiva cm, acest fascicul este îngust și are formă cilindrică (zona Fresnel), undele având practic o dispunere paralelă, figura 9.33. După zona Fresnel urmează zona îndepărtată sau zona Fraunhofer, în care fascicolul de unde devine divergent, sub forma unui trunchi de con. Lungimea zonei Fresnel și divergența zonei Fraunhofer depind de dimensiunile discului piezoelectric, dar și de frecvența ultrasunetelor produse de acesta.

Creșterea frecvenței ultrasunetelor sau a diametrului discului piezoelectric determină mărirea zonei Fresnel și micșorarea unghiului de divergență. Datorită interferențelor care au loc în zona Fresnel, se înregistrează fluctuații în intensitatea acustică care afectează negativ capacitatea de detecție a imperfecțiunilor localizate în această zonă, figura 9.33. Tranziția dintre zona Fresnel și zona Fraunhofer are loc la distanța N , care se mai numește distanță naturală de focalizare și aici intensitatea acustică este maximă, fiind zona optimă de detecție a imperfecțiunilor.

Rezoluția și sensibilitatea traductorului piezoelectric

Frecvența notată pe traductorul piezoelectric este cea nominală (centrală) și depinde așa cum s-a văzut, de grosimea discului piezoelectric. Frecvențe ridicate, înseamnă grosimi reduse pentru discul piezoelectric. Frecvența centrală a traductorului depinde de asemenea de caracteristicile materialului fonoabsorbant, respectiv de impedanța acustică a acestuia. Traductori piezoelectrici cu caracteristici înalte de atenuare¹ răspund la frecvențe inferioare și superioare frecvenței centrale, adică la frecvențele cuprinse între extreme, delimitând lărgimea de bandă a traductorului. Un traductor piezoelectric cu bandă largă de frecvență va avea o rezoluție ridicată, adică poate distinge între defecte foarte apropiate, fisuri ramificate, porozitate grupată etc. Un traductor cu caracteristică de atenuare redusă (*low damped transducers*) va avea o bandă îngustă de frecvență, se va reduce rezoluția de detecție, însă va crește sensibilitatea de detecție. Cele două caracteristici ale traductorului, rezoluția și sensibilitatea variază invers proporțional.

Traductoriile sunt fabricați într-o varietate mare de forme, cu frecvențe și lărgimi de bandă diferite, cu focalizare cilindrică sau sferică, (figura 9.33) pentru a optimiza operația de examinare cu ultrasunete, pentru diferite tipuri de aplicații. De asemenea, există traductori de contact și prin imersie.

¹ Highly damped transducers

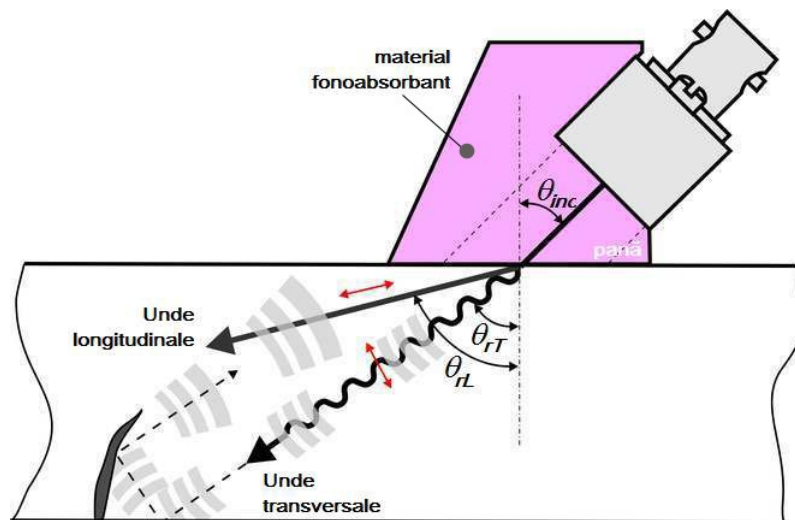


Fig. 9.34 Traductori înclinați.

În anumite aplicații, precum controlul îmbinărilor sudate, este foarte probabil ca orientarea discontinuităților de material, ca de exemplu fisurile, să fie perpendiculare pe suprafața examinată. Pentru a putea detecta acest gen de imperfecțiuni, fascicolul incident de unde ultrasonice trebuie să fie orientat oblic sau cât mai aproape de normală, în raport cu suprafața imperfecțiunii.

Astfel, s-au construit o serie de traductoare înclinate¹ care sunt montate pe un suport din material plastic sau rășină epoxidică sub formă de pană, pentru diferite unghiuri de înclinare a fascicolului incident, θ_{inc} , figura 9.34. Acest tip de traductori au o sensibilitate înaltă de detecție a fisurilor orientate aproximativ perpendicular pe suprafața pieselor sudate. De asemenea, pentru controlul țevilor sau pieselor violate, sunt disponibili traductori cu suprafața de așezare curbă, având diferite raze de curbură, potrivite cu gama de produse examinată.

Datorită unghiului de înclinare a fascicolului incident (θ_{inc}), la interfața dintre două medii diferite traversate de fascicolul de ultrasunete, se produce fenomenul de refracție descris matematic prin legea lui Snell, relația 9.10, figura 9.34:

$$\frac{\sin \theta_{inc}}{\sin \theta_{rT}} = \frac{v_1}{v_{piesă}}$$

Cu ajutorul relației 9.10 se poate calcula unghiul de refracție al fascicolului de ultrasunete (θ_{rT}), când acesta traversează interfața dintre două materiale, având viteze diferite în cele două medii: v_1 fiind viteza fascicolului în primul mediu, iar $v_{piesă}$ este viteza undelor transversale din materialul piesei, în acest caz. Uzual, traductorii piezoelectrice înclinați se construiesc pentru a genera unde transversale sub unghiuri de : 30, 45, 60 și 70° pentru diferite materiale, acestea fiind inscripționate pe corpul traductorului.

Traductoarele piezoelectrice convenționale au, fie un singur element activ (disc piezoelectric) care emite/recepționează undele reflectate din material, fie două elemente active, unul care emite și cel de-al doilea care recepționează semnalele ultrasonice.

¹ Angle beam transducers

Variantele moderne¹ ale traductoarelor cu care sunt echipate în prezent aparatele de control cu ultrasunete, au uzual de la 16 până la 256 de elemente active, care sunt activate individual. Elementele active pot fi dispuse liniar (*linear array*), pe un disc inelar (*annular array*) sau într-un disc circular (*circular matrix array*). Aceste sisteme complexe de examinare cu ultrasunete (*phased array system*) sunt conduse cu ajutorul unor sisteme de calcul cu procesor, asemenea computerelor, datele fiind stocate și prelucrate digital. Datele înregistrate prin diverse metode de scanare, pot fi prezentate grafic în diverse formate standard: A, B, C, sau S scan. Deasemenea, fascicolul de ultrasunete poate fi baleiat liniar, unghiular, pe un anumit interval de unghiuri de refracție, având posibilitatea de a focaliza la diferite adâncimi în material, măbind flexibilitatea și viteza de scanare pe diferite configurații ale pieselor examinate: plăci, tuburi, țevi etc.

Metoda de scanare A - scan

Amplitudinea ecourilor este prezentată în funcție de timpul parcurs de fascicolul de unde în material. Traductorul are o poziție fixă. Instrumentul de control înregistrează două seturi de date: amplitudinea semnalului și timpul scurs între momentul emiterii și recepționării semnalului².

Timpul de tranzit este corelat cu distanța sau adâncimea la care se află imperfecțiunea sau interfața care a generat ecoul, care se calculează în funcție de viteza ultrasunetelor în materialul respectiv (Distanța = viteza ultrasunetelor x timpul de tranzit). Pe ecranul echipamentului, axa Y este pentru amplitudinea semnalului, iar axa X este pentru timp. Bara roșie (orizontală) este un segment de referință față de care se fac o serie de măsurători, de regulă amplitudinea ecoului/timpul sau adâncimea corespunzătoare, figura 9.35.

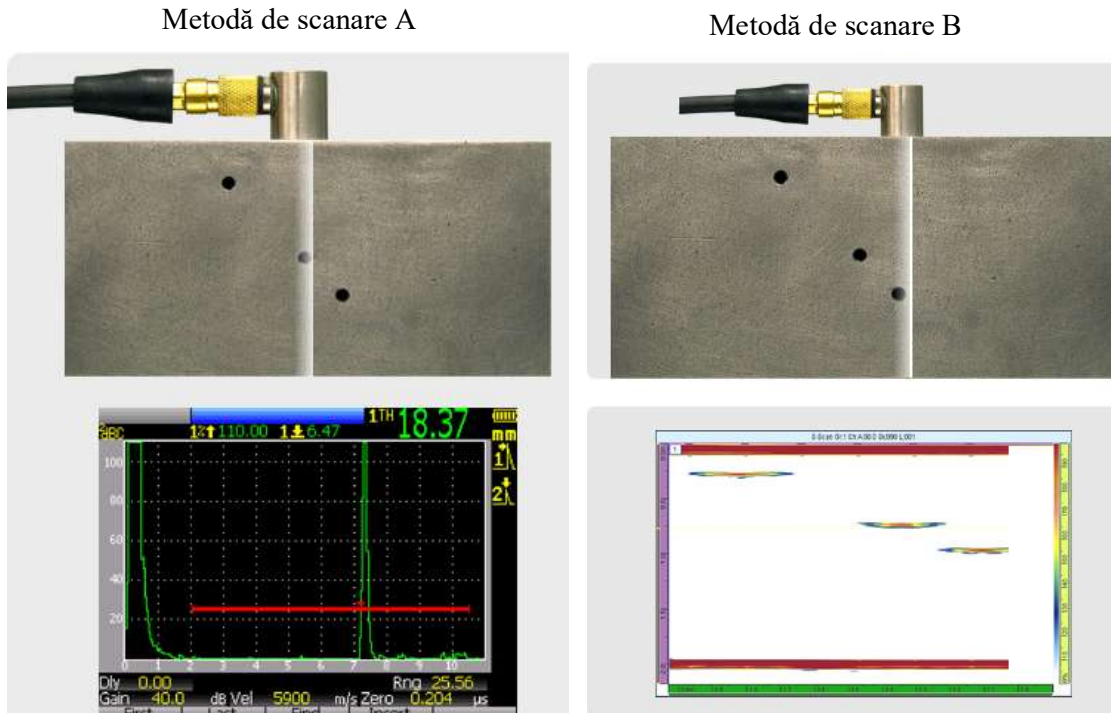


Fig. 9.35 Metodă de scanare A și B, [108].

¹ Phase array probes

² Pulse transit time

Metoda de scanare B - scan

Traductorul se deplasează pe o traiectorie liniară pe suprafața piesei examinate, figura 9.36. Se obține o evaluare în secțiunea piesei, înregistrându-se informații precum lungimea și adâncimea imperfecțiunilor detectate. Acest gen de scanare este utilă pentru detecția fisurilor sau evaluarea coroziunii pieselor examinate.

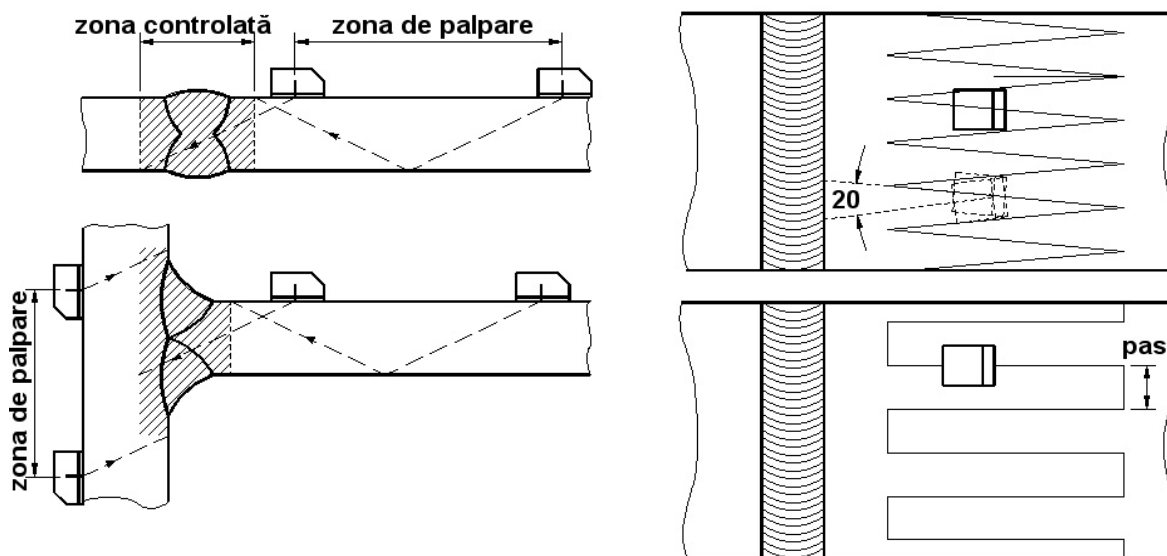


Fig. 9.36 Scanare manuală a îmbinărilor sudate cap la cap și în colț interior.

Semnalul de la traductor poate fi reprezentat grafic în funcție de timp sau poziție, pentru a obține informațiile complete asupra imperfecțiunii. Prin corelarea datelor înregistrate cu poziția curentă a traductorului, se obțin diagrame de reprezentare în 2D, așa cum este ilustrat în figura 9.35. În acest scop se folosesc o serie de dispozitive electromecanice (*encoders*), care furnizează date privind poziția traductorului și care pe urmă sunt sincronizate cu datele recepționate de traductor. Dispozitivele tip encoders pot fi acționate manual sau în sistem automat, cu ajutorul unor motoare pas cu pas programabile, figura 9.37.



a) Examinarea cusăturii sudate prin TOFD¹. Scanare semiautomată

b) Scanare automatizată WeldROVER cu 1 set de traductori PA și până la 3 seturi de traductori TOFD.

Fig. 9.37 Sisteme semiautomate și automatizate de scanare cu ultrasunete[108].

¹ TOFD - Time of Flight Diffraction (lb. eng.)

Metoda de scanare C - scan

Prin această metodă de scanare se obține o reprezentare 2D a tuturor ecourilor, figura 9.38. Metoda se utilizează pentru detecția coroziunii în conducte sau la vase sub presiune. Deasemenea, se pot identifica imperfecțiuni precum delaminările în structurile compozite. Acest tip de scanare este utilizat în industria aeronautică, pentru controlul structurii pereților aeronavelor, detecția delaminărilor sau infiltrațiilor de apă între straturile de material compozit.

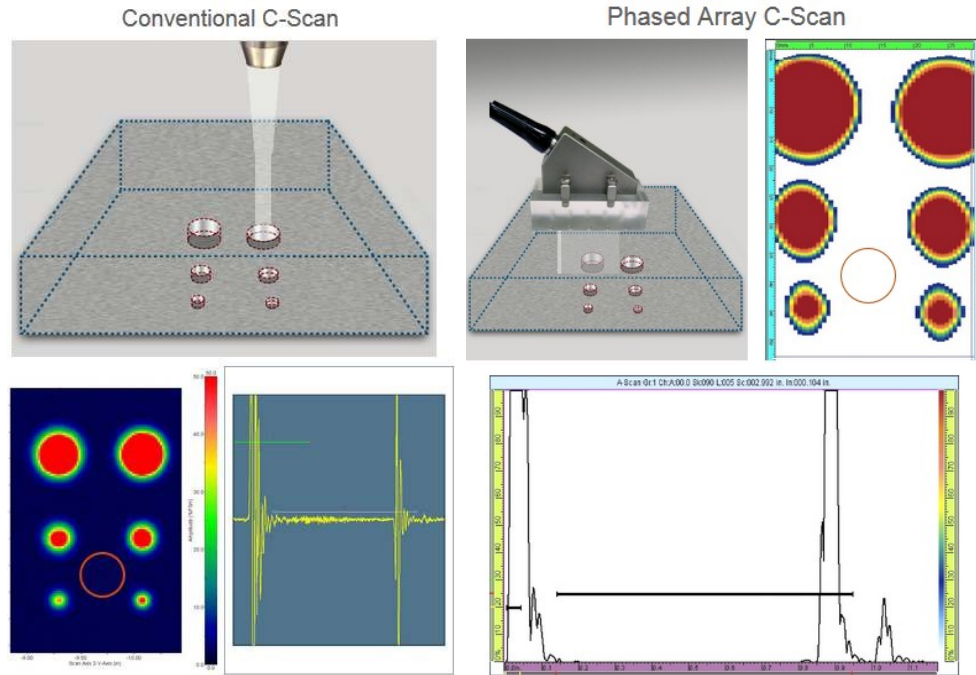
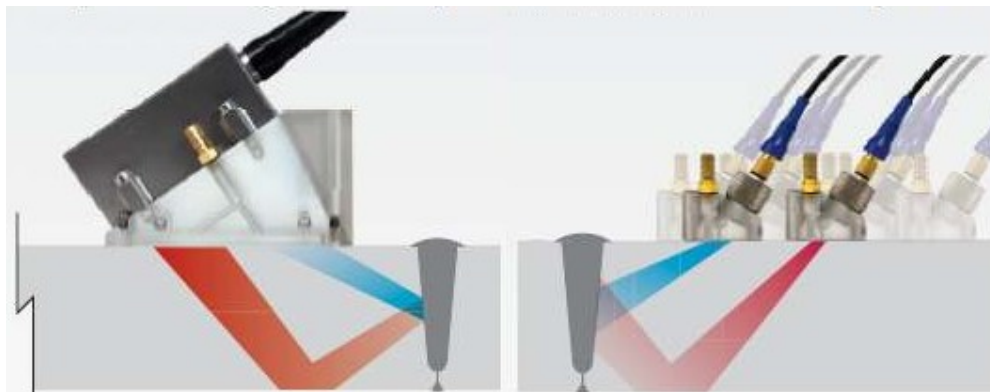


Fig. 9.38 Scanarea C și scanarea C cu traductor multi-element [108].

Examinarea diferitelor tipuri de materiale cu ajutorul ultrasunetelor poate fi limitată de nivelul ridicat de atenuare, datorită mai multor factori:

- Absorbția undelor prin transformarea energiei acustice în energie termică;
- Dispersia ultrasunetelor pe structura materialului;
- Divergența fascicolului de ultrasunete;
- Pierderi prin cuplare.



a) traductor multi-element phase array

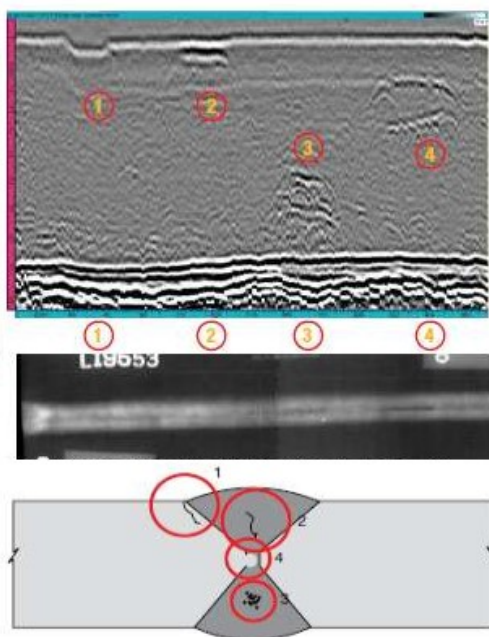
b) traductor convențional

Fig. 9.39 Scanarea sectorială cu traductori multi-element și cea convențională [108].

Introducerea traductorilor piezoelectrice multi-element cu scanare sectorială a simplificat și scurtat durata procesului de scanare, astfel că pentru a acoperi zona scanată de un singur traductor multi-element, ar fi necesar 24 de traductori convenționali, figura 9.39.

Atenuarea crește proporțional cu pătratul distanței parcurse și cu frecvența fasciculului de ultrasunete. Ca urmare, examinarea unor materiale cu structură grosolană este mai dificilă și trebuie utilizate frecvențe mai reduse. Din punct de vedere microstructural, atenuarea este maximă în austenită, urmată de ferită, perlită și martensită. Mai jos sunt recomandate o serie de valori pentru frecvența de examinare pentru diferite tipuri de materiale:

- 0,5 MHz pentru piesele turnate din fontă cenușie (grafit lamelar);
- 2 MHz pentru piese turnate din fontă cu grafit nodular;
- 1 ... 2 MHz pentru oțeluri turnate;
- 0,5 ... 1 MHz pentru oțeluri forjate de dimensiuni mari;
- 2 ... 6 MHz pentru oțeluri laminate;
- 2 MHz pentru piese de aluminiu turnate;
- 4 ... 6 MHz pentru piese de aluminiu deformate plastic;
- 1,5 ... 1,8 MHz pentru piese din cupru și aliaje cuprului;
- 1 MHz pentru piese din zirconiu;
- 5 ... 10 MHz pentru piese din hafniu;
- 10 MHz piese din titan;
- în cazul examinării pieselor sudate și placărilor cu oțeluri inoxidabile austenitice, duplex, austenito-martensitice, efectele de atenuare sunt puternic influențate de orientarea grăunților columnari, în raport cu axa fascicolului de ultrasunete.



Tab. 9.24 Analiză comparativă UT și RT.

ID	Tip defect	Informații oferite	
		Examinare cu ultrasunete	Examinare cu raze X
1	Fisură în zona de trecere	Poziție X, Y, Z Lungime Înălțime	Poziție X, Y Lungime
2	Fisură centrală	Poziție X, Y, Z Lungime Înălțime	Nedetectată
3	Porozitate	Poziție X, Y, Z Lungime	Poziție X, Y Lungime
4	Lipsă de topire la rădăcină	Poziție X, Y, Z Lungime Înălțime	Poziție X, Y Lungime

Fig. 9.40 Examinare comparativă cu ultrasunete și raze X [108].

În figura 9.40 sunt ilustrate rezultatele examinării cu ultrasunete, comparativ cu cele obținute prin examinare cu raze X. După cum se poate observa și din tabelul 9.24, examinarea cu ultrasunete oferă mai multe informații despre discontinuitățile detectate, respectiv adâncimea imperfecțiunii în raport cu suprafața examinată. Mai mult, prezintă o sensibilitate de detecție mărită în cazul discontinuităților planare, fisura centrală notată cu 2 a rămas nedetectată în cazul examinării RX.

Dacă la aceste informații se adaugă faptul că rezultatele examinării cu ultrasunete sunt imediate, viteza de scanare este rapidă, există posibilitatea de automatizare a procesului și nu sunt restricții speciale de protecția muncii sau condiții de examinare, precum cele impuse în cazul controlului cu RX, se poate spune că examinarea cu ultrasunete reprezintă o soluție ieftină și rapidă de examinare non-distructivă a îmbinărilor sudate și a structurilor metalice sau compozite, utilizate în diferite domenii industriale.

9.2.7 Examinarea cu radiații penetrante

Istoricul examinării cu radiații penetrante pornește de la descoperirea razelor X în anul 1895 de către Wilhelm Conrad Röntgen, respectiv radioactivitatea naturală de către Henri Becquerel în anul 1896. Primele imagini radiografice ale îmbinărilor sudate au fost obținute în anul 1927, utilizând un tub Röntgen de 250 kV și 5 mA.

Defectoscoopia cu radiații penetrante se bazează pe proprietățile de penetrare a radiațiilor X și gama în diverse materiale, respectiv pe gradul diferit de absorbție și atenuare a acestora pe diferite tipuri de discontinuități de material. Inițial, informațiile rezultate prin captarea radiațiilor la ieșirea din materialul examinat erau obținute pe filme radiografice, dar în prezent datorită progresului din domeniul IT, aceste informații sunt obținute pe cale computerizată/digitală (CR¹ sau DR²). Înregistrarea digitală a datelor, permite aplicarea unor filtre de prelucrare a imaginilor, pentru a evidenția imperfecțiuni foarte fine, sau chiar este posibilă achiziția de imagini în timp real, prin tomografie computerizată, în diverse secțiuni ale pieselor examinate, figura 9.41. Aplicațiile examinării cu radiații penetrante au pătruns în domenii foarte variate: de la medicină, în artă pentru depistarea falsurilor, în construcții, la verificarea structurilor sudate din domeniul transporturilor, industriei extracției gazelor naturale și a petrolului, industria aerospațială, militară etc.

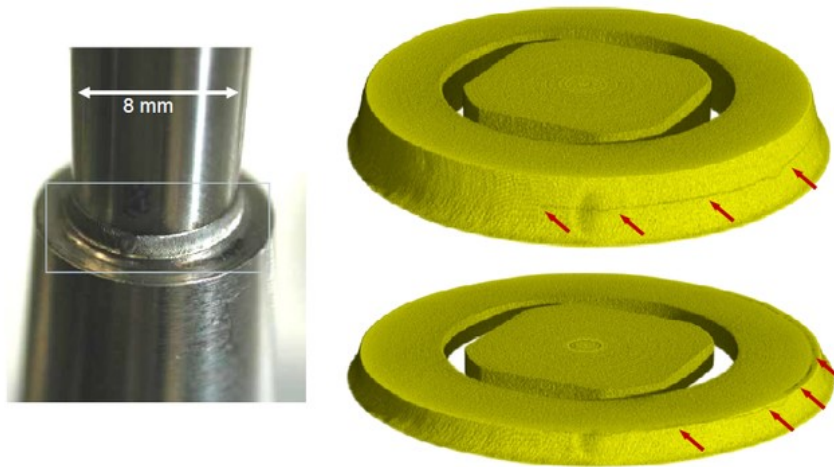


Fig. 9.41 Examinare cu radiații X a unei suduri laser (fisură longitudinală), prin tomografie computerizată 3D [109].

Cerințele de calitate tot mai ridicate, reducerea costurilor de fabricație și control, creșterea performanțelor echipamentelor de control nedistructiv, scurtarea timpului de examinare, prelucrarea computerizată a datelor sunt câteva repere, care în permanență ajustează necesitățile și parametrii de performanță a metodelor de control nedistructiv.

¹ CR - computerized radiography

² DR - digital radiography (DDA - Digital Detector Array)

Atât radițiile X, cât și radițiile gama, sunt parte integrantă din spectrul electromagnetic al luminii, figura 9.42. Prin urmare, radițiile penetrante sunt radiații electromagnetice și manifestă caracterul dual undă-corpusul, specific radiațiilor electromagnetice. Radițiile X sunt produse la tranziția dintre două stări cuantice ale învelișului electronic, în vreme ce radițiile gama sunt produse la tranziția dintre două stări cuantice ale nucleului atomului.

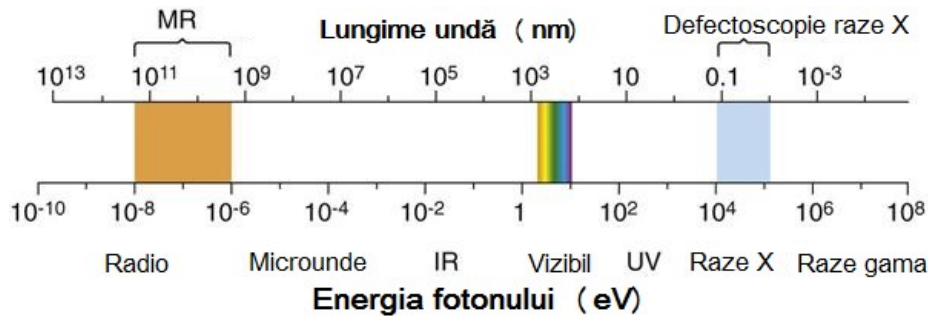
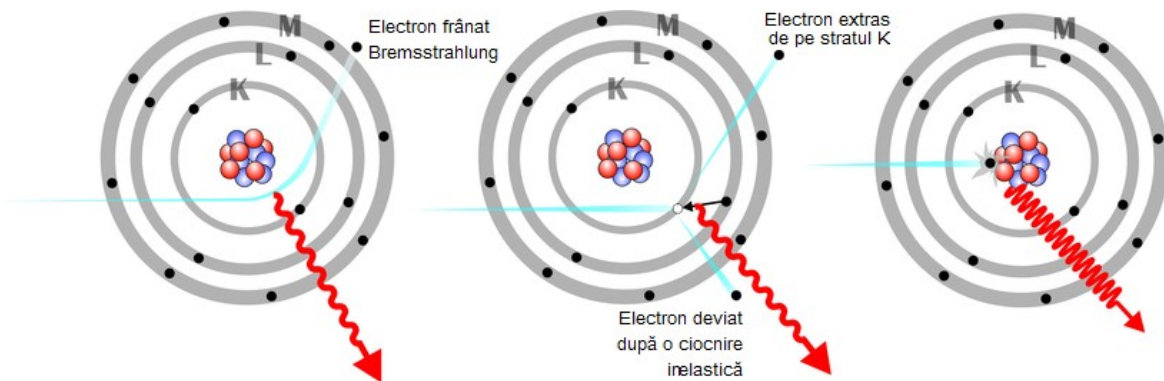


Fig. 9.42 Lungimea de undă și energia fotonilor pentru radiațiile penetrante.

Electronii au o energie de legătură în atom, în funcție de stratul energetic pe care se află. Stratul K are energia de legătură cea mai ridicată, fiind cel mai aproape de nucleul atomic. Urmează în ordine descrescătoare din punct de vedere a energiei de legătură, straturile: L, M, N, O, P și Q. Dacă un electron incident are o energie mai mare decât cea de legătură, este posibil ca prin coliziune inelastică cu atomul respectiv, să extragă un electron de pe stratul K și să ionizeze atomul, aspect ilustrat în figura 9.43 b).



a) frânare electron datorită interacțiunii Coulomb b) ciocnire inelastică c) ciocnire cu nucleul atomic
Fig. 9.43. Interacțiunea electronilor accelerați cu ținta de wolfram.

Stratul atomic incomplet este energetic instabil și atunci un electron de pe un strat exterior cu energie de legătură inferioară, poate ocupa vacanța creată de electronul extras. Prin tranziția electronului de pe stratul L pe stratul K, se eliberează excesul de energie al electronului (diferența de energie între straturile L și K) sub forma unui foton caracteristic.

Se numește **radiație caracteristică**, deoarece energia de legătură este unică pentru fiecare element chimic, iar radiația emisă are doar valori discrete de energie caracteristice elementului respectiv, figura 9.44. Cu creșterea tensiunii de accelerare, crește densitatea fluxului de fotoni emiși, curba radiației X caracteristică fiind scalată spre valori mai mari ale intensității radiației X, figura 9.45.

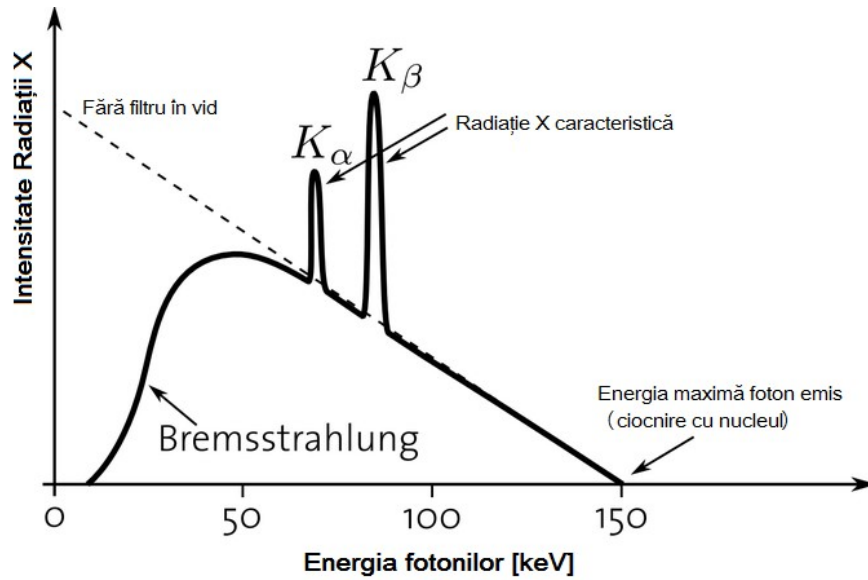


Fig. 9.44 Radiația X caracteristică pentru wolfram, $U = 140 \text{ kV}$.

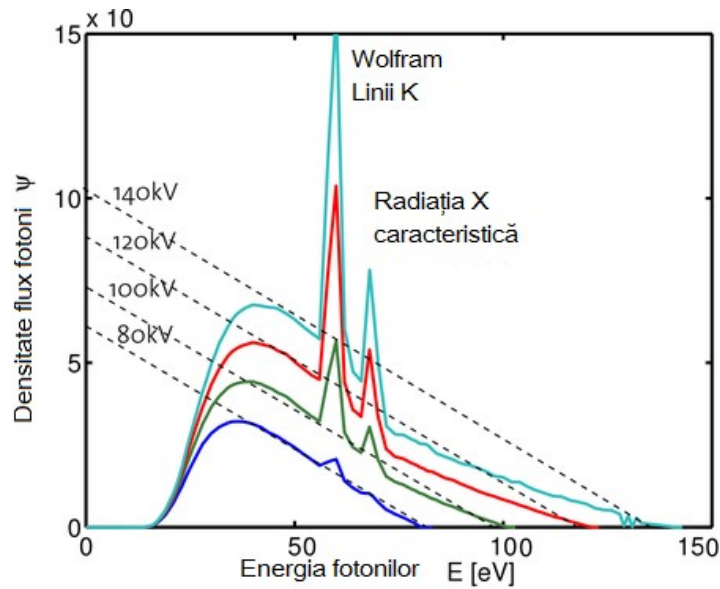


Fig. 9.45 Radiații X caracteristice pentru wolfram funcție de tensiunea de accelerare.

Peak-urile ale intensității radiației caracteristice din figura 9.44 și 9.45 se datorează cazurilor foarte rare (0,5 %), în care electronii incidenti suferă o ciocnire cu nucleul atomilor din țintă, iar întreaga lor energie cinetică este convertită în radiație electromagnetică X, figura 9.43 c). Aproximativ 99% din energia cinetică a electronilor incidenti este convertită în căldură. Doar o fracțiune mică (0,5...1%) din energia cinetică a electronilor, este convertită în radiație X prin interacțiuni tari Coulomb (fenomenul de frânare a electronilor - Bremsstrahlung¹). Electronii ajung în proximitatea nucleului atomic, iar forțele Coulomb ale norului de electroni, determină frânarea electronului incident, scăderea energiei cinetice și modificarea traiectoriei acestuia, figura 9.43 a).

¹ Bremsstrahlung (lb. germană) - termenul original dat de Sommerfeld cu aprobarea lui Röntgen

Ca urmare, se emite un foton cu o energie egală cu energia cinetică pierdută de electronul incident (conservarea energiei). Cu cât electronul este mai departe de nucleu, energia fotonului emis, respectiv a radiației X produse, scade odată cu pătratul distanței dintre electronul incident și nucleul atomic. Fotonii emiși, respectiv radiația X produsă prin ciocnirile electronilor accelerați către ținta de wolfram nu sunt generați într-un singur punct, ci provin de pe toată suprafața catodului de wolfram, ce constituie **pata focală termică**¹ a tubului, figura 9.46.

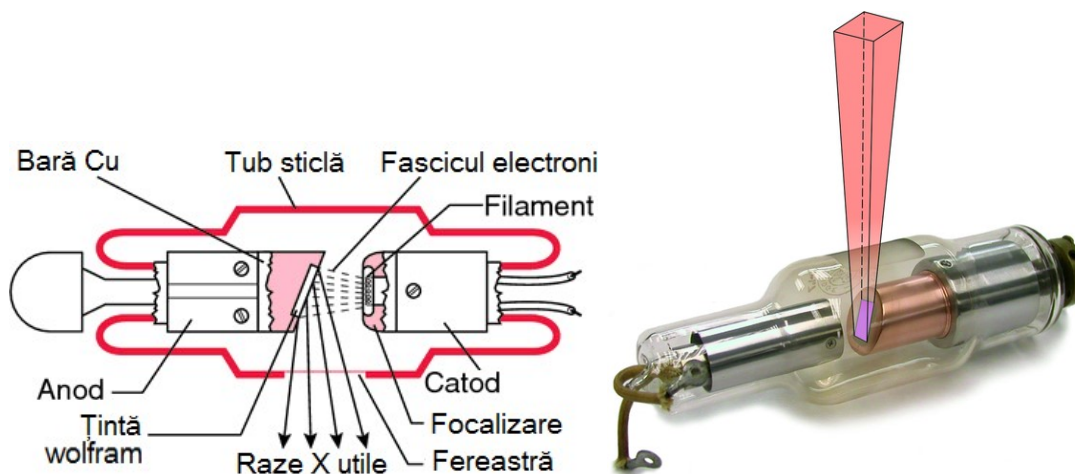


Fig. 9.46 Construcția tubului Röntgen. Pata focală optică.

Dimensiunile plăcuței termice și unghiul de înclinație a acesteia sunt specifice tipului de aplicație pentru care este construit tubul. **Pata focală optică** se obține din proiecția petei focale termice pe o direcție perpendiculară pe direcția de propagare a radiațiilor X (figura 9.46) și este în funcție de tensiunea de accelerare, de unghiul de înclinație a plăcuței termice, determinând calitatea imaginii radiografice. Pentru obținerea unor imagini radiografice de rezoluție ridicată, pata focală optică trebuie să fie cât mai mică.

Emisia fascicolului de electroni are la bază efectul termoelectric, prin aplicarea unui curent de joasă tensiune pe un filament de wolfram ce este montat în corpul catodului. Electronii care părăsesc suprafața filamentului de wolfram prin termoemisie, sunt pe urmă puternic accelerați către anod spre fata focală termică, datorită unei tensiuni înalte aplicate între catod și anod, ce este cuprinsă uzual între 50 ... 800 kV.

Intensitatea radiațiilor X este definită ca fiind energia radiantă ce străbate în unitatea de timp, unitatea de suprafață normală la direcția de propagare a razelor X. Prin urmare, intensitatea radiațiilor este direct proporțională cu curentul catodic (numărul de electroni ce bombardează pata termică). Energia electronilor și implicit energia fotonilor emiși este determinată de valoarea tensiunii de accelerare (kV) a tubului Röntgen.

Reglajul curentului catodic se face prin modificarea curentului de alimentare a filamentului de wolfram, prin controlul fenomenului de termoemisie a electronilor. Datorită încălzirii extrem de puternice a plăcuței, care îndeplinește rolul de țintă a electronilor accelerați, aceasta se realizează din wolfram sau tantal și este încorporată într-un tub de cupru răcit printr-un sistem auxiliar.

¹ Focal spot (lb.eng.)

Un alt parametru important pentru tuburile Röntgen este **debitul dozei de emisie** (factorul de expunere) la o distanță dată, ce influențează calitatea imaginii radiografice, respectiv densitatea de înnegrire și contrastul imaginii, în cazul utilizării filmelor radiografice.

Examinarea constă în proiectarea unui fascicul de radiații penetrante asupra piesei de controlat și înregistrarea pe film radiografic în cazul RT (*radiographic testing*), sau pe suport digital în cazul DR (*digital radiography*) sau CR (*computerized radiography*) a modificărilor suferite de fascicul de radiații la trecerea prin material. Modificările sunt determinate de coeficienții diferiți de atenuare a zonelor de material străbătute, în funcție de variațiile de densitate și grosime ale îmbinării sudate, de tipul discontinuităților de material.

Atenuarea radiațiilor în materialul străbătut este exprimată prin legea atenuării radiațiilor, relația 9.11 și variază exponențial cu distanța Δx parcursă în material, respectiv cu coeficientul de atenuare liniară μ_l .

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu_l \cdot \Delta x} \quad (9.11)$$

unde :

- I - intensitatea radiației în material la grosimea Δx ;
- I_0 - intensitatea sursei de radiații (radiația primară);
- μ_l - coeficient de atenuare liniară (funcție de material), ($\mu_l = k \cdot \lambda^3 \cdot Z^3$);
- k - factor corelat cu densitatea materialului;
- λ - lungimea de undă a radiației penetrante;
- Z - numărul atomic al elementului examinat.

Radiografia cu film

Metodele de control constă în proiectarea unui fascicul de radiații penetrante asupra piesei de controlat și înregistrarea pe un film radiografic a modificărilor suferite de fascicul la trecerea prin material. Datorită faptului că sursa de raze X nu este punctiformă, se formează penumbra, care determină o anumită neclaritate elementelor de contur, figura 9.47. Penumbra, se calculează cu relația 9.12.

$$p = \frac{m \cdot d}{d'} = \frac{m \cdot d}{f - d}$$

unde:

- p - mărimea penumbrei,
- m - mărimea sursei,
- f - distanța focală (sursă-film),
- d - distanța piesă-film,
- d' - distanța sursă-piesă.

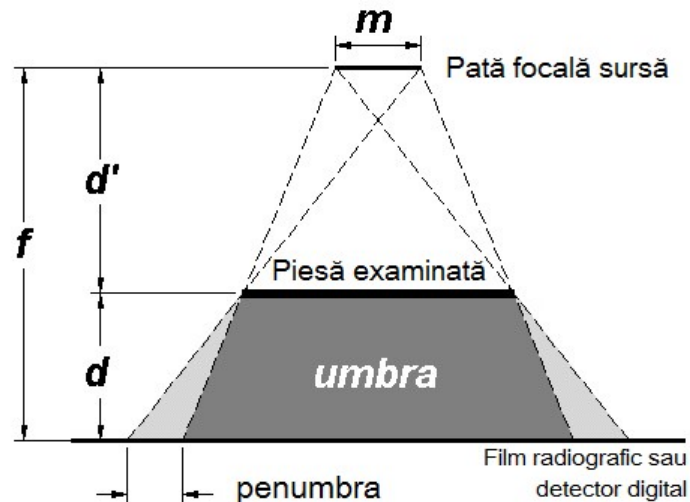


Fig. 9.47 Formarea penumbrei la examinarea cu radiații penetrante.

Uzual, penumbra este limitată la valori $p \leq 0,2$ mm, pentru a nu fi observată distinct de conturul imaginii. Astfel, distanța sursă-film f poate fi calculată cu relația 9.13, unde s este grosimea piesei examinate:

$$f = \frac{s \cdot (m + p)}{p} \quad (9.13)$$

Filmul radiografic este suportul material care reține informațiile rezultate după expunerea materialului examinat la fascicolul de radiații penetrante. Împreună cu condițiile de expunere, determină calitatea și cantitatea informațiilor vizuale, care stau pe urmă la baza identificării discontinuităților de material și a defectelor de sudare. Sensibilitatea de detecție, în special a imperfecțiunilor foarte fine, depinde așadar și de caracteristicile filmului radiografic. Principala caracteristică a filmului radiografic este **densitatea de înnegrire D** , care se exprimă matematic prin relațiile 9.14 și 9.15:

$$D = \log \frac{L_f}{L_t} \quad (9.14)$$

$$D = \left(\frac{1}{B} \cdot \frac{I \cdot \tau}{f^2} \cdot e^{-\mu_l \cdot s} \right)^a \quad (9.15)$$

unde:

L_f = intensitatea luminii care ajunge la suprafața filmului;
 L_t = intensitatea luminii care se transmite prin film;
 I = intensitatea curentului din tubul Röntgen, (mA);
 τ = timpul de expunere în (min) în cazul examinării cu raze X și (ore) la radiații gama;
 f = distanța sursă și film, (m);
 B = coeficient ce ține cont de film (rapiditatea filmului);
 s = grosimea materialului, (cm);
 μ_l = coeficientul de atenuare liniară, (cm^{-1});
 a = coeficient de contrast relativ.

Între densitatea de înnegrire a filmului și logaritmul expunerii relative ($\log E_r$) la distanța focală, se poate utiliza relația 9.16. Această dependență reprezintă curba caracteristică sau **curba sensitometrică** a filmului radiografic, figura 9.48.

$$D = G \cdot \log E_r + K$$

unde G este panta curbei caracteristice sau gradientul filmului, într-un anumit punct [97]. Rapiditatea ISO a filmului se exprimă prin inversul expunerii necesare, pentru a obține o densitate de înnegrire de minim 2,0 peste densitatea de voal.

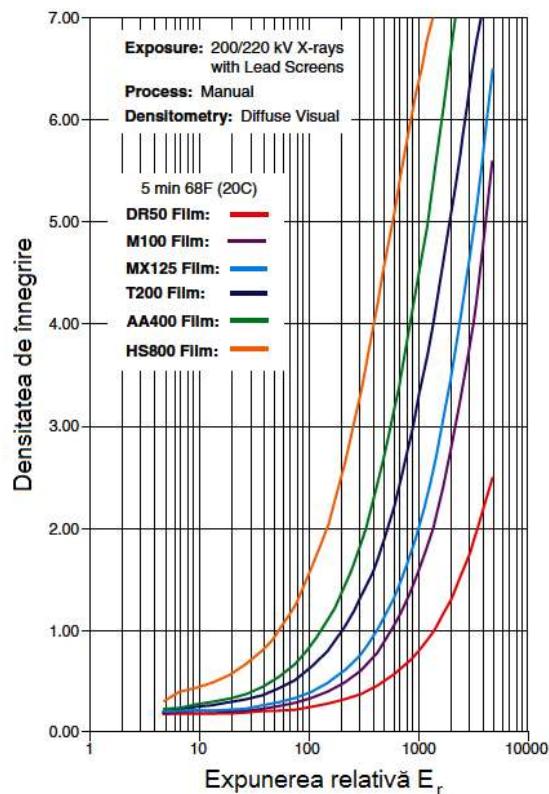


Fig. 9.48 Curba sensitometrică a filmelor radiografice [110].

Puterea separatoare sau definiția filmului este direct proporțională cu granulația emulsiei filmului radiografic. Creșterea granulației filmului necesită timpi de expunere mai îndelungați. Productivitatea metodei de examinare variază invers proporțional cu timpul de expunere, respectiv cu calitatea, definiția sau rezoluția imaginilor obținute. Prin urmare, toate aceste elemente trebuie corelate pentru a optimiza costurile de examinare, dar și cu informațiile achiziționate privind mărimea și tipul discontinuităților probabile din material.

Filmele radiografice conform normelor EN ISO 11699–1 sunt clasificate în 6 **clase de calitate**, de la C1 la C6, C1 fiind calitatea cea mai înaltă cu granulație ultrafină a filmului, ce reclamă surse de raze X de înaltă tensiune sau surse de radiații gama, dar și cel mai lung timp de expunere. Alegerea unei clase de calitate a filmelor radiografice utilizate în controlul RX industrial, poate fi făcută după următoarele recomandări orientative [110]:

- Clasa C1 pentru aplicații speciale de înaltă rezoluție, microelectronică;
- Clasa C2 se utilizează în industria nucleară;
- Clasa C3 se utilizează în industria aerospațială;
- Clasa C4 și C5 pentru examinarea pieselor turnate, sudate, de uz general;
- Clasa C6 pentru structuri de beton sau construcții masive, magistrale de țevi.

Deoarece doar 1% din radiația penetrantă produsă de tuburile Röntgen este absorbită de filmul radiografic, contribuind la formarea imaginii radiografice, restul de 99% din energia radiantă nu este utilă și contribuie la complicarea examinării RT [97].

La ieșirea din piesa examinată, radiația penetrantă întâlnește în calea sa alte obiecte, materiale care reflectă înapoi o fracțiune din radiația incidentă pe aceste corpuri, producând artefacte, indicații false pe filmul radiografic. Această **radiație retroîmprăștiată** se numește **radiație secundară**. Pentru prevenirea unor astfel de efecte nedorite asupra filmului radiografic, ca urmare a radiației secundare, se utilizează ecrane de plumb care ecranează filmul radiografic.

Așadar, calitatea imaginilor radiografice depinde de trei factori: **contrast**, **definiție** (rezoluție) și **zgomot** (granularitate imagine). Toți acești factori afectează în special sensibilitatea de detecție a imperfecțiunilor fine. Se definește astfel, **valoarea normalizată a raportului semnal zgomot SNR** la o densitate de înnegrire de 2, prin relația 9.17, unde G_2 este gradientul filmului la o densitate de înnegrire $D=2$, iar σ_D este granularitatea filmului pentru $D=2$.

$$SNR = (G_2/\sigma_D)/\ln 10, \text{ respectiv } SNR_{norm} = SNR_{măsurat} \cdot 88,6 \mu\text{m}/SRb \quad (9.17)$$

Pentru a putea măsura definiția (rezoluția) imaginii radiografice s-a introdus un indicator de calitate a imaginii **IQI**¹, care este utilizat în metodele de examinare cu radiații penetrante. Practic se determină pe filmul radiografic limita de detecție a unor elemente cu dimensiuni cunoscute, utilizând un etalon de referință. Sunt utilizate în prezent, patru tipuri de etaloane sau indicatori de calitate a imaginii IQI, figura 9.49:

- IQI cu fire, EN 462-1, JIS;
- IQI cu trepte și orificii, EN 462-2;
- IQI cu orificii, ASTM E 1742-95;
- IQI duplex cu fire duble, EN 462-5.

¹ IQI - Image Quality Indicator (lb.eng.)



a) cu fire b) cu trepte și orificii c) cu găuri d) cu fire duplex

Fig. 9.49 Indicatori de calitate a imaginii radiografice [111].

Etaloanele cu fir conțin 6 sau 7 sârme dispuse paralel și înglobate într-un suport de material plastic, iar cele duplex cu fire duble, conțin 13 perechi de fire de wolfram sau platină dispuse paralel la diferite distanțe între ele, având diferite diametre conform specificațiilor EN 462-5. Definiția imaginii sau gradul de neclaritate, care se ia uzual în considerare în cazul examinării cu radiații penetrante, este indicat de ultima pereche de fire, care mai poate fi distinsă separat. Pe măsură ce crește neclaritatea imaginii, imaginea celor două fire pereche converge într-un singur fir, ce poate fi distins pe filmul radiografic, figura 9.50.

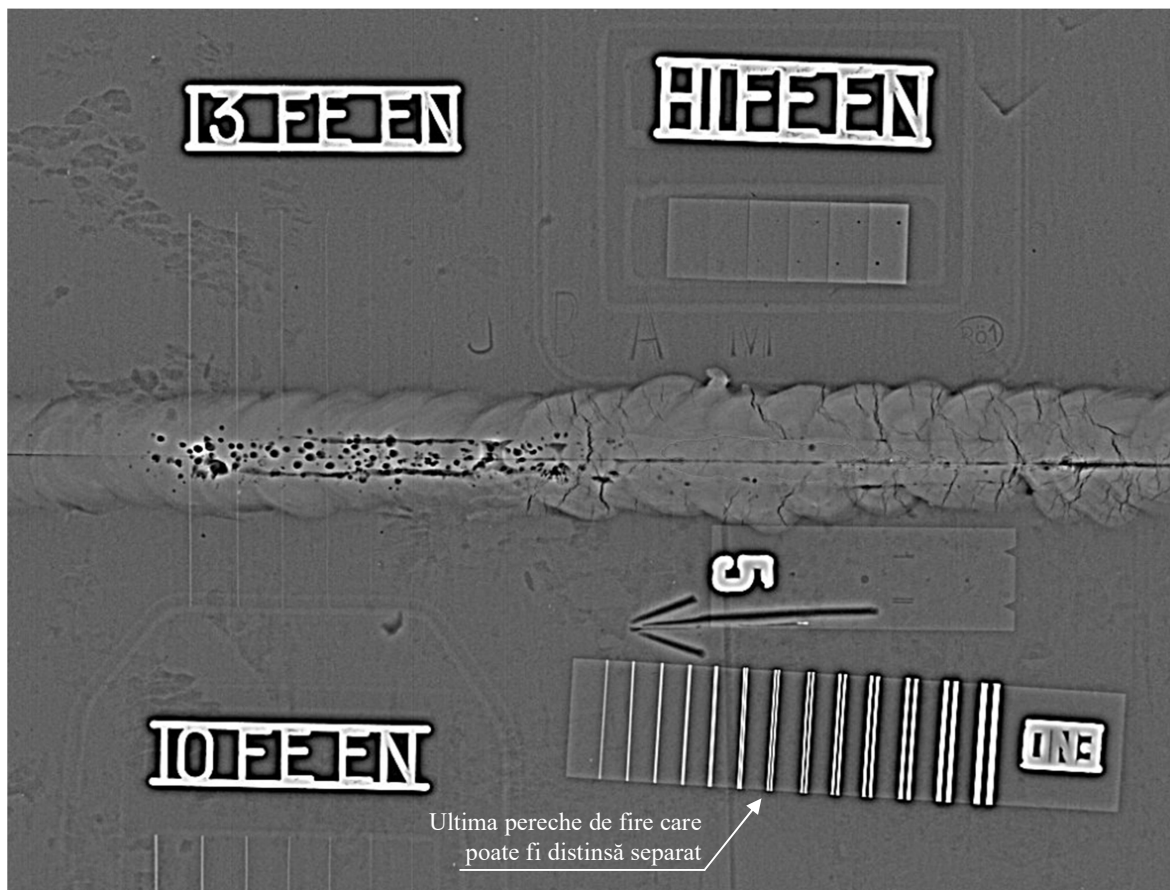


Fig. 9.50 Defecte de sudare și indicatori de calitate a imaginii IQI [113].
Imagine obținută de laboratoarele BAM 5 utilizând un sistem Rayzor X Pro
care depășește cerințele impuse de standardul ASME E2597-07.

Indicatorul de calitate a imaginii IQI cu fire duplex, este utilizat atât în defectoscopia cu raze X pe film radiografic **RT**, cât și în defectoscopia cu raze X computerizată **CR** (EN 14784 și ISO 13671), în radioscopie cu ajutorul ecranelor digitale (EN 13068) sau pentru panourile cu detectori digitali **DR** (ISO 17636-2).

Indicatorul de calitate IQI cu trepte și orificii este realizat dintr-un material identic sau similar cu materialul examinat și prezintă o serie de trepte cu grosimi diferite, în care s-au efectuat una sau două găuri neteșite, diametrul găurii fiind egal cu treapta de grosime. Uzual sunt 6 trepte cu două orificii pe treaptă. Sensibilitatea indicatorului de calitate IQI este în acest caz, ultima treaptă pentru care ambele orificii sunt vizibile.

Sistemul american, figura 9.49 c), utilizează etaloane de grosime uniformă T în care sunt practicate trei orificii având diametrele cu dimensiunile $1T$, $2T$ și $4T$. Și în acest caz, etaloanele sunt confecționate din același material cu cel examinat, pentru a avea același nivel de atenuare. Sensibilitatea indicatorului este dată de orificiul cel mai mic vizibil pe imaginea radiografică. Este important de menționat că sensibilitatea calculată după sistemul american nu corespunde cu sensibilitatea calculată după sistemul european.

Lungimea filmului este determinată de distanța sursă-film și unghiul de divergență maxim admis. În cazul examinării îmbinărilor circulare, poziția S_1 facilitează detectarea nepătrunderilor sau excesului de pătrundere în vreme ce poziția S_2 favorizează detectarea lipsei de topire și fisurilor la rădăcină. Radiografierea se realizează oblic, unghiul de incidență se alege a.î. axa fasciculului să treacă prin axa piesei și să se evite suprapunerea imaginii celor două ramuri pe filmul radiografic, figura 9.51.

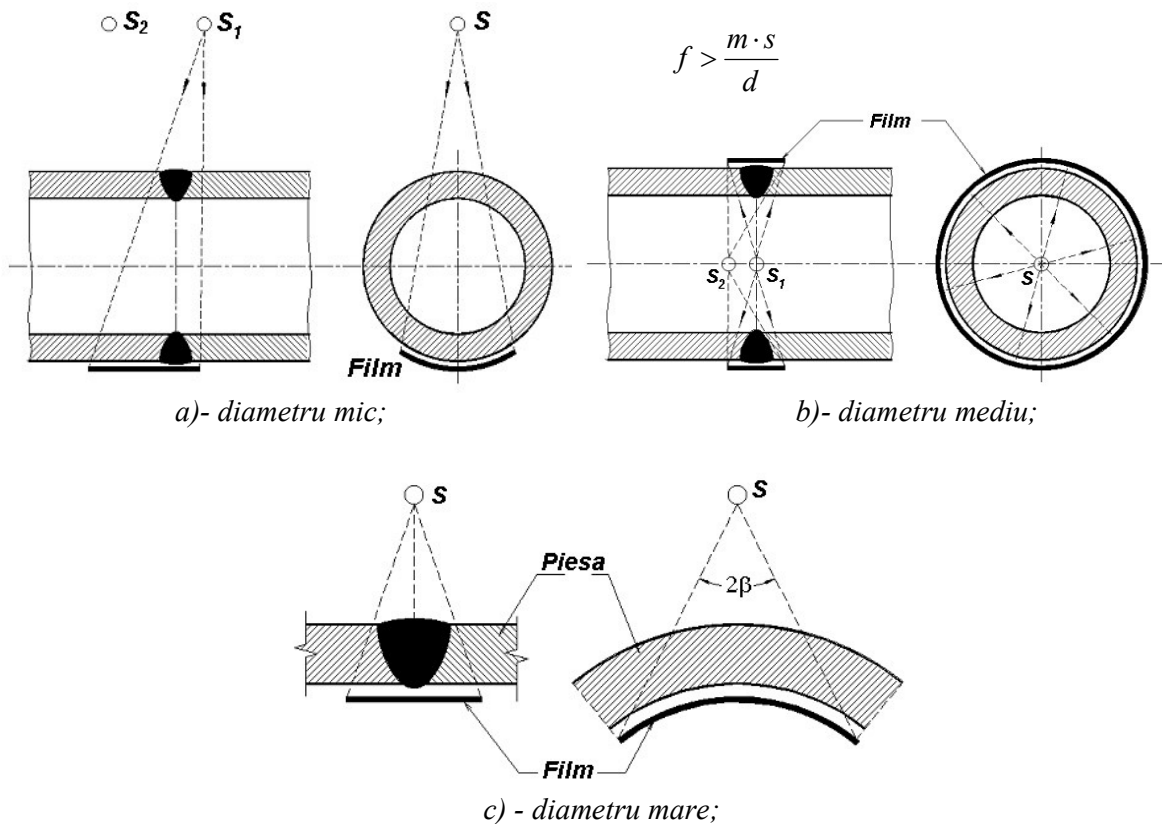
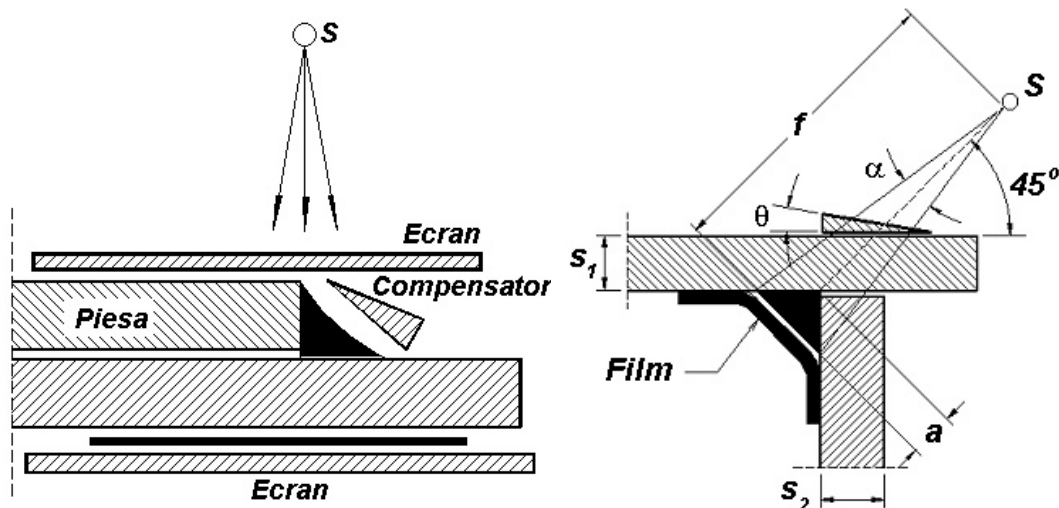


Fig. 9.51 Schema de radiografiere a îmbinărilor circulare.

Îmbinările de colț nepătrunse în L sau în T se radiografiază în planul bisector al îmbinării cu sursa S, fie de partea opusă, fie pe partea îmbinării, figura 9.52. În ambele cazuri, pentru compensarea diferenței de grosime la extremitățile fascicului se impune utilizarea unui compensator cu unghiul la vârf θ .



a) unilaterale, nepătrunse b) prin suprapunere
Fig. 9.52 Schema de radiografiere a îmbinărilor de colț.

Indicatorul de calitate a imaginii se poziționează pe piesa examinată, într-o zonă unde grosimea materialului este uniformă, cât mai aproape de sursa de radiații. Dacă indicatorul de calitate a imaginii este cu fire, acesta se va așeza în așa fel încât, firele să fie orientate perpendicular pe cusătura sudată, iar cel puțin 10 mm din lungimea firelor trebuie să fie plasate pe o suprafață de densitate uniformă. Sensibilitatea indicatoarelor IQI de calitate a imaginii cu fire se exprimă procentual, utilizând relația 9.18:

$$S \text{ (IQI cu fire)} = \frac{\text{Diametrul celui mai subtire fir vizibil}}{\text{Grosimea materialului examinat}} \cdot 100\%$$

Radiografia digitală

În ultimii 10-20 de ani există o tendință de înlocuire a filmului radiografic și a metodei de examinare convențională cu radiații X (RT-F), cu metode ce utilizează detectori digitali sau ecrane fluorescente, ce stochează informațiile în format digital (RT-D). Astfel, au apărut metode noi de analiză și interpretare a datelor, cu ajutorul unor programe software specializate. Formatul digital al imaginilor, permite prelucrarea, arhivarea și accesul rapid al informațiilor, beneficiind de avantajele oferite de tehnologiile IT.

Parametrii cei mai importanți pentru radiografia digitală, sunt:

- Rezoluția spațială de bază, SRb^1 ;
- Raportul semnal-nivel de zgomot, SNR^2 ;
- Contrastul specific, μ_{ef} .

¹ SRb - basic spatial resolution

² SNR Signal-to-noise ratio

Filmele radiografice erau caracterizate calitativ cu ajutorul densității de înnegrire și a granulației emulsiei fotosensibile. În cazul înlocuirii filmului radiografic cu alți detectori, este necesar introducerea unor parametri sau indicatori echivalenți de evaluare a calității imaginii digitale. Imaginea este formată din pixeli, fiecare dintre aceștia având o anumită nuanță de gri, ce reprezintă semnalul primit de la detectorul digital. În figura 9.53, sunt prezentați parametrii imaginii radiografice digitale, în raport cu cei corespondenți pentru filmul radiografic.

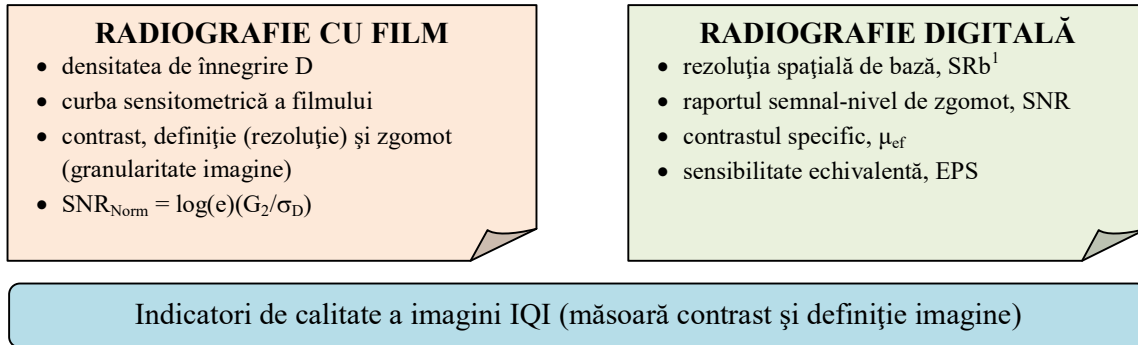


Fig. 9.53 Parametrii de calitate a imaginii radiografice.

Nivelul de gri rezultă în urma fluctuațiilor intensității radiației ce ajunge pe detector, respectiv datorită fluctuației cuantice care este un fenomen statistic sau zgomotului datorat echipamentului electronic, fluctuațiilor termice etc. Răspunsul detectorului la semnalul primit se măsoară cu ajutorul raportului dintre semnal și nivelul de zgomot, SNR . În radiografia digitală, **sensibilitatea de contrast**¹ depinde de contrastul specific μ_{ef} și raportul semnal - nivel de zgomot SNR , normalizate la **rezoluția spațială de bază SRb** , relația 9.19. Practic, se determină cea mai mică diferență de contrast sesizabilă, ca urmare a diferențelor de atenuare a radiațiilor X în material, datorită discontinuităților de material sau imperfecțiunilor de sudare.

$$\frac{CNR}{\Delta t} = SNR \cdot \mu_{ef}$$

Limita de percepție PT^2 a imperfecțiunilor de sudare foarte fine se calculează cu relația 9.20, unde $d_{vizibil}$ reprezintă diametrul găurii celei mai mici vizibile, conform indicatorului de calitate a imaginii IQI. Limita de percepție PT_{const} a unui operator uman este aproximativ de 10 și se calculează cu relația 9.21:

$$PT = d_{vizibil} \cdot CNR \quad (9.20)$$

$$PT_{const} = d_{vizibil} \cdot CNR/SRb \quad (9.21)$$

Sensibilitatea de detecție a celor mai fine indicații, în cazul examinării radiografice digitale depinde de rezoluția detectorului, neclaritatea geometrică, de SNR și CNR . Dacă imaginea este mărită, neclaritatea imaginii este o combinație a neclarității geometrice și a detectorului, împărțită cu factorul de mărire. Detectorii digitali sunt caracterizați de mărimea fizică a elementului de detecție, respectiv de distanța dintre centrele a două elemente de detecție vecine.

¹ CNR - contrast to noise ratio (lb.eng.)

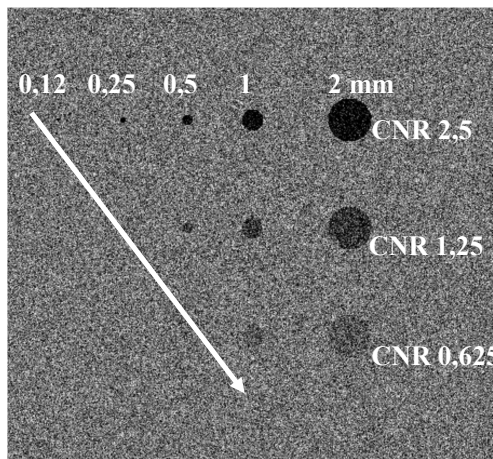
² PT - perception threshold (lb.eng.)

Acest element specific detectorilor digitali se numește SRb^1 , adică **rezoluție spațială de bază** a detectorului, măsurată în μm și reprezintă distanța dintre centrele a doi pixeli de detecție din detector. Pe imaginile radiografice se măsoară cu indicatorii IQI cu fire duplex, conform EN 462-5, ASTM E 2002 sau ISO 19235-5, obținându-se coeficientul u_T (μm) care este echivalentul rezoluției de bază SRb , dată de relația 9.22, [116]:

$$SRb = u_T/2 \quad (9.22)$$

Standardul american ASTM E 2698 prevede o valoare minimă pentru raportul dintre contrast și zgomot (CNR), care este optimizată pentru examinarea cu RD a plăcilor subțiri cu grosimi mai mici de 12 mm. Detectorul digital DDA are o rezoluție spațială de bază SRb , uzual în intervalul de 0,1 mm și 130 μm . Valoarea minimă pentru CNM se calculează cu relația 9.23.

$$CNR_{min} = \frac{10 \cdot SRb(imagine)}{diametru\ IQI}$$



Așa cum se poate observa în figura 9.54, rezoluția spațială a imaginii este:

$$SRb = 50 \mu m$$

$$CNR_{min} = 2,5$$

Pe coloană avem orificii cu același diametru, acestea fiind marcate deasupra primului rând. Orificiile mai mari sunt mai vizibile pentru aceeași valoare CNR .

Pentru fiecare rând, raportul contrast/zgomot este constant. $CNR = C_{depth}/\sigma$

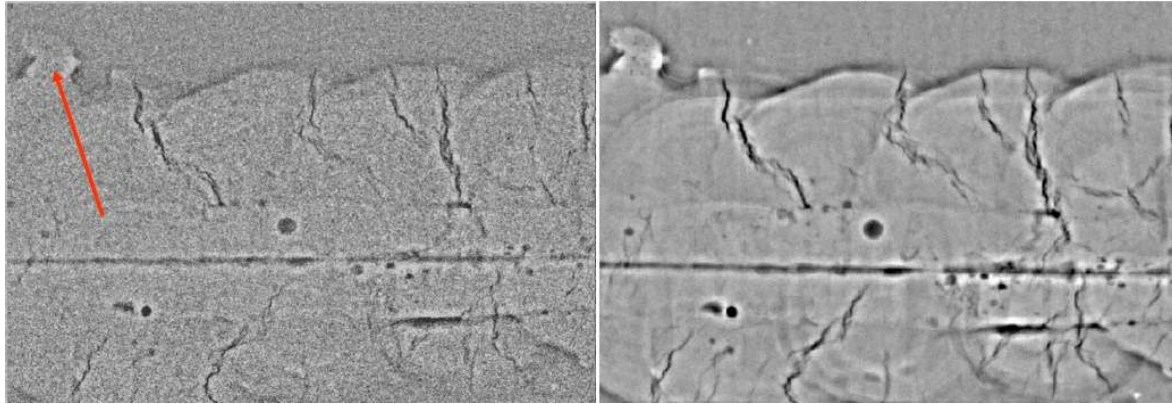
Fig. 9.54 CNR conform standardului ASTM E 2698, [117].

Sensibilitatea echivalentă (EPS) în radiografia digitală este definită conform standardului ASTM E 1025 (indicator de calitate IQI cu orificii) și ASTM E 747 (IQI cu fire), ca și un indicator de sensibilitate de pătrundere. În cazul indicatorilor de calitate a imaginii IQI cu orificii, sensibilitatea echivalentă se calculează cu ajutorul relației 9.24:

$$EPS(\%) = \frac{100}{t_{material}} \sqrt{\frac{T_{IQI} \cdot d}{2}}$$

unde $t_{material}$ este grosimea materialului examinat, T_{IQI} este grosimea indicatorului de calitate a imaginii IQI cu orificii, iar d este diametrul orificiului $2T$ al indicatorului IQI. Sensibilitatea echivalentă EPS conform normelor ASTM este calculată în raport cu orificiul $2T$, astfel că pentru sensibilitatea calculată după sistemul european în raport cu orificiul $1T$, este necesar aplicarea unui factor de corecție $1/\sqrt{2}$.

¹ Detector pitch sau detector pixel size



a) Film radiografic AGFA D2, clasa C1 EN 584-1. Timp expunere: 330 sec.

b) Imagine radiografică digitală PE XRD 1620, detector (SRb 200 μ m), factor mărire X3 Timp expunere: 100 sec.

Fig. 9.55 Analiză comparativă RT și RD pentru o probă sudată din oțel cu $t=8$ mm [117].

Analizând imaginile radiografice obținute pe film (RT-F) și în format digital (RT-D), prezentate în figura 9.55 și figura 9.56, care au fost preluate pe aceeași probă sudată, pentru a evidenția diferențele de calitate a imaginii și a sensibilității de detecție a imperfecțiunilor, se poate observa cu ușurință, că deși rezoluția spațială de bază în tehnica digitală este inferioară rezoluției de bază a filmului radiografic, sensibilitatea de detecție în cazul utilizării detectorilor digitali este mult superioară sensibilității de detecție corespunzătoare filmului radiografic.

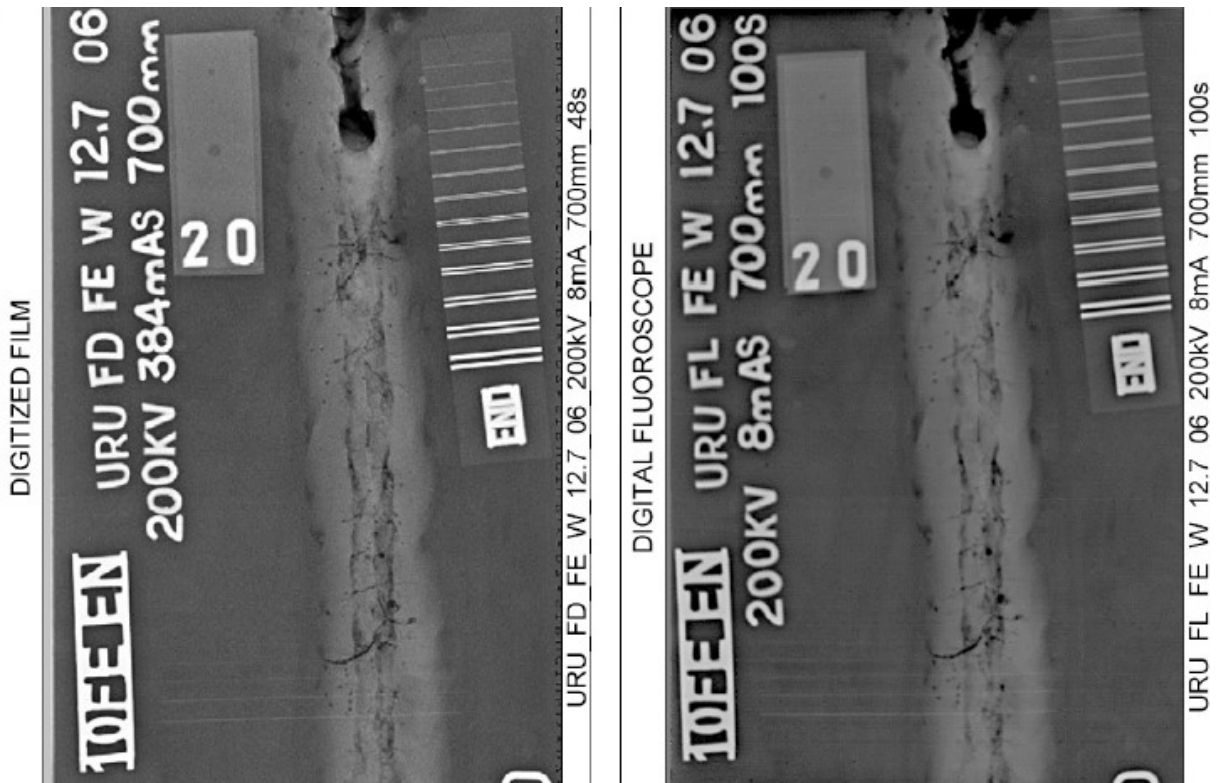


Fig. 9.56 Examinare RT-F și RT-D a unei probe sudate GTAW din oțel carbon, rost de sudare în V, grosimea materialului de bază 12,7 mm [116].

Acest lucru se datorează următorilor factori specifici tehnicii de examinare digitale RT-D:

- Raportului SNR (semnal-nivel de zgomot) ce poate depăși de 20 ori valoarea SNR_{Norm} corespunzătoare filmului radiografic;
- Coeficientul de contrast mult superior ce compensează rezoluția spațială SRb mai scăzută a detectorului digital.

Defectoscoopia cu radiații gama

Radiațiile gama sunt de natură electromagnetică ca și radiațiile X, însă de energie mai ridicată, ceea ce le recomandă la examinarea materialelor de grosime foarte mare, (peste 200 mm). Radiațiile gama sunt produse la tranziția dintre două stări cuantice ale nucleului atomului, spre deosebire de spectrul de emisie energetică a radiațiilor X care este continuu, figura 9.44. Spectrul radiațiilor gama este discret, la energii specifice ale fotonilor emiși caracteristice izotopului radioactiv utilizat ca și sursă de radiații, figura 9.58.

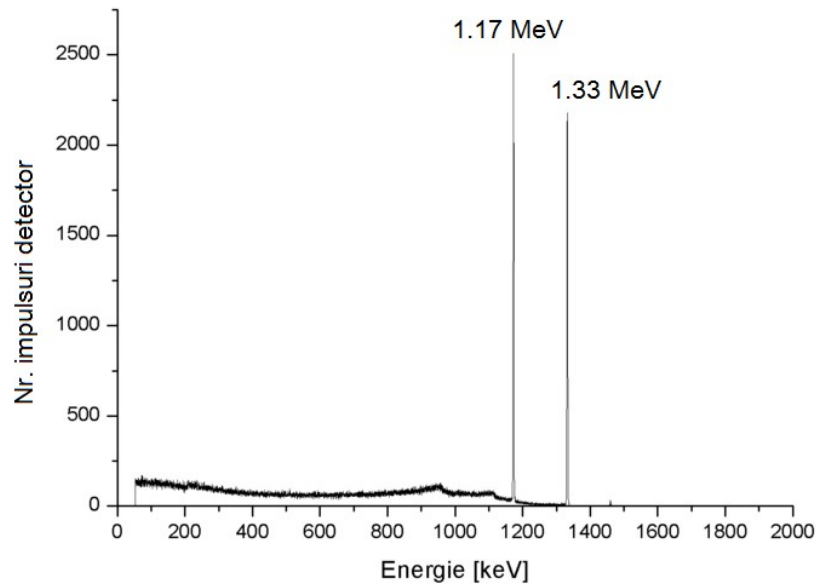
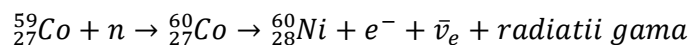


Fig. 9.57 Spectrul energetic al radiațiilor gama pentru izotopul Cobalt-60.

În interiorul nucleului atomic acționează două tipuri de forțe: forța de respingere dintre protoni de natură electrică Coulombiană și forța de atracție dintre nucleoni, care este de natură nucleară. Când cele două forțe sunt în echilibru, izotopul este stabil. Pentru nucleele atomice care conțin neutroni în exces, cele două forțe nu mai sunt în echilibru, iar izotopul este instabil și se dezintegrează spontan cu emisie de radiații. Un exemplu de reacție de dezintegrare nucleară este cel al izotopului de cobalt-60, care printr-o reacție de tip β produce izotopul stabil nichel-60.

Dezintegrarea izotopului cobalt-60 are loc prin transformarea unui neutron într-un proton, reacția nucleară fiind însoțită de emisia spontană a unui electron și a unei particule de masă extrem de mică și fără sarcină electrică, numită anti-neutrino. Această reacție nucleară produce o emisie de radiații gama, cu energii de 1,17 și 1,33 MeV, relația 9.25 și figura 9.57.

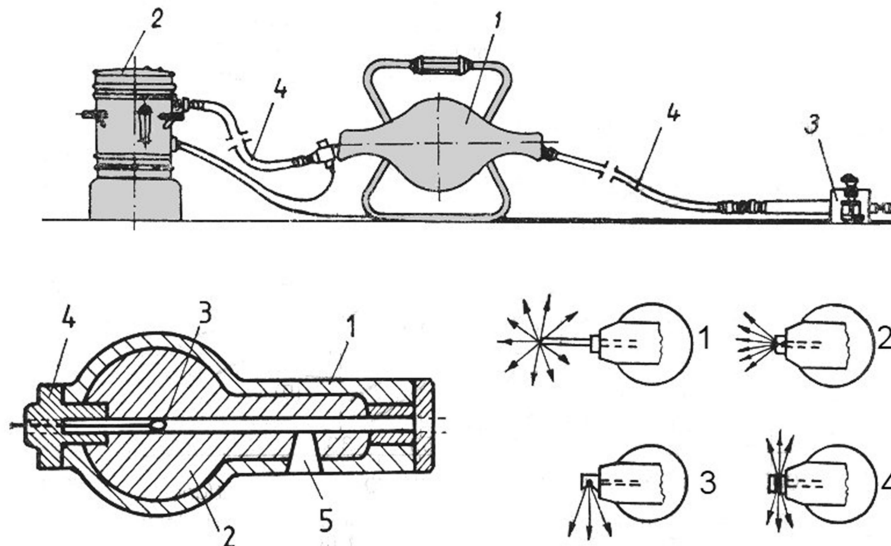


Avantajele utilizării în defectoscopie a radiațiilor gama comparativ cu radiațiile X, sunt:

- Nu este nevoie de sursă de alimentare cu curent;
- Nu este nevoie de circuit de răcire;
- Echipamentul este compact și ușor de transportat;
- Echipamentul este robust, fiabil;
- Spectrul de radiație este discret, efect de împrăștiere minim;
- Echipament ieftin;
- Radiația gama are capacitate de pătrundere foarte mare.

Dezavantajele radiațiilor gama comparativ cu radiațiile X, sunt:

- Calitatea imaginii radiografice mai slabă;
- Timpul de expunere este mai lung (afectând productivitatea);
- Sursele radioactive trebuie înlocuite periodic (în funcție de timpul de înjumătățire);
- Sursa radioactivă nu poate fi oprită;
- Sursa radioactivă trebuie manevrată de la distanță, figura 9.58;
- Măsuri speciale de protecție și securitatea muncii.



Componentele gama-defectoscopului sunt: 1-container, 2-dispozitiv de manipulare, 3-dispozitiv de iradiere, 4-tub flexibil de deplasare, 5-dispozitiv de semnalizare.

Dispozitivele de iradiere pot fi: 1) tri-direcțională, 2) frontală, 3) unidirecțională, 4) panoramică

Fig. 9.58 Examinarea cu radiații gama. Schița echipamentului utilizat.

În defectoscopia industrială se preferă utilizarea sistemelor bazate pe radiații gama, la examinarea structurilor sudate pe teren, unde nu există surse de curent. Ca și surse radioactive se folosesc izotopi, precum: Se-70, Yb-169, sau Ir-192. Utilizarea unor dispozitive de iradiere unidirecționale sunt utile pentru examinarea unei anumite zone a structurii sudate, prevenind efectul de retro-împrăștiere a radiațiilor gama și păstrând SNR în limite convenabile.

În tabelul 9.25 sunt prezentate valorile orientative ale factorilor de echivalență radiografică, din punct de vedere al atenuărilor radiațiilor penetrante, în funcție de material și caracteristicile de expunere la radiații. Practic, se determină grosimea echivalentă a unui material în raport cu un material de referință, pentru a obține același efect radiografic pe film. Grosimea echivalentă se obține prin multiplicarea grosimii materialului respectiv, cu factorul de echivalență radiografică.

Tab. 9.25 Factori de echivalență radiografică [118].

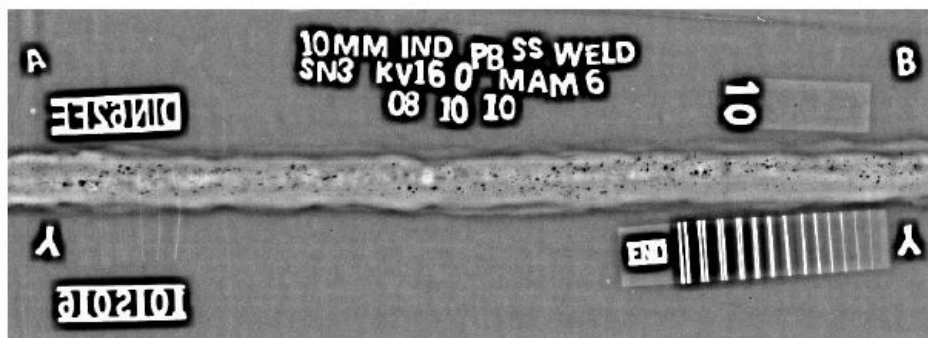
Material	Radiații X						Radiații gama			
	50 kV	100 kV	150 kV	220 kV	400 kV	1000 kV	Ir 192	Cs 137	Co 60	Ra
Magneziu	0,6	0,6	0,5	0,08						
Aluminiu	1,0	1,0	0,12	0,18			0,35	0,35	0,35	0,40
2024 Al	2,2	1,6	0,16	0,22			0,35	0,35	0,35	
Titan			0,45	0,35						
Oțel carbon		1,2	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
18-8 Oțel		1,2	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Cupru		1,8	1,6	1,4	1,4		1,1	1,1	1,1	1,1
Zinc			1,4	1,3	1,3		1,1	1,0	1,0	1,0
Alamă			1,4	1,3	1,3	1,2	1,1	1,1	1,1	1,1
Inconel X		1,6	1,4	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
Zirconiu			2,3	2,0		1,0				
Plumb			14	12		5,0	4,0	3,2	2,3	2,0

Exemplu: Pentru a examina o placă de cupru cu grosimea de 12 mm la 220 kV, se înmulțește grosimea plăcii de cupru de 12 mm x factorul de echivalență 1.4, obținând o grosime echivalentă de oțel de 17 mm. Condițiile de expunere se vor aplica conform examinării unei plăci de oțel carbon cu grosimea de 17 mm.

Aluminiul este considerat ca și metal de referință radiografică pentru examinare cu radiații X, utilizând tensiuni de 50 kV până la 100 kV, iar peste aceste valori este considerat oțelul carbon ca și referință, atât în domeniul radiațiilor X, cât și în domeniul radiațiilor gama. În figura 9.59 se poate observa diferența de contrast și sensibilitate, la examinarea cu raze gama (sursă Ir-192), respectiv cu raze X și film radiografic, pentru o probă din oțel cu 10 mm grosime.



Placă de oțel cu grosime de 10 mm, sursă radioactivă Ir-192 și ecran fluoroscopic.



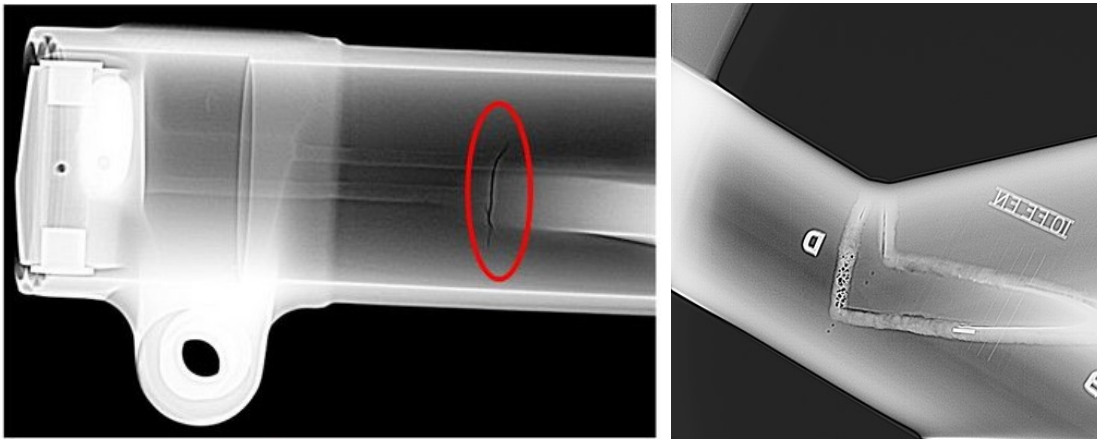
Placă de oțel cu grosime de 10 mm, radiații X 160 kV și film radiografic.

Fig. 9.59 Diferențe de sensibilitate și contrast la examinarea cu radiații gama și X a unei plăci din oțel carbon cu grosime de 10 mm [118].

Cantitatea de radiații emisă de o sursă radioactivă se exprimă în unități Curie și depinde de activitatea sursei, respectiv de timpul de expunere. Astfel, spre deosebire de examinarea cu radiații X, operatorul are mai puține variabile care trebuie corelate:

- Tipul sursei radioactive și dispozitivului de iradiere;
- Distanța sursă radioactivă-film radiografic (sau panou cu detectori digitali DDA);
- Tipul filmului (6 clase de calitate);
- Durata de expunere.

În figurile de mai jos, sunt prezentate câteva defecte depistate la examinare cu radiații penetrante, a unor componente care prezintă susceptibilitate ridicată de apariție a unor fisuri de oboseală, coroziune sau porozitate.



a) fisură în trenul de aterizare a unui avion b) porozitate în cusătura sudată, țevi
Fig. 9.60 Exemple de imagini radiografice obținute cu sistemul RayzorXPro, Vidisco [113].



Fig. 9.61 Fisuri vizibile la examinare RT-D a unui cazan sub presiune, Vidisco [113].

BIBLIOGRAFIE

1. Welding-Related Expenditures, Investments, and Productivity Measurement in U.S. Manufacturing, Construction, and Mining Industries, 2002.
2. ASM Handbook: Vol. 6: Welding, Brazing, and Soldering, ISBN 0-87170-377-7(V.1), ASM International, 1993.
3. Sindo Kou, Welding Metallurgy, 2nd Ed., John Wiley & Son Inc., ISBN 0-471-43491-4, 2003.
4. Ibrahim Khan, Welding Science and Technology, New Age International Ltd., Publishers, ISBN 978-81-224-2621-5, 2008.
5. J. F. Lancaster, Metallurgy of Welding, Abington Publishing, 6th Ed., ISBN 1 85573 428 1, 1999.
6. Grong, Øystein, Metallurgical Modelling of Welding 2nd Ed., Institute of Materials, ISBN 978-18-612-5036-0, 1997.
7. H. Cerjak, Mathematical Modelling of Weld Phenomena, Vol.4, Inst. Of Materials, London, 1998.
8. R. W. Fonda, R. A. Vandermeer, G. Spanos, Continuous Cooling Transformation (CCT) Diagrams for Advanced Navy Welding Consumables, Naval Research Laboratory, 1998.
9. Md.Ibrahim Khan, Welding Science and Technology, New Age International, ISBN 978-81-224-2621-5, 2007.
10. Kita-Shinagawa, Shinagawa-Ku, Arc Welding of Specific Steels and Cast Irons, 4th Ed. Kobe Steel, Tokyo, 2011.
11. Edward R. Bohnart, TIG Handbook for GTAW Gas Tungsten Arc Welding, Miller Electric Mfg. Company, 2002.
12. John Hicks, Welded design theory and practice, Abington Publishing, ISBN 1-85573-537-7, 2000.
13. P. Alexander, Plasma Physics, An Introduction to Laboratory, Space, and Fusion Plasmas, ISBN 978-3-642-10491-6, 2010.
14. H.K.D.H. Bhadeshia, Bainite in Steels, Transformations, Microstructure and Properties, 2nd Ed. ISBN 1-86125-112-2, Institute of Materials, 1992.
15. TRUMPF Co., Laser Technology <http://www.trumpf-laser.com/en/products/co2-lasers.html>
16. Staufer, H.; Rührnößl, M.; Miessbacher, G.: LaserHybrid Welding and LaserBrazing: State of the Art in Technology and Practice by the Examples of the Audi A8 and VW-Phaeton, http://www.fronius.com/cps/rde/xbcr/SID-86F858B7-4A66B591/fronius_usa/12_laserhybrid_laserloeten_gb.pdf
17. Graf, T.; Staufer, H.: LaserHybrid at Volkswagen. IIW-Doc. XII-1730-02.
18. Mickael Courtois, a.o. A new approach to compute multi-reflections of laser beam in a keyhole for heat transfer and fluid flow modelling in laser welding, Journal of Physics D: Applied Physics Vol. 46 Nr. 50.
19. ESAB Co., Submerged Arc Welding - Technical Handbook, 2014, <http://www.esab.com/de/de/support/upload/XA00136020-Submerged-Arc-welding-handbook.pdf>
20. MILLER Co., Submerged Arc Welding Consumables, <http://www.millerwelds.com/pdf/Submerged.pdf>
21. LINCOLN ELECTRIC Co., GMAW Welding Guide, Carbon, Low Alloy, and Stainless Steels and Aluminum, http://www.lincolnelectric.com/assets/global/Products/Consumable_MIGGMAWWires-SuperArc-SuperArcL-56/c4200.pdf
22. Heinz Hackl, Fronius International GmbH, Digitally Controlled GMA Power Sources, http://www.fronius.com/cps/rde/xbcr/SID-9B67C604-0D59F83A/fronius_usa/04_digital_geregelte_msg_stromquellen_gb.pdf
23. LINDE GAS Co., Shielding Gases, Development - Consulting - Applications, <http://www.Linde.de/Linde-Gas>.
24. M.Suban, J. Tusek, Dependence of melting rate in MIG/MAG welding on the type of shielding gas used, Journal of Materials Processing Technology 119 (2001).
25. FRONIUS Co., CMT: Cold Metal Transfer, http://www.digitalweld.co.nz/uploads/Product_Brochures/Fronius/CMT.pdf
26. A Study of Arc Force, Pool Depression and Weld Penetration During Gas Tungsten Arc Welding www.americanweldingsociety.org/wj/supplement/WJ_1993_08_s381.pdf

27. A. Berthier, TIG and A-TIG welding experimental investigations and comparison to simulation. Part 1: Identification of Marangoni effect, Science and Technology of Welding and Joining, vol.17 No. 8, 2012.
28. MILLER Co., Guidelines To Gas Tungsten Arc Welding (GTAW), <https://www.millerwelds.com/pdf/gtawbook.pdf>
29. K-TIG, <http://www.k-tig.com/wp-content/uploads/2013/03/K-TIG-Brochure.pdf>
30. T.W. Eagar, Electron Beam and Laser Beam Materials Processing in Japan, Welding Journal, 1986.
31. Pro-Beam K2000 EBW, <http://namrc.co.uk/work/research/welding/>, 2014.
32. A. Hershcovitch, Non-vacuum electron beam welding through a plasma window, Nuclear Instr. and Methods in Physics Research Sec. B: Beam Interactions with Materials and Atoms, Vol 241, 2005.
33. Dr. B. Hubert, Fascinating World of The Sheet Metals, TRUMPH Co.
34. Klas Weman , Welding processes handbook, Cambridge, Woodhead Publishing Ltd. UK, 2003.
35. FRONIUS, High-performance welding LaserHybrid, TimeTwin Digital, strip-wire, large-diameter wires, 2014.
36. Staufer, H.; Rührnöbl, M.; Miessbacher, G.: LaserHybrid Welding and LaserBrazing: State of the Art in Technology and Practice by the Examples of the Audi A8 and VW-Phaeton, Fronius International GmbH, Wels - Austria.
37. Jack A. Hamill , Peter Wirth , Laser Welding P/M For Automotive Applications, SAE International Cong.and Exposition Feb. 28 - March 3, 1994, Detroit, Michigan USA.
38. HYBRID LASER WELDING, <http://ionix.fi/en/technologies/laser-processing/hybrid-laser-welding/>
39. Jens Klæstrup Kristensen, State Of Art In Shipbuilding Applications Of Hybrid Laser-Arc Welding, NOLAMP 12 – Copenhagen, August 2009.
40. D. Deheleanu ș.a., Curs de ingineri sudori european/internațional EWE/IWE organizat de ASR. Suport curs, Timișoara, 2014.
41. Y Chen, F V Lawrence, C P L Barkan, J A Dantzig, Weld defect formation in rail thermite welds, DOI: 10.1243/0954409JRRT44, JRRT44, IMechE 2006.
42. Kiyoshi Nishioka, Kazutoshi Ichikawa, Progress in thermomechanical control of steel plates and their commercialization, Sci. Technol. Adv. Mater. 13 (2012).
43. 300 Bar High Strength Seamless Steel Gas Cylinders, European Industrial Gases Association, <http://www.dty.nl/bibliotheek/duikcilinders/300bar-cilinders.pdf>
44. G. Kaiser, G. Dunn T.W. Eagar, The Effect of Electrical Resistance on Nugget Formation During Spot Welding, Supplement To The Welding Journal, June, 1982.
45. Nicolae Joni, Traian Chevereșan, Cloos - Aplicații practice ale sudării electrice prin presiune, ROBCON SRL Timișoara, 2004.
46. Robert K. Nichols, High frequency welding - the process and applications, ThermoTool Corp. 1999.
47. John Wright Principles of high frequency induction tube welding, Electronic Heating Equipment, Inc.Sumner, Washington, <http://www.eheimpeders.com/uploads/TB1000.pdf>, 2014.
48. Aachen University, ISF - Welding and Joining Institute, Welding Course, 2005.
49. J. Devine, J. Walsh-Sonobond Ultrasonics Inc., R.Baer, E. Hetrick, R.Jahn, A. Krause, H. Mariam, L. Reatherford, S. Ward, D.Wilkosz-Ford Motor Company - Ultrasonic Welding of Aluminum Sheet
50. New thermoplastic composite design concepts and their automated manufacture, <http://www.jecomposites.com/news/composites-news/new-thermoplastic-composite-design-concepts-and-their-automated-manufacture>, JEC Magazine no. 58, 2010.
51. H. K. D. H. Bhadeshia, Friction Stir Welding, <http://www.msm.cam.ac.uk/phase-trans/2003/FSW/aaa.html>, 2015.
52. R.S. Mishra, Z.Y. Ma, Friction stir welding and processing, Materials Science and Engineering R 50 (2005) 1–78.
53. MTI Welding Technologies, Inc., 2015. http://www.mtiwelding.com/files/MTI_Friction_Welding_Brochure.pdf
54. J.Hu, H.L. Tsail, International Journal of Heat and Mass Transfer 50 (2007).
55. Dan Nauman, Forge Welding, 2015.
56. Yamato M. ,Masahiko O., Takeshi H. Erik C., Shigeru I., Explosive Welding of Light Weight Metal Sheets, 8th International LS-DYNA Users Conference.

57. Kamila Zdrodowska¹, Kwiryn Wojsyk², Mirosław Szala, The Microstructural Properties of Explosion, Welded Ni/Ti Joint, *Advances in Science and Technology, Research Journal*, Vol. 8, No. 22, June 2014, pp. 71–74, DOI: 10.12913/22998624.1105174.
58. R. M. Miranda, B. Tomás, T. G. Santos, N. Fernandes, Magnetic pulse welding on the cutting edge of industrial applications, *Soldag. Insp. São Paulo*, Vol. 19, N°. 01, p.069-081, Jan/Mar 2014.
59. EAA Aluminium Automotive Manual, Joining ,Solid state welding, 2015, http://www.european-aluminium.eu/wp-content/uploads/2015/01/7-Solid-state-welding_2015.pdf.
60. ESAB Co.,Wear part and spare part catalog for oxyfuel mechanized cutting, http://esabsp.esab.net/AutogenKatalog_E.pdf
61. Laser fusion cutting, ACSYS - Lasertechnik, <http://www.acsys.de/en/laser-cutting/laser-fusion-cutting.html>
62. GCE - Echipamente autogene. Sisteme de gaz. Ediția 2011, <http://www.rebels-grup.ro/pdfuri/gce.pdf>
63. Laser Cutting - <http://www.resonetics.com/pages/capability-cutting.php>
64. SSAB, Welding Hardox and Weldox, <http://www.ssab.com>, 2016.
65. HYPER THERM INC., Plasma Cutting - The History of Plasma Cutting, <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=1061>
66. Daniel Austin, Looking Inside the Waterjet Cutting Head, *Canadian Industrial Machinery* October, 2013, <http://www.cimindustry.com/article/formingfabricating/looking-inside-the-waterjet-cutting-head>
67. Paul L. Miller, The Mechanisms and Parameters Of Abrasive Waterjet (AWJ) Cutting Of High-Explosive Projectiles, Technical Report, 1992.
68. ESAB Co, Process Analysis of Laser, Plasma, and Waterjet Cutting &Marking of Stainless Steel Sheet, Martie 2014, <http://awo.aws.org/wp-content/uploads/2014/stainlessconference/DeFalco-ProcessAnalysisofLaserPlasmaandWaterjetCuttingMarkingofStainlessSteelSheet.pdf>.
69. Daniela Ionescu, Tehnologia de fabricare a cablajelor imprimate fără plumb, Univ.Tehnică Gh.Asachi Iași, 2015.
70. V.Micloși, Time evolution of the fundamental concepts on a prime importance issue in welding: hydrogen assisted cracking, *SUDURA* 2/2012.
71. OERLIKON Co., An Introduction to Brazing. Fundamentals. Materials Processing.
72. IPSEN Co.,Vacuum aluminium brazing, <http://www.ipsenusa.com/Documents/Ipsen-USA/Product-Brochures/AluminumBrazing.pdf> , 2015.
73. Craig Moller and Jim Grann, Vacuum Aluminum Brazing - What Matters Most, Ipsen Incorporated, Cherry Valley, Illinois USA, 2015.
74. FRONIUS, MIG Brazing, http://www.fronius.com/cps/rde/xbcr/SID-0C7CFB7A-9D02CD5B/fronius_usa/13_mig_loeten_gb.pdf
75. MIG Brazing, <http://www.mig-welding.co.uk/cast-iron.htm>
76. Flame Spray Technologies, <http://www.fst.nl/about-thermal-spray-process/>
77. Fiz. Jumate N., Dr.Ing. Bicsak E., Ing. Bodea M., Cristalizarea la încălzire a straturilor nanocristaline din aliaje NiCrFeSiBC, Conf.Int.de Sudură, Timișoara 2001.
78. N. Jumate, E.Bicsak, M. Bodea, Transformările la încălzire a straturilor din fontă depuse cu jet de plasmă, Conf.Int.de Sudură, Cluj 2001.
79. Thermal spraying, <http://www.coating-ball.com/index.php?page=high-velocity-spray>
80. <http://www.hvaf.com/>
81. OERLIKON METCO, Atmospheric Plasma Spray Solutions, <http://www.oerlikon.com/metco/en/products-services/coating-equipment/thermal-spray/processes/atmospheric-plasma/>
82. OERLIKON METCO, Controlled Atmosphere Plasma Spray (ChamPro™), <http://www.oerlikon.com/metco/en/products-services/coating-equipment/thermal-spray/processes/controlled-atmospheric-plasma/>
83. B. Zorc, M. Imamović, A. Nagode, A. Stoić, B. Kosec, I. Samardžić, L. Kosec, Effect of Nonmetallic Inclusions on Steel Welds Metal Hot Cracking, *METALURGIJA* 53 (2014).
84. Stephen Birch, What is the difference between the various Carbon Equivalent Formulae used in relation to hydrogen cracking, TWI web site: <http://www.twi-global.com/technical->

- [knowledge/faqs/material-faqs/faq-what-is-the-difference-between-the-various-carbon-equivalent-formulae-used-in-relation-to-hydrogen-cracking/](#)
85. EWF, Pre-heating temperature for butt welding, Technical Bulletin, http://www.ewf.be/media/documentosDocs/doc_71_technical_sheet_-_pre-heating_temperature_for_butt_welding.pdf, 2015.
 86. Dip.-Ing. Marcus von Buseh, Germanischer Lloyd AG, Preheating in Welding Technology, http://e-shipyard.net/attachments/article/90/Preheating_nonstop_02-2010.pdf, no.2/2010.
 87. ProHeat™35 Weld Preheating and Stress Relieving, http://www.millerwelds.com/pdf/spec_sheets/IN11-0.pdf, June 2013.
 88. Pierre-Jean CUNAT, Working with Stainless Steels, Working with stainless steels, 2nd Edition, 2008, ISBN EDP Sciences 978-2-7598-0375-0. Published by EDP Science, http://www.euro-inox.org/pdf/map/Working_with_Stainless_Steel_EN.pdf
 89. Structural Integrity Services, SINTEC, Technology and Equipment for Ultrasonic Impact Treatment, <http://www.sintes.ca/>
 90. SONATS, Ultrasonic Needle Peening, <http://www.sonats-et.com/>
 91. M. Consonni, C. Fun Wee, C. Schneider, Manufacturing of welded joints with realistic defects, NDT 2011 - 50th Annual Conference of the British Institute of Non-Destructive Testing, 13-15 Sept. 2011. Telford, UK.
 92. SSAB Co, TECHSUPPORT No.47, Avoidance of discontinuities in the joint, www.ssab.com
 93. Welding Inspection Handbook, Revision 1, Bechtel Power Corporation, 1984.
 94. KOBE STEEL Ltd, Weld Imperfections and Preventive Measures, 4th Ed.
 95. DIN EN ISO 6520-1, Welding and allied processes – Classification of geometric imperfections in metallic materials – Part 1: Fusion welding (EN ISO 6520-1:2007).
 96. P. S. Wei, Senior Member, IEEE, K. C. Chuang, J. S. Ku, and T. DebRoy, Mechanisms of Spiking and humping in keyhole welding, IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, Vol. 2, No. 3, March 2012.
 97. Voicu Ionel Safta, Voicu Ioan Safta, Defectoscopy Nedistructivă Industrială, Ed. Sudura Timișoara, ISBN 973-99425--6-3, 2001.
 98. [Magnetic Particle Testing](#) by AltaVista Solutions, <http://altavistasolutions.com>, 2015.
 99. TWI, Nondestructive testing, Magnetic Particle Inspection, <http://www.twi-global.com/capabilities/integrity-management/non-destructive-testing/>
 100. OLYMPUS, Pipeline Surface Inspection Using Eddy Current Array Technology, <http://www.olympus-ims.com/es/applications/stress-corrosion-crack-detection-pipelines-eddy-current-array/>
 101. FLIR Thermal Imaging Cameras, Catalog, 2015.
 102. Zhili Feng (PI), HsinWang, Wei Zhang, Online Weld Quality NDE & Control with IR Thermography, Oak Ridge National Laboratory, 2010.
 103. Patrik BROBERG, Anna RUNNEMALM, Detection of Surface Cracks in Welds using Active Thermography, 18th World Conference on Nondestructive Testing, 2012, Durban, South Africa.
 104. L. Boțilă, A. Murariu, A. Cazacu, C. Ciucă – Applications of infrared thermography in welding and nondestructive examination of materials, SUDURA, Romanian Welding Society's review, Year XXI, No.1/2011, pp.6-13, ISSN 1453-0384, Sudura Publishing House, Timisoara, Romania, 2011.
 105. Dehelean, D., Safta, V., Cojocaru R., Hälker, T., Ciucă, C.: Monitoring the quality of friction stir welded joints by infrared thermography. „Welding in the World”. Vol. 52 (2008) n. SPEC. ISS.
 106. Murariu, A., Bîrdeanu, V., Cojocaru, R., Safta, V., Dehelean, D., Boțilă, L., Ciucă, C.: Application of Thermography in Materials Science and Engineering, Chapter in the book “Infrared Thermography”, pag.27-52. Available at <http://www.intechopen.com/books/infrared-thermography>. ISBN: 978-953-51-0242-7, InTech, March, 2012.
 107. OLYMPUS, Pipeline Process Pipe Stress Corrosion Cracking Inspection, <http://www.olympus-ims.com/en/eca-solutions/eca-pipe-inspection/>, 2015.
 108. OLYMPUS, Ultrasonic Weld Inspection Solutions, <http://www.olympus-ims.com/en/resources/>
 109. SIEMENS, Industrial X-ray for Nondestructive Testing, Overview of X-ray Technology and Competence offered by Corporate Technology, 2015.

110. INDUSTREX Films, Film Types and Features, Carestream Co., 2014,
https://www.carestream.com/ndt-manualProcessing_techData_ti2643.pdf
111. Industrial Radiography, Rev.3 - 2004, IE-NDT LTD, UNIT C, Heath Farm, Chipping Norton, Oxford OX7 4BN, England, http://www.emarques.com.br/dbimg/pdf/85_115.pdf
112. Duplex IQI EN462-5 /ASTM E2002-98 for industrial NDT radiography, Computerized Information Technology Ltd., [http://www.cituk-online.com/acatalog/Duplex IQI EN 462-5 ASTM 2002-98.pdf](http://www.cituk-online.com/acatalog/Duplex_IQI_EN_462-5_ASTM_2002-98.pdf)
113. VIDISCO, NDT X-ray Gallery,
http://www.vidisco.com/ndt_solutions/ndt_info_center/ndt_x_ray_gallery/Shipyards
114. Uwe ZSCHERPEL, Uwe EWERT, Klaus BAVENDIEK, Mirko JECHOW, Strategies for Film Replacement in Radiography -Approaches Used in the New Standards, BAM Federal Institute for Materials Research and Testing, D-12200 Berlin, Germany.
115. Uwe EWERT, Uwe ZSCHERPEL, Mirko JECHOW, Essential Parameters and Conditions for Optimum Image Quality in Digital Radiology, 18th World Conference on Nondestructive Testing, 16-20 April 2012, Durban, South Africa.
116. Design, Development and Optimization of a Low Cost System for Digital Industrial Radiology, IAEA RADIATION TECHNOLOGY REPORTS No. 2., Intern. Atomic Energy Agency, Vienna, 2013.
117. Uwe Ewert, Uwe Zscherpel, BAM Federal Institute for Materials Research and Testing, Minimum Requirements for Digital Radiography Equipment and Measurement Procedures by Different Industries and Standard Organizations, ECNDT, Praga 2014.
118. KODAK, Richard A. Quinn, Radiography in Modern Industry, 4th Edition, 2015,
<http://www.kodak.com/eknec/documents/87/0900688a802b3c87/Radiography-in-Modern-Industry.pdf>.

ANEXA 1. Codificarea numerică a procedeelor de sudare, SR ISO 4063-2011.

1	11	Sudare cu arc electric
		Sudarea cu arc electric fără gaz de protecție
	111	Sudarea cu electrod învelit
	112	Sudarea cu electrod învelit prin procedeul gravity-arc
	113	Sudarea cu vergea metalică
	114	Sudarea cu electrod din sârmă tubulară și cu miez de flux
	115	Sudarea cu sârmă învelită
	118	Sudarea prin procedeul firecracker
	12	Sudarea sub strat de flux
	121	Sudarea sub strat de flux cu electrod de sârmă
	122	Sudarea sub strat de flux cu electrod sub formă de bandă
	13	Sudarea în atmosferă protectoare
	131	Sudarea MIG (Metal Inert Gas)
	135	Sudarea MAG (Metal Active Gas)
	136	Sudarea cu electrod de sârmă tubulară și miez de flux în atmosferă protectoare activă
14	Sudarea în atmosferă protectoare și cu electrod neconsumabil	
141	Sudarea TIG (Tungsten Inert Gas)	
149	Sudarea în hidrogen atomic (Atomic-hydrogen welding)	
15	Sudarea în arc de plasmă	
18	Alte procedee de sudare cu arc electric	
181	Sudarea cu electrod de carbon	
185	Sudarea cu arc electric rotitor	
2		Sudarea prin rezistență electrică
21	Sudarea în puncte	
22	Sudarea în linie	
221	Sudarea în linie prin suprapunere	
225	Sudarea în linie cu bandă	
23	Sudarea în relief	
24	Sudarea cu topire intermediară	
25	Sudarea prin presiune și rezistență electrică cap la cap	
29	Alte procedee de sudare prin rezistență electrică	
291	Sudarea cu curenți de înaltă frecvență	
3		Sudarea cu gaze
31	Sudarea oxi-gaz	
311	Sudarea oxi-acetilenică	
312	Sudarea oxi-propan	
313	Sudarea oxi-hidrogen	
32	Sudarea cu aer-gaz combustibil	
321	Sudarea cu aer și acetilenă	
322	Sudarea cu aer și propan	
4		Sudarea prin presiune
41	Sudarea cu ultrasunete	
42	Sudarea prin frecare	
43	Sudarea prin forjare	
44	Sudarea prin energie mecanică ridicată	
441	Sudarea prin explozie	
45	Sudarea prin difuzie	
47	Sudarea prin presiune cu gaz	
48	Sudarea prin presiune la rece	

ANEXA 1. continuare

7	Alte procedee de sudare
71	Sudarea cu termit
72	Sudarea în baie de zgură
73	Sudarea electro-gaz
74	Sudarea prin inducție
75	Sudarea prin radiație luminoasă
751	Sudarea cu fascicol laser
752	Sudarea arc-image
753	Sudarea cu radiație în infraroșu
76	Sudarea cu fascicol de electroni
77	Sudarea prin percuție
78	Sudarea bolțurilor
781	Sudarea bolțurilor cu energie electrică înmagazinată
782	Sudarea bolțurilor prin rezistență electrică

CUPRINS

I. SUDAREA MATERIALELOR ÎN SEC. XXI	
1.1 Impactul sudării materialelor asupra economiei	3
1.2 Scurt istoric al dezvoltării procedeelelor de sudare	5
1.3 Aplicații ale sudării materialelor pentru principalele sectoare industriale	6
1.4 Avantaje și dezavantaje la sudarea materialelor	7
II. DEFINIȚII ȘI NOȚIUNI DE BAZĂ UTILIZATE LA SUDARE	
2.1 Clasificarea îmbinărilor sudate	10
2.2 Rostul de sudare	15
2.2.1 Rosturile îmbinărilor sudate cap la cap	16
2.2.2 Rosturile îmbinărilor sudate în colț	17
2.2.3 Rosturile îmbinărilor sudate prin suprapunere	19
2.3 Gradul de diluție	21
2.4 Alegerea formei rosturilor de sudare	21
2.4.1 Criteriul constructiv	22
2.4.2 Criteriul metalurgic	22
2.4.3 Criteriul tehnologic	23
2.4.4 Criteriul de exploatare	24
2.4.5 Criteriul economic	24
2.4.6 Concluzii privind alegerea rosturilor de sudare	24
2.5 Reprezentarea îmbinărilor sudate pe desenele tehnice	25
III. BAZELE FIZICO-METALURGICE ALE SUDĂRII MATERIALELOR	
3.1 Surse termice pentru sudare	29
3.1.1 Arcul electric	31
3.1.2 Plasma termică	38
3.1.3 Fascicolul de electroni	42
3.1.4 Radiația laser	45
3.1.5 Baia de zgură	49
3.1.6 Reacții chimice exoterme	50
3.2 Aspecte metalurgice la sudarea prin topire	53
IV PROCEDURE DE SUDARE PRIN TOPIRE	
4.1 Sudarea cu arc electric	60
4.1.1 Sudarea cu electrod învelit	60
4.1.2 Sudarea sub strat de flux	74
4.1.3 Sudarea MIG/MAG în atmosferă de gaze protectoare	82
4.1.4 Sudarea cu sârmă tubulară	105
4.1.5 Sudarea WIG	107
4.1.6 Sudarea în hidrogen atomic	115
4.1.7 Sudarea în arc de plasmă	116
4.2 Sudarea cu fascicol de electroni	122
4.3 Sudarea cu radiație LASER	127
4.4 Sudarea aluminotermică	133
4.5 Sudarea în baie de zgură	136
4.6 Sudarea cu flacără oxiacetilenică	138

V. SUDAREA ÎN STARE SOLIDĂ	
5.1 Sudarea prin rezistență electrică	142
5.1.1 Sudarea în puncte	142
5.1.2 Sudarea în linie	152
5.1.3 Sudarea în relief	154
5.1.4 Sudarea cap la cap prin presiune și rezistență electrică	155
5.1.5 Sudarea cu topire intermediară	157
5.1.6 Sudarea cu curenți de înaltă frecvență	159
5.1.7 Sudarea bolțurilor	162
5.2 Sudarea prin presiune	165
5.2.1 Sudarea cu ultrasunete	166
5.2.2 Sudarea prin frecare	169
5.2.3 Sudarea prin forjare	174
5.2.4 Sudarea prin explozie	175
5.2.5 Sudarea prin impuls electromagnetic	177
VI. SUDABILITATEA MATERIALELOR	
6.1 Principii generale de determinare a sudabilității	179
6.2 Metode indirecte de determinare a sudabilității	180
6.3 Temperatura de preîncălzire la sudare	189
VII. TRATAMENTE TERMICE APLICATE PIESELOR SUDATE	
7.1 Tratamente termice anterioare sudării	195
7.1.1 Recoacerea pentru detensionare	195
7.1.2 Recoacerea pentru recristalizare fără transformare de fază	196
7.1.3 Recoacerea de înmuiere	196
7.1.4 Recoacerea pentru regenerare	196
7.1.5 Recoacerea de normalizare	197
7.1.6 Călire pentru punerea în soluție	198
7.2 Tratamente termice concomitente cu sudarea	199
7.3 Tratamente termice post-sudare	201
7.3.1 Tratamentul prin impact cu ultrasunete	201
7.3.2 Tratamente termice aplicate oțelurilor carbon și slab aliate	203
7.3.3 Tratamente termice aplicate oțelurilor aliate cu structură martensitică în ZIT	204
7.3.4 Tratamente termice aplicate oțelurilor înalt aliate	204
VIII. PROCEDEE CONEXE SUDĂRII	
8.1 Tăierea termică	207
8.1.1 Tăierea cu flacără	208
8.1.2 Tăierea cu flacără și cu pulbere metalică	216
8.1.3 Tăierea prin topire cu laser	217
8.1.4 Tăierea cu laser prin vaporizare	218
8.1.5 Tăierea cu plasmă	219
8.2 Tăierea cu jet de apă abraziv	226
8.3 Lipirea	231
8.3.1 Lipirea moale	232
8.3.2 Brazarea	237
8.4 Metalizarea termică	246
8.4.1 Pulverizarea cu flacără	247

8.4.2 Pulverizarea cu flacără și topire intermediară	248
8.4.3 Pulverizare cu flacără HVOF	249
8.4.4 Pulverizare cu flacără HVAF	250
8.4.5 Pulverizarea în arc electric	252
8.4.6 Pulverizarea în jet de plasmă	253
IX. IMPERFEȚIUNI DE SUDARE ȘI CONTROL NEDISTRUCTIV	
9.1 Clasificarea imperfecțiunilor de sudare	260
9.2 Metode de control nedistructiv	279
9.2.1 Metoda de control nedistructiv cu lichide penetrante (PT)	281
9.2.2 Metoda de control nedistructiv cu flux magnetic (MT)	283
9.2.3 Metoda de examinare cu ajutorul curenților turbionari (ET)	288
9.2.4 Metoda de control nedistructiv pe baza emisiei acustice (AT)	290
9.2.5 Metoda de control nedistructiv cu radiații în infraroșu (TT)	291
9.2.6 Metoda de control nedistructiv cu ultrasunete (UT)	294
9.2.7 Examinarea cu radiații penetrante (RT)	307
BIBLIOGRAFIE	324