

DEZVOLTAREA ALIAJELOR DE BRAZARE AMORFE PE BAZĂ DE CUPRU UTILIZATE PENTRU ÎMBINĂRI Cu-Cu/INOX

Teză destinată obținerii
titlului științific de doctor inginer
la
Universitatea Politehnica Timișoara
în domeniul Ingineria Materialelor
de către

ing. Cristian Stoian

Conducător științific: prof.univ.dr.ing. Viorel-Aurel Șerban
Referenți științifici: prof.univ.dr.ing. Ioan Vida-Simiti
prof.univ.dr.ing. Teodor Machedon Pisu
prof.univ.dr.ing. Ion Mitelea

Ziua susținerii tezei: 10.12.2014

Seriile Teze de doctorat ale UPT sunt:

- | | |
|---|--|
| 1. Automatică | 9. Inginerie Mecanică |
| 2. Chimie | 10. Știința Calculatoarelor |
| 3. Energetică | 11. Știința și Ingineria Materialelor |
| 4. Ingineria Chimică | 12. Ingineria sistemelor |
| 5. Inginerie Civilă | 13. Inginerie energetică |
| 6. Inginerie Electrică | 14. Calculatoare și tehnologia informației |
| 7. Inginerie Electronică și Telecomunicații | 15. Ingineria materialelor |
| 8. Inginerie Industrială | 16. Inginerie și Management |

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

Copyright © Editura Politehnica – Timișoara, 2013

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

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

Cuvânt înainte

Teza de doctorat a fost elaborată pe parcursul activității mele de cercetare științifică în cadrul Departamentului de Ingineria Materialelor și Fabricației de la Universitatea Politehnică Timișoara. Studiile teoretice și cercetările experimentale cuprinse în lucrare s-au concretizat prin dezvoltarea unor noi aliaje de brazare cu structură amorfă care deschid noi oportunități privind îmbinarea prin brazare a oțelurilor înalt aliate și aliajelor neferoase, în vederea obținerii unor îmbinări similare și disimilare cu proprietăți de exploatare deosebite.

Mulțumiri deosebite se cuvin conducătorului de doctorat, prof.dr.ing. Viorel-Aurel Șerban, sub a cărui îndrumare s-au pus bazele temei de cercetare, s-au conturat soluțiile de rezolvare a problematicii de cercetare și s-au sistematizat datele, informațiile și rezultatele experimentale în vederea elaborării tezei.

Autorul aduce mulțumiri și membrilor comisiei de îndrumare pentru sprijinul acordat în mai multe faze tehnico-științifice și redacționale ale lucrării.

Timișoara, Decembrie 2014

ing. Cristian Stoian

Stoian, Cristian

Dezvoltarea aliajelor de brazare amorfe pe bază de cupru utilizate pentru îmbinări Cu-Cu/INOX

Teze de doctorat ale UPT, Seria 15, Nr. 14, Editura Politehnica, 2014, 131 pagini, 141 figuri, 22 tabele.

ISSN: 2285-1720

ISSN-L: 2285-1720

ISSN: 978-606-554-887-9

Cuvinte cheie: brazare, aliaj amorf, oțel inoxidabil, cupru

Rezumat, Stadiul actual al dezvoltării tehnologice impune extinderea domeniului de aplicare al brazării oțelurilor înalt aliate și a aliajelor neferoase pe bază de Cu, Al, Ni, Co, Ti, în industrii de vârf, cum ar fi: aero-spațială, energetică, chimică, etc. Având în vedere caracteristicile pe care trebuie să le îndeplinească îmbinările lipite (în special rezistență mecanică, rezistență la coroziune și ductilitate ridicate), se impune dezvoltarea unor aliaje de lipire și a unor procedee de brazare care să asigure îmbinării lipite caracteristicile de exploatare dorite. Dacă până nu demult rolul brazării a fost limitat la realizarea de îmbinări supuse la eforturi reduse, în care aliajul de lipire a fost privit mai mult ca un adeziv, tehnica actuală, bazată pe cunoașterea fenomenelor de bază ale proceselor de îmbinare prin lipire, dispunând de echipamente moderne (cuptoare cu atmosferă reducătoare sau vid, instalații CIF, etc.), permite realizarea unor repere din metale similare sau disimilare cu caracteristici ridicate de exploatare.

Toate aliajele de brazare convenționale cu structură cristalină necesită utilizarea fluxurilor de lipire care au rolul pe de o parte de a curăți suprafețele componentelor și de a le proteja pe durata operației de lipire, iar pe de altă parte de a asigura o bună întindere și umectare aliajului de brazare. Dezavantajul utilizării fluxurilor de lipire constă în faptul că există posibilitatea corodării materialului de bază sau a îndepărtării parțiale a acestuia din rostul capilar de către aliajul de lipire, cu efect negativ asupra omogenității structurale a îmbinării brazate. În ultimii ani s-au dezvoltat aliaje de brazare cu structură amorfă, în special pe bază de Ni sau Co, care se produc la nivel industrial sub formă de benzi ductile. Folosite ca și material de adaos la brazarea oțelurilor inoxidabile și a superaliajelor au condus la o creștere a rezistenței mecanice și în special a rezistenței la coroziune a îmbinării lipite [10, 12, 58 60, 66, 73]. Un dezavantaj al acestor aliaje îl reprezintă temperatura ridicată de topire, drept pentru care cercetările actuale se concentrează pe obținerea de aliaje de brazare amorfe cu temperaturi de topire mai mici, cum ar fi de exemplu cele pe bază de cupru.

În acest context, scopul lucrării îl reprezintă dezvoltarea unor aliaje de brazare cu structură amorfă pe bază de cupru, autofluxante, cu temperatură de topire scăzută și care să poată fi utilizate la brazarea cuprului, a aliajelor sale și a oțelurilor inoxidabile.

CUPRINS

1 GENERALITĂȚI PRIVIND PROCESUL DE BRAZARE	7
1.1 Bazele teoretice ale procesului de brazare	7
1.2 Metode și tehnologii de brazare ale aliajelor pe bază de cupru și oțeluri inoxidabile	14
1.2.1 Tehnologia de brazare	14
1.2.2 Tipuri de îmbinări lipite	16
1.2.3 Metode de brazare ale oțelurilor inoxidabile și a aliajelor cuprului....	18
1.3 Materiale de adaos la brazarea oțelurilor inoxidabile și a aliajelor pe bază de cupru	32
1.3.1 Aliaje de lipire.....	32
1.3.2 Fluxuri de lipire.....	36
2 ALIAJE DE BRAZARE CU STRUCTURĂ AMORFĂ	38
2.1 Aliaje amorfe	38
2.2 Familii de aliaje de brazare amorfe	42
3 SCOPUL ȘI OBIECTIVELE TEZEI	47
4 ELABORAREA ALIAJULUI AMORF DE BRAZARE PE BAZĂ DE CUPRU 49	
4.1 Elaborarea aliajului primar	49
4.2 Elaborarea aliajului amorf sub formă de benzi	54
4.3 Caracterizarea structurală a aliajului de brazare	58
5 BRAZAREA CUPRULUI ȘI OȚELURILOR INOXIDABILE CU ALIAJ DE BRAZARE AMORF PE BAZĂ DE CUPRU	63
5.1 Brazarea prin rezistență electrică.....	63
5.1.1 Tehnologia pentru brazare electrică prin presiune în puncte a platbenzilor de cupru.....	65
5.1.2 Caracterizarea îmbinărilor brazate cupru-cupru.....	69
5.1.2.1 Analiza structurală.....	70
5.1.2.2 Încercări mecanice	73
5.1.3 Tehnologia pentru brazare electrică prin presiune în puncte a platbenzilor din oțel inoxidabil	76
5.1.4 Caracterizarea îmbinărilor brazate inox-inox.....	77
5.1.4.1 Analiza structurală.....	77
5.1.4.2 Încercări mecanice	79
5.1.5 Tehnologia pentru brazare electrică prin presiune în puncte a platbenzilor din oțel inoxidabil și cupru	80
5.1.6 Caracterizarea îmbinărilor brazate inox-cupru.....	81
5.1.6.1 Analiza structurală.....	81
5.1.6.2 Încercări mecanice	83
5.2 Brazare prin inducție	85
5.2.1 Tehnologia pentru brazare prin inducție	87
5.2.2 Caracterizarea structurală a îmbinărilor brazate	91

6 MODELAREA MATEMATICĂ A PROCESULUI DE BRAZARE PRIN REZISTENȚĂ UTILIZÂND METODA EXPERIMENTULUI FACTORIAL..	95
6.1 Modelarea matematică prin experiment factorial complet general a procesului de brazare prin rezistențăCu-Cu cu aliaj amorf pe bază de Cu	98
6.2 Modelarea matematica prin experiment factorial complet general a procesului de brazare prin rezistență Cu-Inox cu aliaj amorf pe bază de Cu	107
6.3 Modelarea matematica prin experiment factorial complet general a procesului de brazare Inox-Inox cu aliaj amorf pe bază de Cu	114
7 CONCLUZII FINALE ȘI CONTRIBUȚII ORIGINALE	122
7.1 Concluzii finale	122
7.2 Contribuții originale.....	124
7.3Probleme de viitor	125
 BIBLIOGRAFIE	 126

1. Generalități privind procesul de brazare

1.1. Bazele teoretice ale procesului de brazare

Brazarea sau lipirea tare este o operație prin care se realizează o îmbinare nedemontabilă, eterogenă, a unor piese metalice, prin intermediul unui aliaj de lipire topit, ce are temperatura de topire mai mare de 450°C. Aliajul de lipire topit umectează materialul de bază solid, în prezența unui flux de lipire, gaz de protecție sau vacuum. Temperatura de lipire este întotdeauna mai mică decât temperatura de topire a materialului de bază, de aceea, față de sudare, brazarea este considerată un procedeu "rece".

Procesul de brazare presupune parcurgerea unui ciclu termic (figura 1.1), care reprezintă succesiunea în timp a valorilor temperaturii materialului de adaos (aliajul de lipire), caracterizând încălzirea, menținerea și răcirea în timpul procesului.

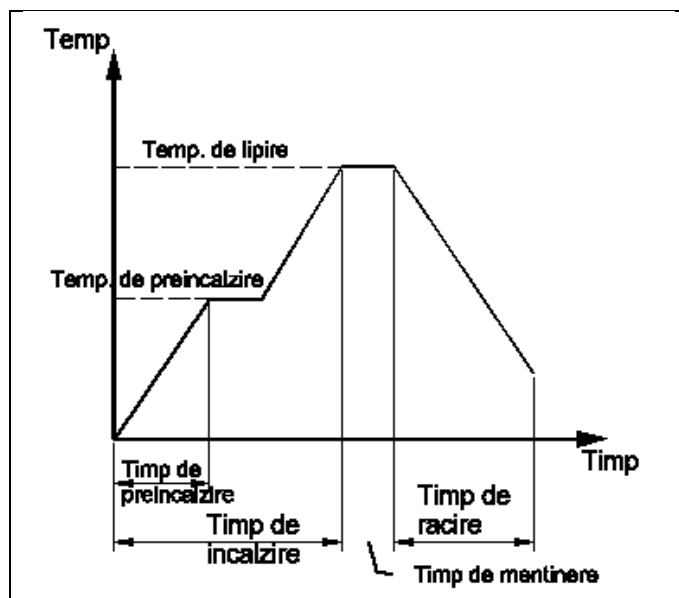


Fig. 1.1. Ciclul termic de lipire [10]

Desfășurarea procesului de brazare este schițată în figura 1.2. Așa cum se poate observa, în vid, suprafața metalului oferă forțe de legătură nesaturate (fig 1.2.a). Când metalul este expus aerului, molecule de gaz (în special cele de oxigen) se atașează de suprafața metalului datorită forțelor de legătură nesaturate (fig 1.2.b). Aceste molecule de gaz pot reacționa cu suprafața metalului formând un strat de oxizi. Prin saturarea forțelor de legătură se pierde reactivitatea suprafeței metalice și stratul de oxid format ar împiedica un contact intim între aliajul de lipire și suprafața metalului. Pentru a îndepărta acest strat se folosesc, la lipirea în

8 Generalități privind procesul de brazare - 1

atmosferă, decapanți care umectează oxizii, îi îndepărtează chimic și împiedică formarea unui nou strat de oxid (fig 1.2c și 1.2d).

Dacă pe o suprafață astfel pregătită este pusă o picătură de topitură aceasta poate umecta suprafața, îndepărtând de pe acea suprafață decapantul. Datorită saturării forțelor de legătură libere, se creează o legătură adezivă (fig. 1.2e). Ca urmare a agitației termice a atomilor, la suprafața de separație se produce o pătrundere reciprocă între atomii materialului de bază și cei ai topiturii (fenomen denumit difuzie), ce duce la o creștere a aderenței (fig. 1.2.f). La răcire topitura se solidifică și coeziunea crește.

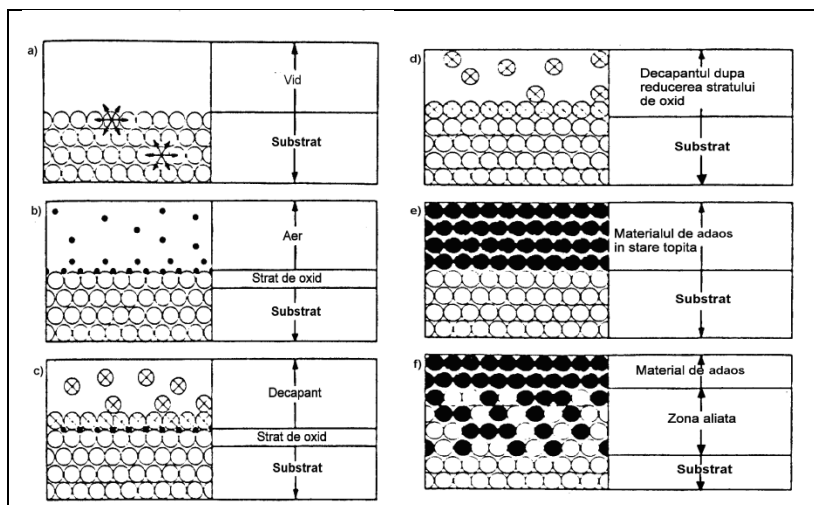


Fig. 1.2. Principiul brazării [25]

La prima vedere, brazarea pare simplă, dar obținerea unei îmbinări rezistente constituie o problemă complexă, deoarece în timpul procesului au loc o serie de fenomene fizico-chimice complexe și variate. În linii generale, procesul de brazare a două piese metalice are loc în următoarele etape [10,25]:

- încălzirea materialului de bază până la o temperatură apropiată de temperatura de topire a aliajului de lipire;
- topirea aliajului de lipire;
- întinderea aliajului de lipire în stare lichidă pe suprafața metalelor de bază și umplerea cusăturii;
- dizolvarea metalelor de bază din zona cusăturii în aliajul de lipire aflat în stare lichidă și difuzia reciprocă a metalelor;
- răcirea și solidificarea aliajului de lipire.

Fenomenele fundamentale care apar în procesul de brazare sunt: umectarea, întinderea, capilaritatea și difuzia.

a) Fenomenul de umectare

Umectarea este fenomenul de interacțiune dintre aliajul de lipire și metalul de bază, încălzit la temperatura de umectare, ce se manifestă prin întinderea sau scurgerea aliajului de lipire pe suprafața materialului de bază.

Dacă o picătura de aliaj de lipit topit ajunge pe suprafața metalului de bază solid, aceasta va umecta suprafața și se va întinde mai mult sau mai puțin (figura 1.3). Pentru realizarea umectării și întinderii este necesar ca să nu fie împiedecat

10 Generalități privind procesul de brazare - 1

La $\alpha = 0^\circ$ ($\cos\alpha = 1$) avem umectare perfectă și picăturile de topitură au tendința să se întindă pe suprafață până la crearea unui film subțire monomolecular. Acest caz apare când tensiunea superficială a metalului de bază, γ_M , este mai mare decât tensiunea superficială la interfața topitură-metal de bază, γ_{LM} , și a topituri γ_L .

La $\alpha = 180^\circ$ ($\cos\alpha = -1$) nu avem umectare, deci topitura ia formă de picături pe suprafața metalului.

La $0^\circ < \alpha < 180^\circ$ avem umectare parțială. Pentru o umectare suficientă la lipire se recomandă ca unghiul de umectare să fie $\alpha < 30^\circ$. [25]

Factorii care influențează umectarea sunt [10,25]:

- natura materialului de bază și a aliajului de lipire;
- valoarea direcției rezultantei tensiunilor superficiale;
- temperatura de lucru;
- starea suprafeței materialului de bază;
- capacitatea fluxurilor sau a gazelor de protecție de a curăți și menține curată suprafața metalului de bază în timpul lipirii.

b) Fenomenul de întindere

Întinderea se realizează când adeziunea între aliajul de lipire topit și metalul de bază va fi mai mare decât coeziunea topituri.

Micșorarea energiei superficiale în timpul umectării duce la o stare mai stabilă decât la începutul procesului. Așa numita energie de adeziune este o măsură a aderenței dintre faza solidă și cea lichidă. Ea dă lucrul mecanic specific (J/m^2) ce ar fi necesar pentru ridicarea (desprinderea) lichidului de pe corpul solid. Unitatea de măsură $J/m^2 = Nm/m^2 = N/m$ corespunde cu cea a tensiunii superficiale, deci valorile tensiunii superficiale și a energiei superficiale sunt egale. La procesul de desprindere apar două noi suprafețe, astfel încât energia superficială este $\gamma_M + \gamma_L$. În schimb, suprafața metal de bază – topitură dispăre și energia superficială γ_{LM} devine liberă. Astfel energia de adeziune este [25]:

$$W_A = \gamma_L + \gamma_M - \gamma_{LM} \quad (1.3)$$

Ținând cont de relația 1.1, rezultă:

$$W_A = \gamma_L (1 + \cos \alpha) \quad (1.4)$$

La umectare perfectă $\alpha = 0^\circ$ și prin urmare $W_A = 2\gamma_L$. Prin urmare, pentru separare este necesară aceeași energie ca cea pentru formarea celor două noi suprafețe de graniță, de aceea energia maximă de adeziune corespunde energiei de coeziune. La umectarea parțială scade energia de adeziune cu creșterea unghiului de umectare α . În cazul neumectării $\alpha = 180^\circ$, iar $W_A = 0$, deci nu apare nici o aderență.

Valorile calculate pentru energia de adeziune nu fac posibilă o specificare cantitativă a capacității de lipire în stare solidă. Cauza constă în neglijarea posibilelor reacții fizico - chimice superficiale (dizolvări, formarea de legături intermetalice), în comportările diferite la dilatare a materialului de bază și materialului de adaos. De asemenea, tensiunile importante din suprafețele de graniță influențează comportarea la rupere. De aceea o bună umectare este o condiție necesară dar nu totdeauna suficientă pentru asigurarea unei îmbinări lipite rezistente.

Deoarece și în stare solidă metalele insolubile se pot lipi, ca de exemplu, oțel și plumb în vid, se poate deduce că lipirea adezivă a perechilor de metale poate fi destul de rezistentă. Rezistența îmbinării depinde hotărâtor de curățirea suprafeței.

c) Fenomene de capilaritate

La îmbinările lipite, jocul dintre suprafețele pieselor de lipit este cât se poate de mic, formând un fel de tub capilar. Efectul capilar, deci posibilitatea umplerii fantelor

mici, depinde de tensiunea superficială. Prin umectarea pereților, pe măsura ce topitura urcă în tubul capilar se eliberează energie superficială, la partea superioară formându-se un menisc. După Laplace, presiunea normală p_k se poate exprima funcție de razele de curbură r_1 și r_2 și tensiunea superficială γ_L [10,25].

$$p_k = \gamma_L \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \quad (1.5)$$

Pentru o fantă cu pereți paraleli de lățime b și lungime infinită (figura 1.5) $r_2 = \infty$, iar $r_1 = \frac{b}{2 \cdot \cos \alpha}$.

Rezultă că presiunea capilară de umplere va fi:

$$p_k = \frac{2 \cdot \gamma_L \cdot \cos \alpha}{b} \quad (1.6)$$

În cazul unei fante verticale presiunea superficială este echilibrată de presiunea hidrostatică datorată coloanei de lichid:

$$p_H = \rho_L \cdot g \cdot h \quad (1.7)$$

unde:

ρ_L = densitatea topiturii;

h = înălțimea la care urcă;

g = accelerația gravitațională ($9,81 \text{ m/s}^2$).

Din egalitatea $p_k = p_H$ se determină înălțimea maximă de urcare a coloanei de lichid:

$$h = \frac{2 \cdot \gamma_L \cdot \cos \alpha}{\rho_L \cdot g} \quad (1.8)$$

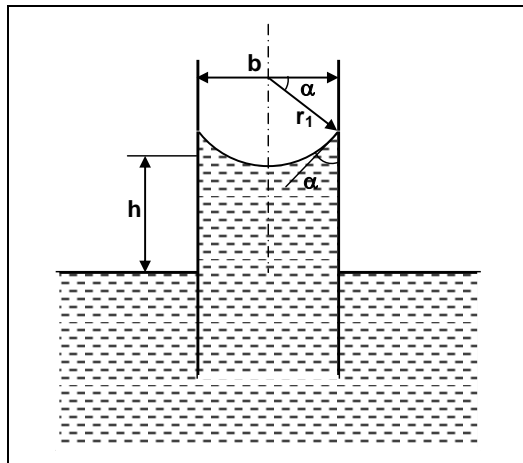


Fig. 1.5. Înălțimea de ridicare și presiunea capilară pentru materiale de adaos în stare lichidă. [10]

Din măsurători ale înălțimii de ridicare la fanta dată se poate determina mărimea tensiunii superficiale de graniță:

$$\gamma_M - \gamma_{LM} = \gamma_L \cos \alpha. \quad (1.9)$$

12 Generalități privind procesul de brazare - 1

Pentru umplerea sigură a fantelor adânci de ordinul milimetrilor este nevoie de o presiune capilară de umplere $p_k > 50$ mbar, ceea ce corespunde cu o lățime a fantei mai mică de 0,2 mm.

Din cele prezentate, rezultă că la două îmbinări lipite executate în condiții asemănătoare, rostul se va umple cu atât mai bine cu cât tensiunile aliajului de lipire vor fi mai mari, cu cât acest aliaj va umecta mai bine suprafața metalului de bază și cu cât vor fi mai mici jocurile dintre piesele de lipit.

d) Fenomenul de difuzie

Aliajul de lipire în stare topită reacționează cu metalul de bază. Deși această reacție este complexă, la baza ei stau următoarele procese:

- dizolvarea metalului de bază în aliajul de lipire în stare topită, cu formarea unei soluții lichide, care se descompune în faza de cristalizare;
- difuzia elementelor ce compun aliajul de lipire în metalul de bază, cu formarea unei soluții solide;
- reacția (difuzia reactivă) dintre aliajul de lipire și metalul de bază, cu formarea pe suprafața de separație a unor legături chimice intermetalice.

Ca atare, la lipire difuzează unul în altul atât elemente din materialul de adaos cât și din cel de bază. Drumul mediu de difuzie rezultă din a doua lege a lui Fick [25]:

$$X^2 = 2 \cdot D \cdot t \quad (1.10)$$

unde t este timpul de difuzie, iar D este coeficientul de difuzie ce arată mobilitatea atomilor.

Coeficientul de difuzie D depinde de valorile D_0 și Q ale fiecărei combinații metal de bază - metal de adaos și crește cu creșterea temperaturii, conform relației [25]:

$$D = D_0 \cdot \exp\left(\frac{-Q}{R \cdot T}\right) \quad (1.11)$$

De aceea grosimea stratului de aliaj ce se formează este cu atât mai mare cu cât temperatura de lucru a materialului de adaos este mai aproape de temperatura de topire a materialului de bază.

Straturile aliate ce se formează constau dintr-o porțiune în care atomii topiturii difuzează în materialul de bază (X_M) precum și o porțiune în care atomii materialului de bază se amestecă cu atomii topiturii (X_L) (figura 1.6). Cercetări asupra mobilității atomilor în metale (așa numita difuzie naturală /proprie) în apropierea temperaturii de topire au arătat că valoarea coeficientului de difuzie în stare topită de la $D_1=10^{-4} \dots 10^{-5}$ cm²/s, ajunge în stare solidă la doar $D_2=10^{-8} \dots 10^{-9}$ cm²/s, de aceea este de așteptat ca straturile de difuzie să se afle în raport $X_L / X_M = \sqrt{D_1 / D_2} \approx 100$. [25]

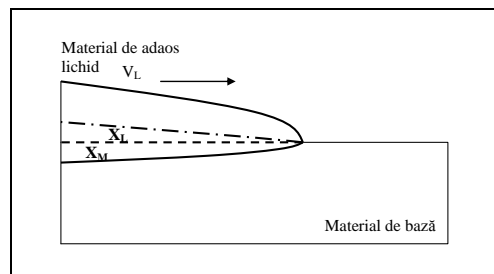


Fig. 1.6 Stratul de difuzie din metalul de bază (X_M) și din cel de adaos (X_L) [25]

Difuzia reactivă conduce la formarea de noi faze. Aceste sunt asemănătoare legăturilor chimice, caracterizate printr-un anumit raport stoichiometric al componentelor, formând în general structuri spațiale complicate cu slabe proprietăți mecanice. Straturile intermediare ce apar la lipire pot deveni vizibile microscopic dacă viteza lor de creștere este mare. Straturile intermediare sunt de regulă fragile și scad rezistența, în special la solicitări cu șoc.

Structura îmbinării brazate prezintă un caracter zonal (figura 1.7), datorită fenomenelor ce apar în timpul procesului de brazare. Astfel se disting următoarele zone:

- zona A – materialul de bază neinfluențat termic;
- zona B - zonă influențată termic în care materialul de bază suferă modificări structurale prin recristalizare și mărirea grăunților cristalini. În această zonă pot apărea limite de grăunți îngroșate ca urmare a difuziei la limita de grăunți.
- zona C – zona de difuzie care face trecerea de la materialul de bază la materialul de adaos. Această zonă poate fi în unele cazuri așa de subțire încât nu poate fi evidențiată microscopic.
- zona D – cu material de adaos nemodificat.

Zonele mai sus menționate nu trebuie întodeauna să fie prezente. Astfel zona influențată termic B este prezentă doar când materialul de bază suferă modificări structurale la temperatura de lipire. Stratul de difuzie C ia naștere doar când materialele sunt solubile unul în altul, de exemplu la crearea legăturilor intermetalice. Zona cu material de adaos nealiat poate dispărea la lipiri la temperaturi mari și cu durată mare.

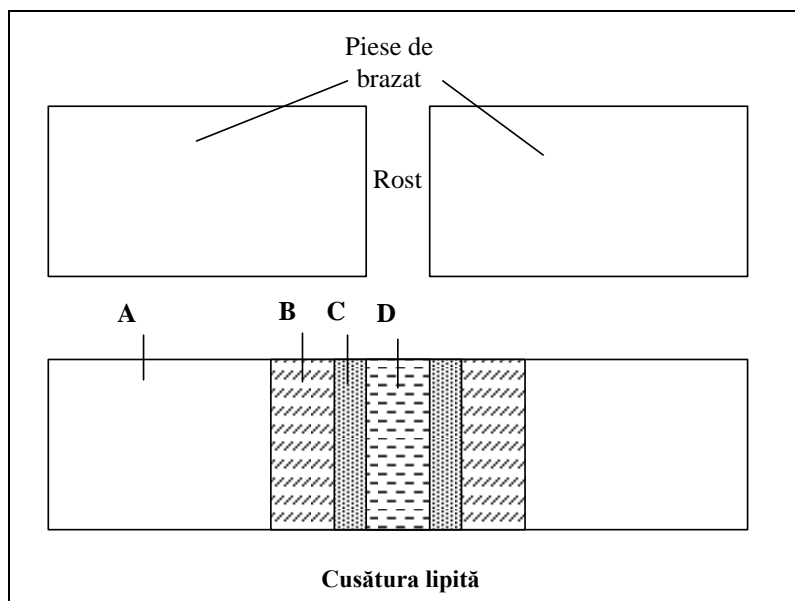


Fig. 1.7. Zonele îmbinării lipite [10]

Analiza constituienților structurali ce apar la lipire se poate efectua cu ajutorul diagramei de echilibru fazic a aliajului utilizat, diagramă ce prezintă de regulă reacție eutectică.

Deoarece fazele solide și lichide ale aliajelor de lipire în timpul topirii diferă, compoziția se schimbă treptat, pe măsură ce temperatura crește. Dacă în procesul de lipire apar condiții favorabile curgerii, e posibil ca faza lichidă să se separe de faza solidă netopită. Această separare artificială a fazelor se numește licuație. Fenomenul de licuație este tipic aliajelor cu interval mare de cristalizare.

Când aliajul de lipire este solubil în metalul de bază în stare solidă, în procesul de lipire va predomina difuzia în metalul de bază a unor elemente ce compun aliajul de lipire. În acest caz, în stratul din metalul de bază care intră în contact nemijlocit cu aliajul de lipire în stare topită, se obține o soluție solidă în care va predomina metalul de bază.

Dacă metalele ce intră în compunerea aliajului de lipire și a metalului de bază pot forma între ele compuși chimici definiți, atunci la limita de separație se va produce o reacție chimică. Pe baza proceselor de reacție fizico – chimice între aliajul de lipire și metalul de bază, la limita de separație se constată de cele mai multe ori un strat intermediar de combinații chimice. Compușii intermetalici asigură o bună legătură între aliajul de lipire și metalul de bază, dar în cazul în care stratul acestor combinații este mare rezistența lipiturii scade foarte mult, datorită fragilității compușilor intermetalici.

Concluzionând, putem afirma că pentru a fi eficientă îmbinarea lipită, materialul de adaos trebuie să umecteze metalul de bază, fără:

- ✓ difuzie necontrolată în acesta;
- ✓ să erodeze suprafața metalului de bază;
- ✓ să formeze constituienți duri și fragili.

1.2. Metode și tehnologii de brazare ale aliajelor pe bază de Cu și oțelurilor inoxidabile

1.2.1. Tehnologia de brazare

În general, tehnologia realizării îmbinărilor prin brazare presupune parcurgerea următoarelor etape:

- pregătirea componentelor; această etapă presupunând curățirea componentelor prin degresare, decapare, curățire mecanică, precum și, în unele cazuri, preacoperirea cu aliaj de lipire.
- încălzirea la temperatura de activare a fluxului decapant și aplicarea acestuia;
- aplicarea aliajului de lipire;
- răcirea, solidificarea, curățarea resturilor de flux.

Pregătirea componentelor presupune și realizarea rostului. Locul lipirii trebuie conceput astfel încât distanța de curgere a topiturii să nu fie prea lungă. Trebuie prevăzută o magazie de topitură în interiorul suprafețelor de lipit (figura 1.8). Topitura trebuie să curgă pe cât posibil din interior spre exterior pentru a îndepărta decapantul spre exterior. Construcția trebuie să aibă o scurgere pentru decapant pentru ca acesta să nu rămână inclus în interior.

În ceea ce privește etapa de încălzire, trebuie avut în vedere că la lipire se derulează una după alta mai multe procese, ce necesită fiecare un anumit timp. De aceea este necesar ca la lipire să nu se încălzească locul lipirii prea repede. Acest lucru este foarte important în special la lipirea cu decapant. În acest caz trebuie să se desfășoare următoarele procese:

- să se evapore apa conținută în pasta sau decapantul lichid

- decapantul trebuie să reacționeze cu oxizii și să-i dizolve;
- la temperatura de lipire metalul de adaos trebuie să îndepărteze decapantul;
- atomii din materialul de bază trebuie să difuzeze în materialul de adaos topit.

Pentru ca toate aceste procese să decurgă, trebuie asigurat un timp minim de lipire. Acesta poate fi mai mic pentru piese mărunte iar pentru piese mari poate fi mai mare.

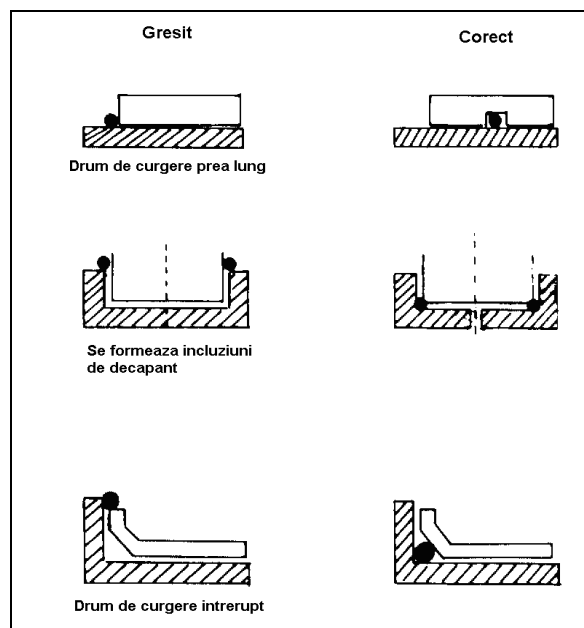


Fig. 1.8 Construcții corecte sau nu din punctul de vedere al curgerii materialului de adaos [25]

Pe de altă parte însă, timpul de lipire trebuie limitat pentru a nu permite:

- saturarea decapantului în oxizi, întrucât are o capacitate limitată de reducere a acestora;
- deteriorarea caracteristicilor materialului de bază.

Dacă în practică se obține un timp mai mare atunci cantitatea de căldură în fiecare fază nu este suficientă și trebuie aleasă o sursă cu putere mai mare.

Și direcția de introducere a căldurii este importantă în procesul de lipire, mai ales la folosirea formelor de lipit. Pentru ca materialul de adaos topit să curgă și să umecteze materialul de bază, trebuie ca locul de lipire să fie încălzit la temperatura de lucru. Dacă piesa se încălzește doar dintr-o parte pe care se găsește sursa de căldură sau pe care se va depune materialul de adaos, acesta, ajuns în stare lichidă, nu va putea să curgă prin întreaga fantă deoarece locul mai depărtat din fantă nu are temperatura de lucru. Forțele capilare nu pot acționa deoarece acestea acționează doar la lichide ce umectează, deci materialul de adaos trebuie mai înainte să umecteze materialul de bază când acesta a atins temperatura de lucru. Apare astfel pericolul ca materialul de adaos să umecteze zone învecinate cu rostul de lipire și astfel să se îndepărteze de zona ce trebuie lipită. Când și zonele îndepărtate ating temperatura de lucru s-ar putea ca să nu mai fie suficient material

de adaos pentru a efectua lipitura. Variația de temperatură cu timpul la încălzirea directă precum și comportarea materialului de bază și a celui de adaos sunt reprezentate în figura 1.9.

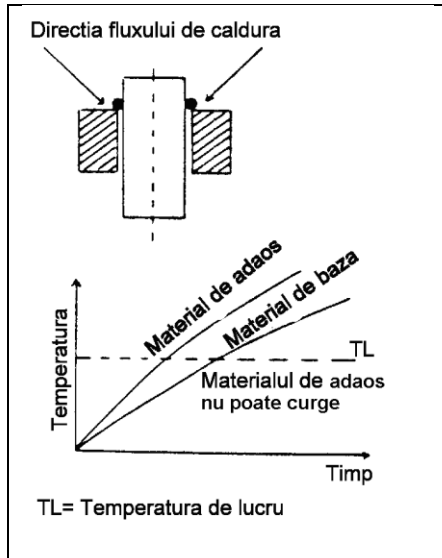


Fig. 1.9 Variația temperaturii la încălzirea directă [25]

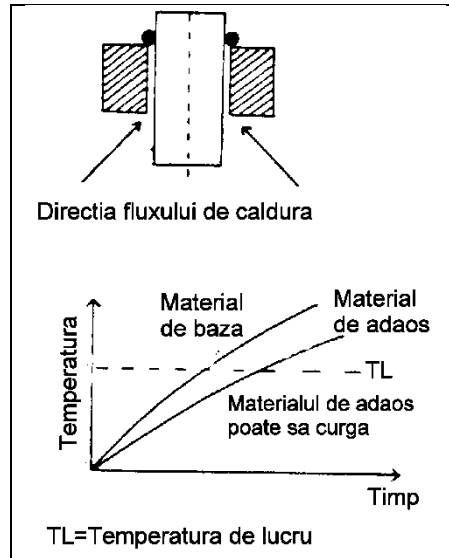


Fig 1.10. Variația temperaturii la încălzirea indirectă [25]

Dacă se încălzește zona opusă depozitului de material de adaos se va încălzi întreaga fantă la temperatura de lucru înainte ca materialul de adaos să devină fluid, acesta putând apoi să pătrundă pe toată lungimea fantei și să umezească piesele. Materialul de adaos curge întodeauna către sursa de căldură astfel că în acest caz forța capilară va fi ajutată (figura 1.10).

1.2.2. Tipuri de îmbinări lipite

La proiectarea locului lipirii tendința este de a obține o fantă cu pereți paraleli. Există însă și cazuri în care o astfel de fantă uniformă nu se poate obține. Când se dorește totuși obținerea unei bune îmbinări lipite este necesar ca fanta să se îngusteze în direcția de curgere a topiturii, deoarece doar atunci poate topitura, prin creșterea presiunii de umplere, să fie absorbită în fantă (figura 1.11).

Lățimile de fantă mai sus recomandate trebuie să existe la temperatura de lipire. Deci determinarea lățimii fantei la temperatura camerei trebuie să țină cont de deformațiile termice ce apar în procesul lipirii.

Deoarece alungirea datorată încălzirii, proporțională cu dimensiunea, este mică la dimensiuni mici în comparație cu lățimea fantei, la piese mici sau locuri de lipit mici aceasta se poate neglija.

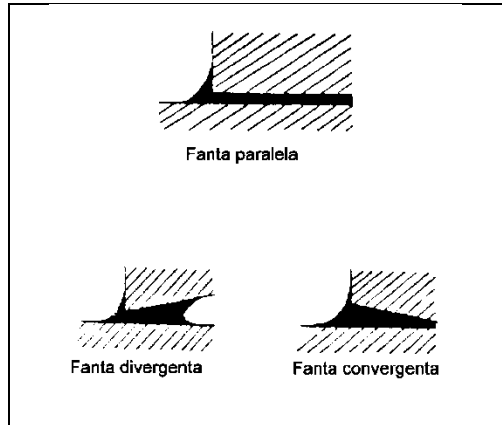


Fig. 1.11 Comportarea la curgere a materialului de adaos pentru fante ce se îngustează respectiv lărgesc în direcția de curgere [25].

Altfel stau lucrurile la piese mari realizate din materiale diferite, unde trebuie aleasă o fantă mai mare la temperatura camerei, pentru a avea dimensiunea corespunzătoare la temperatura de lipire.

Principalele tipuri de îmbinări lipite sunt:

a) Îmbinare prin suprapunere

Pentru a obține o rezistență mare a lipiturii sau pentru a ușura fixarea se folosește suprapunerea (figura 1.12 a). Această metodă de îmbinare este pe de parte cea mai răspândită. Este utilizată îndeosebi la table subțiri sau țevi. Se poate alege o lungime de suprapunere astfel încât să se asigure aceeași rezistență cu cea a materialului de bază. Lungimea de suprapunere se determină funcție de rezistența la tracțiune a materialului de bază și de rezistența la forfecare a îmbinării. Pentru o îmbinare solicitată la întindere rezultă:

$$l = \frac{\sigma_r \cdot d}{\tau} \quad (1.12)$$

unde:

l = lungimea de suprapunere;

σ_r = rezistența la tracțiune a materialului de bază;

τ = rezistența la forfecare a materialului de adaos;

d = grosimea peretelui materialului de bază.

Dacă se consideră și un factor de siguranță și se iau în considerare și defecte ale cusăturii lipite, rezultă o lungime de suprapunere între 3 și 6 ori grosimea materialului de bază. O lungime de suprapunere de 3 ori grosimea materialului de bază se alege la materiale de bază cu rezistență proprie mică iar de 6 ori la materiale cu rezistență mare. O lungime de suprapunere mai mare ar duce doar la un consum inutil de material de adaos. În plus, o lipitură cu suprafață mare duce la multe incluziuni de decapant, ceea ce reduce rezistența lipiturii.

b) Lipire cap la cap

Lipirea cap la cap (figura 1.12 b) se aplică la grosimi ale materialului de bază mai mari de 2 mm, când nu există posibilitatea suprapunerii.

c) Lipirea cap la cap cu eclise

În acest caz se mărește rezistența lipiturii comparativ cu lipirea cap la cap.

d) Îmbinare în T (figura 1.12 c) se aplică la piese de grosimi mari.

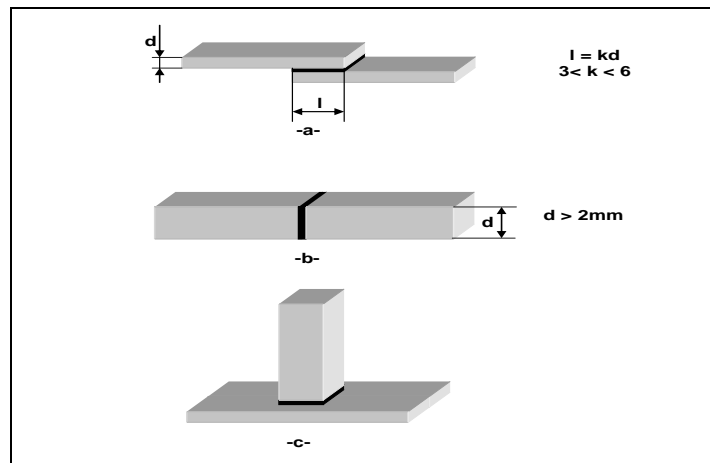


Fig. 1.12. Reprezentare schematică a principalelor poziții de lipire [10]

1.2.3. Metode de brazare ale oțelurilor inoxidabile și a aliajelor cuprului

La brazarea oțelurilor inoxidabile apar unele probleme care pot fi cauzate de:

- oxizii duri și stabili care se formează la suprafața pieselor lipite, din cauza prezenței în compoziția oțelurilor inoxidabile a anumitor elemente de aliere, cum ar fi: Cr, Mo, Mn, Si, Ti, Al;
- separarea cromului sub formă de carburi, ca urmare a temperaturilor ridicate la care are loc lipirea (800 – 1000°C). Carburile de crom precipită de regulă la marginea grăunților, existând realul pericol al coroziunii intercrystaline.

Prin urmare, se recomandă ca lipirea oțelurilor inoxidabile să se realizeze prin metode de lipire cât mai rapide, care să asigure o viteză de răcire cât mai mare (lipirea prin rezistență, lipire aprin inducție) și în atmosfere lipsite de oxygen (lipirea în cuptor cu vid/atmosferă de gaz inert), pentru evitarea precipitării carburilor de crom, respectiv a formării oxizilor duri și stabili de pe suprafața pieselor.

La brazarea cuprului și aliajelor acestuia (alame, bronzuri) trebuie luate în considerare valorile ridicate ale conductibilităților termice și electrice ale acestora. În consecință, se impune utilizarea unor surse de căldură mai puternice decât la brazarea aliajelor feroase.

Brazarea cuprului este mult mai avantajoasă decât sudarea acestuia, deoarece la 1063°C se separă un eutectic fragil ($\text{Cu-Cu}_2\text{O}$) la limita grăunților cristalini, măbind pericolul de fisurare a materialului. Dat fiind faptul că la brazare nu se ating temperaturi care să depășească 1000°C, se evită producerea fenomenului de fragilizare, și, prin alegerea corectă a materialului de adaos și a parametrilor de proces, se pot obține rezistențe ale îmbinărilor lipite ce ating 90...95% din rezistența materialului de bază. Procedeele cel mai răspândit pentru brazarea cuprului este cel cu flacără oxo-acetilenică, deși se pot utiliza și alte metode de brazare (lipirea prin inducție, lipirea în cuptor cu atmosferă protectoare sau în vid și lipirea prin rezistență).

La brazarea alamelor trebuie să se evite evaporarea zincului din materialul de bază, și eventual chiar din materialul de adaos. Vaporii de zinc pot ataca și elementele de încălzire, reducându-le durabilitatea. De asemenea, materialul încălzit are proprietatea de a absorbi cantități mari de gaze (O_2 , CO , H_2), ceea ce conduce la

formarea porozităților în îmbinarea lipită. Drept urmare, procedeele cele mai potrivite pentru brazarea alamelor sunt lipirea prin inducție și lipirea prin rezistență. Aceste procedee oferă viteze mari de încălzire/răcire, ceea ce reduce semnificativ riscul vaporizării zincului și formării porozităților.

În cazul bronzurilor există riscul producerii segregățiilor cu faze mai ușor fuzibile, care se topesc mai repede în cursul încălzirii. De asemenea, trebuie avută în vedere scăderea bruscă a rezistenței mecanice a bronzurilor în jurul temperaturii de 900 °C. Ținând cont de aceste considerente, se recomandă ca bronzurile să fie brazate cu aliaje de lipire cu conținut de argint, folosindu-se ca procedee lipirea în cuptor în atmosferă protectoare, lipirea cu flacără și lipirea prin rezistență.

Din cele prezentate anterior rezultă că procedeele recomandate pentru brazarea cuprului și aliajelor acestuia sunt lipirea cu flacără oxi-acetilenică, lipirea prin inducție, lipirea în cuptor cu atmosferă protectoare sau în vid și lipirea prin rezistență. În consecință, se vor descrie tehnologiile de brazare aferente acestor procedee.

a) Tehnologia brazării cu flacără oxi-acetilenică

Brazarea cu flacără oxi-acetilenică poate fi brazare prin depunere sau brazare capilară.

În cazul brazării prin depunere, prelucrarea marginilor pentru îmbinări cap la cap se face cu unghiuri de deschidere mai mari ca la sudare (figura 1.13). Temperatura materialului de bază trebuie menținută în permanență la temperatura optimă de lucru, ceea ce se poate observa după modul de întindere a aliajului de lipire în momentul topirii. Când umectarea suprafețelor încetează, atunci piesele sunt fie prea reci, fie prea fierbinți. Pentru a evita supraîncălzirea materialului de bază, flacăra nu se îndreaptă direct spre piesă ci spre baia de metal toipit, așa cum se arată în figura 1.14.

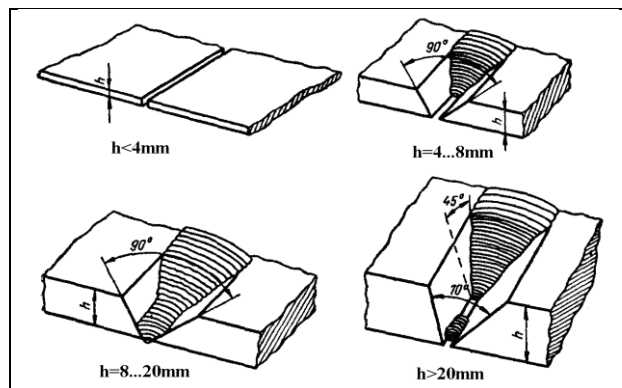


Fig. 1.13. Îmbinări cap la cap lipite prin depunere cu flacără oxiacetilenică [43]

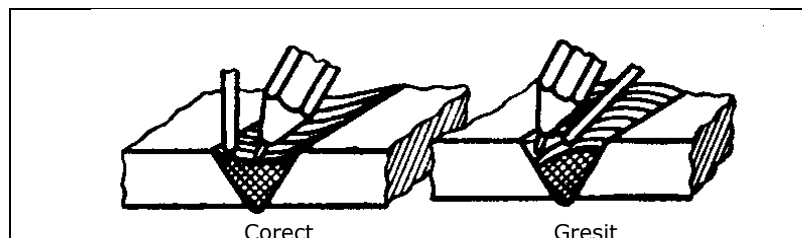


Fig.1.14. Dirijarea corectă și greșită a flăcării oxiacetilenice la lipirea prin depunere[43].

La lipire îmbinărilor în V și X de grosimi mai mari (peste 20 mm) se recomandă lipirea cu piesa îmbinată la 25...40°. Cu cât piesa este mai groasă, unghiul de înclinare trebuie să fie mai mare. În această poziție (figura 1.15 a) se formează o baie voluminoasă de metal topit, conducând vergeaua la marginea băii, iar flacăra în interiorul ei. Dacă înclinarea piesei nu este posibilă, atunci aliajul de lipire se depune în mai multe straturi, așa cum se arată în figura 1.15 b. Pozițiile arzătorului și vergelei în cazul brazării în poziție verticală și în poziție peste cap sunt prezentate în figurile 1.15 c și 1.15 d.

La brazarea capilară, se necesită o pregătire minuțioasă a pieselor și o încălzire uniformă a materialului de bază în întreaga secțiune ce se îmbină. Se recomandă a se lucra cu o flacăra oxiacetilenică cât mai moale, încălzind piesa numai cu flacăra secundară. Nucleul flăcării se ține la o distanță de 25...50 mm față de piesă.

Aliajul de lipire sub formă de vergea se așează pe piesă numai după ce aceasta s-a încălzit la temperatura optimă de lucru, astfel încât materialul de adaos să se topească sub acțiunea căldurii piesei. Flacăra se dirijează mereu spre acea parte a îmbinării în care urmează să pătrundă aliajul de lipire topit. Prin îndepărtarea arzătorului de piesă sau prin dirijarea flăcării la piesa vecină se evită supraîncălzirea piesei în curs de lipire fără a se întrerupe adăugarea materialului de adaos.

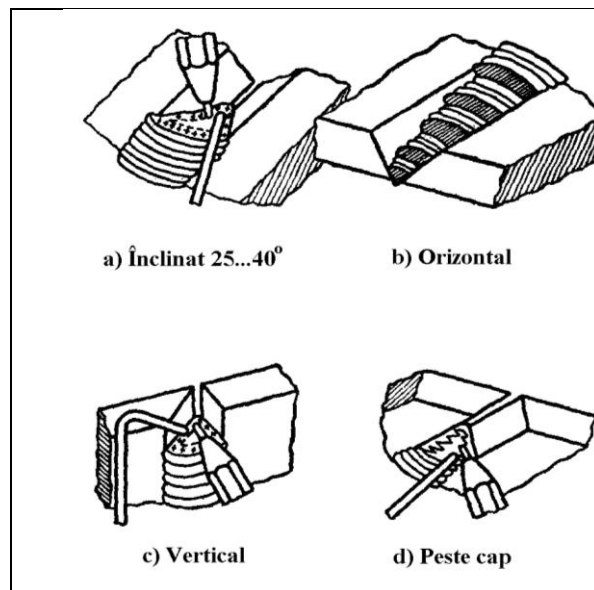


Fig. 1.15 Execuția îmbinărilor lipite prin depunere în diferite poziții de lucru [43]

Forma recomandată a aliajului de lipire este vergeaua, cu diametrul de 1...3 ori mai mare decât grosimea minimă piesei. Vergelele prea subțiri se consumă prea repede și duc la întreruperea frecventă a procesului de lipire. Vergelele prea groase sunt de asemenea neindicte, întrucât se topesc mai greu și obligă uneori la supraîncălzirea piesei. În multe aplicații materialul de adaos este folosit sub formă de folii subțiri sau inele așezate în îmbinare înaintea începerii încălzirii. În acest caz, locul îmbinării se încălzește uniform, pe ambele părți ale îmbinării, până la topirea materialului de adaos, fără a dirija flacăra direct pe materialul de adaos. Pentru obținerea unei îmbinări cu aspect exterior frumos, trebuie dozată cu atenție cantitatea de material de adaos.

b) Tehnologia lipirii prin inducție

Lipirea prin inducție este un procedeu de lipire capilară la care sursa de căldură o constituie energia inductivă a curenților de înaltă frecvență.

Principiul lipirii prin inducție este schematizat în figura 1.16. Inductorul, prin care trece un curent electric de înaltă frecvență, induce în piesa pe care o „îmbracă” un curent de înaltă frecvență și intensitate mare. Pe baza efectului pelicular și al efectului Joule-Lenz acest curent încălzește piesa ce urmează a fi lipită. Prin urmare, încălzirea piesei are loc fără ca inductorul să fie în contact cu acesta, sub acțiunea câmpului electromagnetic produs de inductor.

Este cunoscut faptul că densitatea curentului alternativ nu se repartizează uniform pe întreaga secțiune a conductorului, ea fiind maximă la suprafața acestuia. De asemenea se știe că o dată cu creșterea frecvenței se micșorează adâncimea până la care pătrunde curentul în interiorul conductorului. Prin urmare, grupurile generator-motor, cu frecvențe mai mici (1000...12000 Hz) se folosesc în cazul pieselor masive, unde se cer pătrunderi și puteri mari, iar convertizoarele de înaltă frecvență, cu frecvențe de peste 15000 Hz se folosesc la piese mici, unde se cer pătrunderi și puteri mai mici.

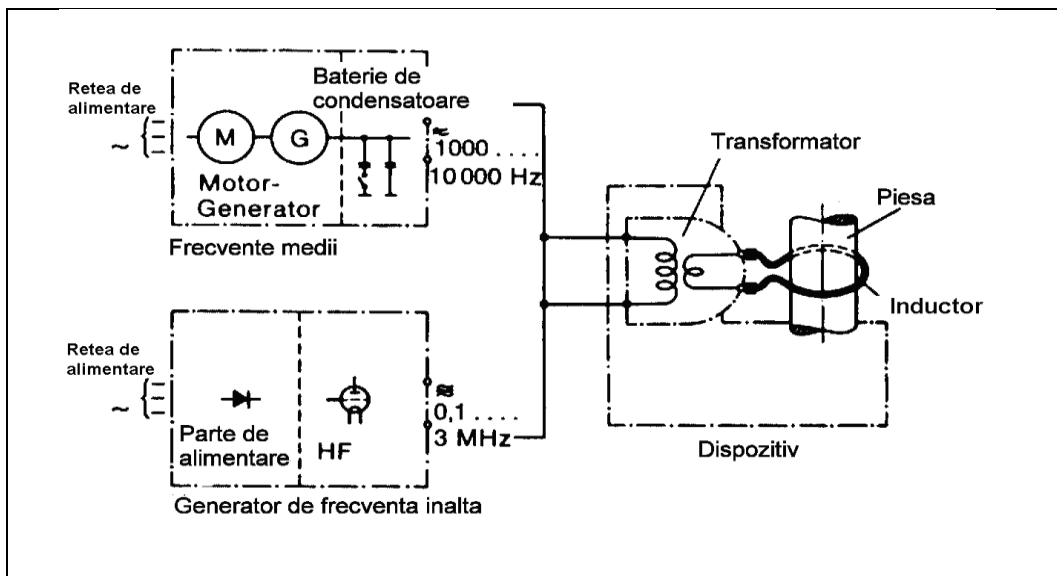


Fig. 1.16 Principiul lipirii prin inducție [25]

Adâncimea de încălzire, h , prin inducție este dată în general de formula:

$$h = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho}{\mu \cdot f}} \quad (1.13)$$

unde: f = frecvența curentului, în s-1;

μ = permeabilitatea magnetică a materialului încălzit, în $\frac{\Omega \cdot s}{m}$;
 ρ = rezistența specifică a materialului încălzit, în $\frac{\Omega \cdot mm^2}{m}$.

22 Generalități privind procesul de brazare - 1

Prin urmare, adâncimea de pătrundere, h , este invers proporțională cu rădăcina pătrată a frecvenței curentului, depinzând și de proprietățile fizice ale materialului piesei. În figura 1.17 se exemplifică variația adâncimii de pătrundere în funcție de frecvență și de materialul piesei.

Viteza de încălzire prin inducție depinde de puterea sursei de curent și de natura materialului încălzit. Spre exemplu, o piesă magnetică (oțel, nichel) se încălzește mult mai rapid în comparație cu o piesă dintr-un metal nemagnetic (Al, Cu, alamă).

Temperatura la care se încălzește o piesă prin inducție depinde și de mărimea pierderilor de căldură prin convecție și radiație. La încălziri rapide la temperaturi joase pierderile de căldură nu sunt semnificative. La încălzirea pieselor mari, a pieselor în mișcare sau în atmosferă protectoare, pierderile de căldură în jurul inductorului pot fi mari.

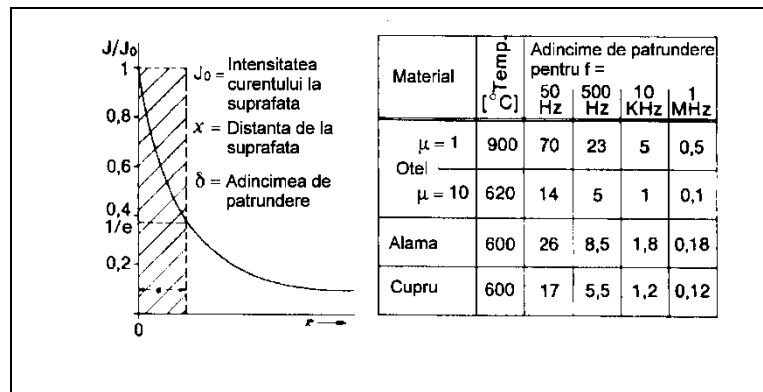


Fig.1.17 Adâncimea de pătrundere funcție de frecvență [25]

La încălzirea prin inducție trebuie să se țină seama de diferența de temperatură dintre exteriorul și interiorul piesei care va conduce la o continuă transmitere de căldură de la exterior spre interior. Totodată, trebuie avut în vedere faptul că piesele cilindrice se încălzesc mai repede decât cele plane, iar la piesele cu suprafață neregulată se vor încălzi prima dată părțile ieșite în relief. În consecință, pentru uniformizarea încălzirii se adaptează inductorul la forma piesei sau se mărește durata de încălzire.

Calitatea unei îmbinări lipite prin inducție depinde de soluția constructivă corectă a îmbinării și a inductorului. De asemenea este necesar să se stabilească temperatura optimă de lucru și durata de încălzire precum și amplasarea corectă a aliajului de lipit pe piesă și a piesei față de inductor. Îmbinările recomandate sunt cele ce pot fi încălzite cu inductoare exterioare, deoarece acestea au randmentul de încălzire mult mai bun.

În figura 1.18 sunt schematizate câteva exemple reprezentative de îmbinări și amplasarea inductorilor. Se remarcă de asemenea și amplasarea aliajului de lipit pentru fiecare exemplu în parte.

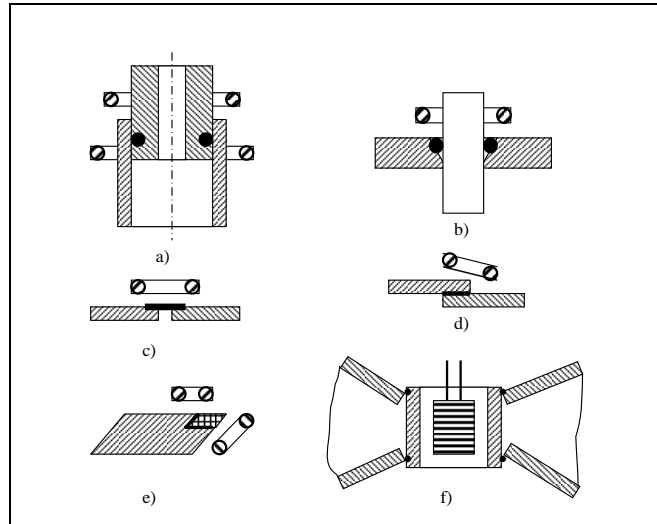


Fig.1.18 Exemple de îmbinări lipite prin inducție [10]

a,b)-lipire a două piese cilindrice cu inductor exterior; c,d)-lipire a două plăci cu inductor exterior; e)-lipire cu două inductoare exterioare; f)-lipire cu inductor interior

Se observă că inductoarele sunt astfel amplasate încât să cuprindă cât mai bine zona lipiturii, asigurând încălzirea ambelor piese ce se îmbină.

Importantă pentru reușita lipiturii este și mărimea rostului capilar. Din punct de vedere al încălzirii uniforme a pieselor, rosturile capilare trebuie să fie cât mai mici. Mărimea rosturilor depinde însă de natura materialelor de bază și de adaos, precum și de forma geometrică a îmbinării, ea neputând coborî sub o anumită limită. Se recomandă la lipirea prin inducție rosturi cuprinse între 0,04 și 0,3 mm. În tabelul 1.1 [38,43,106] sunt redată recomandări pentru mărimea rosturilor capilare în cazul utilizării diferitor aliaje de lipire.

La fel de importantă pentru o lipitură corectă este și poziția relativă a pieselor ce se îmbină. În acest scop se folosesc mijloace de fixare corespunzătoare sau dispozitive de ghidare montate pe suportul de susținere al pieselor.

Tabelul 1.1. Recomandări pentru mărirea rosturilor capilare, în mm, la brazarea prin inducție

Material de bază	Tipul aliajului de lipire		
	Aliaje Cu-Zn	Aliaje cu fosfor	Aliaje de argint
Cupru	0,08-0,3	0,08-0,3	0,04-0,25
Alamă, bronz	0,08-0,3	0,08-0,3	0,04-0,25

Temperatura optimă de lucru la lipirea prin inducție se obține prin variația puterii generatorului CIF și prin modificarea duratei de încălzire. La stabilirea duratei de încălzire trebuie avut în vedere că la CIF vitezele de încălzire sunt mari. Durata minimă de încălzire trebuie să asigure umplerea întregului rost capilar cu aliajul de lipit, ea putând varia de la 10 secunde până la câteva minute, în funcție de tipul pieselor și felul materialelor folosite.

Un rol important îl joacă și forma geometrică a materialului de adaos. Frecvent se utilizează aliaje sub formă de sârmă, benzi sau folii. Amplasarea materialului de adaos trebuie să se facă în proximitatea îmbinării sau chiar în interiorul ei, dacă e posibil, astfel încât topirea să înceapă în momentul în care îmbinarea ajunge la

24 Generalități privind procesul de brazare - 1

temperatura de lucru prescrisă. Este recomandat ca înaintarea capilară a aliajului topit să se facă de sus în jos, fiind astfel favorizată de greutatea proprie a acestuia.

Pentru încălzirea uniformă a pieselor la lipirea prin inducție este necesară așezarea lor centrică în inductor, iar la piesele cilindrice se recomandă rotirea piesei în inductor, fie continuu, fie intermitent. În acest fel se îmbunătățește procesul de topire al aliajului de lipit și pătrunderea lui capilară, reducându-se pericolul apariției unor porozități în îmbinare.

Din punct de vedere tehnologic este important și mediul în care se face lipirea (aer, cu fluxuri obișnuite, în mediu de gaze protectoare sau în vid). Fiecare din aceste procedee se poate mecaniza sau automatiza.

Brazarea prin inducție în atmosferă de gaze protectoare se execută în camere închise cu pereți metalici sau de sticlă, în interiorul cărora se montează inductorul și dispozitivul de manipulare al pieselor. Procesul de lipire are loc în interiorul acestor camere sub protecția unei atmosfere controlate.

În figura 1.19 se prezintă schema de principiu a lipirii prin inducție în astfel de camere cu pereți metalici și capac de sticlă. Se remarcă placa conică izolatoare care se fixează pe corpul camerei cu o flanșă pentru a asigura etanșeitatea camerei în locul de pătrundere al inductorului. Pereții camerei de protecție se execută din tablă metalică și se răcesc cu apă cu ajutorul unei serpentine de cupru, fixată pe pereții laterali ai camerei. Capacul se închide este prevăzut cu un geam de sticlă prin care se poate observa procesul de lipire.

Gazul de protecție se introduce printr-o conductă de alimentare, amplasată în partea superioară, iar ieșirea gazelor din cameră are loc printr-o țevă de evacuare situată în partea inferioară a camerei. La capătul țevii de evacuare este montat un arzător care semnalează printr-o flacără de veghe funcționarea normală a circuitului de gaze. Gazele de protecție se aleg în funcție de tipul materialelor lipite. La lipirea metalelor feroase se folosesc gaze reducătoare (hidrogen, gaze industriale incomplet arse, etc.), iar la lipirea metalelor neferoase se folosesc gaze neutre sau inerte (argon, heliu). În acest caz este necesară evacuarea aerului din camera de protecție cu ajutorul unor pompe de vid.

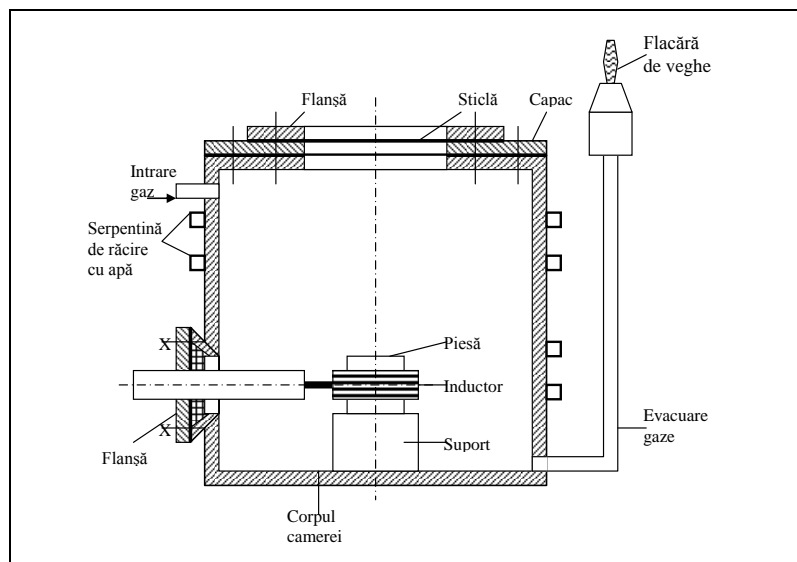


Fig. 1.19. Principiul lipirii prin inducție în atmosferă de gaze protectoare [10]

În cazul unei producții de serie se utilizează instalații complexe de lipire la care inductorul cuprinde din exterior camera de protecție. Există două variante pentru acest mod de lipire:

lipirea în containere, la care piesele sunt introduse într-un creuzet termorezistent (container), încălzit în întregime cu un inductor exterior;

lipirea sub capace de sticlă, la care fiecare piesă este acoperită cu un capac de sticlă cu atmosferă protectoare în interior.

Procedeul lipirii în vid este o perfecționare a lipirii prin inducție în atmosferă de gaze protectoare. Calitatea superioară a îmbinărilor lipite executate în vid se datorește faptului că în cursul lipirii are loc o degazare a metalului încălzit. Nivelul vidului depinde de materialul de bază și de temperatura de lucru. Utilajul folosit la lipirea în vid este asemănător cu cel la lipirea în atmosferă de gaze protectoare, existând trei tipuri de instalații:

- camere de vid cu inductor introdus în interior;
- containere de vid cu inductor exterior;
- mese rotative (benzi transportoare) cu capac de sticlă.

Diferența față de instalațiile cu atmosferă de gaze protectoare constă în faptul că în locul atmosferei de protecție se folosește vidul înaintat.

Ordinea operațiilor la lipirea prin inducție în vid este următoarea:

- ✓ se curăță piesele în vederea lipirii;
- ✓ se asamblează piesele în poziția în care trebuie îmbinate;
- ✓ se așează materialul de adaos;
- ✓ se introduc piesele în camera de vid și se pornește pompa de vid;
- ✓ după obținerea nivelului de vid prescris se realizează încălzirea prin inducție;
- ✓ după 10 ... 20 secunde de la atingerea temperaturii de lipire se întrerupe curentul în inductor;
- ✓ se continuă evacuarea gazelor cu pompa de vid până la răcirea pieselor la 100 ... 300 °C (temperatură la care materialul nu se mai oxidează în aer);
- ✓ se introduce aer în camera de vid până la egalizarea presiunii din interior cu cea exterioară și se scot piesele lipite.

Dezavantajul lipirii în vid constă în faptul că sunt necesare instalații speciale pentru realizarea vidului.

c) Tehnologia brazării în cuptor

Lipirea în cuptor face parte din procedeele de lipire capilară, încălzirea pieselor ce se lipesc făcându-se fără intervenția omului.

Există trei procedee de bază ale lipirii în cuptor:

- lipirea în atmosferă normală;
- lipirea în atmosferă controlată de gaze;
- lipirea în vid.

În primul caz, piesa împreună cu aliajul de lipire și fluxul aplicate pe suprafețele ce se îmbină se introduc într-un cuptor care se încălzește până la temperatura de lipire.

În al doilea caz, în locul aerului atmosferic, în cuptor se introduce un gaz de protecție inert sau reducător, care împiedică oxidarea suprafețelor ce se îmbină. Gazul protector reducător poate juca și rolul de flux de lipire.

În al treilea caz din incinta cuptorului se elimină aerul cu ajutorul unor pompe de vid, vidul astfel creat făcând inutilă folosirea fluxurilor.

Principalele avantaje ale lipirii în cuptor sunt:

26 Generalități privind procesul de brazare - 1

- ✓ se pot lipi simultan mai multe piese, deci procedeul este foarte productiv;
- ✓ se pot realiza mai multe îmbinări lipite pe aceeași piesă, încălzirea făcându-se uniform în toată masa piesei;
- ✓ încălzirea și răcirea lentă a pieselor asigură tensiuni și deformații reduse;
- ✓ calitatea constantă a îmbinărilor;
- ✓ posibilitatea mecanizării și automatizării complete a procesului de lipire;
- ✓ la lipirea în atmosferă protectoare și în vid piesele rămân curate după scoaterea lor din cuptor și nu necesită nici o prelucrare ulterioară.

Dezavantajul lipirii în cuptor constă în complexitatea și costul relativ ridicat al instalațiilor și utilajelor necesare pentru aplicații industriale.

Procesul de lipire se desfășoară cu respectarea următoarelor condiții tehnologice generale:

- curățirea corespunzătoare a suprafețelor de îmbinat;
- alegerea corespunzătoare a combinației material de bază – aliaje de lipire – flux de lipire;
- pregătirea adecvată a îmbinării;
- stabilirea temperaturii optime de lucru;
- stabilirea duratei optime de lipire;
- alegerea procedurii de lipire cel mai potrivit;
- tratarea pieselor după lipire;
- controlul calității îmbinărilor lipite.

Impuritățile de pe suprafața pieselor de îmbinat, cum ar fi: oxizi, uleiuri, grăsimi sau alte substanțe străine, îngreunează sau opresc complet umectarea de către aliajul de lipire a suprafețelor ce se îmbină. Prin urmare este absolut necesară îndepărtarea oxizilor prin mijloace mecanice (sablarea, polizarea, șlefuirea), sau prin decapare chimică. Alegerea corectă a combinației material de bază – aliaje de lipire – flux depinde, în principal, de caracteristicile de exploatare impuse îmbinării lipite. În cazul brazării în vid nu mai este necesar fluxul de lipire.

În cazul lipirii în cuptor trebuie acordată o atenție deosebită pregătirii îmbinării în vederea lipirii. Execuția unei îmbinări lipite depinde de forma ei geometrică, de cantitatea de aliaj de lipire depus în îmbinare, precum și de modul de asigurare a poziției reciproce a pieselor în cursul operației de lipire. Depunerea unor cantități excesive de aliaj de lipire duce la acoperirea inutilă a zonelor din jurul îmbinării și are ca efect o risipă de material și o manoperă în plus legată de operația dificilă de îndepărtare a materialului depus excedentar.

Lipirea în cuptor presupune parcurgerea unui ciclu termic, reprezentat în figura 1.20. Se remarcă principalii parametri de proces: temperatura de preîncălzire (dacă este cazul), temperatura de lipire, durata de încălzire și durata de menținere la temperatura de lucru.

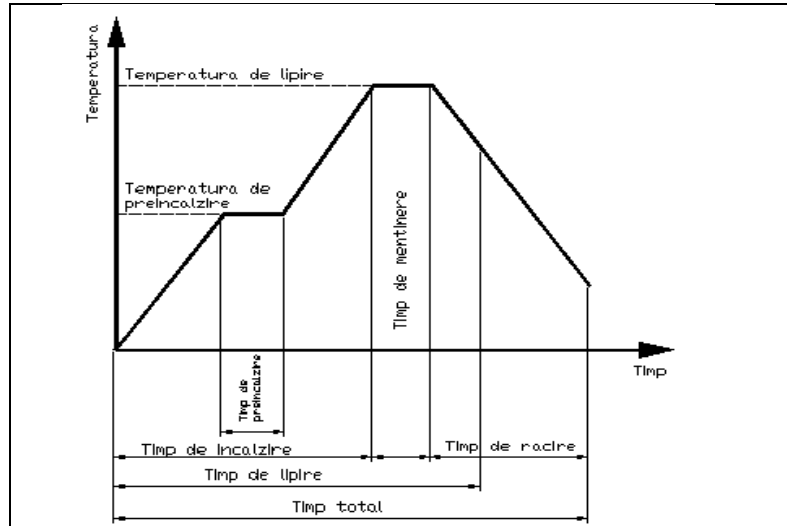


Fig. 1.20. Ciclograma procesului de lipire în cuptor [10]

Temperatura de lipire joacă un rol hotărâtor la realizarea unei îmbinări lipite de bună calitate. Având în vedere faptul că lipirea în cuptor este o lipire capilară, temperatura de lucru trebuie să fie cât mai ridicată, pentru a scădea vâscozitatea aliajului de lipire topit. În același timp, temperatura de încălzire nu trebuie să fi prea ridicată, pentru a reduce durata de lipire, consumul de energie, tensiunile interne și influența termică a materialului de bază. Prin urmare, temperatura optimă de lipire se situează de obicei cu 20...50°C peste temperatura lichidus a aliajului de lipire.

Durata de lipire este un parametru tehnologic ce influențează în mod direct eficiența economică a operației de lipire. Ea depinde atât de natura aliajului de lipire, cât și de natura materialului de bază și de dimensiunile îmbinării.

Răcirea pieselor lipite, mai ales în cazul brazării la temperaturi ridicate, se realizează în cuptor, în mediu protector.

d) Tehnologia lipirii prin rezistență

Lipirea prin rezistență este o metodă de lipire capilară la care sursa de încălzire o constituie rezistența electrică. Un procedeu al acestei metode, este cel al lipirii prin presiune în puncte cu ajutorul a doi electrozi, derivat din procedeu sudării prin presiune în puncte.

Există două variante ale acestui procedeu:

- lipirea prin încălzire cu electrozi din cărbune, care au rezistență relativ ridicată și se încălzesc puternic, transmitând căldura prin conducție la piesele ce se încălzesc;
- lipirea prin încălzire cu electrozi metalici, care au rezistență relativ redusă, și care produc încălzirea datorită rezistenței de contact dintre piese și electrod, respectiv dintre piesele ce se îmbină.

Acest procedeu constă în realizarea unei îmbinări lipite între suprafețele în contact a doua sau mai multe componente suprapuse în zonele prin care trece curentul de lipăire. Schema de principiu a procedurii este prezentată în figura 1.21.

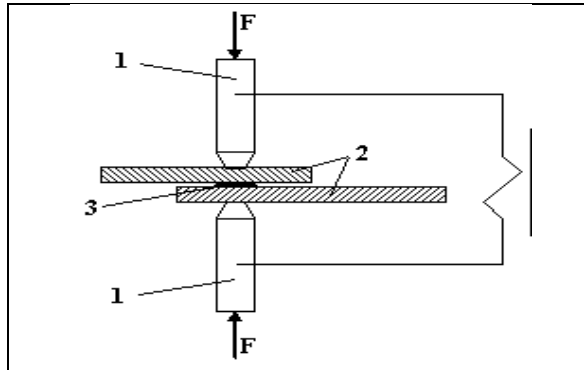


Fig. 1.21. Principiul lipirii prin rezistență cu încălzire cu 2 electrozi [10]

Componentele 2 sunt strânse cu forța de apăsare F între electrozii de contact 1, legați la secundarul sursei de curent. Încălzirea componentelor în zona de trecere a curentului are loc prin efect Joule-Lenz. La început încălzirea maximă se obține la contactul componentelor apăsate de electrozii de contact datorită rezistenței de contact de valori ridicate și a răcirii intense promovate de electrozii de contact la contactul acestora cu suprafața componentelor. Rezistența de contact scade însă foarte repede până la anularea ei datorită încălzirii locale și acțiunii forței de apăsare, ca urmare a creșterii secțiunii în zona de contact prin înmuierea și aplatizarea asperităților suprafețe lor. Prin încălzirea materialului are loc creșterea rezistivității electrice a materialului componentelor, fapt ce intensifică efectul Joule-Lenz prin creșterea rezistenței. Prin urmare, componentele se încălzesc în continuare până la topirea aliajului de lipire 3.

Sucesiunea fazelor de lipire prin această metodă este următoarea:

- Componentele suprapuse se așează deasupra electrodului de contact inferior;
- Strângerea componentelor prin coborârea electrodului de contact superior prin aplicarea forței de apăsare F în scopul asigurării unui contact electric bun;
- Conectarea curentului de lipire, încălzirea și formarea nucleului topit prin efect Joule-Lenz în zona de contact dintre componente;
- Întreruperea curentului de lipire (după un timp foarte scurt) și menținerea forței de apăsare;
- Anularea forței de apăsare și retragerea electrodului superior.

Avantajele acestui procedeu de lipire se apreciază a fi următoarele [10,13,78]:

- ✓ pentru efectuarea operațiilor sunt suficiente mașini simple de sudat în puncte, fără dispozitive de programare a forței;
- ✓ la o mișcare lentă de avans a electrodului se obține o mai bună stabilitate a procesului;
- ✓ timpul necesar este asimilat cu cel de la sudarea electrică prin presiune în puncte;
- ✓ este posibilă lipirea fără folosirea unui flux, deoarece mișcarea relativă dintre aliajul de lipit și materialul de bază, care are loc în faza de început a procesului, are un efect de străpungere asupra stratului de oxizi și impurități de pe suprafața pieselor și produce o activare a acestora;
- ✓ procesul de topire prin lipire este mult înlesnit prin faptul că aliajul de lipire are o rezistență electrică ridicată și un interval limitat de topire.

Condiția necesară și suficientă de formare a îmbinării lipite la lipirea prin rezistență prin încălzirea cu doi electrozi, este ca în zona de contact dintre componente să se formeze un strat de metal topit. Procesul poate fi împărțit în trei etape principale:

I. În prima etapă metalul componentelor, în zona de contact realizată prin apăsarea electrozilor de contact cu forța F , se încălzește și se dilată sub acțiunea căldurii obținute prin efect Joule-Lenz la trecerea curentului prin rezistența de contact și prin rezistența proprie a componentelor.

II. În etapa a doua suprafața de contact dintre componente crește în continuare ca efect al aplatizării asperităților și sub acțiunea căldurii are loc formarea unui nucleu de metal topit de o anumită dimensiune în funcție de grosimea componentelor. Straturile superficiale de oxizi și impurități de pe suprafața componentelor în contact se amestecă cu metalul topit. Metalul se dilată în continuare și suferă deformări plastice.

III. În etapa a treia, prin deconectarea curentului, metalul nucleului topit se răcește și recrystalizează prin solidificare.

Forța de apăsare are rolul de realizare a unui contact metalic local între componente și de creere în jurul nucleului topit a unei zone de contact intim între suprafețele componentelor care să împiedice expulzările de metal lichid și accesul aerului din mediul înconjurător, evitând oxidarea băii metalice a nucleului.

Deformările plastice ale metalului datorate încălzirii au un rol important pentru ruperea și desprinderea stratului de oxizi de pe suprafața componentelor. Îndepărtarea oxizilor din baie are loc sub acțiunea forțelor electrodinamice care acționează asupra băii metalice și care produc o puternică agitație a metalului topit, conducând la omogenizarea nucleului. Forțele electrodinamice au valori maxime la marginile nucleului scăzând spre interior pentru ca la mijlocul acestuia să devină nule. Sub acțiunea acestor forțe în baia metalică ia naștere o presiune variabilă după o lege parabolică a cărei valoare maximă se obține în mijlocul nucleului topit și care scade la zero înspre exteriorul acestuia. Agitația băii conduce la amestecarea metalului topit, la ruperea peliculei de oxizi din baie și, în același timp, sub acțiunea forțelor orientate favorabil, la împingerea spre extremitățile băii a elementelor nefuzibile din aceasta (oxizi, impurități, etc.).

Cantitatea de căldură Q , necesară formării îmbinării lipite se obține prin efect Joule-Lenz conform relației:

$$Q = \int_0^t I^2(t) \cdot R(t) \cdot dt \quad (1.14)$$

unde: - $I(t)$ – curentul ce trece prin îmbinare;
- $R(t)$ – rezistența totală a circuitului electric dintre electrozii de contact, variabilă în timp;

Rezistența totală a circuitului electric dintre electrozii de contact este formată dintr-o sumă de rezistențe, calculată cu expresia:

$$R = R_C' + 2R_C'' + 2R_p \quad (1.15)$$

unde: - R_C' – rezistența de contact dintre componente;
- R_C'' – rezistența de contact dintre componente și electrozii de contact;

- R_p – rezistența volumului de material cuprins între electrozi, de formă cilindrică cu baza egală cu diametrul vârfului electrozilor și înălțimea egală cu grosimea componentelor.

Componentele rezistenței totale se modifică continuu pe durata ciclului de lipire.

Valoarea rezistenței de contact dintre componente, R_C' , depinde de următorii factori:

- natura materialului componentelor (duritate, rezistența mecanică);
- starea suprafețelor;
- forța de apăsare și modul ei de aplicare (static sau dinamic);
- temperatura la locul de contact.

Prezența oxizilor, a ruginii și a altor impurități pe suprafața componentelor determină creșterea rezistenței de contact. De asemenea, rezistența de contact R_C' crește o dată cu scăderea rugozității dacă celelalte condiții rămân constante. Aceasta deoarece în cazul rugozităților mari pelicula de oxizi se rupe și se dislocă mai ușor datorita presiunilor mai mari exercitate asupra fiecărui punct de contact (microasperitate).

Influența stării suprafețelor asupra rezistenței de contact R_C' se poate observa din următoarele exemple stabilite în anumite condiții date de lucru [10]:

- pentru suprafețe polizate și lustruite: $100\mu\Omega$;
- pentru suprafețe prelucrate prin așchiere (strunjire): $120\mu\Omega$;
- pentru suprafețe ruginite: $80000\mu\Omega$;

Creșterea forței de apăsare conduce la creșterea suprafeței de contact prin deformațiile plastice ale microasperităților și tocirea acestora, straturile superficiale de oxizi se rup, ceea ce determină scăderea rezistenței de contact.

La încălzirea componentelor deformarea plastică a microasperităților și ruperea straturilor superficiale de oxizi are loc mult mai ușor, ceea ce determină scăderea rapidă a rezistenței de contact R_C' . Pentru fiecare material există o temperatură critică și o forță de apăsare la care valoarea rezistențelor de contact scade la zero. Cu cât forța de apăsare este mai mare cu atât este mai mică temperatura critică.

Rezistențele de contact electrozi-componente R_C'' sunt mult mai mici decât rezistența de contact dintre componente R_C' , datorită materialului electrozilor și datorită unei concentrări de presiune bine delimitată. Rezistența de contact R_C'' nu joacă un rol important în formarea lipiturii. Încălzirile în aceste zone sunt mici atât datorită materialului electrozilor (bun conducător de căldură), cât și datorită răcirii forțate cu apă a acestora.

Rezistența volumului de material, R_p , dintre electrozii de contact (figura 1.22), străbătut de curentul de lipire, se poate calcula prin mai multe modalități. Dacă se presupune că suprafața reală de contact dintre componente, A , este egală cu

suprafața de contact electrod-component A_e , $A_e = \frac{\pi d_e^2}{4}$, atunci rezistența R_p se poate scrie:

$$R_p = \rho \cdot \frac{2\delta}{A} \quad (1.16)$$

unde:

- d_e = diametrul cilindrului de metal;
- 2δ = înălțimea, cilindrului de metal.
- ρ = rezistivitatea electrică a materialului componentelor la temperatura mediului ambiant;

Valoarea rezistivității depinde de metalul componentelor, de eventualul tratament termomecanic la care au fost supuse și de temperatura acestora.

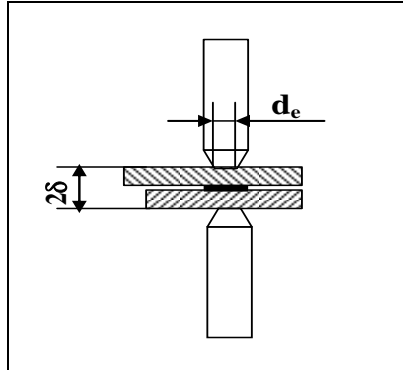


Fig. 1.22 Volumul de material dintre electrozi [10]

Influența temperaturii asupra rezistivității este dată de relația:

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha T) \quad (1.17)$$

Prin urmare rezistivitatea electrică crește mult cu creșterea temperaturii. Coeficientul α are valoarea $\alpha=0,004^{\circ}\text{C}^{-1}$ pentru metale pure, respectiv $\alpha=0,001 \dots 0,002^{\circ}\text{C}^{-1}$ pentru aliaje, iar la temperaturi critice, ca de exemplu la temperatura de topire, valoarea lui α crește de 1,5 ... 2 ori.

Ciclul de lucru specific brazării prin rezistență este reprezentat în figura 1.23. Se remarcă faptul că într-o primă etapă are loc presarea materialului de bază între electrozi, iar după timpul t_1 apare impulsul de curent. După o durată t_5 de la întreruperea curentului se îndepărtează sacina, și se eliberează materialul de bază dintre electrozi.

Spre deosebire de sudare, când are loc topirea metalului de bază, în cazul lipirii, aliajul de lipire are o rezistență electrică specifică mai ridicată și un interval limitat de topire, drept urmare, acesta se va topi înainte ca temperatura metalului de bază la suprafața de contact cu electrozodul să atingă o valoare ce ar putea conduce la modificări ale structurii acestuia.

Principalii parametri de proces care influențează realizarea îmbinării lipite sunt curentul de lipire și durata de lipire. Stabilirea acestor parametri se face astfel încât să nu apară topirea materialului de bază și deci sudarea acestuia.

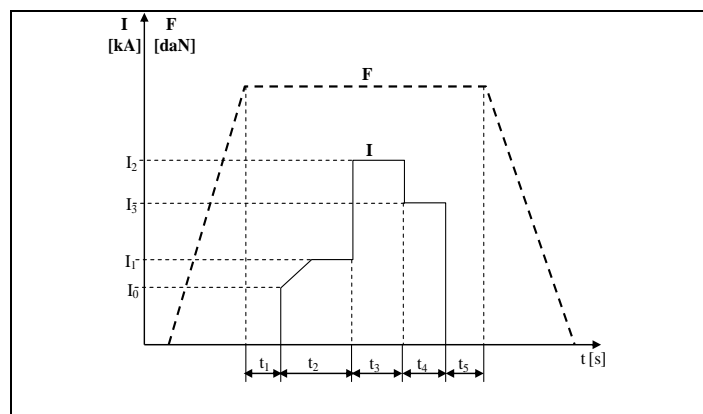


Fig. 1.23 Ciclograma lipirii electrice prin presiune în puncte [10,13]

1.3. Materiale de adaos la brazarea oțelurilor inoxidabile și a aliajelor pe bază de cupru

Din categoria materialelor de adaos utilizate la brazare fac parte aliajul de lipire și fluxul de lipire.

1.3.1. Aliaje de lipire

Aliajele de lipire sunt aliaje sub formă de sârme, vergele, table, bare, granule sau pulberi, cu ajutorul cărora se îmbină materialul de bază.

În cazul brazării, aceste aliaje trebuie să îndeplinească câteva condiții [25,38,43]:

- ✓ compoziția chimică să fie garantată de producător;
- ✓ să aibă temperaturi de topire inferioare față de metalul de bază;
- ✓ să aibă caracteristici optime de tensiune superficială, pentru a asigura o bună întindere și aderență pe suprafața de lipit;
- ✓ unghiul minim de umețare să fie sub 75o (recomandabil în jur de 15o);
- ✓ să asigure rezistență mecanică și rigiditate lipiturii;
- ✓ să aibă suprafața curată, netedă, fără fisuri, stratificări sau incluziuni;
- ✓ coeficientul de dilatare liniară să fie aproximativ egal cu cel al metalului de bază, pentru a nu se produce fisuri sau crăpături la cristalizare;
- ✓ să asigure rezistența la coroziune a îmbinării în mediul de folosire;
- ✓ să aibă preț de cost scăzut.

a) Aliaje pentru brazarea oțelurilor inoxidabile

În cazul brazării oțelurilor inoxidabile s-au dezvoltat familii de aliaje de lipire pe bază de Ni și pe bază de metale nobile (Au, Ag) [10,25,43]

Aliajele de brazare pe bază de Ni sunt de regulă aliate cu B, Si și P pentru formarea unor eutectice care diminuează temperatura de topire relativ înaltă a matricilor de Ni respectiv Ni-Cr și astfel este îmbunătățită comportarea la curgere și capacitatea de umețare acestor aliaje. Materialele de adaos pe bază de Ni se împart, în funcție de compoziția lor chimică, în cinci familii: Ni-B-Si, Ni-Cr-B-Si; Ni-Cr-Si; Ni-P, Ni-Cr-P, prezentate în tabelul 1.2.

Cercetări în domeniul materialelor de adaos pe bază de Ni [25] vizează dezvoltarea de aliaje cu fosfor. Astfel a fost creat, pentru aplicații în tehnica reactoarelor un material de adaos înalt aliat cu Cr ce conține fosfor, care se remarcă prin rezistență mare la coroziune și oxidare precum și rezistență la temperaturi înalte, unde pericolul de eroziune la lipirea pieselor cu pereți subțiri este mai mic ca la materialele de adaos obișnuite cu fosfor.

Aliajul de lipire fără B din familia Ni-Cr-Si poate fi procesat doar la temperaturi ridicate, situate între 1150 și 1205°C. Scăderea temperaturii de topire se poate realiza printr-o modificare a compoziției aliajului. Prin mici adaosuri de Fe și P se scade temperatura de topire a aliajelor din sistemul Ni-Cr-Si. Aceste materiale de adaos pe bază de Ni, cu conținut mic de fosfor se pot utiliza la temperaturi de lipire asemănătoare cu materialele de adaos Ni-Cr-B-Si.

Pe de altă parte, adaosul de Fe duce la scăderea eroziunii la piesele cu pereți subțiri cum ar fi schimbătoarele de căldură. În construcția de turbine se urmărește în viitor acoperirea pieselor cu straturi extrem de subțiri de material de adaos pentru temperaturi înalte și apoi, printr-un proces de difuzie, obținerea de îmbinări lipite extrem de rezistente.

1.3 – Materiale de adaos la brazarea oțelurilor inox și aliajelor pe bază de cupru 33

Tabelul 1.2 Aliaje de brazare pe bază de Ni [10,25]

Nr crt	DIN 8513 (AWS)	Compoziție (rest Ni), în procente de masă	Intervalul de cristalizare în °C	
1	L-Ni 1	13÷15 Cr-2,75÷3,5 B-4÷5 Si-4÷5 Fe	977	1038
2	L-Ni 1a	13÷15 Cr-2,75÷3,5 B-4÷5 Si-4÷5 Fe	977	1077
3	L-Ni 2	6÷8 Cr-2,75÷3,5 B-4÷5 Si-2,5÷3,5 Fe	971	999
4	L-Ni 3	2,75÷3,5 B-4÷5 Si-0,5 Fe	982	1038
5	L-Ni 4	1,5÷2,2 B-3÷4 Si-1,5 Fe	982	1066
6	L-Ni 5	18,5÷19,5 Cr-9,75÷10,75 Si	1079	1135
7	L-Ni 6	10÷12 P	877	877
8	L-Ni 7	13÷15 Cr-9,7÷10,5 P	888	888
9	L-Ni 8	6÷8 Si	982	1010
10	-	15 Cr-3,5 B	1055	1055
11	-	10 Cr-2 B-2,5 Si-2,5 Fe	970	1160
12	-	5 Cr-1 B-3 Si-3,5 Fe	970	1180
13	-	11,5 Cr-2,5 B-3,25 Si-3,75 Fe	970	1160
14	-	10 Cr-2,5 B-3,5 Si-3,5 Fe	970	1095
15	-	7 Cr-3,2 B-4,5 Si-3 Fe	975	1040
16	-	4 Cr-0,9 B	995	1080
17	-	3,5 Cr-0,9 B-2,5 Si-1 Fe	980	1065
18	-	25 Cr-10 P	872	951
19	-	21,5 Cr-11,6 Si	1062	1085
20	-	14,8 Cr-8 Si-3 P-3 Fe	996	1058
21	-	20,3 Cr-11,5 Si-0,5 P	1044	1060
22	-	6,25 Cr-3,5 B-4,9 Si-17,3 Fe	-	-
23	-	25 Cr-3 B-2,75 Si-2 Fe	1040	1120

Un mare dezavantaj al tuturor aliajelor de brazare pe bază de Ni utilizate la brazarea oțelurilor inoxidabile și refractare este stabilitatea în structură a fazelor dure ca boruri sau combinații chimice ale fosforului și siliciului cu Ni și Cr. În matricea de Ni relativ ductilă sunt incluse faze dure de tipul: Ni₃B, CrB și Ni₃Si.

Îndepărtarea fazelor dure din zona îmbinării lipite pentru creșterea ductilității și astfel îmbunătățirea proprietăților mecanice stă pe primul loc la utilizarea materialelor de adaos pe bază de Ni și poate fi făcută prin mărirea timpilor de lipire sau cu un tratament termic pentru difuzia fazelor dure în materialul de bază.

Aliajele de brazare pe bază de Ni, datorită fragilității lor foarte ridicate, sunt livrate sub formă de pulbere, cu sau fără element de legătură (o substanță care se transformă în pastă). Pentru producerea pastelor se folosesc elemente de legătură lichide. Tabelul 1.3 oferă o privire de ansamblu asupra elementelor de legătură ce se folosesc la lipirea în vid sau sub gaz protector.

34 Generalități privind procesul de brazare - 1

Tabelul 1.3: Elemente de legătură pentru materiale de adaos sub formă de pulbere pentru lipirea în vid sau gaz protector [25]

Element de legătură	solubil în		evaporare completă		formă de pornire
	apă	soluți organice	da	nu	
Etilenglicol	x		x		lichid
Furfurol	x		x		lichid
Glicerină	x		x		lichid
Metilceluloză	x			x	solid
Etilceluloză	x			x	solid
Parafină		x	x		solid
Parafinol		x	x		lichid
Stearinacid		x	x		solid

Rolul elementului de legătură este de a face posibilă manevrarea mai ușoară, dozarea exactă și fixarea mai bună a pulberii de aliaj.

O altă grupă importantă de aliaje pentru brazarea oțelurilor inoxidabile o formează aliaje cu metale nobile, pe bază de Au, Ag, Pd și Pt, cele mai uzuale fiind prezentate în tabelul 1.4. Aceste materiale de adaos sunt ductile, datorită structurii de soluție solidă, formată în urma dizolvării reciproce a componentelor aliajului (Au și Ag). Rezistența mecanică a îmbinărilor lipite cu aceste aliaje este independentă de lățimea fantei, pe când îmbinările lipite cu materiale de adaos pe bază de Ni prezintă o dependență importantă a rezistenței mecanice de această variabilă. Astfel rezultă o sensibilitate mică față de precizia de realizare a pieselor.

Tabelul 1.4 Aliaje de brazare cu metale nobile pentru lipirea la temperaturi înalte [10,25]

Nr crt	Denumire AWS	Compoziție, în % de masă	Interval de cristalizare	
1	BAu-1	62÷63 Cu-37÷38Au	991	1016
2	BAu-2	19,5÷20,5 Cu-79,5÷80,5Au	891	
3	BAu-3	61÷62 Cu-34,5÷35,5Au 2,5÷3,5 Ni	974	1029
4	BAu-4	81,5÷85,5 Au-17,5÷18,5 Ni	950	
5	BAu-5	29,5÷30,5 Au-33,5÷34,5 Pd 35,5÷36,5 Ni	1135	1166
6	-	100 Pt	1768	
7	-	100 Pd	1552	
8	-	65 Pd-35 Co	1230	1235
9	-	60 Pd-40 Ni	1238	
10	-	92 Au-8 Pd	1200	1240
11	-	81,5 Au-16,5 Cu-2 Ni	910	925
12	-	73,8 Au-26,2 Ni	980	1010
13	-	72 Au-22 Ni-6 Cr	975	1000
14	-	70 Au-22 Ni-8 Pd	1005	1037
15	-	60 Au-37 Cu-3 In	860	900
16	-	50 Au-25 Pd-25 Ni	1102	1121
17	-	50 Au-50 Cu	955	970
18	-	100 Ag	960	
19	-	54 Ag-25 Pd-21 Cu	900	950
20	-	48,5 Ag-22,5 Pd-18,9 Cu-10 Ni	910	1179

1.3 – Materiale de adaos la brazarea oțelurilor inox și aliajelor pe bază de cupru 35

Datorită ductilității lor mari, aliajele pe bază de metale nobile se pot obține cu ușurință sub formă de de sârmă sau benzi. Ele prezintă de regulă puncte de topire mai mici decât în cazul aliajelor pe bază de Ni.

Proprietăți de exploatare importante ca: rezistența la temperatură și rezistența la oxidare la temperaturi înalte de până la aproximativ 800°C, sunt asigurate de materialele de adaos pe bază de metale nobile ca și în cazul materialelor pe bază de Ni. Gama de materiale de bază ce pot fi brazate cu aliaje pe bază de metale nobile este mai mare decât la aliajele pe bază de Ni deoarece pe lângă oțel și superaliaje pe bază de Ni sau cobalt se pot lipi cu materiale nobile și metale speciale și ceramică metalizată. În plus tendința de fragilizare datorită lipsei metaloizilor B, și P este mai mică decât la materialele de adaos pe bază de Ni.

b) Aliaje pentru brazarea cuprului și aliajelor sale

Principalele aliaje pentru brazarea cuprului și aliajelor sale, sintetizate în tabelul 1.5, sunt pe bază de cupru și argint.

Tabelul 1.5 Aliaje de brazare pentru Cu și aliaje de Cu [38, 43, 98]

Simbolizar e AWS	Compoziție chimică, %							Temperatur a solidus (°C)	Temperatur a lichidus (°C)
	A g	Cu	P	Zn	C d	N i	S n		
BCuP-5	15	80	5	-	-	-	-	645	705
BCuP-3	5	89	6	-	-	-	-	645	815
BCuP-2	-	92.7 5	7.2 5	-	-	-	-	710	795
BAG-1	45	15	-	16	24	-	-	605	620
BAG-1a	50	15,5	-	16, 5	18	-	-	625	635
BAG-2	35	26	-	21	18	-	-	605	700
BAG-3	50	15,5	-	15, 5	16	3	-	630	690
BAG-5	45	30	-	25	-	-	-	665	745
BAG-6	50	34	-	16	-	-	-	675	775
BAG-7	56	22	-	17	-	-	5	620	650
BAG-8	72	28	-	-	-	-	-	780	780
BAG-18	60	30	-	-	-	-	10	600	720
BAG-20	30	38	-	32	-	-	-	675	765
BAG-24	50	20	-	28	-	2	-	660	705
BAG-34	38	32	-	28	-	-	2	650	720
BAG-36	45	27	-	25	-	-	3	675	775
BAG-37	25	40	-	33	-	-	2	690	780

Pentru brazarea cuprului electrolitic dezoxidat de mare conductivitate, utilizat la conductori electrici, radiatoare auto, instalatii sanitare, tuburi de schimbare a caldurii, conducte de transport si ghidare a undelor, se recomandă aliaje fără cadmiu: BCuP-5, BCuP-3 sau BCuP-2, BAG-7, BAG-34. De asemenea, pentru evitarea fragilizării, cuprul electrolitic nu poate fi brazat în atmosfere de hidrogen. Atmosferele de brazare recomandate sunt: exogaz sărac sau bogat, endogaz reactionat, amoniac disociat, vid.

La brazarea alamei comerciale, alamei galbene - Metal Muntz se utilizează atât aliaje cu cadmiu: BAG-1a, BAG-2 si BAG-1, cât și aliaje fără cadmiu: BCuP-4,

BAG-7, BAG-34, și BAG-20. Atmosferele de lucru recomandate sunt: exogaz sărac, endogaz reacționat și amoniac disociat. Aliajele BAG-2 sunt preferate pentru brazarea în cuptor pentru a evita dezincarea alamelor cu conținut mare de zinc.

În cazul brazării alamelor cu plumb se recomandă cicluri de brazare scurte pentru a diminua coagularea plumbului în aliajul de brazare. Alama cu plumb trebuie detensionată înainte de brazare pentru a evita fisurile intergranulare. Aliajele BAG-1a, BAG-7 sau BAG-18 sunt preferate pentru brazarea în cuptor pentru a evita dezincarea alamelor cu conținut mare de zinc. Brazarea în cuptor a alamelor cu plumb nu este recomandată pentru conținuturi de plumb mai mari de 5 %.

Pentru brazarea bronzurilor cu fosfor se recomandă aliajele BCu-5, BAG-1a, BAG-2 și BAG-1; BAG-7. Atmosferele de lucru recomandate sunt: exogaz sărac sau bogat, endogaz reacționat și amoniac disociat.

Bronzurile cu siliciu trebuie să fie detensionate înainte de brazare pentru a evita fisurarea intergranulară și trebuie brazate la temperaturi sub 760 °C pentru a se evita contracțiile datorate gradientului mare de temperatură. Prin urmare se recomandă ca aliaje de brazare BAG-1a, BAG-3 și BAG-1; BAG-2, BAG-24.

La brazarea bronzurilor cu aluminiu utilizate la armături marine, tuburi de schimbare a căldurii, etc. se recomandă utilizarea aliajelor BAG-3, BAG-6 și BAG-24, iar atmosferele de lucru recomandate sunt exogaz sărac sau bogat, amoniac disociat sau vid.

Bronzurile cu nichel trebuie detensionate înainte de brazare pentru a evita fisurarea intergranulară. Aliajele de brazare recomandate sunt: BCu-5, BAG-1a, BAG-2, BAG-1. Bronzurile cu nichel care conțin mai mult de 10 % nichel nu ar trebui brazate cu BCuP-5. Atmosferele de brazare recomandate în acest caz sunt: exogaz sărac sau bogat, endogaz reacționat, amoniac disociat, vid.

1.3.2 Fluxuri de lipire

Fluxurile de lipire au rolul de a curăți suprafețele componentelor și de a le proteja pe durata operației de lipire. Ele trebuie să intre în acțiune la o temperatură inferioară celei de topire a aliajului de lipire.

Efectul fluxului de lipire se bazează pe faptul că umectează oxizii metalului, îi reduce, iar produsele ce apar sunt dizolvate și îndepărtate. În continuare, fluxul de lipire trebuie să protejeze suprafața metalului de acțiunea aerului, iar la temperatura de lucru, acesta trebuie să-i permită metalului topit să pătrundă complet în rost.

La alegerea fluxului de lipire trebuie ținut cont de următoarele cerințe [10,25,43]:

- să aibă proprietăți bune de umectare și întindere pe oxidul metalului, pentru ca locul lipirii să fie complet umezit cu un strat gros și uniform de decapant care rămâne la temperatura de lipire;
- să fie capabil să reducă oxidul superficial;
- temperatura de lucru a materialului de adaos trebuie să se situeze în zona de activitate a fluxului de lipire, temperatura de umectare a fluxului de lipire situându-se cel puțin cu 50°C sub temperatura de lucru, pentru a asigura o îndepărtare completă a oxizilor la atingerea temperaturii de lucru. Fluxul de lipire nu are voie să se decompună în domeniul de temperatură de lucru chiar la timpi de lipire mai mari pentru ca protecția la oxidare a zonei de lipit să fie asigurată;
- să aibă capacitate mare de dizolvare a oxizilor metalici în cazul fantelor subțiri, pentru ca să ajungă să dizolve complet oxizii. Capacitatea de

1.3 – Materiale de adaos la brazarea oțelurilor inox și aliajelor pe bază de cupru 37

dizolvare a majorității fluxurilor depinde de temperatură și de felul oxidului, situându-se între 0,1 ... 10%;

- să aibă în intervalul de temperatură de lucru o vâscozitate între 0,1 și 1 poise. Pe de o parte trebuie să fie destul de fluid, pentru a putea fi îndepărtat de materialul de adaos și în fante înguste, iar pe de altă parte destul de vâscos pentru a adera la suprafață în cazul lipirii în poziții dificile;
- după terminarea lipirii fluxul de lipire să poată fi îndepărtat ușor, de exemplu, prin spălare cu apă. Acest lucru este important în special pentru fluxurile corozive.

Fluxurile de lipire pot conține aditivi ce reduc tensiunea superficială a materialului de adaos lichid și astfel măresc capacitatea acestuia de umectare.

În tabelul 1.6 sunt prezentate fluxuri utilizate la brazare [43, 104].

Tabelul 1.6 Fluxuri utilizate la brazare

Denumire	Compoziția chimică	Temperatura de lucru [°C]	Domeniu de utilizare
FL10	Fluoruri higroscopice	Min 550	Lipirea Al și aliajelor sale
FL20	Fluoruri nehigroscopice	Min 550	
FH10	Cloruri și fluoruri higroscopice	550 - 800	De uz general
FH11	Fluoruri nehigroscopice	550 - 800	Lipirea Cu-Al
FH12	Bor, compuși de bor, fluoruri simple și complexe	550 - 800	Lipirea OL inoxidabile
FH20	Compuși de bor și fluoruri	700 - 1000	De uz general
FH21	Compuși de bor	750 - 1100	
FH30	Compuși de bor, fosfați, silicați	min 1000	Lipirea alamei și a Cu
FH40	Cloruri, fluoruri fără bor	600 - 1000	Lipituri unde borul este interzis

2. Aliaje de brazare cu structură amorfă

2.1. Aliaje amorfe

Descoperirea structurii amorfe la metale este indubitabil meritul profesorului american Pol Duwez. Căutările echipei sale de cercetare de a promova noi structuri metastabile s-au concretizat în anul 1960 prin obținerea unei "sticle metalice" în sistemul Au-Si printr-o metodă de răcire rapidă a topiturii (picăturii) metalice pe un substrat răcit. Uriașul interes de care s-au bucurat apoi, aceste noi materiale neconvenționale își are explicația în primul rând în ansamblul de proprietăți nemaîntâlnit la alte materiale și implicit în potentialul aplicativ deosebit.

Din punct de vedere științific putem vorbi de trei stări structurale:

- *starea de gaz*, ce presupune o dezordine totală în aranjamentul atomic;
- *starea de lichid și solid amorf*, caracterizată prin lipsa de ordine la lungă distanță însă distribuția în spațiu a atomilor nu este complet întâmplătoare, ci gruparea atomilor vecini în jurul unui atom dat are anumite trăsături geometrice caracteristice, constituind ordinea la scurtă distanță, pe un domeniu restâns de 15...20 Å;
- *starea cristalină*, ce reprezintă o ordine totală în aranjamentul spațial al atomilor.

Se poate afirma deci că starea amorfă este o stare intermediară, diferită de starea lichidă, ce se descrie pe baza diverselor modele structurale și matematice.

Luând în considerare modelul cvasicristalin, conform căruia metalul amorf se caracterizează printr-un aranjament ordonat al particulelor într-un domeniu restrâns, chimic și topologic, s-au creat diferite tipuri de aranjare a atomilor. Merită atenție tipul de legături întâmplătoare ale unității moleculare (Random Packing and Molecular Units – RPMU), conceput de P.M. Gaskell, și care are la bază ideea că atomii de metaloid sunt înconjurați de atomi de metal, dispuși într-o configurație geometrică de prismă triunghiulară (figura 2.1). Se observă că ordinea aranjării atomilor se păstrează pe distanțe mici, în jurul atomilor de metaloid (reprezențați prin ceruțele albe). Întrucât prisma triunghiulară este element de construcție la un număr mare de compuși chimici cristalini, face ca să nu apară diferențe semnificative între structurile diverselor metale amorfe, ceea ce constituie un neajuns.

Un alt tip de aranjament atomic este tipul de împachetare densă întâmplătoare a atomilor (Dense Random Packing – DRP). Acest tip are la bază ideea ordinii locale impusă de restricții geometrice și de excluderea contactelor tari metaloid-metaloid. În funcție de modul în care sunt dispuși atomii de metaloid, au fost realizate diverse variante ale acestui tip. Astfel, Polk consideră că atomii metalului de tranziție formează o structură de sfere tari, iar atomii de metaloid ocupă golurile mari rămase. Bennett admite că la un aranjament ordonat la scurtă distanță, denumit *cluster*, se alipesc trei atomi așezați la distanță minimă de centrul de greutate momentan al clusterului considerat, obținându-se astfel un cluster final, de formă sferică care prezintă o medie de împachetare. Densitatea de împachetare scade pe măsura îndepărtării de centrul clusterului și tinde spre valoarea finală de 0,61 când raza clusterului final tinde spre infinit. Bernal-Finney construiesc un alt model de împachetare densă din sfere rigide și spițe, în care lungimea spițelor corespunde

funcției de distribuție a atomilor în argonul lichefiat. În limitele unei sfere oarecare a fost distribuite statistic N puncte, fiecare punct fiind considerat centrul unei sfere de o anumită rază. Dacă două sfere se suprapun, atunci se face deplasarea lor de-a lungul liniei ce le unește centrele, până când ele devin tangente. Procedura se continuă prin mărirea razei inițiale, după care se reia ciclul până la eliminarea suprapunerilor.

În figura 2.2 este schematizat un tip DRP, unde atomii de metaloid sunt reprezentați prin cercuri deschise, iar liniile întrerupte definesc poliedrul vecin cel mai apropiat.

Heimendahl propune tipul de relaxare QC, admitând că atomul nu mai este reprezentat printr-o sferă rigidă, iar interacțiunile dintre atomi sunt descrise prin potențialele lor ce depind de distanță. Fiecare atom se deplasează în poziția ce asigură energia minimă, poziție ce depinde de ceilalți atomi. În figura 2.3 se reprezintă o imagine sugestivă a tipului QC, unde atomul **1** constituie originea clusterului, iar mărirea cercurilor constituie probabilitatea semnificativă de aranjare a altor atomi.

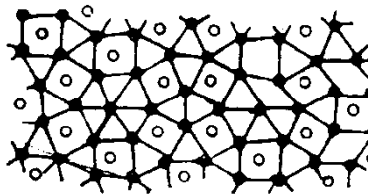


Fig.2.1 Tipul de aranjament atomic RPMU [18]

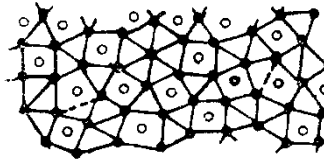


Fig.2.2 Tipul de aranjament atomic DRP [18]

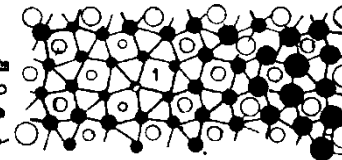


Fig.2.3 Tipul de aranjament atomic QC [18]

Tipurile de aranjament atomic prezentate admit că starea amorfă este generată de starea lichidă a materialului metalic, fiind caracterizată printr-o structură formată din clusteri și goluri.

În teoria stării lichide se consideră că orice topitură metalică poate fi transformată într-un metal amorf dacă răcirea topiturii s-a făcut cu o viteză suficient de mare astfel încât vitezele de difuzie să fie foarte mici, vâscozitatea ridicată și deci formarea germinilor cristalini și creșterea acestora să nu aibă loc. Interes practic prezintă sistemele de aliaje cu capacitate mare de a deveni amorfe la viteze maxime de răcire realizabile în practica industrială de $10^6 \dots 10^{10}$ K/s.

Întrucât în accepțiunea termenului de „sticlă” intră toate corpurile amorfe obținute prin răcirea unei topituri, metalele amorfe rezultate în urma răcirii ultrarapide a unei topituri se mai numesc și „sticle metalice”.

Clasificarea sistemelor de aliaje ce formează sticle metalice se poate face pe baza poziției relative a componentelor în tabelul periodic. Astfel se poate vorbi de trei grupe de aliaje amorfizabile [18,28]:

- Grupa I: metal de tranziție – metaloid;
- Grupa II: metal de tranziție – metal de tranziție;
- Grupa III: metale simple, netranziționale, cu sau fără participare metalelor din grupa pământurilor rare.

Prima grupă este alcătuită din metale amorfe la a căror formare participă metalele de tranziție (Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zr, Nb, Mo, Rh, Pd, Ag, Hf, Ta, W, Ir, Pt, Au, La) și metaloizi (B, Al, Tl, C, Si, Ge, Sn, P, As, Te). Din experiența practică, este recomandat ca metalele de tranziție să participe în proporție de 75 –

90 % at., iar metaloizii în proporție de 25 – 10 % at. Metaloizii au rolul de a mări capacitatea de amorfizare a aliajului.

A doua grupă conține metale amorfe formate din componente intertranzitionale [metal de tranziție din primele grupe ale tabelului periodic (Ti, Zr, Hf, V, Nb, Ta) și metal de tranziție din ultimele grupe ale aceluiași tabel (Fe, Co, Ni, Cu, Rh, Pd, Ag, Ir, Pt, Al)].

A treia grupă conține metale amorfe formate din metale netranziționale, cu sau fără participarea metalelor din grupa pământurilor rare (Be, Mg, Ca, Sr, Ba, Y, Re, Zn, Ga, Sb, Pb, Ce, Th, Pr, Nb, U, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Lu).

Aliajele metalice amorfe (în special sticlele metalice) prezintă caracteristici deseori excepționale, neasociate într-un asemenea mod în nici o altă clasă de materiale cunoscute.

Absența cristalinității conduce la valori ridicate ale rezistenței la rupere în sticlele metalice, ușurință deosebită de magnetizare, atenuarea extrem de redusă a undelor acustice și o rezistivitate electrică apreciabilă [18,28]. De asemenea, omogenitatea structurală și o anumită compoziție chimică conduc la o mare rezistență la coroziunea electrochimică. Solubilitatea nelimitată a componentelor chimice din compoziția sticlelor metalice, în comparație cu solubilitățile limitate manifestate în majoritatea sistemelor de aliaje cristaline, stă la baza unor proprietăți de transport electronic la temperaturi joase neîntâlnite la alte clase de materiale.

Sticlele metalice, prezentând legături interatomice de tip metalic, au proprietăți care le diferențiază net de sticlele clasice nemetalice cum sunt: ductilitatea care le asigură posibilitatea de a fi prelucrate prin deformare plastică și o comportare nefragilă la rupere, conductivitate electrică și termică și proprietăți optice specifice (opacitate și luciu metalic) [18,28].

Fabricarea aliajelor amorfe la scară industrială se poate face doar utilizând procedee continue de călire rapidă. Aceste tehnici au avantajul că materialele se obțin prin turnare directă, și nu prin prelucrarea unor semifabricate. Deși au fost dezvoltate diferite tehnici pentru obținerea de cantități comerciale de materiale amorfe (cum ar fi extragerea din topitură, utilizată la obținerea de pulberi și fibre în cantități de ordinul tonelor într-un an – într-o singură fabrică!) cea mai avantajoasă rămâne răcirea din topitură (melt spinning) care a devenit metoda standard utilizată în numeroase laboratoare și fabrici. Procedeele au fost extensiv studiate și au fost efectuate numeroase studii experimentale și analitice ale cineticii condițiilor de procesare. Procedeele implică prezența unui jet liber de topitură, a unei băi metalice (mai mult sau mai puțin staționară) din care materialul este extras și călit sub formă de bandă; forma băii determinând și limitând dimensiunile benzilor obținute.

Tehnicile reprezentative de răcire din topitură (fig.2.4) includ [18]:

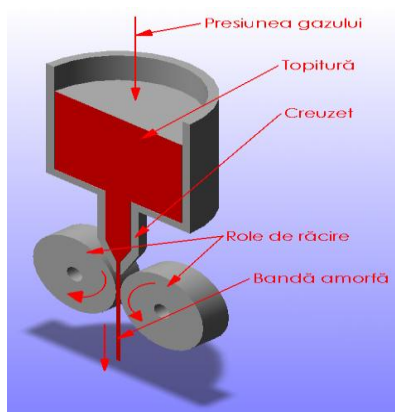
- călirea cu două role;
- răcirea liberă din topitură (exterior);
- răcirea liberă din topitură (interior);
- călire centrifugală.

În metoda călirii cu 2 role (fig. 2.4,a), topitura este forțată să treacă printre două role ce se rotesc cu viteză mare, iar la contactul cu cele două suprafețe reci este călită rapid pentru a forma o bandă de grosime uniformă. Presiunea aplicată roților în timpul procesului permite obținerea de viteze de răcire inițiale mari, dar „răcirea secundară” datorită convecției și radiației va fi slabă dacă banda părăsește imediat rolele răcite. De aceea această tehnică se folosește la obținerea benzilor amorfe și microcristaline dacă aliajele metalice au abilitate ridicată de formare a sticlelor.

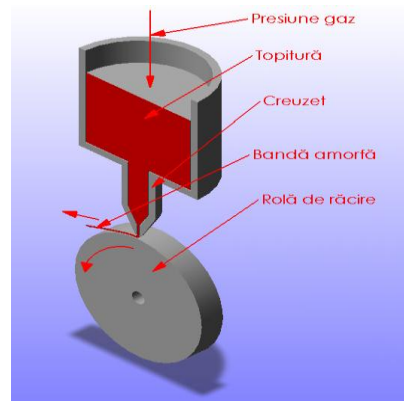
În tehnica răcirii libere din topitură (exterior), metalul topit este adus în contact cu exteriorul unei role aflate în mișcare de rotație (fig. 2.4,b) și apoi "înghețat" sub formă de bandă sau filament. Această metodă de răcire cu o rolă este cea mai avantajoasă dintre metodele de obținere a sticlelor metalice, ducând la obținerea unor benzi lungi, subțiri și continue.

Când topitura este ejectată dintr-o formă de turnare pe suprafața interioară a unui cilindru în mișcare de rotație, tehnica se numește sau răcire liberă din topitură (interior) – fig. 2.4,c. Pentru a se obține filamente amorfe sau benzi continue, jetul de topitură este ejectat printr-un orificiu direct pe suprafața interioară a unei role aflate în mișcare de rotație cu viteză mare, rolă realizată dintr-un aliaj cu conductivitate termică ridicată. Componenta normală a forței centrifugale menține banda solidificată în contact cu suprafața rolei, iar componenta tangențială forțează banda solidificată să alunece pe panta rolei.

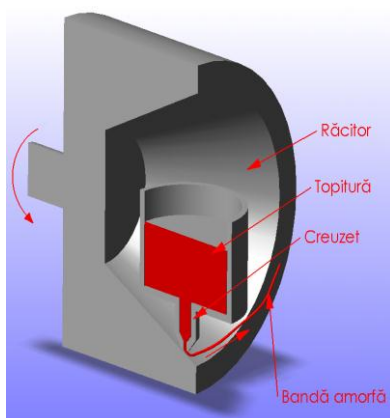
Călirea centrifugală (fig. 2.4,d) constă în ejectarea topiturii prin orificiul duzei de la baza creuzetului pe suprafața interioară a unei role în mișcare de rotație, cu axa de rotație în plan vertical. Rata scăzută de călire care este un dezavantaj duce însă la limitarea extinderii procedurii.



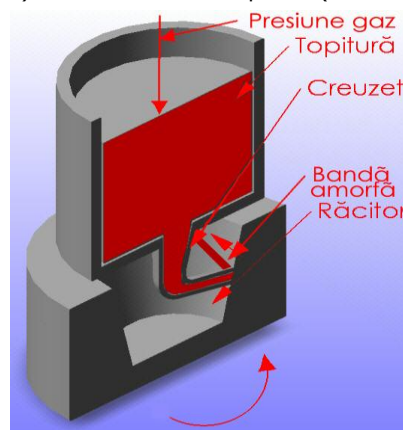
a) călirea cu două role



b) răcirea liberă din topitură (exterior)



c) răcirea liberă din topitură (interior)



d) călire centrifugală

Fig. 2.4 Tehnici de răcire din topitură [18]

Narasimhan (fig. 2.5) a avut ideea plasării duzei de ejectare la o distanță foarte mică de suprafața rolei (o fracțiune de milimetru), asigurând astfel constrângerea mecanică a băii și minimizând perturbațiile. În această configurație cantitatea de topitură este menținută constantă (fosta baie metalică, reprezentată cu linie întreruptă în fig. 2.5,b) și astfel geometria benzii obținute este îmbunătățită. Duza cu forma din figura 2.5,b poate fi în principiu utilizată fără a se limita lățimea benzilor, deschizând astfel drumul pentru producerea la scară industrială.

Acest procedeu se numește "planar flow casting".

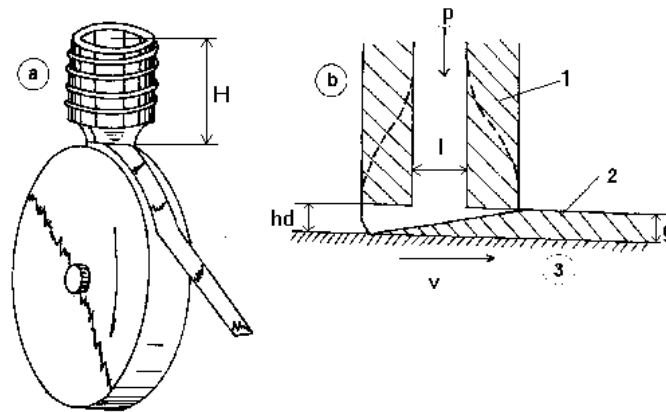


Fig. 2.5 Reprezentarea schematică a procedurii "planar flow casting" [28]

a) vedere general; b) Detaliu - orificiul duzei:

1 - creuzet; 2 - bandă; 3 - substrat (rolă de răcire)

2.2. Familii de aliaje de brazare amorfe

Stadiul actual al dezvoltării tehnologice impune extinderea domeniului de aplicare al brazării oțelurilor înalt aliate și a aliajelor neferoase pe bază de Cu, Al, Ni, Co, Ti, în industrii de vârf, cum ar fi: aero-spațială, energetică, chimică, etc. Având în vedere caracteristicile pe care trebuie să le îndeplinească îmbinările lipite (în special rezistență mecanică, rezistență la coroziune și ductilitate ridicate), se impune dezvoltarea unor aliaje de lipire și a unor procedee de brazare care să asigure îmbinării lipite caracteristicile de exploatare dorite.

Începând de la descoperirile lui Sexton și DeCristofaro [22,24] privind potențialul aplicativ al producerii de benzi flexibile pentru brazare, în ultimii 20 de ani s-au găsit numeroase aplicații ale acestora. Avantajul important pe care aceste benzi amorfe sau cvasiamorfe pentru brazare îl prezintă este ductilitatea și flexibilitatea lor. Dacă aliajele pentru brazare la temperaturi înalte, datorită fragilității lor pot fi folosite doar sub formă de pulbere, benzile de brazare obținute prin răcirea ultrarapidă a topiturii pot fi plasate cu ușurință în zona îmbinării, prezentând totodată și caracteristici de umectare superioare.

Pentru ca aceste aliaje să poată fi elaborate în stare amorfă ele trebuie să aibă o compoziție chimică favorabilă amorfizării. Așa cum se prezintă și în literatura de specialitate, pentru a obține un aliaj cu structură cvasiamorfă sau amorfă, prin răcirea ultrarapidă a topiturii, compoziția chimică trebuie astfel aleasă încât să fie îndeplinite următoarele condiții [18,28]:

- Gama de compoziții în care se formează aliajul amorf trebuie să fie amplasată într-o regiune a diagramei de echilibru fazic în care faza lichidă să fie stabilă la temperaturi joase (o regiune în care sunt prezente eutectice sau compuși ușor fuzibili).
 - Diagramele de echilibru fazic ale sistemelor de aliaje care formează sticle metalice trebuie să prezinte solubilități reduse sau chiar nule ale componentilor în soluții solide terminale, datorită unei entalpii libere pozitive de formare a soluției solide.
 - Sistemele de aliaje care formează sticle metalice trebuie să prezinte compuși intermetalici, deoarece existența mai multor compuși intermetalici foarte stabili, cu rețele cristaline de mare complexitate într-o anumită regiune de compoziții a diagramei de echilibru fazic este, într-un anumit fel, complementară cu formarea de sticle metalice în cealaltă parte a diagramei de echilibru fazic.
- Prin urmare, pentru a obține aliaje de lipire la temperaturi înalte pe bază de Ni-Cr sub formă de benzi cu structură amorfă sau cvasiamorfă, compoziția lor chimică trebuie să respecte atât cerințele impuse unui aliaj de brazare cât și cerințele impuse unui aliaj amorfizabil, sintetizate în figura 2.6.

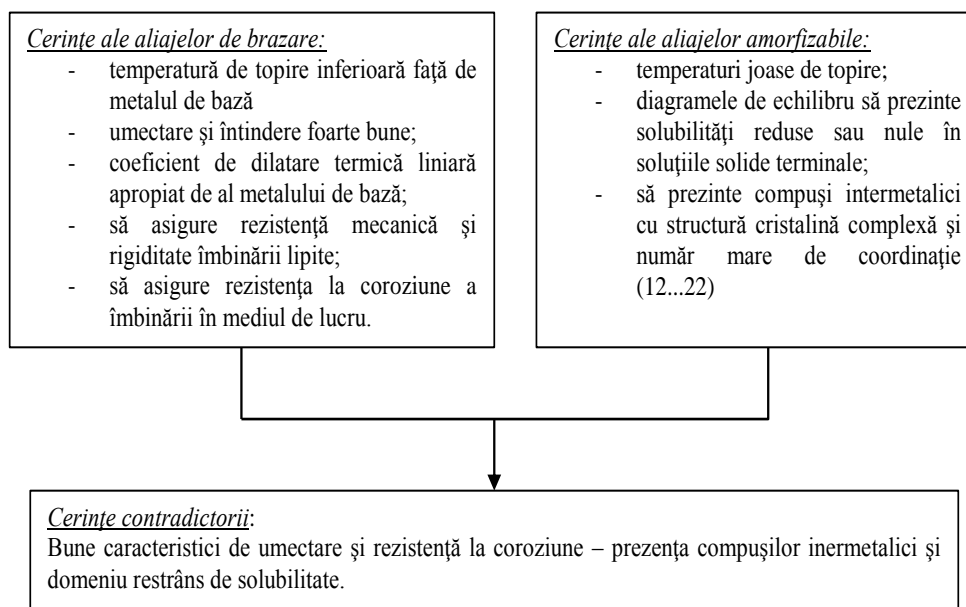


Fig. 2.6. Cerințele impuse aliajelor de brazare amorf [10]

Ținând cont de aceste cerințe, se poate realiza următorul algoritm de procesare a aliajului pentru brazare (figura 2.7)

Se pleacă de la cerințele pe care trebuie să le îndeplinească îmbinarea lipită. Acestea vor impune un anumit procedeu de brazare și anumite condiții pe care trebuie să le îndeplinească materialul de adaos. În funcție de acestea, se va opta pentru o formă geometrică optimă a materialului de adaos și, implicit, pentru un anumit procedeu de amorfizare, care va genera cerințele impuse aliajului amorfizabil. Se va stabili astfel o compoziție chimică optimă pentru aliajul de

brazare, care să îndeplinească atât cerințele tehnologice cât și cele de exploatare impuse.

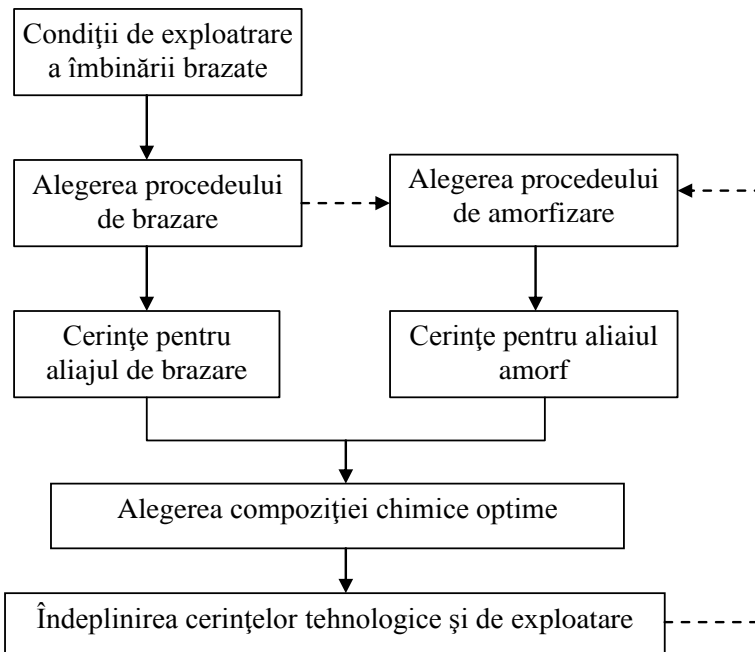


Fig 2.7 Algoritm de procesare a aliajului de brazare cu structură amorfă [11]

La ora actuală se produc la nivel industrial mai multe familii de aliaje amorse de brazare, utilizate în domenii de vârf ale industriei aerospațiale, energetice, chimice, automotive, etc.

Aceste aliaje amorse se elaborează de regulă sub formă de benzi continue, în instalații industriale bazate pe metoda melt-spinning. Schema de principiu a unei astfel de instalații industriale este prezentată în figura 2.8.

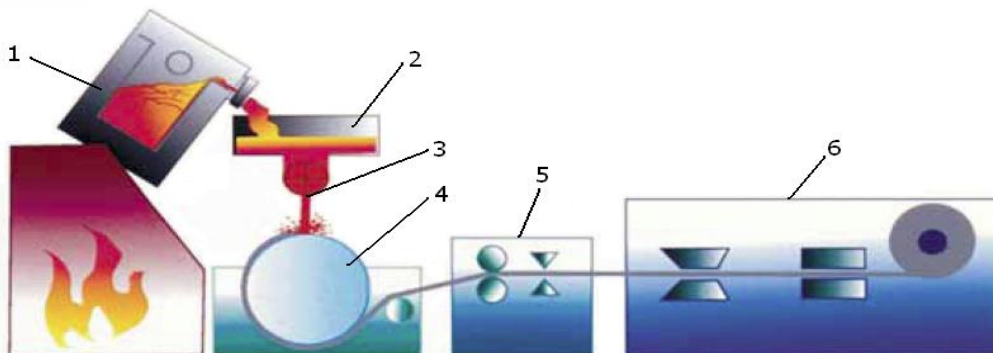


Fig. 2.8. Instalație industrial de producere a benzilor amorse [95]

1-cuptor de topire a aliajului primar; 2-rezervor de metal topit; 3-duză de ejectare a topiturii; 4-rolă de răcire; 5-sistem de control al benzii; 6-sistem de înfășurare a benzii

Astfel, aliajul primar, cu o compoziție chimică favorabilă amorfizării, este topit într-un cuptor, de unde topitura este transferată într-un rezervor de topitură ce alimentează duzele de turnare prin orificiul cărora topitura este ejectată pe suprafața exterioară a unei role de răcire aflată în mișcare de rotație. Prin răcirea ultrarapidă pe suprafața rolei, topitura se solidifică sub forma unei benzi continue care ulterior este controlată din punct de vedere geometric și bobinată cu ajutorul unui sistem de înfășurare. Astfel se produc benzi uniforme din punct de vedere geometric.

La ora actuală se produc la scară industrială aliaje amorge sub formă de benzi pe bază de Ni, pentru brazarea oțelurilor inoxidabile și a superaliajelor. Cele mai utilizate mărci sunt prezentate în tabelul 2.1.

Tabelul 2.1. Aliaje de brazare amorge pe bază de Ni [51, 58, 60, 66, 95]

Denumire comercială	Simbolizare AWS/ASM	Compoziția chimică, % de masă								T _{solid} us/ °C	T _{lichid} us/ °C	T _{brazare} °C
		Cr	Fe	Si	C	B	P	Mo	Ni			
MBF 15		13.0	4.2	4.5	0.03	2.8	-	-	rest	965	1103	1135
MBF 20	AWS BNi2 / AMS 4777	7.0	3.0	4.5	0.06	3.2	-	-	rest	969	1024	1055
MBF 30	AWS BNi3 / AMS 4778	-	-	4.5	0.06	3.2	-	-	rest	984	1054	1085
MBF 50	AWS BNi5a	19.0	-	7.3	0.08	1.5	-	-	rest	1052	1144	1170
MBF 51	AWS BNi5b	15.0	-	7.25	0.06	1.4	-	-	rest	1030	1126	1195
MBF 53		15.0	-	7.25	0.06	1.4	-	5.0	rest	1045	1127	1195
MBF 60	AWS BNi6	-	-	-	0.10	-	11.0	-	rest	883	921	950
MBF 62		21.0	<1	0.5	-	0.5	8.0	1.0	rest	878	990	1020
MBF 64		17.5	4.0	6.0		0.75	5.0	1.0	rest	913	978	1010
MBF 80	AWS BNi9	15.2	-	-	0.06	4.0	-	-	rest	1048	1091	1120

Benzile obținute din aceste aliaje se pot obține la grosimi și lățimi diferite. În tabelul 2.2 sunt indicate lățimile maxime la care se pot obține aceste benzi pentru anumite grosimi standard, impuse de condițiile de amorfizare.

Tabelul 2.2. Geometria benzilor din aliaje de brazare amorfe pe bază de Ni [95]

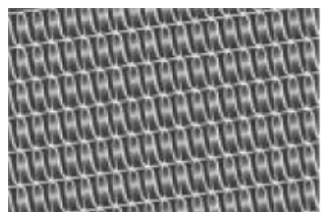
Denumire comercială	Grosimea standard, μm				
	24,5	38,1	50,8	63,5	76,2
<i>MBF 15</i>	215,6 mm	215,6 mm	-	-	-
<i>MBF 20</i>	215,6 mm	215,6 mm	215,6 mm	215,6 mm	215,6 mm
<i>MBF 30</i>	215,6 mm	215,6 mm	215,6 mm	215,6 mm	215,6 mm
<i>MBF 50</i>	165,1 mm	165,1 mm	-	-	-
<i>MBF 51</i>	215,6 mm	215,6 mm	215,6 mm	-	-
<i>MBF 53</i>	101,6 mm	101,6 mm	-	-	-
<i>MBF 60</i>	76,2 mm	50,8 mm	-	-	-
<i>MBF 62</i>	170,18 mm	215,6 mm	101,6 mm		
<i>MBF 64</i>	170,18 mm	215,9 mm	-	-	-
<i>MBF 80</i>	-	50,8 mm	-	-	-

Avantajele pe care le prezintă aceste aliaje de brazare amorfe elaborate sub formă de benzi sunt următoarele;

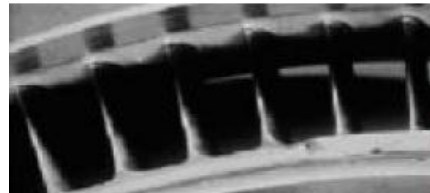
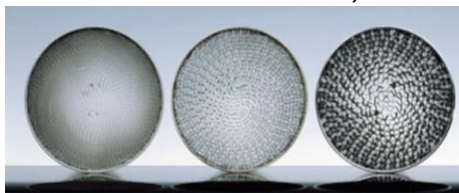
- sunt ductile și flexibile, putând fi astfel ușor de plasat în rostul îmbinării;
- prezintă caracter autofluxant datorită prezenței în compoziția lor a borului și fosforului;
- prezintă o excelentă umectare și întindere;
- asigură îmbinări lipite omogene din punct de vedere geometric și structural, evitându-se apariția porozităților;
- reduc foarte mult timpul de brazare;
- nu afectează mediul înconjurător.

Aceste aliaje asigură îmbinări brazate cu o rezistență mecanică mai mare decât limita de curgere a materialului de bază [10, 19, 50], dar și cu o bună rezistență la oboseală și coroziune. Prin urmare, aliajele de brazare amorfe pe bază de Ni sunt folosite la brazarea diferitelor componente din oțeluri inoxidabile și superaliaje pe bază de Ni sau Co din alcătuirea schimbătoarelor de căldură, a catalizatorilor, a paletelor de la turbinele cu gaz sau a altor componente din industria aerospațială sau energetică.

În figura 2.9 sunt prezentate câteva exemple de utilizări ale acestor aliaje de brazare amorfe.



a) schimbătoare de căldură



b) catalizatori

c) palate de turbine

Fig. 2.9 Îmbinări brazate cu aliaje de brazare amorfe [95]

3. Scopul și obiectivele tezei

Două evenimente importante ce au avut loc în anul 1997 și anume "Joining '97" – A 5-a Conferință Internațională de îmbinare a ceramicelor, sticlei și metalului, la Jena și a 14-a ediție a Târgului de specialitate de la Essen "Sudare-Tăiere", au subliniat importanța brazării printre procedeele de îmbinare termică. Totodată, brazarea are o importanță majoră pentru materialele care nu pot fi sudate și la care lipirea cu adezivi sau lipirea moale nu oferă rezultate mulțumitoare. [99,100].

Stadiul actual al dezvoltării tehnologice impune extinderea domeniului de aplicare al brazării oțelurilor înalt aliate și a aliajelor neferoase pe bază de Cu, Al, Ni, Co, Ti, în industrii de vârf, cum ar fi: aero-spațială, energetică, chimică, etc. Având în vedere caracteristicile pe care trebuie să le îndeplinească îmbinările lipite (în special rezistență mecanică, rezistență la coroziune și ductilitate ridicate), se impune dezvoltarea unor aliaje de lipire și a unor procedee de brazare care să asigure îmbinării lipite caracteristicile de exploatare dorite.

Dacă până nu demult rolul brazării a fost limitat la realizarea de îmbinări supuse la eforturi reduse, în care aliajul de lipire a fost privit mai mult ca un adeziv, tehnica actuală, bazată pe cunoașterea fenomenelor de bază ale proceselor de îmbinare prin lipire, dispunând de echipamente moderne (cuptoare cu atmosferă reducătoare sau vid, instalații CIF, etc.), permite realizarea unor repere din metale similare sau disimilare cu caracteristici ridicate de exploatare.

De-a lungul timpului au fost dezvoltate mai multe familii de aliaje de brazare care să corespundă anumitor cerințe de exploatare. Astfel, pentru brazarea oțelurilor inoxidabile și a superaliajelor au fost elaborate aliaje de brazare pe bază de Ni-Cr. Acestea sunt de regulă aliate cu B, Si și P pentru formarea unor eutectice care diminuează temperatura de topire relativ înaltă a matricilor de Ni respectiv Ni-Cr și astfel este îmbunătățită comportarea la curgere și capacitatea de umectare acestor aliaje.

Un mare dezavantaj al acestor aliaje pe bază de Ni este stabilitatea fazelor dure ca boruri sau combinații chimice ale fosforului și siliciului cu Ni și Cr în structură. În matricea de Ni relativ ductilă sunt incluse faze dure de tipul: Ni_3B , CrB și Ni_3Si . Datorită fragilității lor foarte ridicate, aceste aliaje de brazare sunt livrate sub formă de pulbere, cu sau fără element de legătură (un liant organic). Rolul elementului de legătură este de a obține aliajul de brazare sub forma unor benzi care să facă posibilă manevrarea mai ușoară, dozarea exactă și fixarea mai bună a acestuia în rostul capilar. Neomogenitatea chimică și neuniformitatea geometrică constituie însă principalele dezavantaje ale acestor benzi.

O altă grupă importantă de materiale de adaos pentru brazare o formează materialele de adaos cu metale nobile, pe bază de Au, Ag, Pd și Pt. Aceste materiale de adaos sunt ductile, datorită structurii formate dintr-o soluție solidă, formată în urma dizolvării reciproce a componentelor aliajului. Datorită ductilității lor mari, materialele de adaos pe bază de metale nobile se pot obține cu ușurință sub formă de de sârmă sau benzi. Ele prezintă, de regulă, puncte de topire mai mici decât în cazul aliajelor pe bază de Ni. Gama de materiale de bază ce pot fi brazate cu materialele de adaos pe bază de metale nobile este mai mare decât la materialele de adaos pe bază de Ni deoarece pe lângă oțel și superaliaje se pot braza și metale și aliaje neferoase speciale și chiar ceramică metalizată. Aliajele de lipire pe bază de

metale nobile prezintă dezavantajul unei rezistențe la coroziune nesatisfăcătoare în unele aplicații, precum și al unui preț de cost foarte ridicat [10,25].

Toate aliajele de brazare convenționale cu structură cristalină necesită utilizarea fluxurilor de lipire care au rolul pe de o parte de a curăți suprafețele componentelor și de a le proteja pe durata operației de lipire, iar pe de altă parte de a asigura o bună întindere și umectare aliajului de brazare. Dezavantajul utilizării fluxurilor de lipire constă în faptul că există posibilitatea corodării materialului de bază sau a îndepărtării parțiale a acestuia din rostul capilar de către aliajul de lipire, cu efect negativ asupra omogenității structurale a îmbinării brazate.

În ultimii ani s-au dezvoltat aliaje de brazare cu structură amorfă, în special pe bază de Ni sau Co, care se produc la nivel industrial sub formă de benzi ductile. Folosite ca și material de adaos la brazarea oțelurilor inoxidabile și a superaliajelor au condus la o creștere a rezistenței mecanice și în special a rezistenței la coroziune a îmbinării lipite [10, 12, 58 60, 66, 73]. Un dezavantaj al acestor aliaje îl reprezintă temperatura ridicată de topire, drept pentru care cercetările actuale se concentrează pe obținerea de aliaje de brazare amorfă cu temperaturi de topire mai mici, cum ar fi de exemplu cele pe bază de cupru.

În acest context, **scopul lucrării îl reprezintă dezvoltarea unor aliaje de brazare cu structură amorfă pe bază de cupru, autofluxante, cu temperatură de topire scăzută și care să poată fi utilizate la brazarea cuprului, a aliajelor sale și a oțelurilor inoxidabile.**

Pentru atingerea acestui scop se propune realizarea următoarelor obiective, prin activități aferente:

1. Fundamentarea teoretică a procesului de brazare

Activități:

- Studiul fenomenelor care stau la baza procesului de brazare;
- Studiul asupra metodelor de brazare și asupra materialelor de adaos utilizate la brazarea cuprului și oțelurilor inoxidabile.

2. Elaborarea unui aliaj de brazare pe bază de cupru cu structură amorfă

Activități:

- Studiul privind elaborarea aliajelor amorfă sub formă de benzi;
- Alegerea compoziției chimice optime;
- Elaborarea și caracterizarea structurală a aliajului primar;
- Elaborarea și caracterizarea structurală a aliajului amorf.

3. Brazarea cuprului și oțelurilor inoxidabile cu aliajul amorf elaborat

Activități:

- Brazarea prin rezistență și prin inducție a cuprului și oțelurilor inoxidabile;
- Caracterizarea îmbinărilor brazate din punct de vedere structural și al proprietăților mecanice.

4. Optimizarea tehnologiei de brazare prin rezistență utilizând aliajul de brazare amorf

Activități:

- Modelarea matematică a procesului de brazare prin rezistență utilizând metoda experimentului factorial.

4. Elaborarea aliajului amorf de brazare pe bază de cupru

Pentru obținerea aliajului de brazare amorf s-a ales metoda „melt-spinning”, care presupune răcirea ultrarapidă a topiturii pe un cilindru aflat în mișcare de rotație.

Pentru elaborarea benzilor amorfe prin metoda răcirii ultrarapide a topiturii pe un cilindru aflat în mișcare de rotație trebuie parcurse următoarele etape [18]:

- elaborarea unui aliaj primar (master-alloy) cu o compoziție chimică favorabilă amorfizării;
- retopirea și turnarea continuă a prealiajului pe o rolă de răcire aflată în mișcare de rotație.

Eliminarea primei etape ar conduce la o serie de dezavantaje, dintre care amintim:

- mărirea timpului de elaborare;
- necesitatea folosirii ca materii prime a unor componente pure;
- necesitatea elaborării în vid pentru evitarea zgurii.

4.1. Elaborarea aliajului primar

Elaborarea aliajului primar presupune într-o primă etapă alegerea compoziției chimice optime. Așa cum s-a arătat în Capitolul II, la alegerea compoziției chimice trebuie să se țină cont atât de condițiile impuse unui aliaj de brazare cât și de condițiile impuse unui aliaj amorfizabil.

Studiile efectuate au arătat că aliajele de brazare pe bază de Cu conțin P care are pe de o parte rolul de a reduce temperatura de topire a aliajului, iar pe de altă parte imprimă aliajului un caracter autofluxant. De asemenea, P este recunoscut și ca un element care mărește capacitatea de amorfizare a aliajului.

Așa cum s-a prezentat în Capitolul I, în compoziția aliajelor de brazare pe bază de Cu sau care conțin Cu se mai găsesc elemente chimice cum ar fi Ag, Sn, Zn, Cd sau Ni. Aceste elemente au rolul fie de a reduce temperatura de topire a aliajului prin formarea unor eutectice, fie de creștere a unor caracteristici mecanice de rezistență sau a rezistenței la coroziune.

Ținând cont de studiile referitoare la obținerea aliajelor de brazare cu structură amorfă [10, 12, 57, 60, 66, 72, 73], și luând în considerare compozițiile chimice clasice ale aliajelor de brazare pe bază de Cu, pentru elaborarea aliajului primar s-a ales familia de aliaje Cu-Sn-Ni-P.

În vederea alegerii compoziției chimice s-au analizat sistemele bifazice Cu-Sn, Cu-Ni, Cu-P, Ni-Sn și Ni-P.

Astfel, sistemul de aliaje Cu-Sn (figura 4.1) prezintă o reacție eutectică la 99,3% Sn. Se observă că solubilitatea maximă a Sn în Cu este de 15,8% la temperatura de 520 °C. Soluția solidă α de Sn dizolvat în Cu este stabilă la temperatura ambiantă până la 10 %Sn. La conținuturi de peste 8%Sn, datorită segregării puternice ce are loc în cursul solidificării, apare compusul electronic β (Cu_5Sn). Această fază se transformă succesiv, la răcire, în amestecul mecanic $\alpha+\gamma$ (transformarea eutectoidă la 586°C), și apoi în faza δ ($\text{Cu}_{31}\text{Sn}_{18}$). Transformarea

50 Elaborarea aliajului amorf de brazare pe bază de cupru - 4

fazei α în ϵ la temperaturi sub 350°C , nu se poate produce decât în condiții de răcire foarte lente, practic foarte greu de realizat.

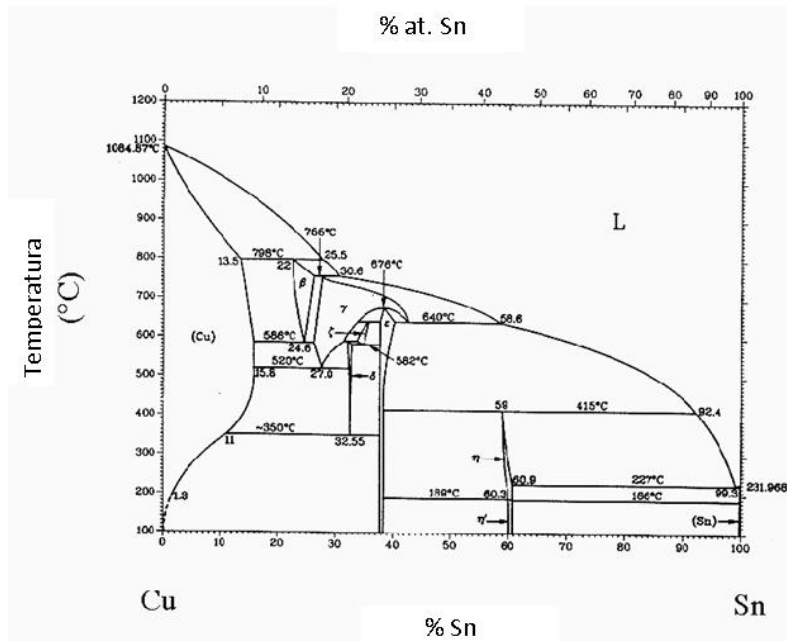


Fig. 4.1 Sistemul Cu-Sn [94]

Sistemul Cu-Ni (figura 4.2) prezintă o solubilitate totală a componentelor, cu formarea unei soluții solide extinse pe tot domeniul compozițional. Se observă că o dată cu creșterea conținutului de Ni crește temperatura de topire a aliajului.

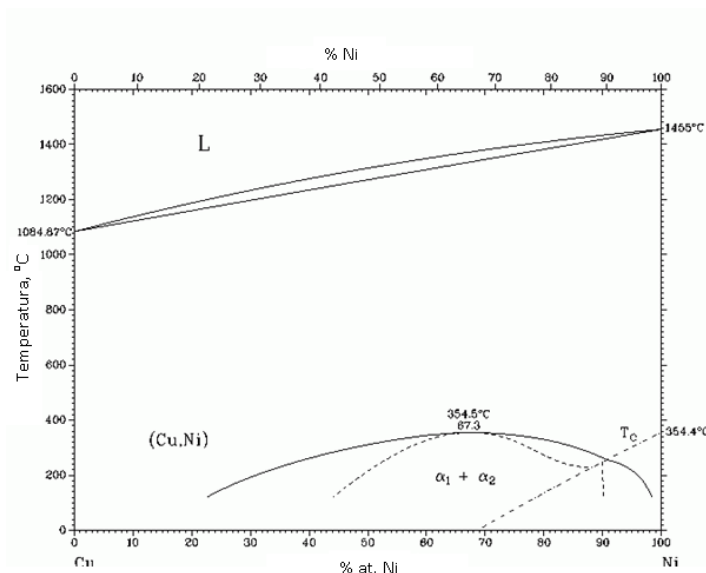


Fig. 4.2 Sistemul Cu-Ni [94]

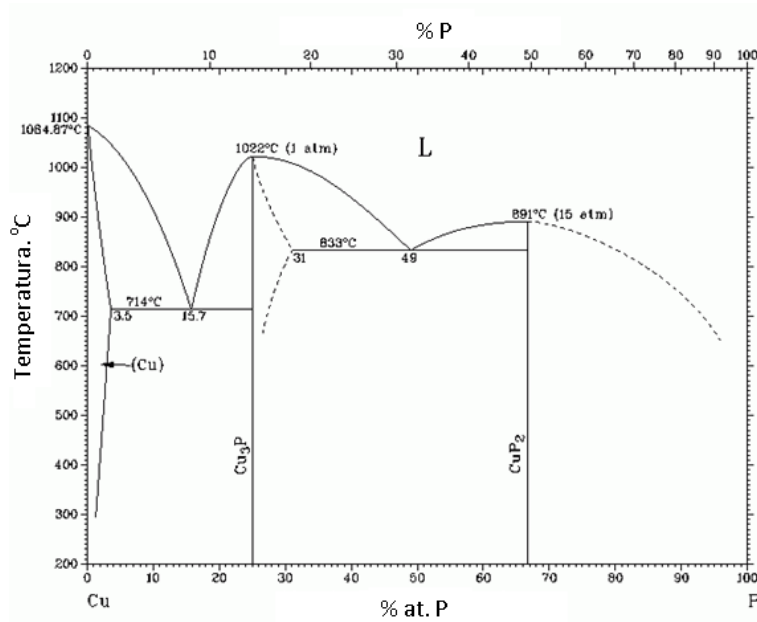


Fig. 4.3 Sistemul Cu-P [94]

Sistemul Cu-P (figura 4.3) prezintă două reacții eutectice la 15,7% at., respectiv 49% at. P. De asemenea, se observă o solubilitate redusă a P în Cu, de maxim 3,5% at. P la 714 °C. Este de remarcat și prezența compușilor Cu_3P și CuP_2 . Prin urmare, sistemul Cu-P este un sistem de aliaje amorfizabile.

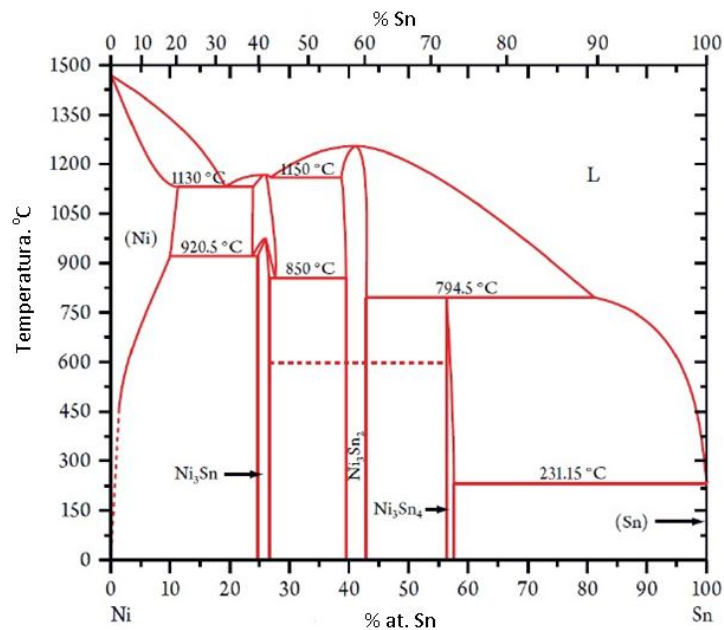


Fig. 4.4 Sistemul Ni-Sn [94]

Și în cazul sistemului Ni-Sn (figura 4.4) se remarcă prezența reacțiilor eutectice la 1130, respectiv 1150 °C și a compușilor intermetalici Ni_3Sn , Ni_3Sn_2 , respectiv Ni_3Sn_4 . Prezentând și o solubilitate redusă a Sn în Ni, se poate afirma că și acest sistem de alije este favorabil obținerii structurii amorse.

Sistemul de aliaje Ni-P (figura 4.5) este de asemenea un sistem de aliaje amorfizabile, prezentând reacții eutectice (la 870, respectiv la 880 °C), mulți compuși chimici și solubilitate redusă a P în Ni. Se observă că la concentrații situate în vecinătatea concentrației eutectice de 11% P, există o capacitate ridicată de obținere a aliajelor amorse.

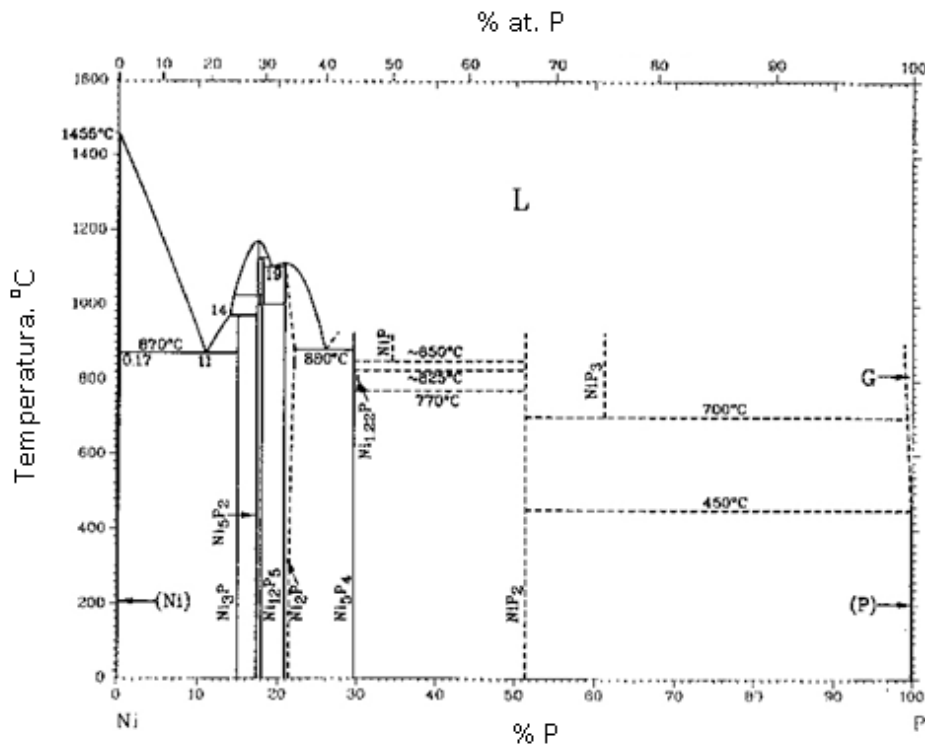


Fig. 4.5 Sistemul Ni-P [94]

Prin urmare, în urma analizei sistemelor binare de aliaje, se poate concluziona că pentru a obține aliaje de brazare pe bază de Cu cu structură amorfă, compoziția chimică a unui astfel de aliaj trebuie să se încadreze în următoarele limite:

Tabelul 4.1 Compoziția chimică favorabilă amorfizării

Elementul chimic	Sn	Ni	P	Cu
% atomice	2÷10	5÷10	10÷20	rest

Ținând cont de condițiile impuse unui aliaj de brazare și urmărind obținerea unei temperaturi de topire și a unui interval de solidificare cât mai mici, s-a ales următoarea compoziție chimică pentru aliajul primar: **$\text{Cu}_{75}\text{Ni}_7\text{Sn}_5\text{P}_{13}$** .

Pentru elaborarea aliajului primar s-au avut la dispoziție ca materii prime după cum urmează:

- Cu metalic 99%;
- Ni electrolitic 99%;
- SnCu3 sub formă de sârmă cu 97% Sn și 3% Cu;
- P sub formă de pulbere 99,9%

Elaborarea s-a făcut într-o instalație cu încălzire prin inducție, din dotarea Departamentului de Ingineria Materialelor și Fabricației (figura 4.6). Instalația are în componență un generator de curent de înaltă frecvență de tip CTC, la care este conectat un transformator la a cărui secundar se leagă un inductor din țeavă de cupru.



Fig. 4.6 Instalația cu încălzire prin inducție pentru elaborarea aliajului primar

După cântărire, materiile prime au fost introduse într-un creuzet de alumină și au fost topite sub protecție de argon (figura 4.7).



Fig. 4.7 Topirea materiilor prime

Turnarea aliajului primar s-a realizat într-o cochilă metalică (figura 4.8), obținându-se bare de diametru $\phi 10$ mm și lungimi de 30 mm (figura 4.9).



Fig. 4.8 Forma de turnare a aliajului primar

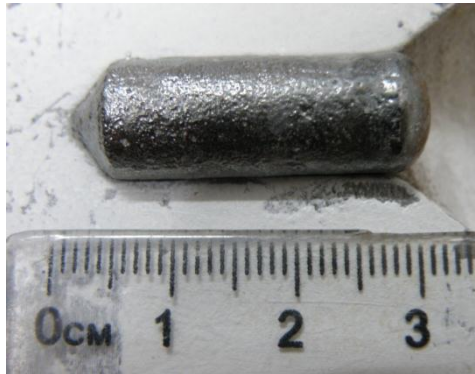


Fig. 4.9 Aliajul primar solidificat sub forma unei bare

4.2. Elaborarea aliajului amorf sub formă de benzi

Elaborarea aliajului amorf sub formă de benzi s-a realizat pe o instalație de răcire rapidă a topiturii bazată pe metoda melt-spinning, din dotarea Departamentului de Ingineria Materialelor și Fabricației (figura 4.10).



Fig. 4.10 Instalație de elaborare a aliajelor amorphe prin metoda melt-spinning

Instalația cuprinde următoarele părți componente: rola de răcire, sistemul de lăgăruire, transmisia mecanică realizată cu ajutorul unei curele de transmisie sincron, un motor electric de acționare, un sistem de deplasare pe verticală a inductorului, un sistem de deplasare pe verticală a creuzetului, un inductor, un creuzet, generator de medie frecvență, tablou de comandă (ce conține voltmetru, ampermetru, turometru, buton oprire, buton pornire, reglare turație, reglare presiune).

Generatorul de frecvență utilizat este un generator electronic GSMF 10 A 8000 cu frecvența fixă de 8KH și puterea de 10KW. Prin intermediul unei baterii de condensatori și al cablurilor flexibile de forță este alimentat inductorul în care este introdus creuzetul.

Inductorul de topire este dimensionat funcție de diametrul creuzetului folosit și are posibilitatea de a efectua o mișcare pe verticală de apropiere sau depărtare față de rolă și poate fi înclinat în planul de rotație al rolei de răcire cu $\pm 30^\circ$.

Creuzetul de topire trebuie să reziste la temperaturi mai mari decât temperatura de topire a aliajului primar, să reziste la șocuri termice și să suporte diferențe mari de temperatură pe lungime, să aibă o bună etanșeitate, să permită legătura la sistemul pneumatic și să fie prevăzut cu o duză de ejectare a topiturii. În cazul aplicației de față s-a utilizat un creuzet din cuarț, prevăzut în partea inferioară cu un orificiu de ejectare de formă circulară, cu diametrul de 0,7 mm (figura 4.11).



Fig.4.11 Creuzetul pentru topire

Sistemul mecanic de deplasare a creuzetului cuprinde un dispozitiv de deplasare pe verticală împreună cu inductorul, ce se ghidează pe două coloane prevăzute cu bucșe cu bile, sub acțiunea unui mecanism șurub-piuliță cu bile. Acest dispozitiv permite aducerea inductorului și creuzetului în poziția corespunzătoare față de rola de răcire în timpul încălzirii pentru topire. Sistemul mecanic mai permite deplasarea pe verticală doar a creuzetului în inductor pentru apropierea sau depărtarea duzei de ejectare a creuzetului față de rola de răcire, în funcție de presiunea metalului topit. De asemenea, creuzetul și inductorul pot fi poziționate manual, printr-o mișcare pe orizontală, în raport cu centrul rolei de răcire.

Sistemul de deplasare a rolei asigură mișcarea de rotație a rolei cu turație reglabilă prin intermediul unui motor electric de curent continuu SMU 750, alimentat printr-un variator electronic de tensiune și prevăzut cu un tahogenerator de curent continuu pentru măsurarea turației. Gama de turații reglabilă de la un potențiomtru este de la 0 la 3000 rotații pe minut.

Transmiterea mișcării la axul rolei se face printr-o transmisie cu curea sincron pentru a evita alunecările la pornire și la modificarea turației.

Sistemul pneumatic asigură protecția topiturii în timpul încălzirii și expulzarea ei prin duza de ejectare a creuzetului după atingerea temperaturii de încălzire prin intermediul presiunii argonului din zona superioară a creuzetului. El cuprinde un tub de argon sub presiune prevăzut cu un reductor de presiune legat la un rezervor de presiune joasă (0...2 atm) de la care se introduce presiunea în creuzet prin intermediul unui electroventil în momentul atingerii temperaturii de turnare și după reglarea corespunzătoare a poziției duză-rolă.

Sistemul electric de comandă asigură alimentarea motorului electric de acționare, comanda electroventilului pentru argon și indicarea turației rolei prin intermediul tahogeneratorului.

Soluția constructivă prezentată a urmărit eliminarea surselor de vibrații pentru a se obține benzi uniforme. În acest sens s-a adoptat soluția de deplasare a creuzetului după toate direcțiile necesare pentru reglaj, cu excepția mișcării de poziționare care este efectuată de către suportul rolei.

Pentru determinarea temperaturii aliajului în timpul elaborării, s-a montat o termocuplă cu infraroșu care permite măsurarea temperaturii fără contact direct cu obiectul. Principiul de funcționare al acestor termocuple cu infraroșu pornește de la faptul că un obiect emite căldură ce este direct proporțională cu temperatura acestuia conform ecuației Stefan-Boltzmann:

$$e = S \cdot T^4$$

unde: e- energia totală emisă prin radiații de către obiect;

T- temperatura obiectului;

S- constanta Stefan-Boltzmann.

Termocupla cu infraroșu măsoară această energie și produce un semnal proporțional cu energia radiată de către obiectul focalizat. Pentru a realiza o bună

măsurare prin aceasta tehnică este importat de știut proporția de radiație emisă și reflectată de către obiect. Această proporție poartă numele de emisivitate.

Modurile de montare al termocuplei și de fixare și poziționare a creuzetului sunt prezentate în figura 4.12.

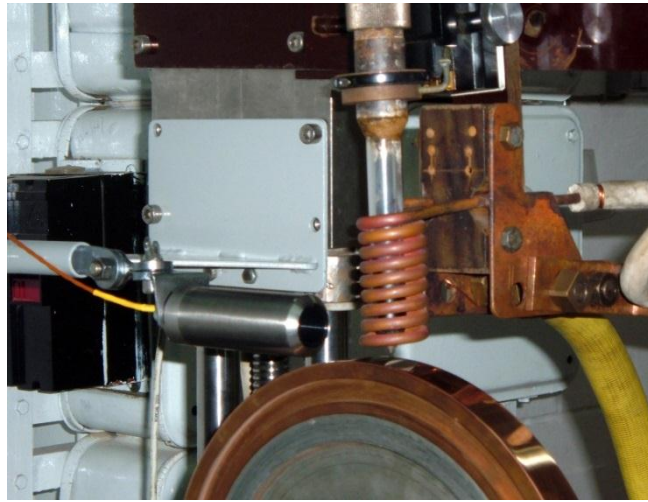


Fig.4.12 Montajul termocuplei și al creuzetului

Tehnologia de elaborare a benzilor presupune parcurgerea următoarelor etape:

- ✓ introducerea aliajului primar în creuzet și fixarea creuzetului de cuarț;
- ✓ încălzirea inductivă și topirea aliajului primar;
- ✓ aducerea rolei de răcire la turația optimă;
- ✓ poziționarea relativă a creuzetului față de rola de răcire;
- ✓ aplicarea suprapresiunii topiturii prin intermediul gazului inert (argon) și ejectarea topiturii prin orificiul duzei de ejectare pe suprafața rolei de răcire.

Pe baza experimentărilor anterioare privind elaborarea unor benzi prin răcire ultrarapidă a topiturii [10, 16, 73], s-au determinat ca optimi următorii parametrii:

- temperatura topiturii: 800 °C;
- turația rolei de răcire: 2100 rot/min;
- suprapresiunea aplicată topiturii: 0,20 atm;
- distanța duză-suprafața rolei de răcire: $h = 0,8$ mm;
- unghiul de înclinare a creuzetului față de verticală: 8°.

Modul de elaborare a aliajului sub formă de benzi este prezentat în figura 4.13.

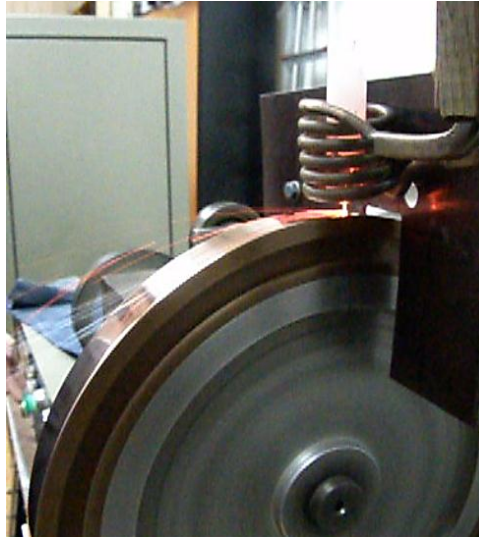


Fig.4.13 Elaborarea aliajului de brazare sub formă de benzi

În aceste condiții s-au obținut benzi ductile, continue, uniforme din punct de vedere geometric, având grosimi de $25\ \mu\text{m}$ și lățimi de $1,5\ \text{mm}$. Aspectul macroscopic al benzilor obținute este redat în figura 4.14.

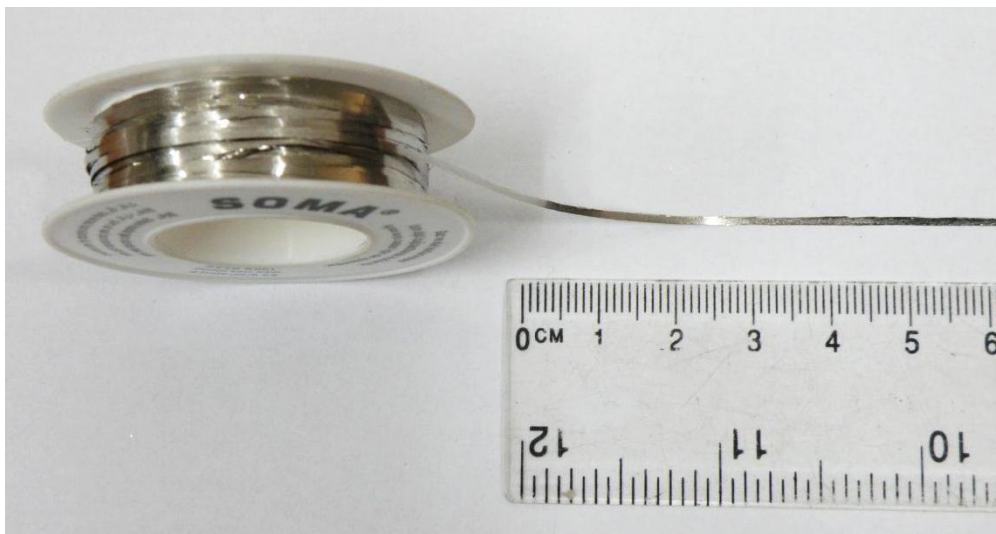


Fig. 4.14 Aspectul macroscopic al benzilor obținute

4.3. Caracterizarea structurală a aliajului de brazare

Aliajul primar a fost supus analizei structurale prin microscopie optică și prin difracție de raze X. De asemenea, pentru verificarea compoziției chimice, aliajul primar a fost supus și analizei EDAX.

Analiza microscopică s-a realizat cu ajutorul microscopului optic metalografic OLYMPUS BX41M.

Structura microscopică a aliajului primar este o structură dendritică, specifică stării turnate a metalelor (figura 4.15). Se remarcă prezența unei soluții solide pe bază de Cu și un amestec eutectic distribuit printre cristalele dendritice specifice soluției solide

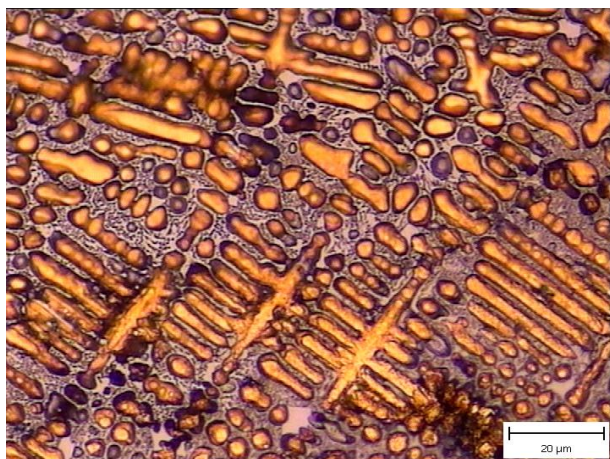


Fig. 4.15: Microstructura aliajului primar

Analiza structurală prin difracții de raze X s-a efectuat utilizând difractometrul DRON 3, din dotarea Departamentului de Ingineria Materialelor și Fabricației, cu următorii parametri: tensiunea folosită: $U = 40 \text{ kV}$, intensitatea curentului: $I = 30 \text{ mA}$, anticatod de Mo, $\lambda_{\text{KMo}} = 0,71 \text{ \AA}$, viteza de deplasare a tubului de raze X: $v_d = 2^\circ/\text{min}$.

Difractograma aliajului primar (figura 4.16) atestă prezența în structura aliajului primar a soluției solide pe bază de cupru precum și a unor compuși chimici și intermetalici ai cuprului și ai nichelului cu fosforul și cu staniul.

Pentru certificarea compoziției chimice a aliajului elaborat, s-a efectuat și analiza EDAX, utilizând un microscop electronic cu baleiaj de tipul FEI INSPECT-S, din dotarea Departamentului de Ingineria Materialelor și Fabricației.

Spectrul EDAX prezentat în figura 4.17, atestă prezența elementelor componente ale aliajului, fără alte impurități. De asemenea, cuantificarea proporției masice și atomice a elementelor componente atestă faptul că nu au existat pierderi semnificative prin oxidare ale acestora. Prin urmare, compoziția chimică a aliajului primar este foarte apropiată de compoziția chimică teoretică.

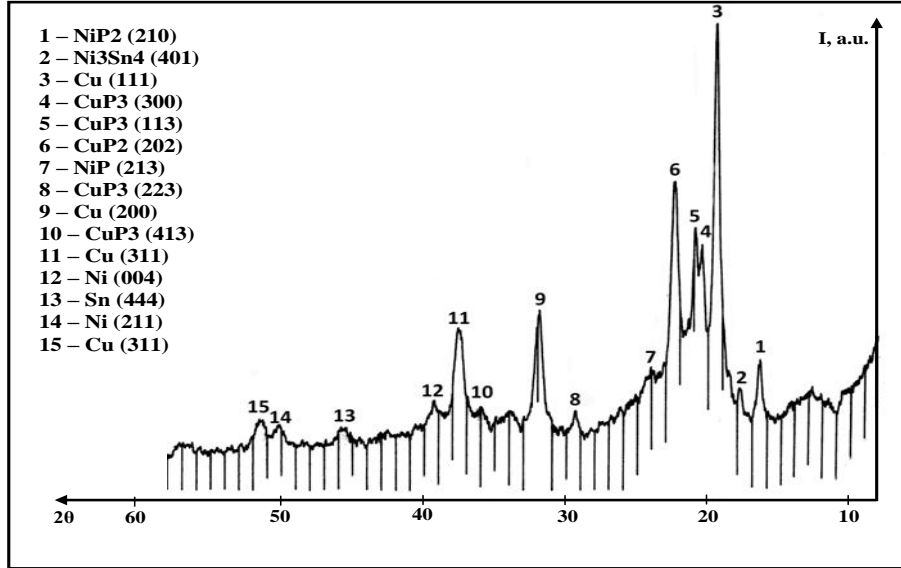


Fig. 4.16: Difractograma aliajului primar

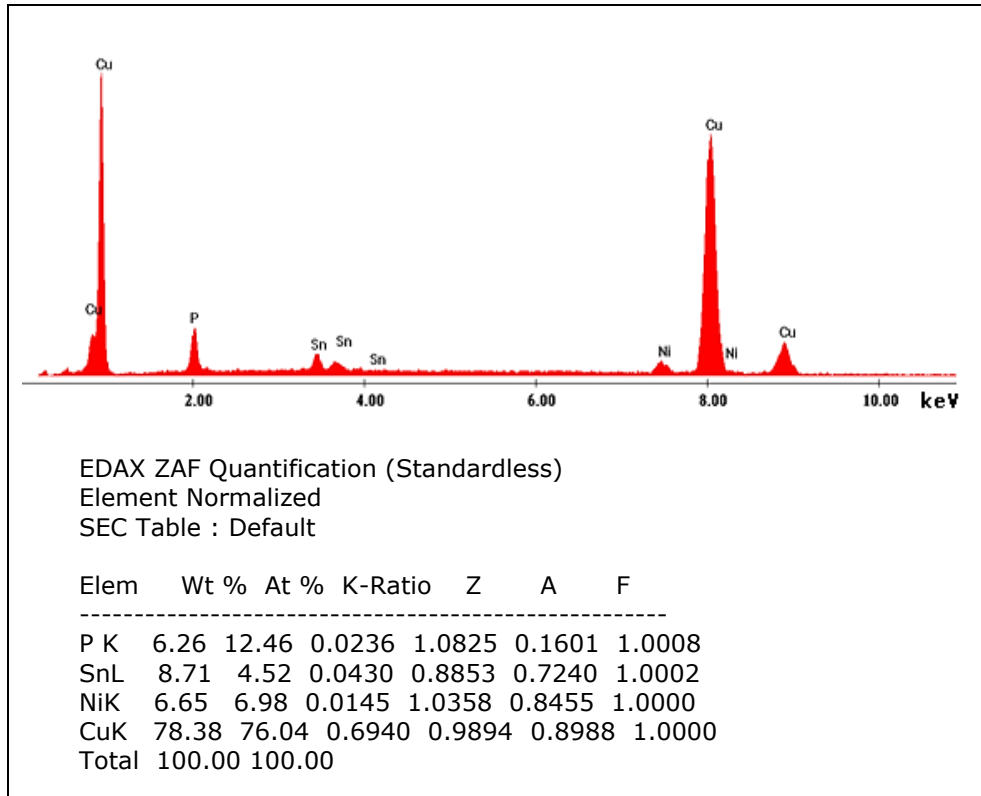


Fig. 4.17: Spectrul EDAX al aliajului primar

Benzile elaborate au fost supuse analizei prin difracție de raze X și analizei calorimetrice diferențiale.

Analiza prin difracție de raze X s-a efectuat utilizând difractometrul DRON 3, din dotarea Departamentului de Ingineria Materialelor și Fabricației, cu următorii parametri: tensiunea folosită: $U = 40$ kV, intensitatea curentului: $I = 30$ mA, anticatod de Mo, $\lambda_{\text{KMo}} = 0,71$ Å, viteza de deplasare a tubului de raze X: $v_d = 2^\circ/\text{min}$. Spectrul de difracție (figura 4.18) certifică structura amorfă a aliajului de brazare elaborat sub formă de bandă prin absența maximelor de difracție nete specifice structurii cristaline.

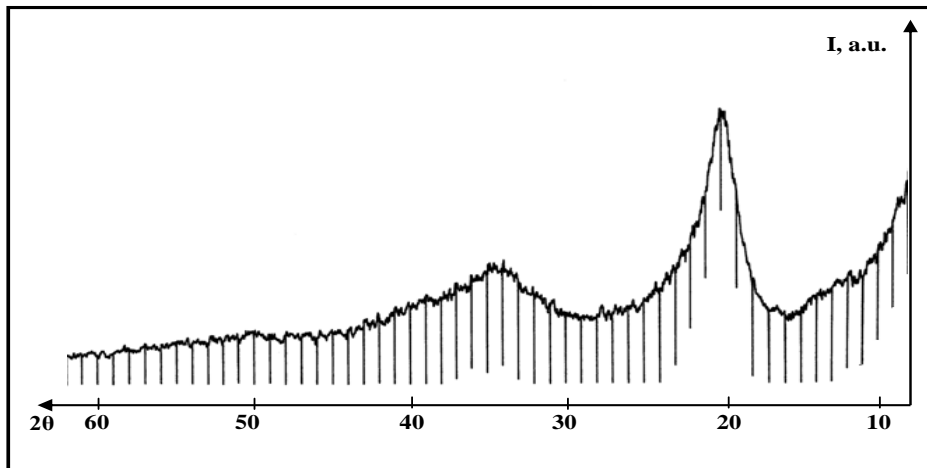


Fig. 4.18: Diffractograma benzii elaborate

Pentru a determina stabilitatea termică a aliajului amorf elaborat și pentru a-i determina temperatura de topire, s-a efectuat analiza calorimetrică diferențială, utilizând un instrument DSC de tipul NETZSCH. Curba DSC a aliajului de brazare amorf (figura 4.19) prezintă un peak exoterm, ce marchează un proces de cristalizare primară a fazei amorfe, în jurul temperaturii de 200°C . De asemenea se remarcă peak-ul endoterm ce indică procesul de topire a aliajului în jurul temperaturii de 637°C . Prin urmare, stabilitatea termică a aliajului de brazare amorf elaborat este relativ scăzută, însă și temperatura de topire și intervalul de solidificare sunt relativ reduse, deziderat dorit în cazul aliajelor de brazare.

62 Elaborarea aliajului amorf de brazare pe bază de cupru - 4

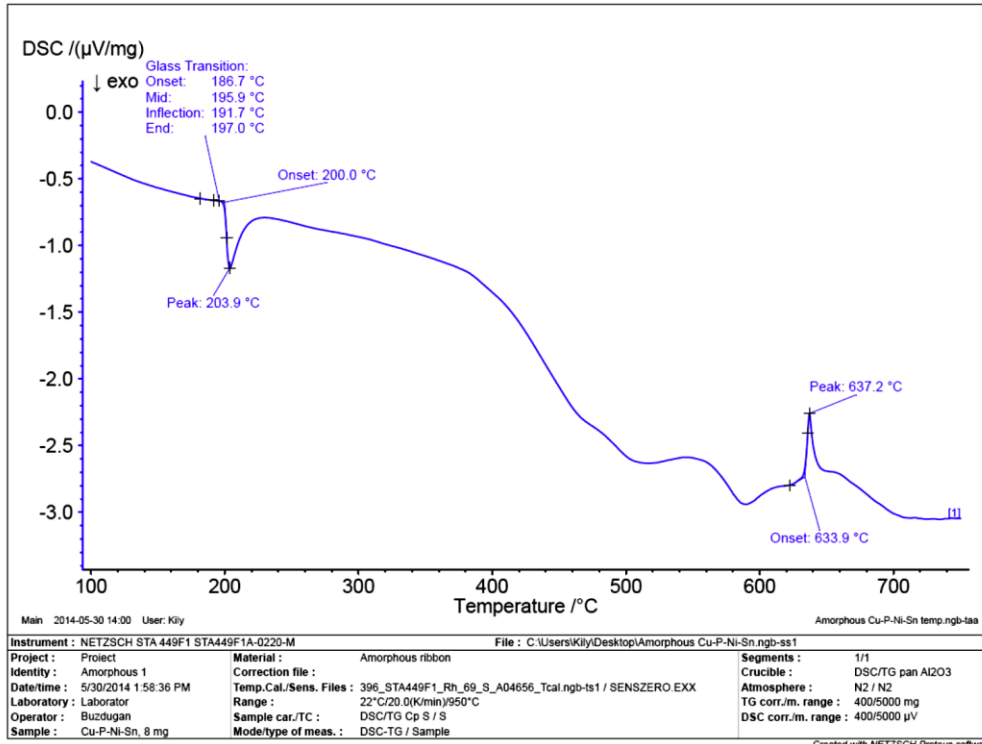


Fig. 4.19: Curba DSC a benzii elaborate

În concluzie, se poate afirma că s-a obținut un aliaj de brazare pe bază de cupru sub formă de bandă, cu structură amorfă, caracterizat printr-o temperatură de topire relativ scăzută.

5. Brazarea cuprului și oțelurilor inoxidabile cu aliaj de brazare amorf pe bază de cupru

În urma studiilor și cercetărilor efectuate, pentru brazarea cuprului și a oțelurilor inoxidabile cu aliajul de brazare amorf elaborat, s-a optat pentru lipirea prin rezistență electrică, respectiv pentru lipirea prin inducție.

Ca și materiale de bază s-au utilizat cupru 99,95%, respectiv oțel inoxidabil austenitic X10CrNi18-8/EN 10088, a căror caracteristici sunt prezentate în tabelele 5.1, și 5.2.

Tabelul 5.1 Proprietățile mecanice ale materialului de bază cupru

STAREA	PROPRIETĂȚILE MECANICE		
	R _{p0,2} [N/mm ²]	R _m [N/mm ²]	A ₅ [%]
Recopt	70	220	45
Ecruisat	315	350	6

Tabelul 2 Compoziția chimică și proprietățile mecanice ale materialului de bază oțel inoxidabil

COMPOZIȚIA CHIMICĂ [% MASICE]							PROPRIETĂȚILE MECANICE		
C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	R _{p0,2} [N/mm ²]	R _m [N/mm ²]	A ₅ [%]
0,05	1,51	0,52	0,035	0,007	18,09	9,13	260	642	65

Ca și aliaj de lipire, s-a utilizat aliajul Cu₇₅Ni₇Sn₅P₁₃, cu structură amorfă, elaborat sub formă de benzi continue de grosime de 25 μm și lățime de 1,5 mm.

5.1. Brazarea prin rezistență electrică

Lipirea prin rezistență este o metodă de lipire capilară la care sursa de încălzire o constituie rezistența electrică. Un procedeu al acestei metode, este cel al lipirii prin presiune în puncte cu ajutorul a doi electrozi, derivat din procedeul sudării prin presiune în puncte.

Există două variante ale acestui procedeu:

- lipirea prin încălzire cu electrozi din grafit, care au rezistență relativ ridicată și se încălzesc puternic, transmitând căldura prin conducție la piesele ce se încălzesc;

- lipirea prin încălzire cu electrozi metalici, care au rezistență relativ redusă, și care produc încălzirea datorită rezistenței de contact dintre piese și electrod, respectiv dintre piesele ce se îmbină.

Ca și echipament pentru brazarea electrică prin presiune în puncte s-a utilizat o mașină de sudat electric prin presiune în puncte de tipul PPU-125 (figura 5.1). Un astfel de echipament are în componență următoarele subansambluri: batiul, brațul superior, brațul inferior, electrozii, port-electrozii, transformatorul de sudare,

circuitul de comandă, circuitul de sudare, instalația de acționare a brațului mobil și instalația de răcire.

Principalele caracteristici tehnice ale mașinii de sudat PPU-125 sunt:

- puterea aparentă: 125 kVA
- tensiunea de alimentare: 380 V
- intensitatea maximă: 25 kA
- forța maximă de apăsare: 10 kN
- cursa maximă a electrodului: 50 mm.



Fig. 5.1 Mașina PPU-125

Programatorul de timp și de curent realizează trei cicluri diferite de sudare și o modulare a curentului de sudare în cinci trepte.

În cazul brazării s-a lucrat în modul cu impulsuri multiple de curent, fapt ce presupune ca electrodul superior să nu se ridice iar ciclurile se reiau atâta timp cât pedala este apasată. Prin urmare, pentru un punct brazat se asigură mai multe impulsuri de curent, corespunzătoare la diferiți timpi de brazare.

Ciclul de lucru folosit este reprezentat în figura 5.2.

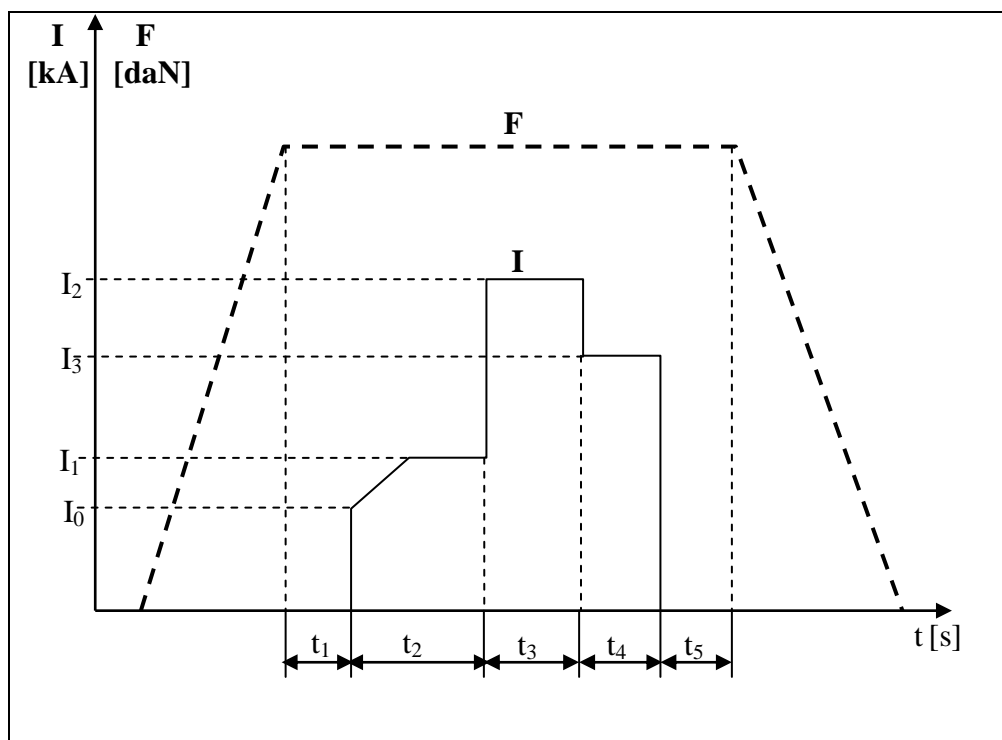


Fig. 5.2 Ciclograma lipirii electrice prin presiune în puncte

Se remarcă faptul că într-o primă etapă are loc presarea materialului de bază între electrozi, iar după timpul t_1 apare impulsul de curent. După o durată t_5 de la întreruperea curentului se îndepărtează sacina, și se eliberează materialul de bază dintre electrozi.

5.1.1. Tehnologia pentru brazare electrică prin presiune în puncte a platbenzilor de cupru.

Principalii parametri de proces care influențează realizarea îmbinării lipite sunt curentul de lipire și durata de lipire. Stabilirea acestor parametri s-a făcut experimental, astfel încât să nu apară topirea materialului de bază și deci sudarea acestuia.

S-au realizat mai multe seturi de îmbinări prin suprapunere, utilizându-se platbenzi de cupru de grosime de 1 mm. Forma și dimensiunile platbenzilor precum și schița îmbinării lipite sunt prezentate în figura 5.3 a și b. Datorită prezenței fosforului în aliajul de brazare, care reacționează cu oxigenul din atmosferă în timpul procesului de lipire, în cazul lipirii cuprului nu s-au utilizat fluxuri de lipire.

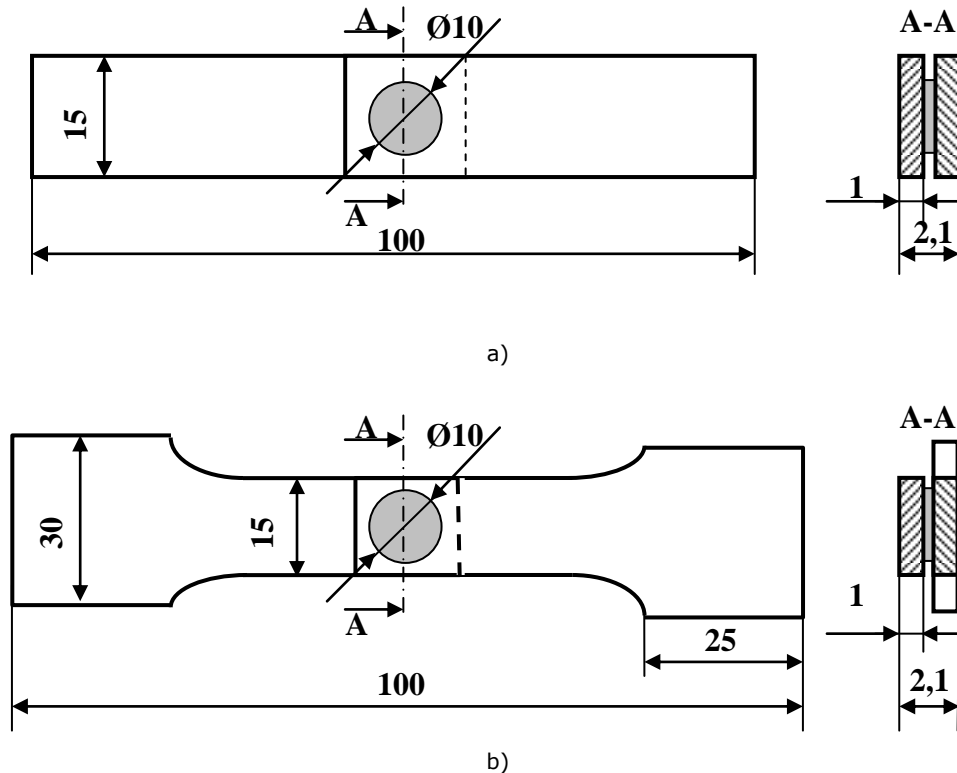


Fig. 5.3 Schița îmbinărilor lipite

Modul de realizare a îmbinării lipite este prezentat în figura 5.4.

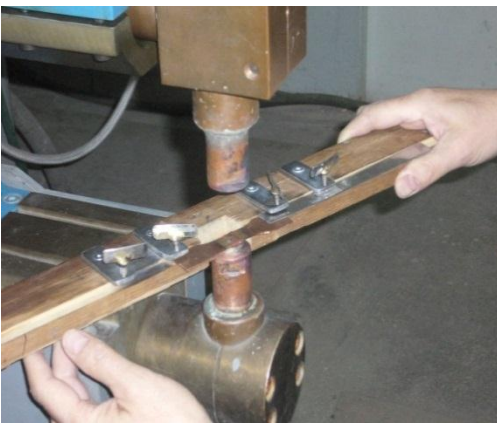
Așa cum se poate observa și din figura 5.4, într-o primă etapă are loc pliarea aliajului de lipire sub formă de bandă astfel încât să se obțină grosimea stratului de aliaj de lipire dorită (figura 5.4 a). Urmează prinderea platbenzilor ce urmează a fi brazate într-un dispozitiv de fixare în poziția în care urmează a fi îmbinate. Se introduce aliajul de lipire între platbenzi (figura 5.4 b) fără a fi necesară utilizarea fluxului de lipire. Se poziționează platbezile în raport cu electrozii astfel încât zona unde a fost plasat aliajul de lipire să fie în dreptul electrozilor (figura 5.4 c). Se aplică forța de apăsare și curentul de brazare un anumit timp necesar topirii aliajului de lipire (figura 5.4 d), rezultând îmbinarea lipită (figura 5.5).



a) plierea aliajului de lipire



b) Prinderea platbenzilor în dispozitivul de fixare și plasarea aliajului de lipire



c) poziționarea platbenzilor în dreptul electrozilor



d) aplicarea forței de apăsare și a curentului de brazare

Fig. 5.4 Realizarea îmbinărilor lipite



Fig. 5.5 Îmbinări lipite

Principali parametri de proces sunt curentul de lipire, timpul de lipire și forța de apăsare a electrozilor. Aceștia au fost setați de la panoul de comandă a mașinii PPU-125, putând fi vizualizați pe display-ul acestuia (figura 5.6).



Fig. 5.6 Setarea parametrilor de brazare

S-au realizat mai multe seturi de probe, urmărindu-se modificarea parametrilor de proces astfel încât să se obțină îmbinări brazate de calitate, fără sufluri sau incluziuni și fără topirea sau afectarea termică semnificativă a materialului de bază. Atât platbenzile dreptunghiulare cât și cele calibrate au fost supuse aceluiași regimuri de brazare. De menționat că platbenzile calibrate au fost brazate în vederea supunerii lor ulterioare la încercarea de tracțiune pentru determinarea rezistenței la forfecare a îmbinării brazate prin suprapunere.

Parametrii tehnologici utilizați pentru lipirea probelor sunt sintetizați în tabelul 5.3:

Tabelul 5.3 Parametrii utilizați la probele lipite prin suprapunere simplă

Nr. crt	Proba	Curentul de lipire [A]	Timpul de lipire [s]	Forța de apăsare [N]
1	BC1	200	5	400
2	BC2			500
3	BC3		10	400
4	BC4			500
5	BC5	300	5	400
6	BC6			500
7	BC7		10	400
8	BC8			500
9	BC9		15	400
10	BC10			500
11	BC11		20	400
12	BC12			500
13	BC13		25	400
14	BC14			500
15	BC15		30	400
16	BC16			500
17	BC17	400	5	400
18	BC18			500
19	BC19		10	400
20	BC20			500
21	BC21		15	400
22	BC22			500
23	BC23		20	400
24	BC24			500
25	BC25		25	400
26	BC26			500
27	BC27		30	400
28	BC28			500

5.1.2. Caracterizarea îmbinărilor brazate cupru-cupru

Îmbinările brazate au fost supuse analizei structurale prin microscopie optică, microscopie electronică, analiză EDAX precum și la încercări mecanice la forfecare.

5.1.2.1 Analiza structurală

Într-o primă etapă, îmbinările brazate au fost supuse analizei structurale prin microscopie optică, realizată cu un microscop optic metalografic de tipul OLYMPUS BX41M.

În cazul probelor BC1 și BC2, curentul de lipire cât și durata de lipire fiind foarte mici, nu s-a reușit topirea completă a aliajului de lipire și, drept consecință, acesta nu a umplut complet rostul capilar dintre platbenzile de cupru (figura 5.7). Mărind timpul de lipire (cazul probelor BC3 și BC4) s-a constatat topirea aliajului de lipire dar și prezența în continuare a porilor în îmbinarea brazată (figura 5.8). Prin urmare, deși s-a vizat un curent de brazare și un timp de brazare de valori mai mici, pentru a evita influența materialului de bază, s-a constatat că la aceste valori nu se pot realiza îmbinări brazate de calitate.

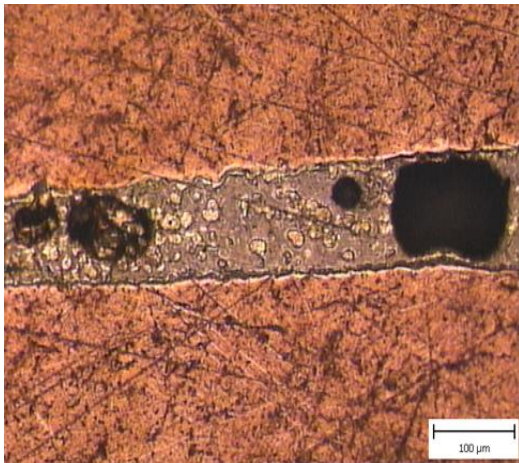


Fig. 5.7 Aspectul microscopic al probei BC2

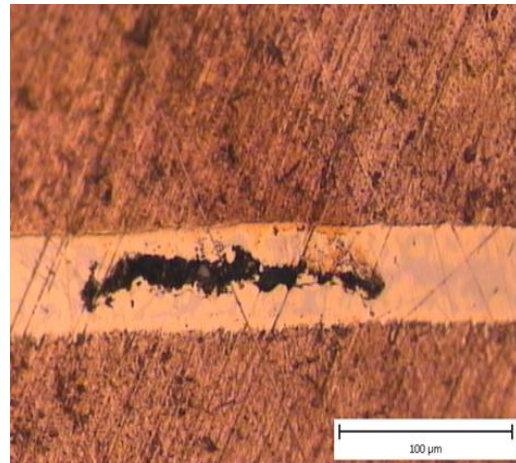


Fig. 5.8 Aspectul microscopic al probei BC4

În cazul probelor lipite cu un curent de 300 A s-a constatat topirea totală a aliajului de lipire și o umplere completă a rostului capilar. Totuși, în cazul probelor BC5 și BC6 s-a observat prezența porilor în îmbinarea lipită, ca urmare a unei durate de lipire insuficiente (figura 5.9).

La toate celelalte probe se constată că îmbinarea brazată este uniformă din punct de vedere geometric, are o structură monofazică, nedetectându-se precipitări de compuși intermetalici. De asemenea, structura materialului de bază este formată din grăunți poliedrici de cupru. Nu se observă modificarea structurii nici datorită câmpului termic nici datorită câmpului de tensiuni. Se constată însă o deformare plastică a materialului de bază în zona de acțiune a electrozilor, ce are ca efect o reducere a grosimii îmbinării brazate (figura 5.10)

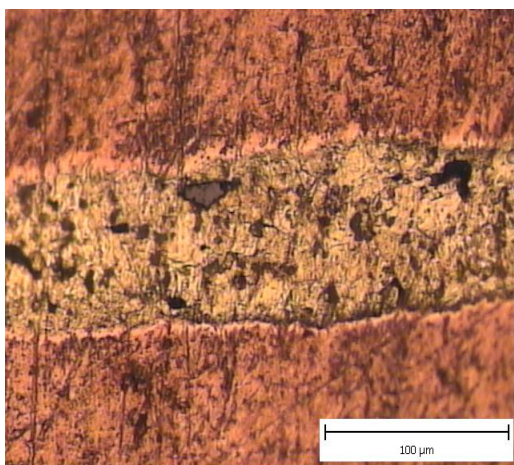


Fig. 5.9 Aspectul microscopic al probei BC6

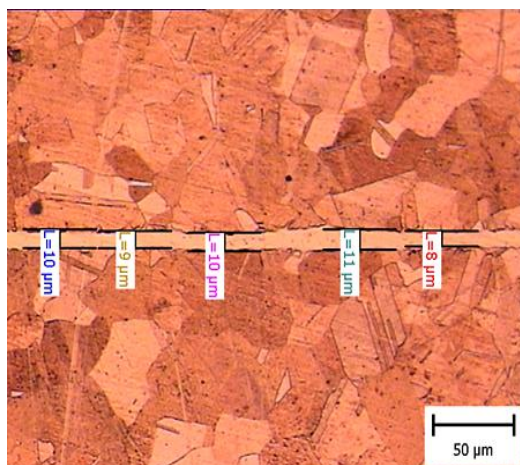


Fig. 5.10 Aspectul microscopic al probei BC12

Și probele brazate cu un curent de brazare de 400 A se caracterizează printr-o îmbinare brazată omogenă cu o structură similară cu cea întâlnită în cazul probelor lipite cu un curent de 300 A (figura 5.11). În acest caz, la durate mai mari de brazare (probele BC27, BC28) se remarcă faptul că structura monofazică din imbinarea lipită capătă un aspect dendritic (figura 5.12). Evidențierea structurii dendritice s-ar putea explica prin realizarea unei ușoare supraîncălziri datorate creșterii curentului de lipire și a duratei de lipire. Totodată se observă apariția unei zone mai deschise la culoare, aflată la limita dintre materialul de bază și materialul de adaos, zonă în care a avut loc difuzia elementelor din materialul de adaos în materialul de bază, și, probabil formarea unor compuși intermetalici.

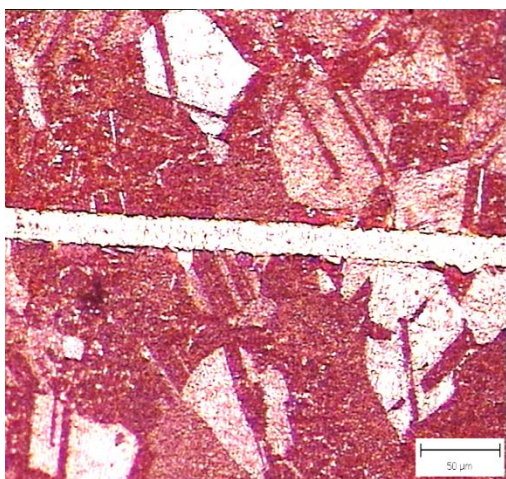


Fig. 5.11 Aspectul microscopic al probei BC24

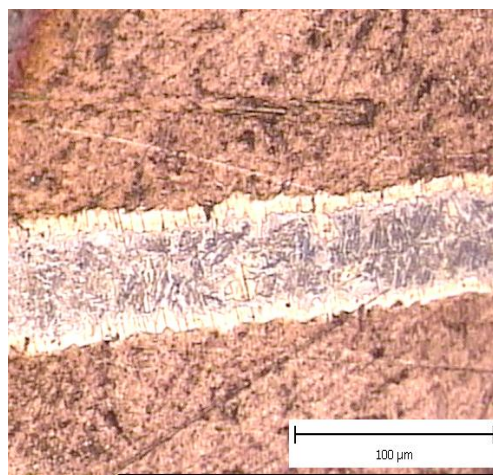


Fig. 5.12 Aspectul microscopic al probei BC28

Urmărind aspectul microscopic al îmbinărilor realizate se pot trage următoarele concluzii:

- În toate cazurile, curentul de lipire a fost suficient de mic pentru a evita sudarea platbenzilor și destul de mare pentru a realiza topirea materialului de adaos.

- Pentru a obține o structură monofazică în îmbinarea lipită, parametrii optimi de proces sunt:

- Curentul de lipire: 300-400 A;
- timpul de brazare: 20...25 secunde;
- forța de apăsare: 50daN.

În cazul probelor la care s-a obținut o îmbinare brazată omogenă, s-au realizat și investigații structurale prin microscopie electronică utilizând un microscop electronic cu baleiaj de tipul FEI INSPECT-S, precum și analiza EDAX, atât în îmbinare cât în zona de trecere de la îmbinarea brazată la materialul de bază.

Astfel, în cazul probelor BC11...BC14, precum și în cazul probelor BC21...BC26 se observă în îmbinarea lipită o structură omogenă, formată dintr-o soluție solidă, fără identificarea compușilor intermetalici sau a cristalele dendritice (figurile 5.13, 5.14).

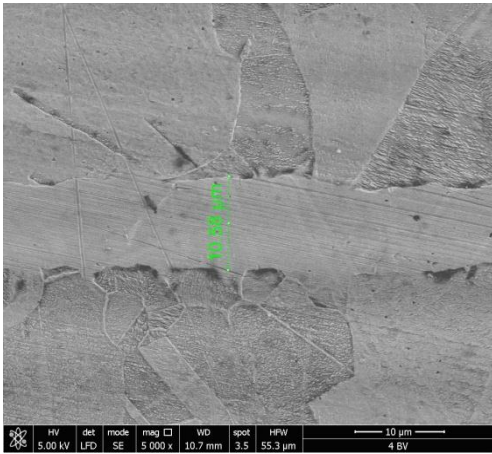


Fig. 5.13 Aspectul microscopic al probei BC14

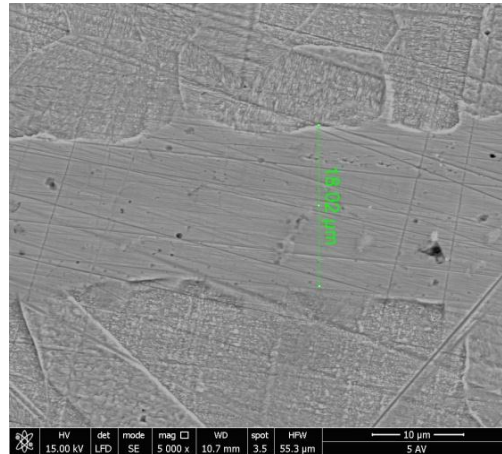


Fig. 5.14 Aspectul microscopic al probei BC23

Analiza EDAX realizată atât în îmbinare (figura 5.15) cât și în zonele adiacente ale îmbinării cu materialul de bază (figura 5.16) nu atestă modificări semnificative ale compoziției chimice. Prin urmare, în timpul procesului de brazare nu s-a produs oxidarea deși nu s-a utilizat flux de lipire. În concluzie se poate afirma că aliajul de lipire elaborat are și un caracter autofluxant.

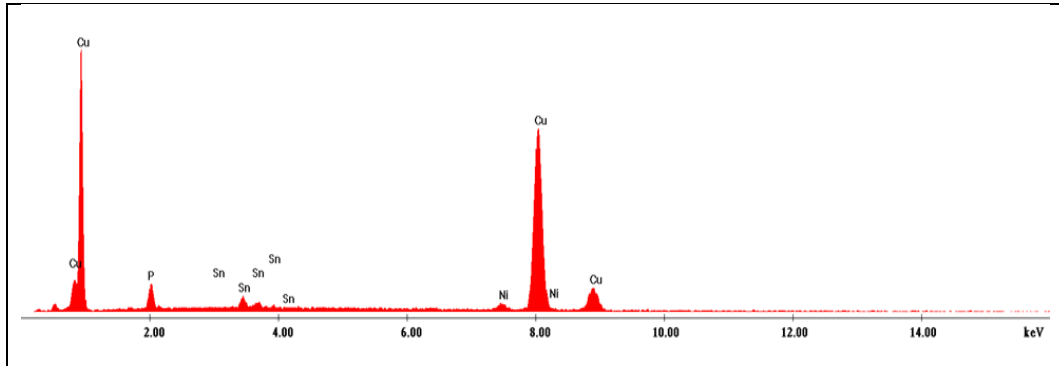


Fig. 5.15 Spectrul EDAX în îmbinare

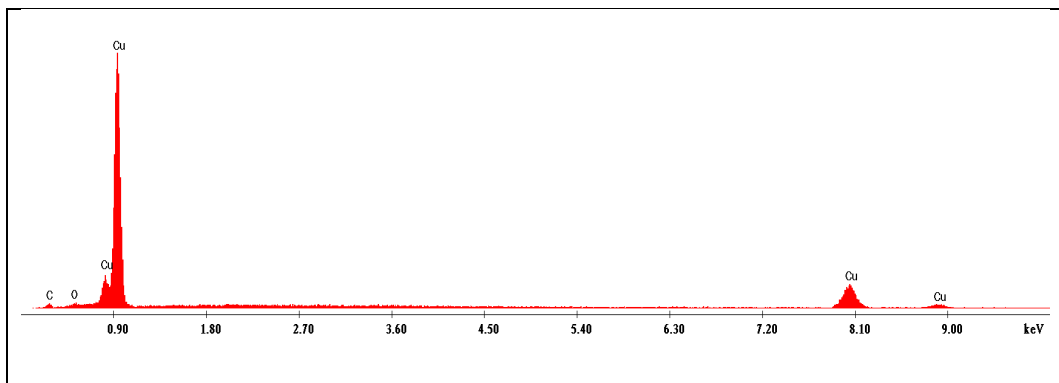


Fig. 5.16 Spectrul EDAX în zona adiacentă îmbinării

5.1.2.2 Încercări mecanice

Ținând cont de geometria îmbinărilor lipite, realizate prin suprapunerea platbenzilor din cupru, acestea nu s-au putu supune încercărilor de tracțiune, care presupuneau îmbinare cap la cap. Prin urmare, îmbinările lipite au fost supuse încercării de rupere la forfecare.

Încercarea la forfecare constă în aplicarea lentă și fără șocuri, până la rupere, pe direcția longitudinală a epruvetei, a unei forțe de tracțiune. Astfel se determină rezistența la rupere prin forfecare prin raportarea forței maxime ce apare în timpul încercării la aria secțiunii suprafeței brazate. Schema încercării este redată în figura 5.17.

Încercarea la forfecare s-a efectuat pe mașina universală de încercat la tracțiune Zwick/Roell-Z005, cu forța maximă ce se poate aplica de 5kN, din dotarea Departamentului de Mecanică și Rezistența Materialelor. Viteza cu care se execută încercarea este de 1mm/min.

Mașina de încercat precum și modul de realizare a încercării sunt prezentate în figura 5.18.

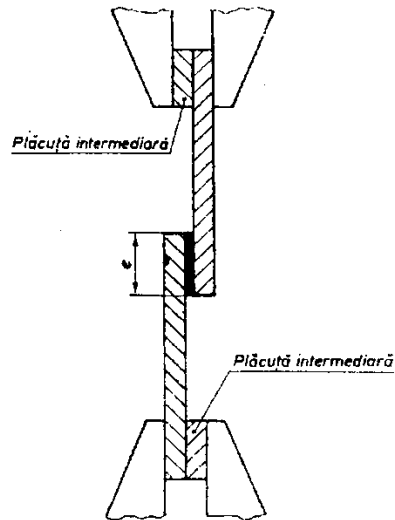


Fig.5.17. Schema încercării la rupere prin forfecare [101]



Fig. 5.18 Desfășurarea încercării la forfecare

Ținând cont de rezultatele analizei metalografice, s-au supus încercării la forfecare probe calibrate brazate cu regimuri de brazare corespunzătoare probei BC24, deoarece în acest caz s-a obținut o structură omogenă în îmbinare cu umplerea completă a rostului dintre platbenzi.

S-au supus încercării un număr de 5 probe. Curbele de tracțiune ale tuturor probelor încercate prezintă aspectul din figura 5.19. Se constată un comportament ductil, ruperea realizându-se în materialul de bază, în zona adiacentă îmbinării brazate (figura 5.20)

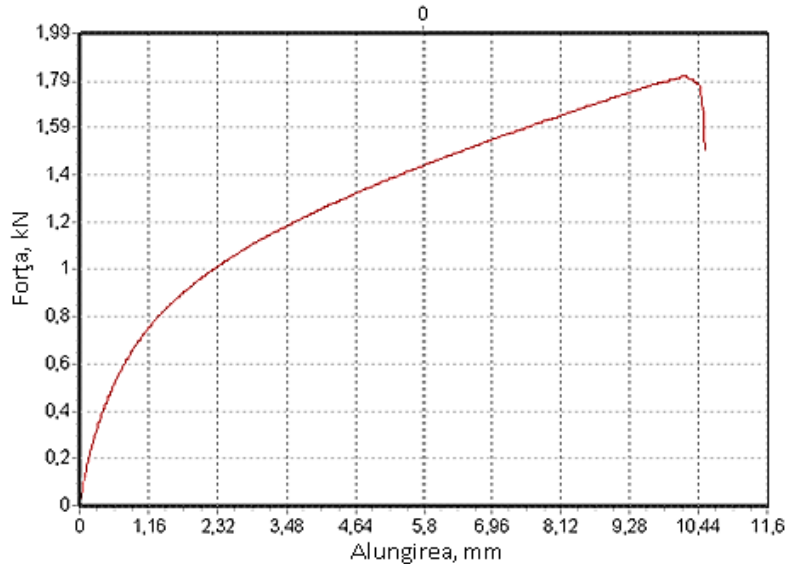


Fig. 5.19 Curba de tracțiune specifică la îmbinarea Cu+Cu



Fig. 5.20 Proba încercată la forfecare

Rezultatele încercării la forfecare pentru probele analizate sunt sintetizate în tabelul 5.4.

Tabelul 5.4 Rezultatele încercării la forfecare

Nr. crt	Proba	Încercarea	Rezistența la forfecare, [MPa]	Valoarea medie, R_f [Mpa]
1	BC24	1	178	180,2
2		2	182	
3		3	175	
4		4	187	
5		5	179	

Prin urmare, brazarea platbenzilor de cupru cu aliajul de brazare amorf pe bază de cupru a condus la îmbinări brazate rezistente, ruperea probelor realizându-se în materialul de bază și nu în îmbinare. Ținând cont de acest aspect, se poate concluziona ca brazarea electrică prin rezistență în puncte cu aliaj de brazare cu structură amorfă poate înlocui cu succes sudarea tablelor de cupru.

5.1.3. Tehnologia pentru brazare electrică prin presiune în puncte a platbenzilor din oțel inoxidabil

Cercetările experimentale au vizat și brazarea platbenzilor din oțel inoxidabil austenitic cu aliaj de lipire amorf pe bază de cupru. Tehnologia de brazare în acest caz este similară cu cea descrisă în cazul platbenzilor de cupru la paragraful 5.1.1.

Și în acest caz au fost folosite platbenzi din oțel inoxidabil austenitic de grosime de 1 mm, schița îmbinării brazate fiind cea prezentată în figura 5.3a.

S-au realizat mai multe seturi de probe, urmărindu-se modificarea parametrilor de proces astfel încât să se obțină îmbinări brazate cu o structură omogenă, fără sufluri sau incluziuni și fără topirea sau afectarea termică a materialului de bază.

Având în vedere rezultatele obținute în cazul brazării platbenzilor de cupru, în acest caz s-au realizat un număr mai mic de probe, excluzându-se curenți de lipire și durate de lipire de valori mici.

Parametrii tehnologici utilizați pentru lipirea probelor sunt sintetizați în tabelul 5.5:

Tabelul 5.5 Parametrii utilizați la lipirea platbenzilor din oțel inoxidabil

Nr. crt	Proba	Curentul de lipire [A]	Timpul de lipire [s]	Forța de apăsare [N]
1	BI1	300	15	400
2	BI2			500
3	BI3		20	400
4	BI4			500
5	BI5		25	400
6	BI6			500
7	BI7		30	400
8	BI8			500
9	BI9	400	15	400
10	BI10			500
11	BI11		20	400
12	BI12			500
13	BI13		25	400
14	BI14			500
15	BI15		30	400
16	BI16			500

În aceste condiții au rezultat îmbinări brazate ce prezintă aspectul din figura 5.21



Fig. 5.21 Îmbinarea brazată

5.1.4. Caracterizarea îmbinărilor brazate inox-inox

Îmbinările brazate au fost supuse analizei structurale prin microscopie optică, microscopie electronică, analiză EDAX precum și la încercări mecanice la forfecare.

5.1.4.1 Analiza structurală

Analiza structurală prin microscopie optică a îmbinărilor brazate a fost realizată cu un microscop optic metalografic de tipul OLYMPUS BX41M.

La toate probele examinate se remarcă structura austenitică a materialului de bază, neafectată de procesul de brazare (figura 5.22, figura 5.23). La margine îmbinării, datorită faptului că nu a fost sub acțiunea electrodului, iar conductivitatea termică a materialului de bază este mai redusă, se constată o neîncălzire suficientă a aliajului de lipire, astfel încât acesta nu s-a topit (figura 5.22).

Se observă o îmbinare brazată omogenă din punct de vedere geometric, cu o structură monofazică foarte fină (figura 5.23).

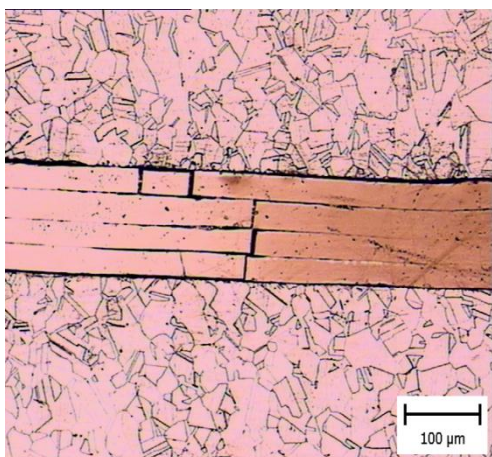


Fig. 5.22 Aspectul microscopic al probei BI1

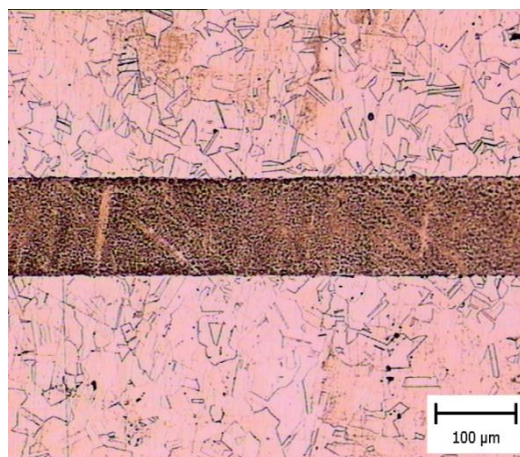


Fig. 5.23 Aspectul microscopic al probei BI11

S-au realizat și investigații structurale prin microscopie electronică utilizând un microscop electronic cu baleiaj de tipul FEI INSPECT-S, precum și analiza EDAX, atât în îmbinare cât în zona de trecere de la îmbinarea brazată la materialul de bază.

În acest caz se remarcă o grosime uniformă și aproximativ egală cu lățimea inițială a rostului dintre tablele de lipit (figura 5.24), ca urmare a unei limite de curgere mai ridicate a materialului de bază. De asemenea se observă în îmbinarea lipită o structură monofazică cu aspect dendritic (figura 5.25).

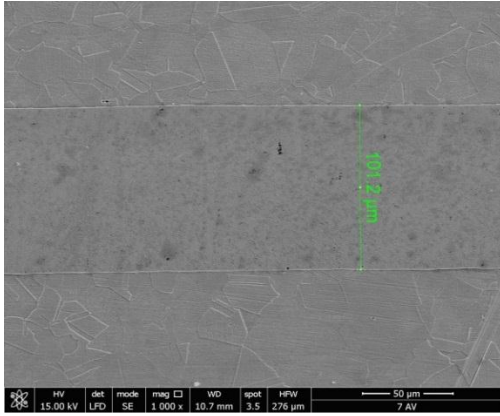


Fig. 5.24 Aspectul microscopic al probei BI12

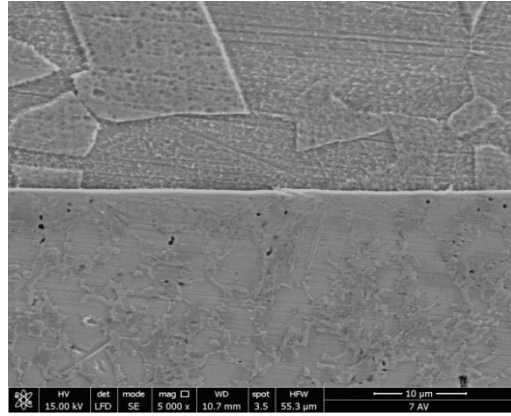


Fig. 5.25 Aspectul microscopic al probei BI14

Analiza EDAX din îmbinarea lipită confirmă microstructura evidențiată la microscop (figura 5.26)

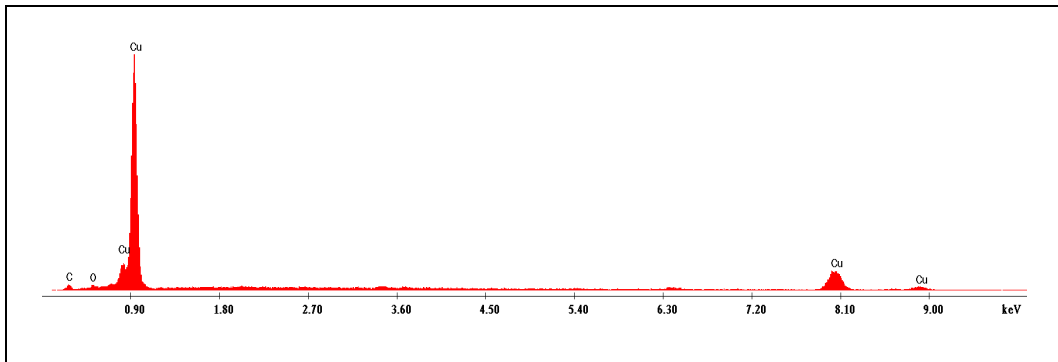


Fig.5.26 Spectrul EDAX în îmbinare

În zona din îmbinare adiacentă materialului de bază rezultatele EDAX evidențiază existența unui proces de difuzie ce a avut loc în timpul brazării (figura 5.27). Se remarcă difuzia fierului și cromului în îmbinarea brazată, și prin urmare, o creștere a adeziunii aliajului de brazare la materialul de bază.

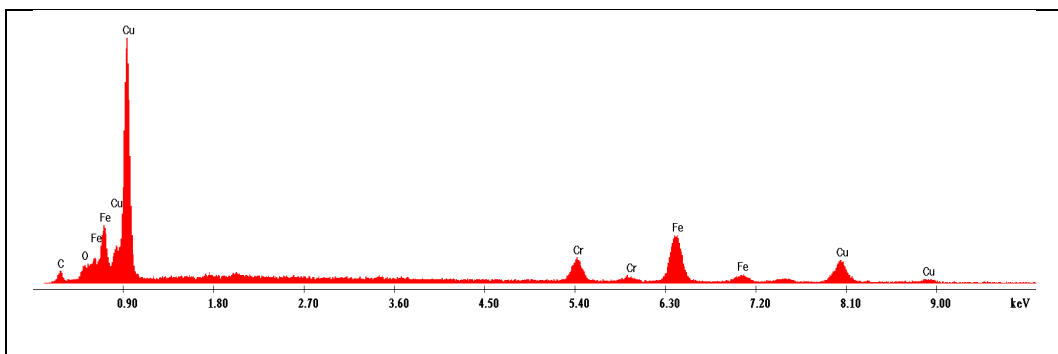


Fig.5.27 Spectrul EDAX în zona adiacentă materialului de bază

Prin urmare, aliajul de brazare cu structură amorfă pe bază de cupru se poate utiliza și la brazarea oțelurilor inoxidabile.

5.1.4.2 Încercări mecanice

Și în cazul îmbinării platbenzilor din oțel inoxidabil s-a realizat încercarea mecanică la forfecare, utilizând aceeași mașină și aceeași metodologie de lucru ca și în cazul îmbinărilor platbenzilor de cupru, fiind descrise în paragraful 5.1.2.2.

Având în vedere faptul că îmbinările brazate au prezentat o structură omogenă, s-au supus încercării un set de 5 probe brazate cu parametrii corespunzători probei BI14. Curbele de tracțiune ale tuturor probelor încercate prezintă aspectul din figura 5.28. Se constată un comportament ductil, ruperea realizându-se în îmbinarea brazată.

Așa cum se poate observa și în imaginea microscopică (figura 2.59), ruperea s-a produs aproximativ în zona mediană. Prin urmare adeziunea aliajului de lipire la materialul de bază este foarte bună.

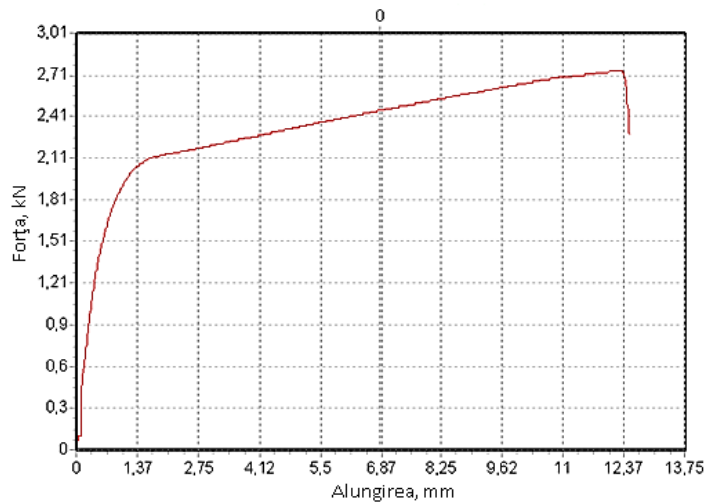


Fig. 5.28 Curba de tracțiune specifică la îmbinarea inox+inox

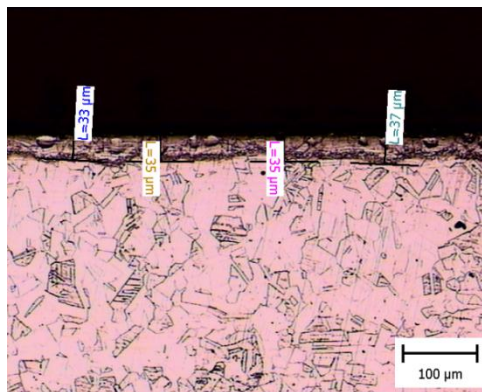


Fig. 5.29 Aspectul microscopic al probei rupte

Rezultatele încercării la forfecare pentru probele analizate sunt sintetizate în tabelul 5.6.

Tabelul 5.6 Rezultatele încercării la forfecare

Nr. crt	Proba	Încercarea	Rezistența la forfecare, [MPa]	Valoarea medie, R_f [Mpa]
1	BI14	1	273	270,4
2		2	269	
3		3	275	
4		4	264	
5		5	271	

Prin urmare, în urma încercării la forfecare se constată că îmbinarea brazată are un comportament ductil, rezistența mecanică la forfecare fiind de aproximativ 270,4 MPa, ruperea realizându-se în îmbinare. Ținând cont de faptul că limita la curgere a materialului de bază este 260MPa, se poate concluziona că aliajul de brazare amorf pe bază de cupru elaborat poate fi folosit cu succes la brazarea oțelurilor inoxidabile.

5.1.5. Tehnologia pentru brazare electrică prin presiune în puncte a platbenzilor din oțel inoxidabil și cupru

Cercetările experimentale au urmărit și realizarea de îmbinări brazate de tipul cupru cu oțel inoxidabil.

Tehnologia de brazare și în acest caz este similară cu cea descrisă în cazul platbenzilor de cupru la paragraful **V.1.1**, utilizându-se ca materiale de bază platbenzi din oțel inoxidabil austenitic și de cupru de grosime de 1 mm. Schița îmbinării brazate este cea prezentată în figura 5.3a.

S-au realizat mai multe seturi de probe, urmărindu-se modificarea parametrilor de proces astfel încât să se obțină îmbinări brazate cu o structură omogenă, fără sufluri sau incluziuni și fără topirea sau afectarea termică a materialului de bază.

Având în vedere rezultatele obținute în cazul brazării platbenzilor de cupru, și a platbenzilor din oțel inoxidabil, în acest caz s-au realizat un număr mai mic de probe, excluzându-se curenți de lipire și durate de lipire de valori mici, precum și duratele de brazare foarte mari.

Parametrii tehnologici utilizați pentru lipirea probelor sunt sintetizați în tabelul 5.7:

Tabelul 5.7 Parametrii utilizați la lipirea platbenzilor din oțel inoxidabil și cupru

Nr. crt	Proba	Curentul de lipire [A]	Timpul de lipire [s]	Forța de apăsare [N]
1	BCI1	300	15	400
2	BCI2			500
3	BCI3		20	400
4	BCI4			500
5	BCI5		25	400
6	BCI6			500
7	BCI7	400	15	400
8	BCI8			500
9	BCI9		20	400
10	BCI10			500
11	BCI11		25	400
12	BCI12			500

5.1.6. Caracterizarea îmbinărilor brazate inox-cupru

Îmbinările brazate au fost supuse analizei structurale prin microscopie optică, microscopie electronică, analiză EDAX precum și la încercări mecanice la forfecare.

5.1.6.1 Analiza structurală

Analiza structurală prin microscopie optică a îmbinărilor brazate a fost realizată cu un microscop optic metalografic de tipul OLYMPUS BX41M. Probele metalografice au fost atacate astfel încât să se pună în evidență structura îmbinării brazate.

La toate probele examinate se remarcă structura formată din grăunți poliedrici a materialului de bază, neafectată de procesul de brazare (figura 5.30). Structura îmbinării este monofazică, uniformă, fără a se identifica grăunți cristalini sau precipitări de faze intermetalice. Se constată că în acest caz grosimea îmbinării brazate este comparabilă cu cea în cazul îmbinării Cu-Cu, fiind mult mai redusă decât în cazul brazării tablelor din oțel inoxidabil (figura 5.31). Acest fapt se datorează deformării tablelor de cupru sub acțiunea forței de apăsare a electrozilor.

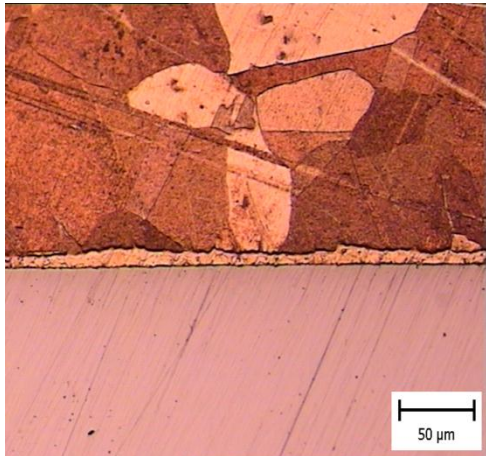


Fig. 5.30 Aspectul microscopic al probei BCI10

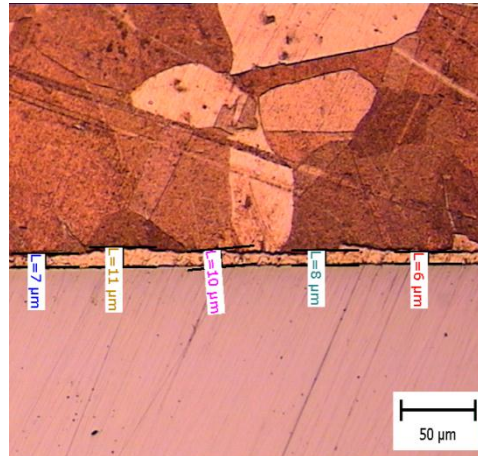


Fig. 5.31 Grosimea îmbinării brazate

S-au realizat și investigații structurale prin microscopie electronică utilizând un microscop electronic cu baleiaj de tipul FEI INSPECT-S, precum și analiza EDAX, atât în îmbinare cât în zona de trecere de la îmbinarea brazată la oțelul inoxidabil.

Imaginea SEM a probelor examinate atestă în îmbinarea brazată o structură monofazică omogenă, lipsită de precipitări ale unor faze intermetalice. În cazul probelor brazate cu curenți de brazare și forțe de apăsare mai mici se constată o grosime mai mare a îmbinării brazate (figura 5.32). În cazul probelor brazate cu curenți de brazare și forțe de apăsare mai mari se observă o grosime mai mică a îmbinării brazate (figura 5.33). De asemenea se poate observa o mai bună adeziune între aliajul de brazare și cupru, cu formarea unei zone de difuzie.

De altfel, apariția zonelor de difuzie este confirmată și de spectrele EDAX realizate în materialul de bază, în zona imediat adiacentă îmbinării (figurile 5.34, 5.35). Se observă că apare atât o difuzie a Cu în oțelul inoxidabil precum și o difuziune a Fe în imbinarea brazată.

Analiza EDAX în îmbinarea brazată certifică aspectul microstructural, și anume prezența unei structuri omogene, monofazice formată dintr-o soluție solidă pe bază de Cu (figura 5.36).

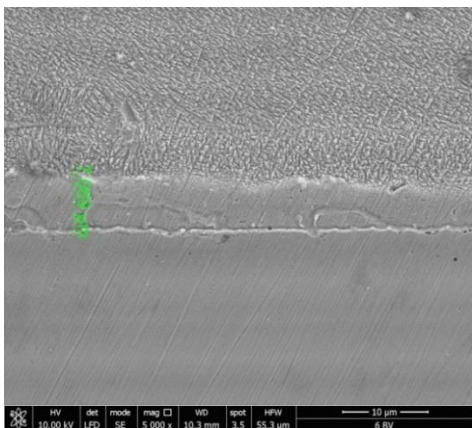


Fig. 5.32 Aspectul microscopic al probei BCI5

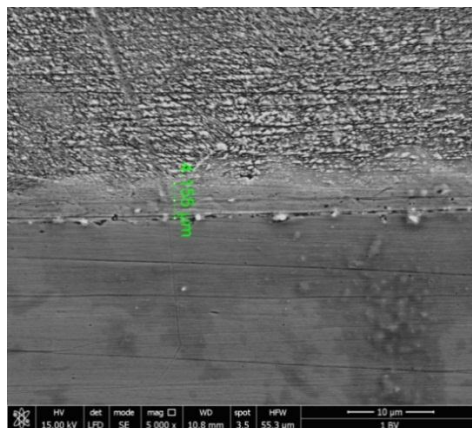


Fig. 5.33 Aspectul microscopic al probei BCI12

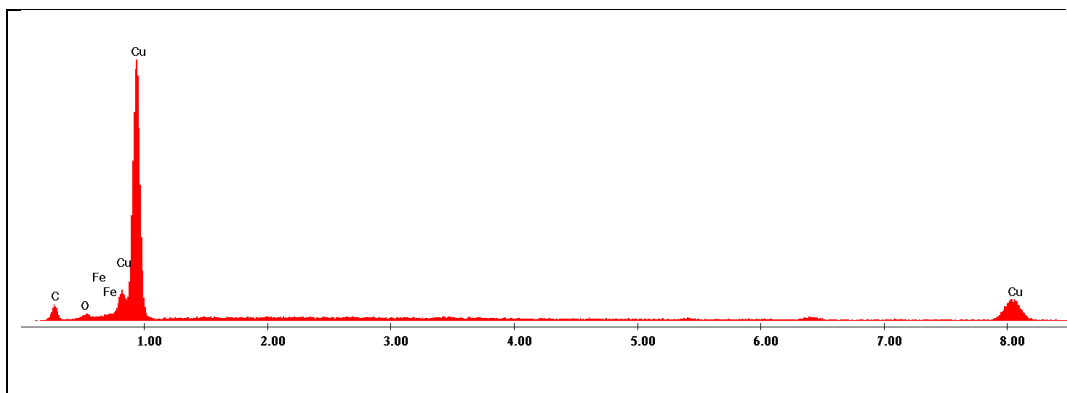


Fig. 5.34 Spectrul EDAX în îmbinare în vecinătatea tablei de inox

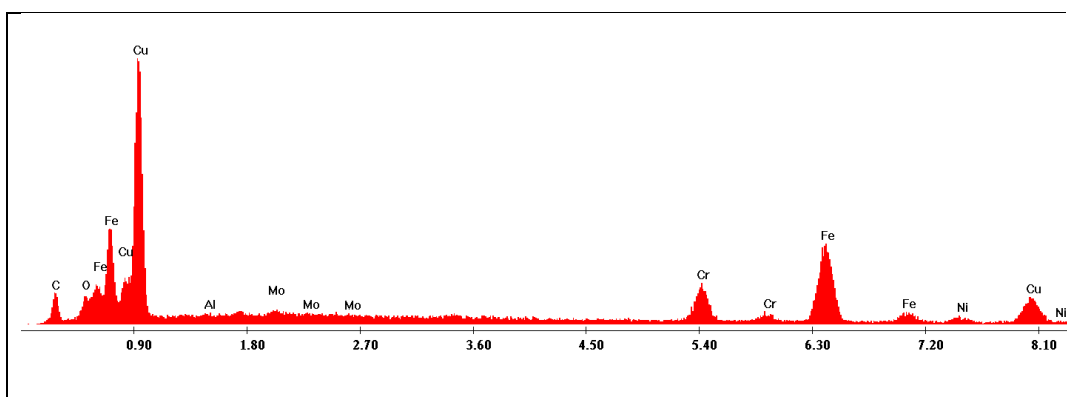


Fig. 5.35 Spectrul EDAX în tabla de inox în vecinătatea îmbinării

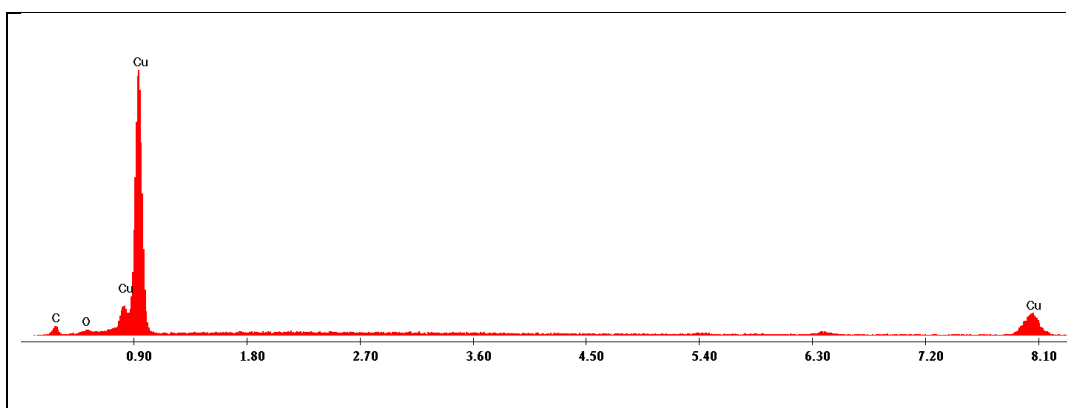


Fig. 5.36 Spectrul EDAX în îmbinare

5.1.4.2 Încercări mecanice

Și în acest caz s-a realizat încercarea mecanică la forfecare, utilizând aceeași mașină și aceeași metodologie de lucru ca și în cazul îmbinărilor platbenzilor de cupru, descrise în paragraful 5.1.2.2.

Având în vedere faptul că îmbinările brazate au prezentat o structură omogenă, s-au supus încercării un set de 5 probe brazate cu parametrii corespunzători probei BCI10. Curbele de tracțiune ale tuturor probelor încercate prezintă aspectul din figura 5.37. Se constată un comportament ductil, ruperea realizându-se în îmbinarea brazată.

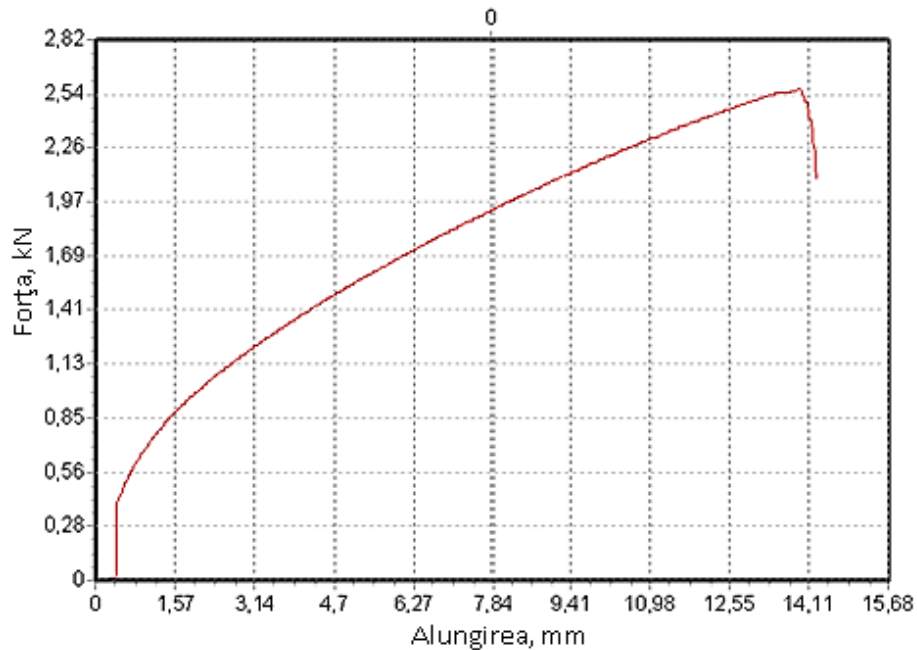


Fig. 5.37 Curba de tracțiune specifică la îmbinarea Cu+inox

Analiza microscopică realizată în zona de rupere a îmbinării arată că ruperea se face în aliajul de lipire, la limita de îmbinare cu oțelul inoxidabil (figura 5.38). Prin urmare, adeziunea aliajului de brazare la cupru este superioară adeziunii la oțel, fapt confirmat și de analiza microstructurală a îmbinărilor brazate.

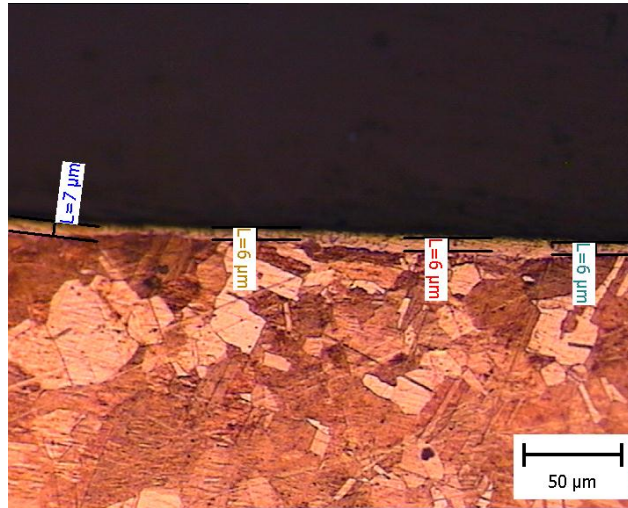


Fig. 5.38 Aspectul microscopic al probei rupte

Rezultatele încercării la forfecare pentru probele analizate sunt sintetizate în tabelul 5.8.

Tabelul 5.8 Rezultatele încercării la forfecare

Nr. crt	Proba	Încercarea	Rezistența la forfecare, [MPa]	Valoarea medie, R_f [Mpa]
1	BCI10	1	250	252,4
2		2	254	
3		3	249	
4		4	253	
5		5	256	

În urma încercării la forfecare se constată că îmbinarea brazată are un comportament ductil, rezistența mecanică la forfecare fiind de aproximativ 252,4 MPa, ruperea realizându-se în îmbinare. Se poate concluziona că aliajul de brazare amorf pe bază de cupru elaborat poate fi folosit și la brazarea cuprului și a aliajelor sale cu oțeluri inoxidabile.

5.2. Brazare prin inducție

Cercetările experimentale au vizat și realizarea de îmbinări brazate cu aliajul amorf elaborat utilizând procedeul de brazare cu încălzire prin inducție. Brazarea prin inducție este un procedeu de lipire capilară la care sursa de căldură o constituie energia inductivă a curenților de înaltă frecvență.

Ca și echipament pentru brazarea prin inducție s-a utilizat un generator de curent de înaltă frecvență de tip CTC, la care este conectat un transformator la a cărui secundar se leagă un inductor din țevă de cupru, de construcție specială. În figura 5.39 este prezentată instalația utilizată pentru brazarea prin inducție, iar în figura 5.40 este prezentat inductorul utilizat.

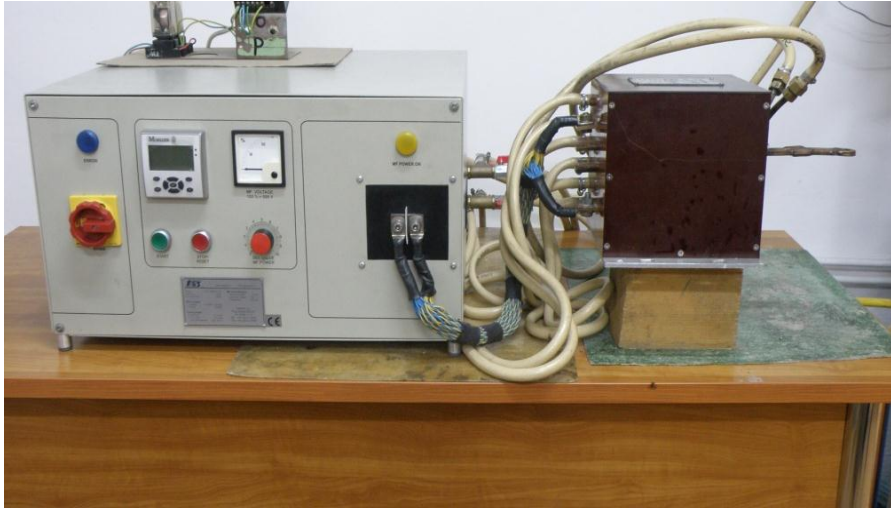


Fig. 5.39 Instalația pentru brazare prin inducție

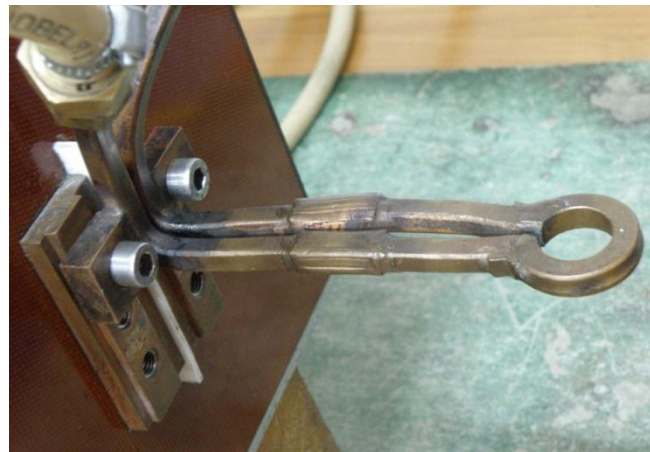


Fig. 5.40 Detaliu cu inductorul utilizat la brazarea prin inducție

Având în vedere faptul că s-a urmărit brazarea unor piese de tip țevă, construcția inductorului este una particulară, fiind format dintr-o singură spiră care să acționeze doar în zona în care se află aliajul de lipire.

Spre deosebire de brazarea prin rezistență, unde încălzirea și topirea aliajului de lipire se realizează datorită rezistențelor de contact dintre aliajul de lipire și materialul de bază, precum și datorită rezistivității ridicate a aliajului de lipire, în cazul brazării prin inducție, încălzirea și topirea aliajului de lipire se realizează ca urmare a căldurii rezultate în urma încălzirii prin inducție a materialului de bază. Prin urmare, în acest caz se produce o încălzire a materialului de bază până la o temperatură superioară temperaturii de topire a aliajului de lipire. În consecință, parametrii tehnologici ai procesului de brazare prin inducție trebuie să fie riguros controlați pentru a realiza topirea aliajului de lipire, fără însă a afecta termic prea mult materialul de bază și fără a-l topi parțial.

5.1.1. Tehnologia pentru brazare prin inducție

Principalii parametri de proces care influențează realizarea îmbinării lipite sunt: tensiunea curentului de inducție, frecvența curentului, intensitatea curentului și durata de lipire. Având în vedere că s-a utilizat un generator de curent de tip CTC, prin setarea unei anumite tensiuni a curentului, convertizorul adaptează automat intensitatea și frecvența curentului de lucru astfel încât să se acordeze cu inductorul. Prin urmare, la generatorul de curent de înaltă frecvență se setează doar tensiunea curentului, care, împreună cu ceilalți parametri, sunt afișați pe display-ul aparatului (figura 5.41).

Stabilirea parametrilor tehnologici (tensiunea curentului de inducție și durata de lipire) s-a făcut experimental, astfel încât să nu apară topirea materialului de bază.

S-au realizat mai multe seturi de îmbinări a unui manșon din cupru pe o țevă de cupru de diametrul de 10 mm. Schița îmbinării lipite este prezentată în figura 5.42. Datorită prezenței fosforului în aliajul de brazare, care reacționează cu oxigenul din atmosferă în timpul procesului de lipire, în cazul lipirii cuprului nu s-au utilizat fluxuri de lipire.



Fig. 5.41 Detaliu cu panoul de setare și afișare a parametrilor curentului de inducție

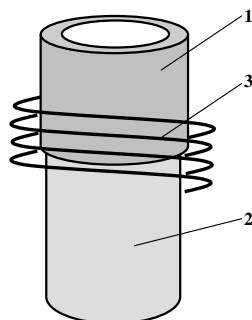


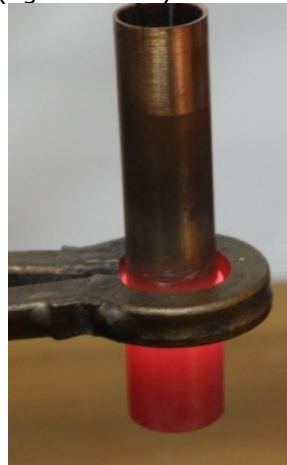
Fig. 5.42 Schița îmbinării: 1- manșon, 2 - țevă, 3 - inductor

Modul de realizare a îmbinării lipite este prezentat în figura 5.43.

Așa cum se poate observa și din figura 5.43, într-o primă etapă are loc bobinarea pe țeava de cupru aliajului de lipire sub formă de bandă astfel încât să se obțină grosimea stratului de aliaj de lipire dorită. Urmează fixarea manșonului ce urmează a fi brazat (figura 5.43 a). Se poziționează țeava de cupru în raport cu inductorul astfel încât zona unde a fost plasat aliajul de lipire să fie în dreptul acestuia. Se aplică curentul de inducție un anumit timp necesar topirii aliajului de lipire (figura 5.43 b), rezultând îmbinarea lipită (figura 5.43.c).



a) așezarea aliajului de lipireși montarea manșonului



b) aplicarea curentului de inducție



c) răcirea îmbinării lipite

Fig. 5.43 Realizarea îmbinărilor lipite

S-au realizat mai multe seturi de probe, urmărindu-se modificarea parametrilor de proces astfel încât să se obțină îmbinări brazate de calitate, fără sufluri sau incluziuni și fără topirea sau afectarea termică semnificativă a materialului de bază.

În principiu, s-a căutat o tensiune a curentului de inducție care să realizeze o topire cât mai rapidă a aliajului de lipire, motiv pentru care s-a optat din start pentru tensiuni mai mari.

Parametrii tehnologici utilizați pentru brazarea probelor sunt sintetizați în tabelul 5.9:

Tabelul 5.9 Parametrii utilizați la probele brazate prin inducție

Nr. crt	Proba	Tensiunea curentului de inducție [V]	Timpul de lipire [s]
1	I1	365	8
2	I2		10
3	I3	342	8
4	I4		10
5	I5		12
6	I6	321	8
7	I7		10
8	I8		12
9	I9		14
10	I10	298	8
11	I11		10
12	I12		12
13	I13		14
14	I14		16
15	I15	274	8
16	I16		10
17	I17		12
18	I18		14
19	I19		16

Pentru optimizarea parametrilor tehnologici, într-o primă etapă s-a realizat o examinare macroscopică (vizuală) a îmbinărilor brazate.

Astfel, în cazul probelor I1 și I2, deși s-a realizat o topire rapidă a aliajului de lipire, s-a constatat o supraîncălzire a materialului de bază, iar în cazul probei I2 chiar topirea parțială a manșonului (figura 5.44). Prin urmare, tensiunea curentului de inducție folosită a fost prea mare.

Și în cazul brazării cu o tensiune a curentului de inducție de 342 V s-a observat o supraîncălzire a materialului de bază, chiar la durate de brazare mai mici (figura 5.45).

La brazarea cu tensiunea curentului de inducție de 321 V s-a remarcat că la durate mai mari de brazare apare o supraîncălzire a materialului de bază (figura 5.46). Această supraîncălzire se datorează și conductivității termice ridicate a materialului de bază care are ca efect disiparea căldurii din zona de îmbinare în masa acestuia.

Probele brazate la tensiuni mai mici de 300 V prezintă aspectul din figura 5.47. În acest caz s-a produs cu precădere încălzirea manșonului și mai puțin a țevii de cupru.



a) proba I1



b) proba I2

Fig. 5.44 Aspectul macroscopic îmbinărilor lipite cu tensiunea de 365 V



Fig. 5.45 Proba I3



Fig. 5.46 Proba I9



Fig. 5.47 Proba I12

5.2.2. Caracterizarea structurală a îmbinărilor brazate

Probele I6...I19, prezentând un aspect macroscopic corespunzător, au fost supuse analizei structurale prin microscopie optică și electronică.

Analiza structurală prin microscopie optică s-a realizat cu un microscop optic metalografic de tipul OLYMPUS BX41M, în secțiuni transversale ale îmbinărilor brazate.

În cazul probelor brazate cu tensiuni ale curentului de inducție mai mici de 300V (probele I10...I19) s-a constatat prezența discontinuităților în îmbinarea brazată. Aceste discontinuități au apărut chiar și la durate de brazare mai mari (figura 5.48).

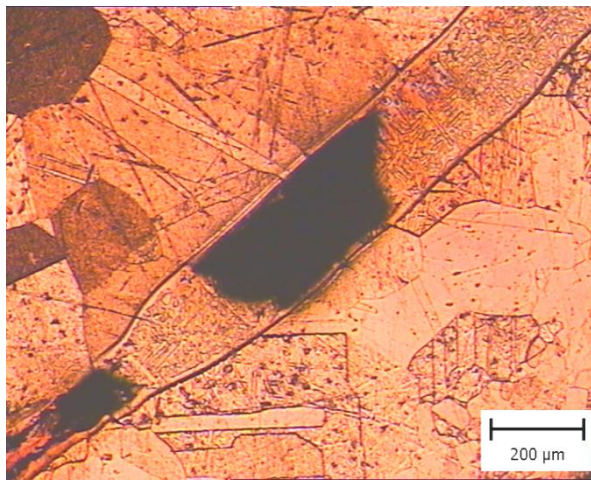


Fig. 5.48 Microstructura probei I18

Prezența acestor goluri în îmbinarea brazată se datorează unei curgeri neuniforme a aliajului de lipire în rostul capilar datorate unei încălziri neuniforme a componentelor de brazat. Astfel, la tensiuni ale curenților de inducție și durate de brazare mai mici are loc încălzirea până la temperatura de topire a aliajului de lipire doar a manșonului, în timp ce temperatura țevii de cupru rămâne mai mică. În aceste condiții, aliajul de lipire se solidifică mai rapid, neuniform, fără a umple complet rostul capilar. Prin urmare, chiar dacă în aceste condiții materialul de bază nu este afectat termic semnificativ de procesul de brazare, remarcându-se structura acestuia formată din grăunți poliedrici cu macles de recoacere, îmbinarea brazată nu este corespunzătoare.

Examinarea probelor brazate cu o tensiune de 321 V (probele I6...I19) atestă prezența unei îmbinări brazate omogenă din punct de vedere geometric (figura 5.49). Se remarcă structura dendritică a aliajului de lipire, fără incluziuni și precipitări de faze intermetalice și structura poliedrică a materialului de bază, neafectat termic semnificativ de procesul de brazare.

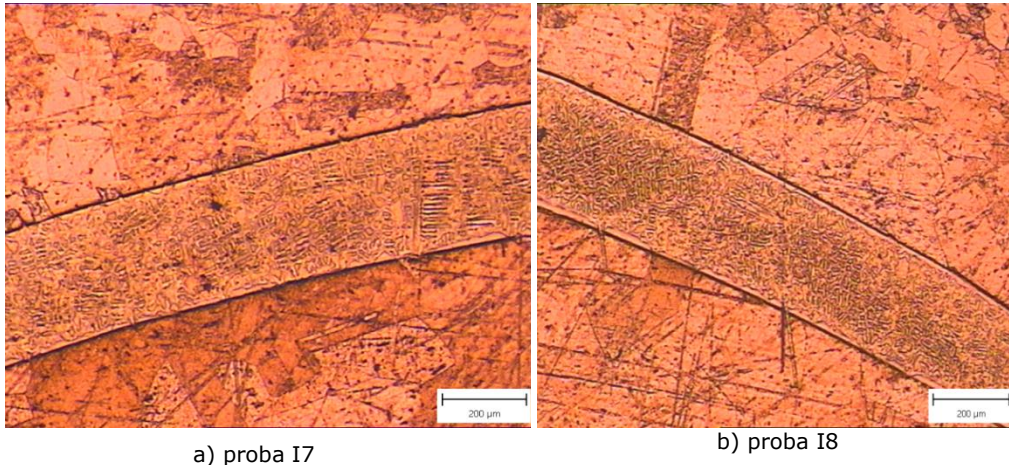


Fig. 5.49 Aspectul microscopic îmbinărilor lipite cu tensiunea de 321 V

Pentru a analiza omogenitatea îmbinării brazate, aceste probe au fost examinate și într-o secțiune longitudinală. Așa cum se poate remarca și în figura 5.50, îmbinarea brazată este omogenă și în secțiune longitudinală, neobservându-se goluri, incluziuni sau precipitări de faze intermetalice.

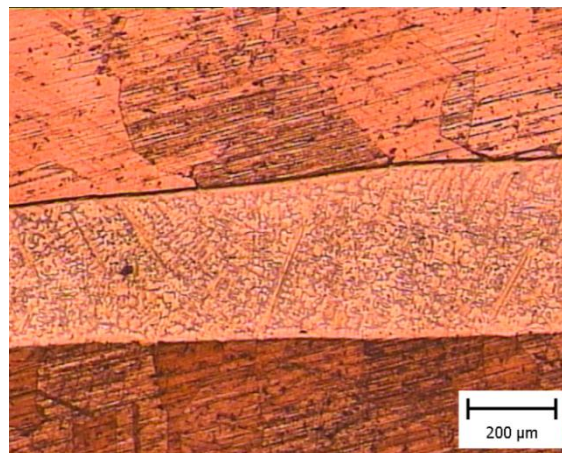


Fig. 5.50 Microstructura probei I9 în secțiune longitudinală

În cazul probelor la care s-a obținut o îmbinare brazată omogenă, s-au realizat și investigații structurale prin microscopie electronică utilizând un microscop electronic cu baleiaj de tipul FEI INSPECT-S, precum și analiza EDAX, atât în îmbinare cât în zona de trecere de la îmbinarea brazată la materialul de bază.

Astfel, în cazul probelor I7 și I8, într-o secțiune longitudinală a îmbinării brazate se observă în îmbinarea lipită omogenă din punct de vedere geometric, cu o structură cu aspect dendritic formată dintr-o soluție solidă pe bază de cupru (figurile 5.51 și 5.52). Examinarea cu o putere de mărire mai mare pune însă în evidență existența în structura îmbinării brazate și a unor insule de amestec mecanic eutectic (figura 5.53). Apariția eutecticului în structura îmbinării brazate confirmă faptul că în cazul brazării prin inducție viteza de răcire a aliajului de lipire topit este mai redusă decât în cazul brazării prin rezistență în puncte.

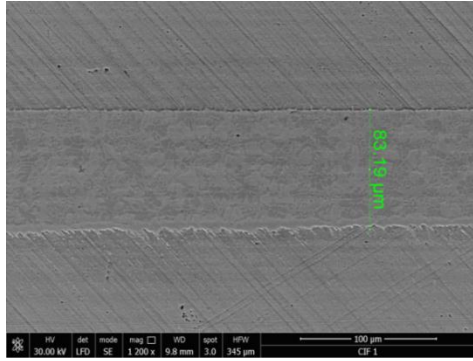


Fig. 5.51 Imaginea SEM în secțiune longitudinală a probei I7

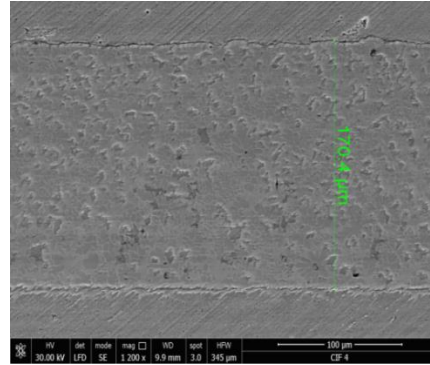


Fig. 5.52 Imaginea SEM în secțiune longitudinală a probei I8

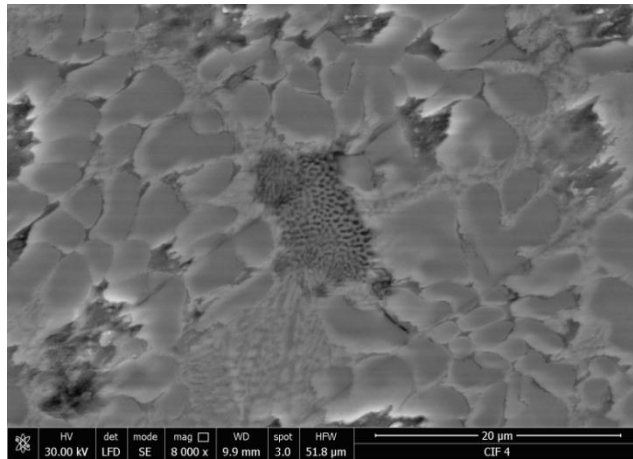


Fig. 5.53 Structura îmbinării brazate – detaliu cu amestecul mecanic eutectic

Analiza EDAX realizată la proba I8 atât în îmbinare (figura 5. 54) cât și în zonele adiacente ale îmbinării cu materialul de bază (figura 5.55) nu atestă modificări semnificative ale compoziției chimice. Prin urmare, în timpul procesului de brazare nu s-a produs oxidarea deși nu s-a utilizat flux de lipire Deci, se poate afirma că aliajul de lipire elaborat are și un caracter autofluxant.

Se remarcă totuși că în zona adiacentă materialului de bază, apare o creștere a proporției de cupru și o diminuare a proporției celorlalte elemente din aliajul de lipire, fapt datorat proceselor de difuziune ce au avut loc în timpul procesului de brazare.

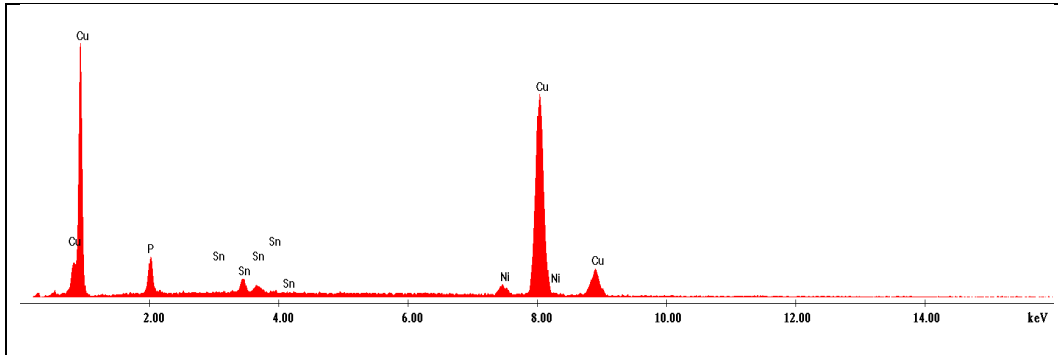


Fig. 5.54 Spectrul EDAX în îmbinarea brazată

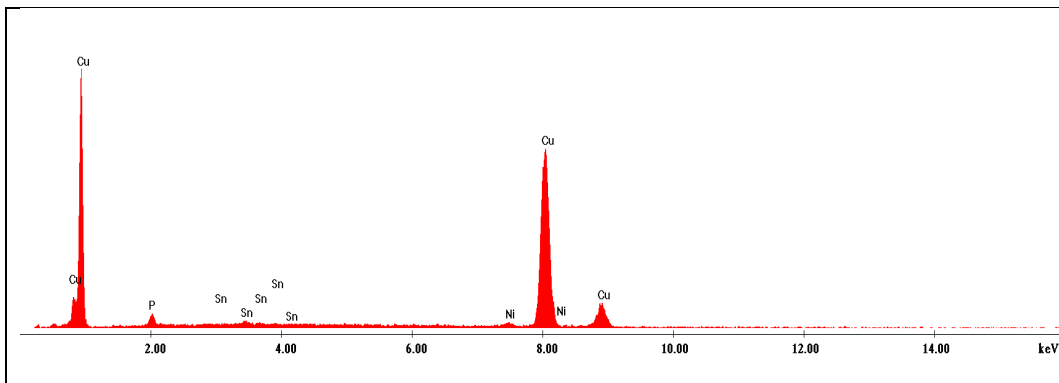


Fig. 5.55 Spectrul EDAX în zona adiacentă materialului de bază

Urmărind aspectul macro și microscopic al îmbinărilor realizate se pot trage următoarele concluzii:

- Aliajul de lipire elaborat poate fi folosit cu succes la brazare prin inducție a componentelor de secțiune circulară din cupru sau din aliaje pe bază de cupru. S-a constatat o bună întindere și umectare precum și caracterul autofluxant al aliajului de brazare cu structură amorfă.

- Pentru a evita topirea sau supraîncălzirea materialului de bază tensiunea curentului de inducție nu trebuie să depășească 350 V.

- Pentru a obține o structură monofazică în imbinarea lipită, parametrii optimi de proces sunt:

- Tensiunea curentului de inducție: 280-340 V;
- timpul de brazare: 10...14 secunde.

6. Modelarea matematică a procesului de brazare prin rezistență utilizând metoda experimentului factorial

O caracteristică de bază a științelor experimentale este aceea că ele își bazează cunoașterea în problemele abordate cel mai adesea pe rezultate experimentale, obținute în urma unor procese de măsurare. La ora actuală se acceptă că orice rezultat experimental este afectat cel puțin de erorile aleatoare de măsurare și, ca atare, formularea concluziilor și luarea deciziilor trebuie făcută în condițiile în care se ține seama de existența acestor erori, deci se acceptă implicit faptul că afirmațiile făcute vor avea o certitudine inferioară valorii de 100%.

Pe de altă parte, prezența erorilor de măsurare arată că este rațional ca prelucrarea datelor să se facă luând în considerare totalitatea rezultatelor măsurărilor și nu rezultatele individuale, luate ca atare. Dacă se abordează problema în acest mod, denumit statistic, se realizează un salt considerabil privind calitatea și cantitatea informațiilor ce se pot extrage din șirul de date experimentale analizate [7].

Identificarea unui sistem sau proces presupune investigarea experimentală. Folosirea mijloacelor și metodelor de măsurare trebuie încadrată într-un proces mai larg de analiză, modelare și interpretare a rezultatelor investigației experimentale. Pentru utilizarea sau folosirea unui sistem de prelucrare este necesară o analiză sistemică completă și competentă.

Aceasta precizează obiectivele, resursele și modul de obținere a rezultatelor dorite. În acest scop este necesară modelarea acestuia. Este evident că pentru definirea cât mai corectă a unui sistem (în vederea optimizării), este necesară luarea în studiu a cât mai mulți parametri. Aceasta implică însă și un număr mare de încercări experimentale. De aceea se folosește metoda planificării experimentelor care, în scopul achiziționării datelor experimentale, trebuie să respecte următoarele criterii:

- să faciliteze achiziția progresivă de date;
- să minimizeze numărul de experimente;
- să ofere o precizie cât mai bună.

Planificarea experimentelor (Design of Experiments, DOE) reprezintă o serie de teste al căror scop este modificarea variabilelor procesului pentru a se putea urmări modificările care vor apărea în răspunsul (ieșirea) procesului, figura 6.1 [30,69].

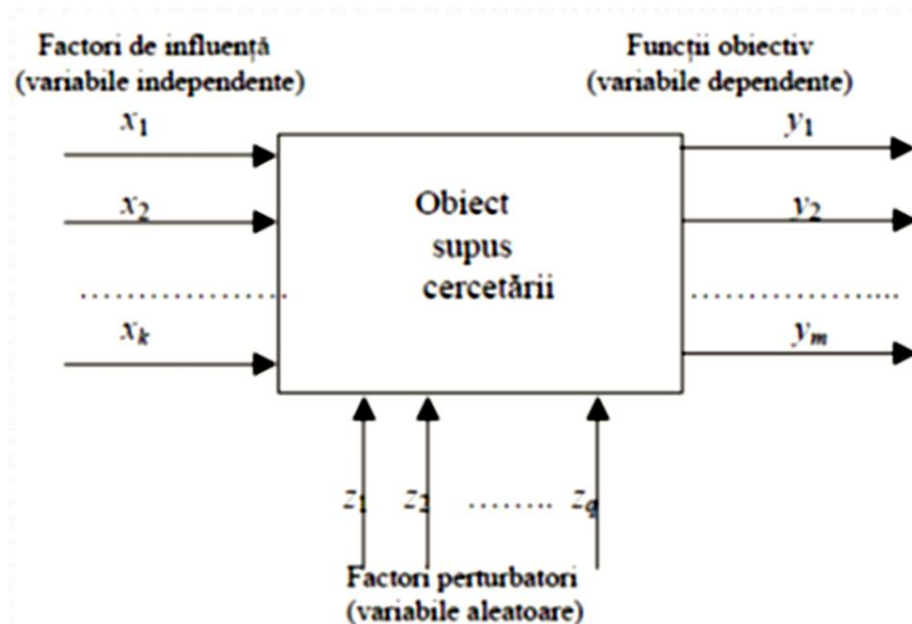


Fig. 6.1 Modelul general al unui proces sau sistem [30,69]

Proiectarea experimentelor (DoE – Design of Experiments) este o metodă statistic experimentală analitică, statistică, structurată, sistematică, standardizată, riguroasă, de investigare a unui proces sau a unui sistem, produs, serviciu, dezvoltată pornind de la activitatea de cercetare științifică, în scopul de a identifica și cuantifica mai simplu și mai rapid principalele efecte ale elementelor de intrare (considerate cauze) asupra rezultatelor procesului, precum și interdependențele dintre elementele de intrare [3].

DoE urmărește astfel obținerea și analiza datelor experimentale cantitative necesare pentru determinarea relației dintre factorii (x) ce influențează un proces și rezultatele respectivului proces (y), printr-o abordare care aplică principii și tehnici statistice ce asigură generarea și susținerea de concluzii valide și consistente pe baza numărului minim de date necesare, ceea ce implică un consum minim de resurse (bani, timp etc.).

De obicei, necesită utilizarea de instrumente de analiză statistică, pentru analiza și interpretarea datelor colectate (ANOVA, analiza de corelare, analiza de regresie), ceea ce face utilă achiziționarea de programe special de calcul (Minitab sau alte programe de analize statistice). DoE se poate aplica în orice sector industrial, dar fiind un instrument relativ sofisticat, în producție este mai des întâlnit în electronică, industria auto, industria farmaceutică, producția de aparate de măsură analitice etc. Pe măsură ce abordările Six Sigma și Lean Six Sigma se extind în organizațiile din toată lumea, DoE devine din ce în ce mai cunoscută și aplicată [41,42,68].

DoE se poate aplica atât în producție, cât și în cazul proceselor suport dintr-o organizație de producție, atunci când:

- Procesul este inadecvat proiectat sau nu poate fi bine controlat
- Trebuie introduse modificări în proces, iar riscul este foarte mare
- Procesul este foarte complex și depinde de multe variabile, unele dificil de controlat

- Trebuie introduse noi produse în fabricație
 - La rezolvarea problemelor nu se poate ajunge la un consens în luarea deciziei pentru selectarea soluției celei mai adecvate [86].
- Conceperea sistemului ocupă un loc important, iar determinarea parametrilor nu caută a determina relațiile între cauză și efect, ci de a concepe produse robuste, insensibile la cauzele de dispersie. Termenul optimal se referă la cea mai bună combinație de factori. Determinarea parametrilor este un demers de concepție experimentală. Metoda tradițională de rezolvare a unei probleme este prezentată în figura 6.2. [84]

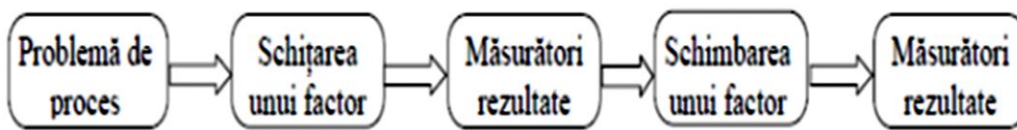


Fig. 6.2 Metoda tradițională de rezolvare a unei probleme [84]

Planificarea experimentelor reprezintă strategia de programare a încercărilor în vederea obținerii unor rezultate utile și cu un nivel de încredere satisfăcător. Prin aceste planuri se determină factorii semnificativi, interacțiunile semnificative dintre factori și se permite obținerea ecuației care exprimă fenomenul cercetat în funcție de efectele reținute ca fiind influente [41,42]. În cercetarea experimentală s-au conceput și aplicat mai multe tipuri de planuri experimentale:

- planuri factoriale complete cu și fără repetarea experiențelor;
- planuri factoriale incomplete;
- planuri factoriale fracționate;
- planuri factoriale de tip pătrat latin și pătrat greco-latin [85].

Metoda experimentului planificat permite, pe lângă reducerea considerabilă a numărului de experimente, stabilirea unor corelații matematice (prin intermediul ecuațiilor de regresie) între influențele manifestate de diferiți parametri interdependenți ai procesului analizat. Dintre multiplele posibilități pe care le pune la dispoziție matematică statistică, sunt de preferat acele metode care să asigure ulterior o conducere eficientă a procesului analizat. În raport cu numărul variabilelor independente studiate simultan în cadrul aceluiași experiment putem distinge:

- a. scheme de proiectare experimentală de bază, când o singură variabilă este supusă tratamentului experimental;
- b. scheme de proiectare experimentală factorială, când se cercetează simultan mai multe variabile independente.

Se adoptă, prin urmare, planificarea experimentelor pe baza experimentului factorial complet. Pentru acest experiment factorial s-a folosit soft-ul de analiză Minitab, bazat pe tehnici matematice și statistice care permit modelarea funcțiilor de răspuns în funcție de factorii de influență [21]. Procesul de brazare este influențat de un număr mare de parametri, care influențează calitatea îmbinării. Aceștia au fost selectați și analizați cu ajutorul soft-ului Minitab 16. Dintre parametrii considerați importanți și care vor fi analizați pe parcursul acestui experiment se enumeră: curentul de lipire (3 nivele), timpul de lipire (5 nivele) și forța de apăsare (2 nivele). În tabelul 6.1 se prezintă parametrii care vor fi investigați în timpul experimentelor.

Tabelul 6.1 Parametrii investigați în timpul experimentărilor

Parametrul	Nivel		Valoare			
Curentul de lipire [A]	3	200	300	400		
Timpul de lipire [s]	5	5	10	15	20	25
Forța de apăsare [N]	2	400		500		

Răspunsul urmărit este calitatea îmbinării brazate. Ținând cont de faptul că s-au realizat îmbinări brazate prin suprapunere, calitatea îmbinării este dată de rezistența mecanică la forfecare (R_f). În afara factorilor de control (parametrii prezentați în tabelul 6.1), fenomenele pot fi influențate și de o serie de alți factori perturbatori. Aceștia nu pot fi controlați, dar chiar și în prezența acestora se dorește ca prin setarea factorilor care pot fi astfel controlați, să se obțină un răspuns cât mai apropiat de optim [42]. Obiectivele acestui experiment sunt stabilirea ponderii de influență a factorilor de control, modul în care se schimbă răspunsul urmărit pe parcursul experimentului când fiecare dintre acești factori este schimbat, precum și optimizarea procesului.

6.1 Modelarea matematică prin experiment factorial complet general a procesului de brazare prin rezistență Cu-Cu cu aliaj amorf pe bază de Cu

S-a planificat un experiment factorial general complet cu trei factori de nivele diferite, având domeniul de reglare al factorilor prezentat în tabelul 6.1. Folosind datele de intrare stabilite, soft-ul generează automat un program experimental, prezentat în tabelul 6.2.

Experimentul va fi rulat în ordinea dată de coloana 2. Nivelul stabilit pentru fiecare factor este indicat în coloanele 5-7. În urma fiecărui experiment s-au înregistrat valorile pentru rezistența mecanică. Analizând datele introduse, s-au trasat următoarele reprezentări grafice pentru funcția de răspuns analizată: graficele reziduurilor, diagrama Pareto, graficul efectelor factorilor de influență, graficul de interacțiune între factorii de influență, graficele de contur ale funcției de răspuns, graficele suprafeței 3D ale funcției de răspuns și graficul de optimizare.

Tabelul 6.2: Matrice-program pentru experimentul factorial general complet

StdOrder	Run Order	PtType	Blocks	Curentul de lipire, I_b [A]	Timpul de lipire, t_b [s]	Forța de apăsare, F [N]	Rezistența mecanică, R_f [MPa]
20	1	1	1	300	30	500	161
11	2	1	1	300	5	400	100
19	3	1	1	300	30	400	154
22	4	1	1	400	5	500	130
9	5	1	1	200	30	400	140
18	6	1	1	300	20	500	162
27	7	1	1	400	20	400	176
1	8	1	1	200	5	400	95
17	9	1	1	300	20	400	158
13	10	1	1	300	10	400	135
5	11	1	1	200	15	400	125
30	12	1	1	400	30	500	173
8	13	1	1	200	20	500	143
12	14	1	1	300	5	500	110
3	15	1	1	200	10	400	115
24	16	1	1	400	10	500	153
4	17	1	1	200	10	500	120
25	18	1	1	400	15	400	160
23	19	1	1	400	10	400	150
6	20	1	1	200	15	500	143
10	21	1	1	200	30	500	141
29	22	1	1	400	30	400	168
26	23	1	1	400	15	500	170
28	24	1	1	400	20	500	180
7	25	1	1	200	20	400	146
15	26	1	1	300	15	400	145
16	27	1	1	300	15	500	143
21	28	1	1	400	5	400	126
2	29	1	1	200	5	500	113
14	30	1	1	300	10	500	126

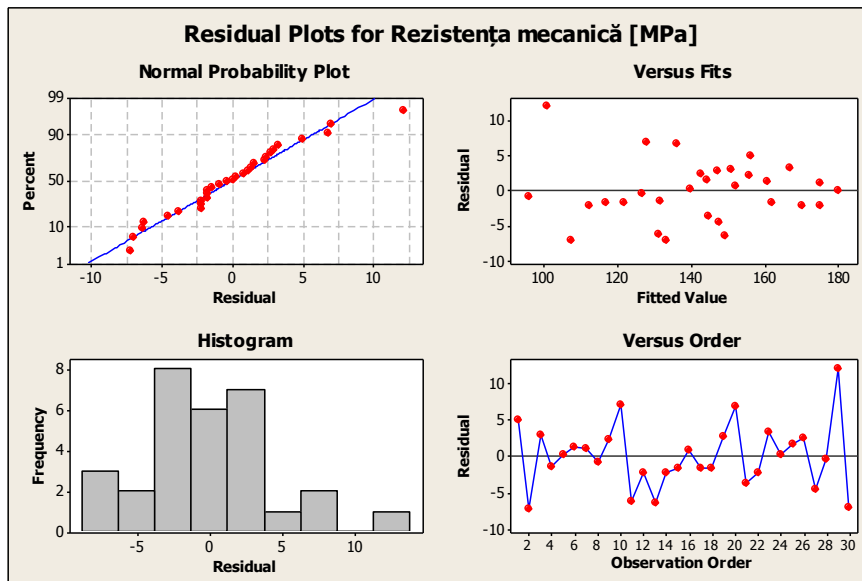


Fig. 6.3 Graficele reziduurilor

Analizând graficele din fig 6.3, se observa ca reziduurile sunt aleatoriu distribuite, urmând un șablon normal, cu media zero. Se remarcă o distribuție aleatoare deasupra și sub linia de zero, fără tendințe de nici un fel.

Diagrama Pareto este o metodă de decizie și control care permite utilizarea priorităților după diferite criterii și constă într-o reprezentare grafică a diferitelor neconformități. Analiza Pareto este o tehnică statistică de clasificare a sarcinilor reduse ca număr, dar cu efect semnificativ. Se bazează pe principiul Pareto (cunoscut și sub denumirea de regula 80/20), care stabilește că 20% din resurse generează 80% din întregul proces, sau, în termeni de ameliorare a calității, majoritatea problemelor (80%) au câteva cauze cheie (20%).

Diagrama Pareto rezolvă eficient o problemă prin identificarea și ierarhizarea principalelor cauze în ordinea importanței acestora, stabilește prioritatea multor aplicații practice, și arată în ce direcție trebuie îndreptate eforturile [68, 84, 85].

Analizând diagrama Pareto (fig. 6.4) pentru factorul de răspuns (rezistența mecanică la forfecare), se observă că principalii factori de influență sunt timpul de lipire și curentul de lipire, deoarece depășesc verticala ce indică pragul de 5%.

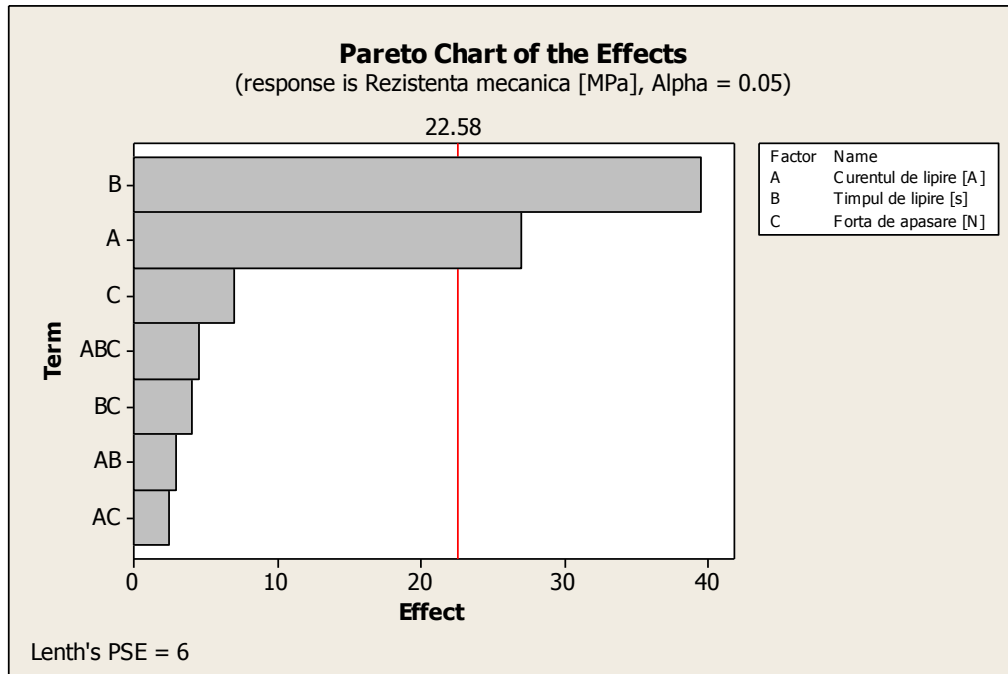


Fig. 6.4 Diagrma Pareto

Modul de influență al factorilor de influență asupra rezistenței mecanice este pus în evidență prin graficul efectelor factorilor de influență din figura 6.5. Panta mai mare a dreptelor indică o influență mai mare, iar direcția de înclinare indică faptul că are o influență negativă sau pozitivă. Din graficul efectelor factorilor de influență (fig. 6.5) se poate observa cum factorii de control influențează pozitiv rezistența mecanică la forfecare, însă după trecerea timpului de lipire de 20s are loc o ușoară scădere a valorilor rezistenței mecanice la forfecare.

Din graficul prezentat în figura 6.6, se poate evalua dacă între factorii de control există sau nu interacțiuni. Dacă dreptele din grafic sunt paralele sau aproximativ paralele atunci se poate spune că nu există interacțiuni. Dacă diferența de paralelism este mai mare atunci sunt interacțiuni între factori. Analizând graficul de interacțiune între factorii de influență pentru rezistența mecanică la forfecare, se poate observa că există interacțiuni semnificative între curentul de lipire și timpul de lipire, respective între timpul de lipire și forța de apăsare.

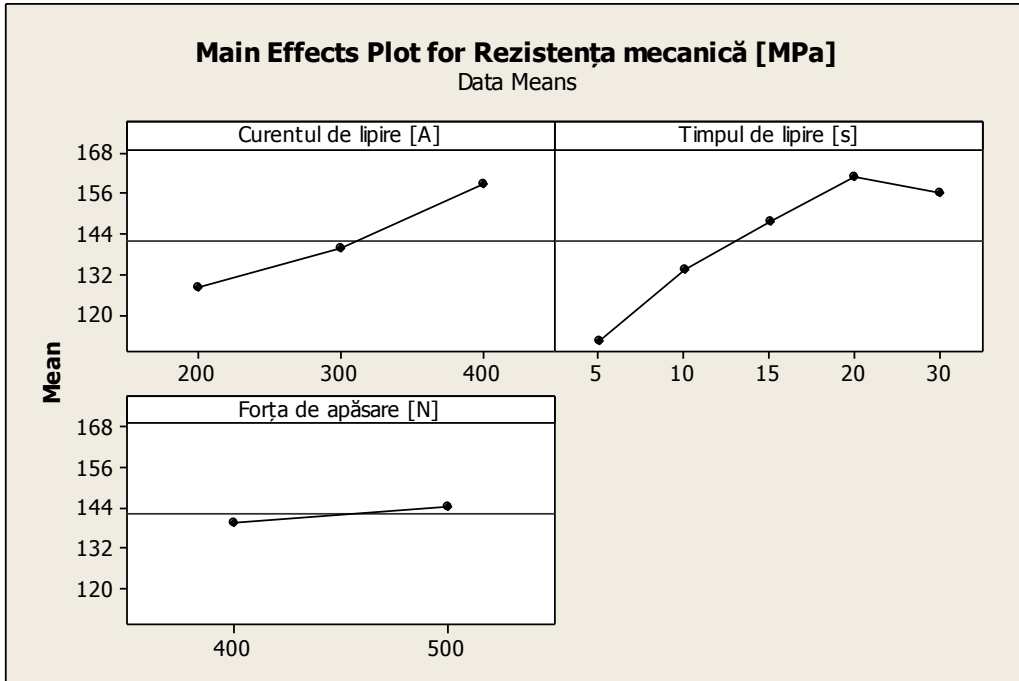


Fig. 6.5 Graficul efectelor factorilor de influență

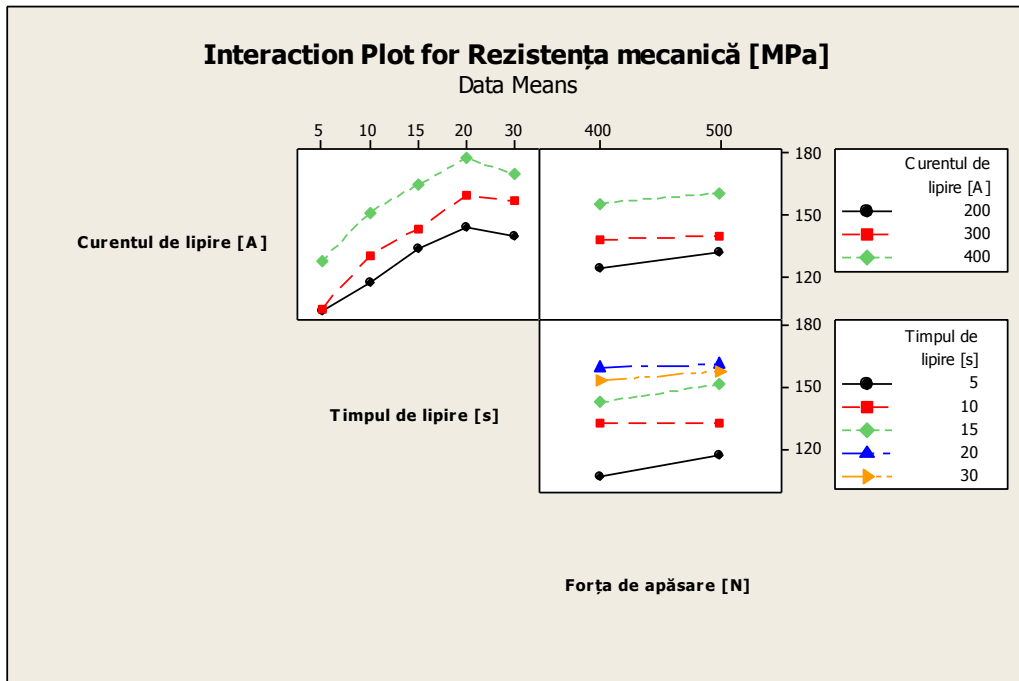


Fig. 6.6 Graficul de interacțiune între factorii de influență

Graficele de contur prezentate în figurile 6.7, 6.8 și 6.9 sunt folosite pentru determinarea valorilor de răspuns dorite în funcție de câte doi factori. Din moment ce sunt trei factori de influență, de fiecare dată unul dintre ei va fi menținut constant în timp ce se realizează corelația dintre ceilalți doi. Se pot observa combinațiile de factori care conduc la valori ale rezistenței mecanice la forfecare cuprinse între 100 și 200 MPa. Datele experimentale sunt reprezentate în format 3D (figurile 6.10, 6.11 și 6.12) și interpolate pentru a genera o suprafață continuă a funcției de răspuns.

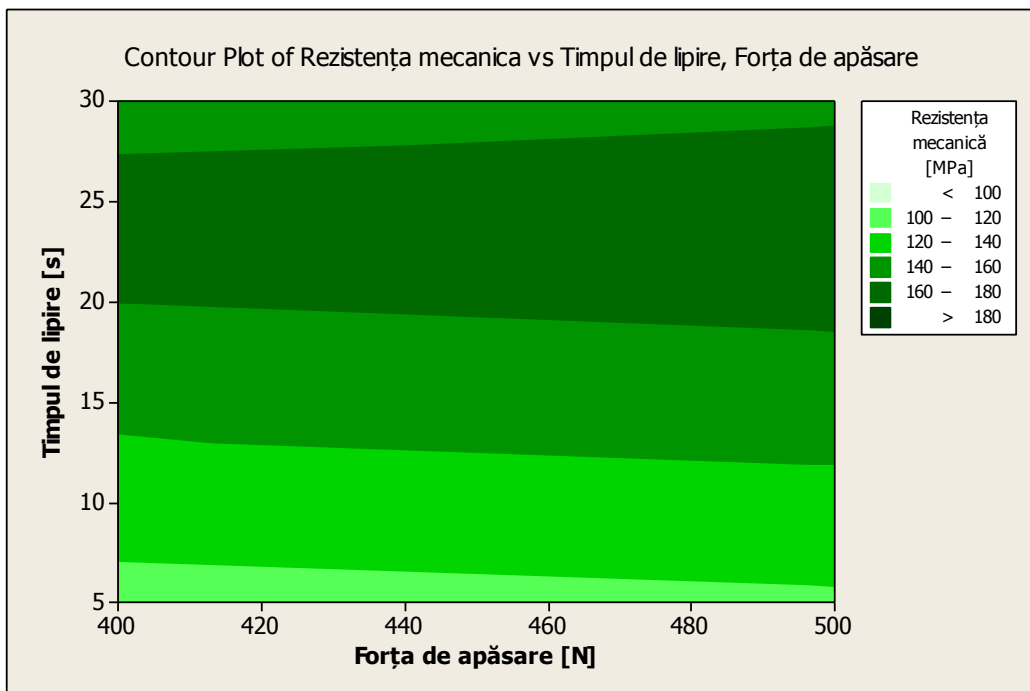


Fig. 6.7 Graficul de contur al interacțiunii principalele (dintre timpul de lipire și forța de apăsare) asupra R_f

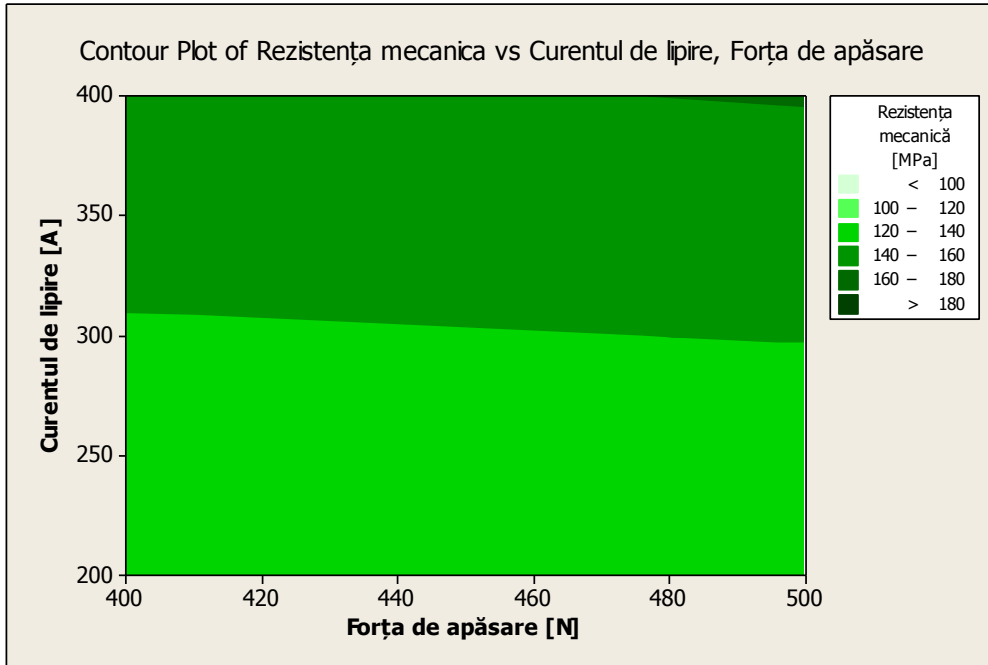


Fig. 6.8 Graficul de contur al interacțiunii principalele (dintre curentul de lipire și forța de apăsare) asupra R_f

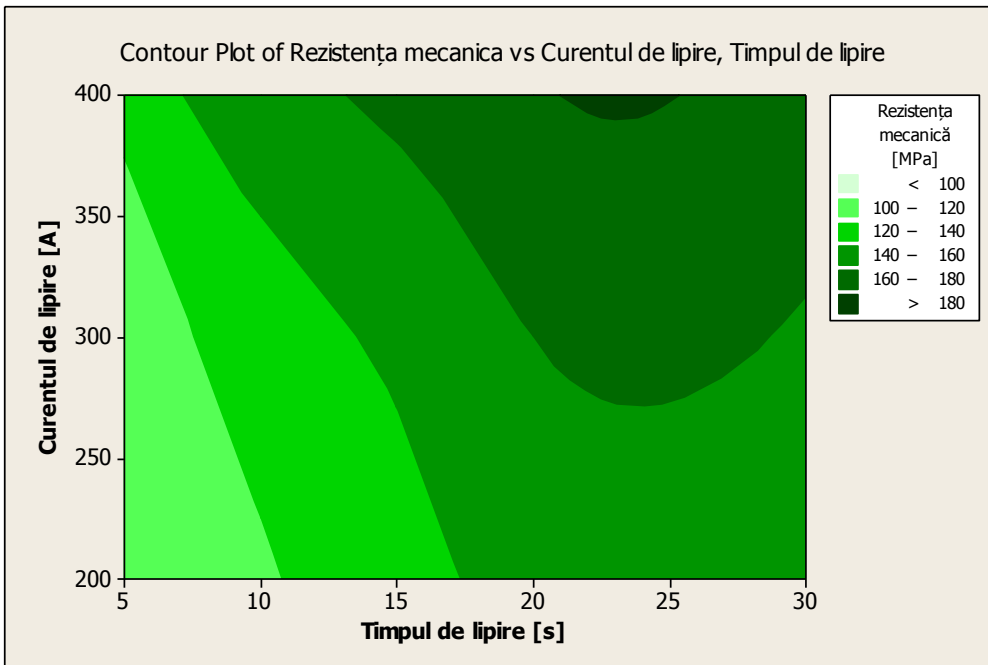


Fig. 6.9 Graficul de contur al interacțiunii principalele (dintre curentul de lipire și timpul de lipire) asupra R_f

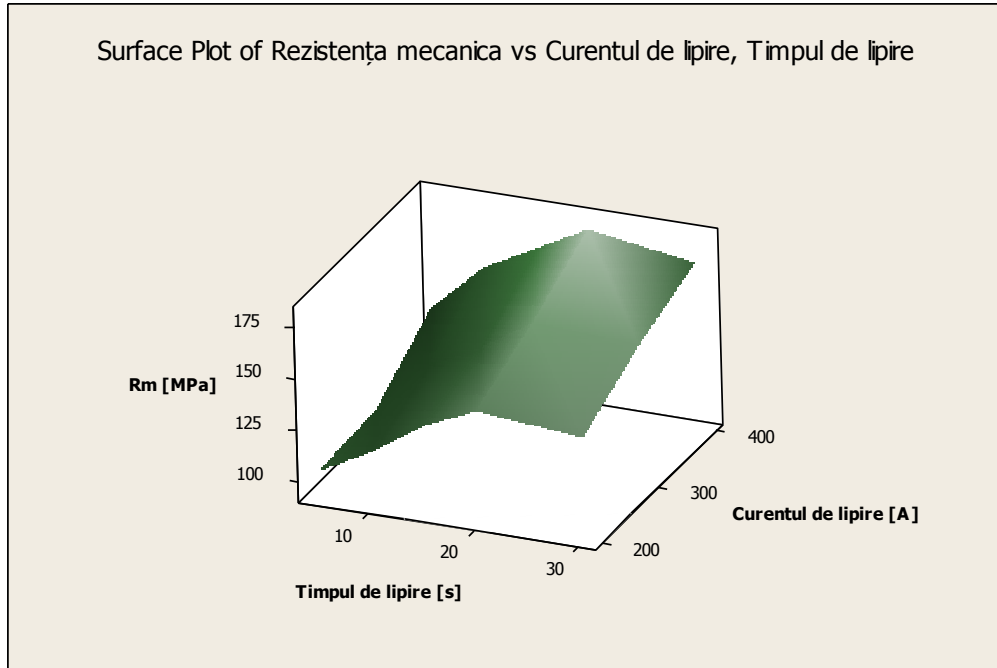


Fig. 6.10 Reprezentarea 3D a interacțiunii principale (dintre timpul de lipire și curentul de lipire) asupra R_f

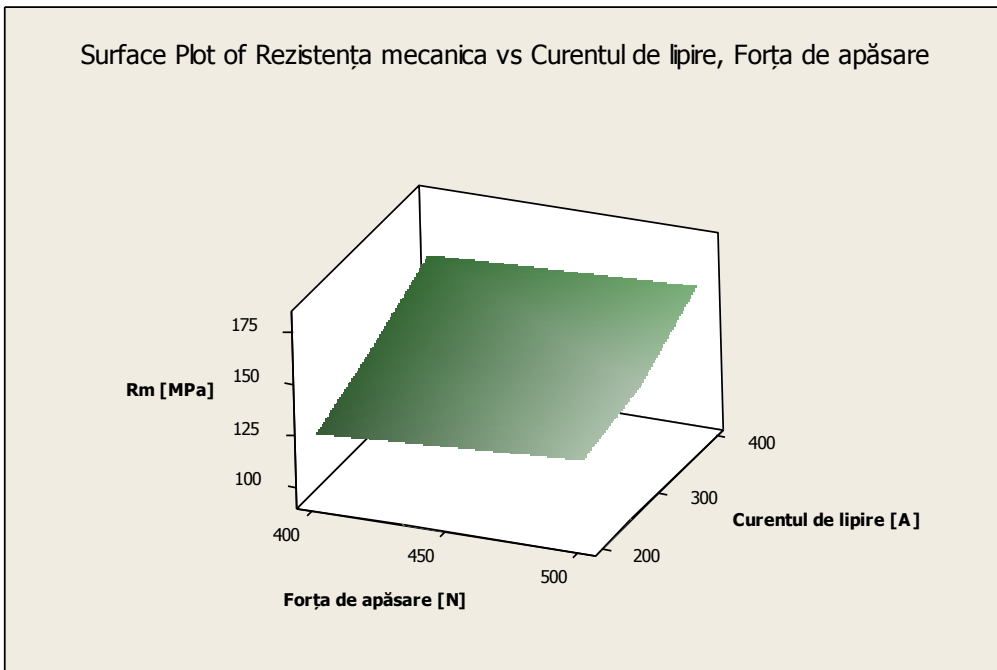


Fig. 6.11 Reprezentarea 3D a interacțiunii principale (dintre forța de apăsare și curentul de lipire) asupra R_f

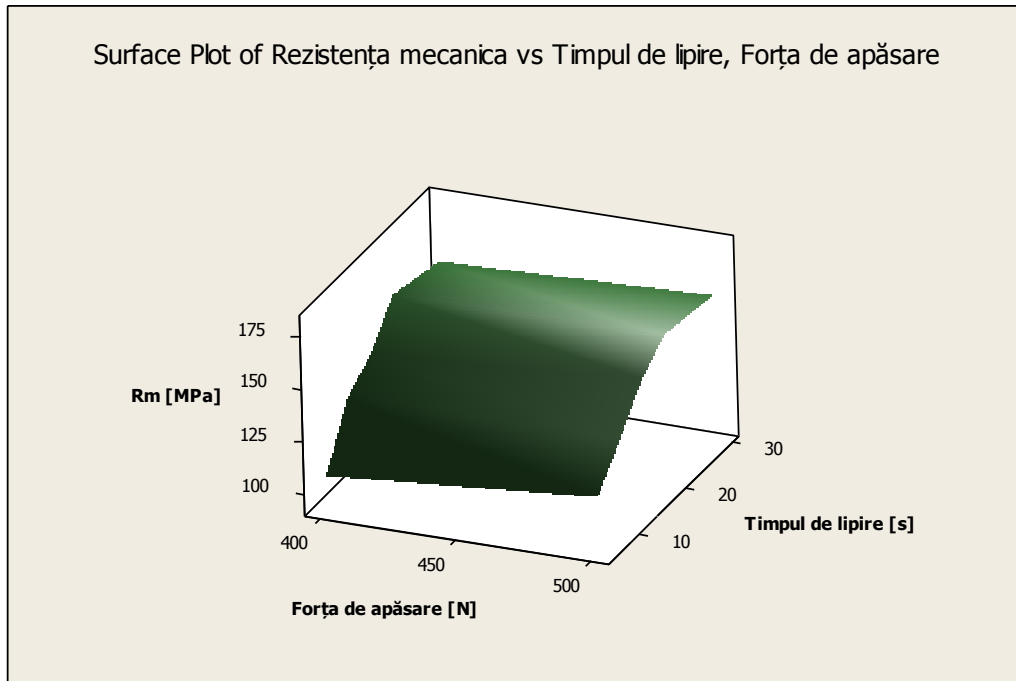


Fig. 6.12 Reprezentarea 3D a interacțiunii principalele (dintre forța de apăsare și timpul de lipire) asupra Rf

Valorile optime determinate de program sunt prezentate în graficul de optimizare, figura 6.13. Metoda de optimizare constă în obținerea unei valori individuale dorite pentru funcția de răspuns, precum și combinarea valorilor individuale dorite, în vederea obținerii unei valori compuse dorite. Astfel, se caută domeniul de valori al factorilor de influență (parametrii procesului de brazare) pentru obținerea unei rezistențe mecanice la forfecare cât mai mari. În cazul aplicației realizate, se observă că s-a găsit un optim local care asigură o rezistență mecanică la forfecare de 179 MPa. Factorii de control care asigură aceste valori sunt prezentați în partea superioară a figurii, în paranteze pătrate. Pentru funcția de răspuns s-a determinat proporția de realizare, aceasta fiind de 97%.

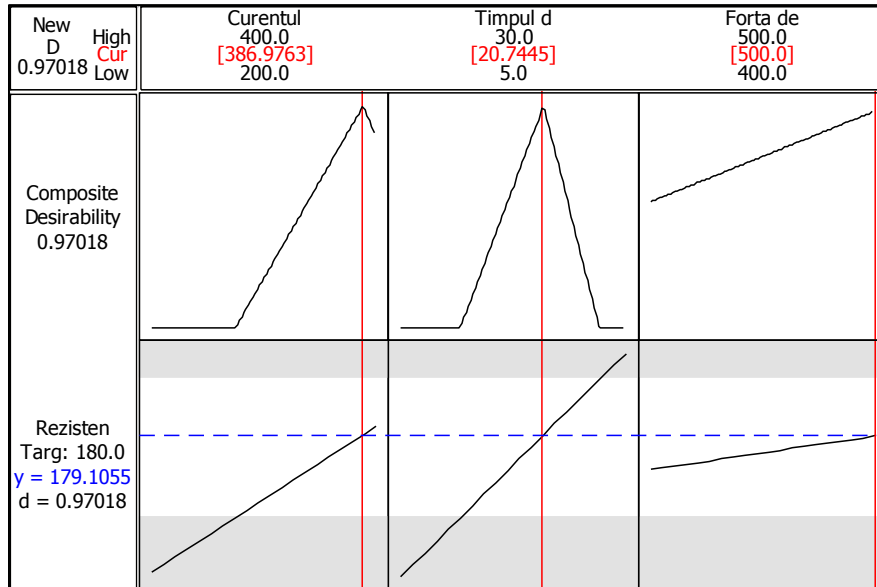


Fig. 6.13 Reprezentarea grafică a optimizării parametrilor

Pasul următor în analiza legăturii dintre variabilele statistice, atunci când acestea sunt corelate, este stabilirea concretă a naturii legăturii liniare dintre ele, descriind-o printr-o ecuație matematică. Modul de prezentare a legăturii liniare dintre variabile, se numește metoda regresiei liniare. Regresia liniară, prin metoda celor mai mici pătrate, este metoda de modelare cea mai des utilizată. Metoda regresiei liniare multiple este generalizată prin teoria "modelului liniar general", în care se permit mai multe variabile dependente simultan și, de asemenea, variabile factoriale care nu sunt independente liniar.

În urma analizei cu experiment factorial, soft-ul generează o ecuație de regresie liniară multiplă de forma:

$$R_f = 45,8 + 0,153 \cdot I_b + 1,75 \cdot t_b + 0,05 \cdot F$$

Unde: R_f – rezistența mecanică la forfecare [MPa];

I_b – curentul de lipire [A];

t_b – timpul de lipire [s];

F – forța de apăsare [N]

6.2 Modelarea matematică prin experiment factorial complet general a procesului de brazare prin rezistență Cu-Inox cu aliaj amorf pe bază de Cu

Similar, s-a realizat o modelare matematică a procesului de brazare Cu-Inox cu aliaj amorf pe bază de Cu. Analizând datele introduse în matricea program (tabelul 6.3), s-au trasat următoarele reprezentări grafice pentru funcția de răspuns analizată: graficele reziduurilor, diagrama Pareto, graficul efectelor factorilor de influență, graficul de interacțiune între factorii de influență, graficele de contur ale funcției de răspuns, graficele suprafeței 3D ale funcției de răspuns și graficul de optimizare.

Tabelul 6.3: Matrice-program pentru experimentul factorial general complet

StdOrder	RunOrder	PtType	Blocs	Curentul de lipire, I_b [A]	Timpul de lipire, t_b [s]	Forța de apăsare, F [N]	Rezistența mecanică, R_f [MPa]
20	1	1	1	300	30	500	236
11	2	1	1	300	5	400	174
19	3	1	1	300	30	400	234
22	4	1	1	400	5	500	203
9	5	1	1	200	30	400	214
18	6	1	1	300	20	500	238
27	7	1	1	400	20	400	252
1	8	1	1	200	5	400	168
17	9	1	1	300	20	400	234
13	10	1	1	300	10	400	200
5	11	1	1	200	15	400	201
30	12	1	1	400	30	500	255
8	13	1	1	200	20	500	219
12	14	1	1	300	5	500	186
3	15	1	1	200	10	400	191
24	16	1	1	400	10	500	219
4	17	1	1	200	10	500	196
25	18	1	1	400	15	400	236
23	19	1	1	400	10	400	210
6	20	1	1	200	15	500	219
10	21	1	1	200	30	500	218
29	22	1	1	400	30	400	250
26	23	1	1	400	15	500	246
28	24	1	1	400	20	500	256
7	25	1	1	200	20	400	222
15	26	1	1	300	15	400	221
16	27	1	1	300	15	500	216
21	28	1	1	400	5	400	200
2	29	1	1	200	5	500	189
14	30	1	1	300	10	500	202

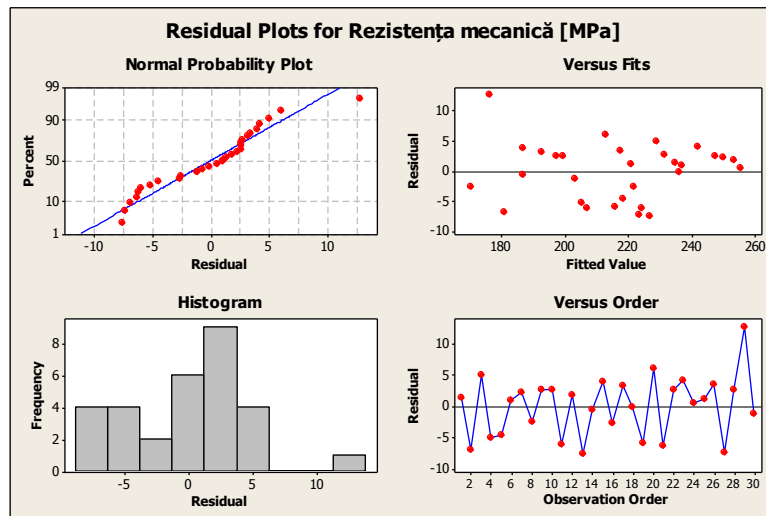


Fig. 6.14 Graficele reziduurilor

Analizând graficele din fig 6.14, se observă ca reziduurile sunt aleatoriu distribuite, urmând un șablon normal, cu media zero. Se remarcă o distribuție aleatoare deasupra și sub linia de zero, fără tendințe de nici un fel.

Din diagrama Pareto (fig. 6.15), se observă că principalul factor de influență asupra funcție de răspuns este timpul de lipire care depășește verticala ce indică pragul de 5%.

În graficul efectelor factorilor de influență (figura 6.16) se remarcă cum factorii de control influențează pozitiv și semnificativ factorul de răspuns. Analizând graficul de interacțiune între factorii de influență pentru rezistența mecanică la forfecare (figura 6.17), se observă că semnificative sunt interacțiunile dintre curentul de lipire și timpul de lipire.

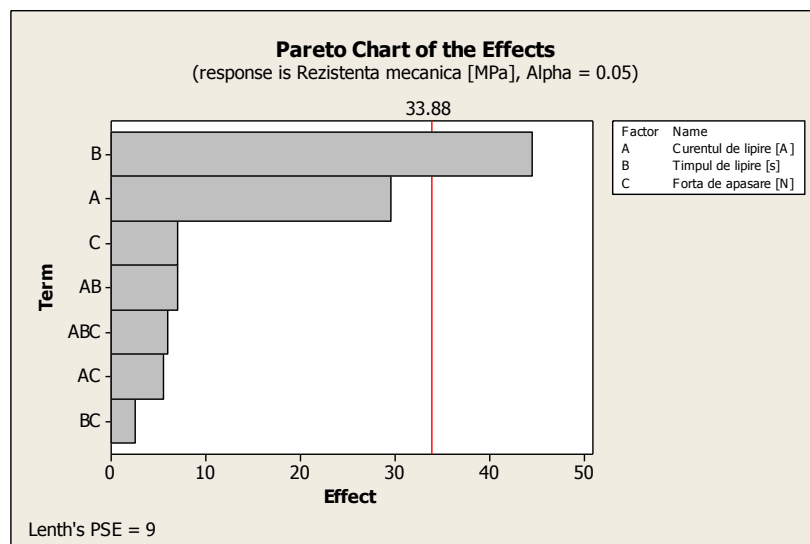


Fig. 6.15 Diagrama Pareto

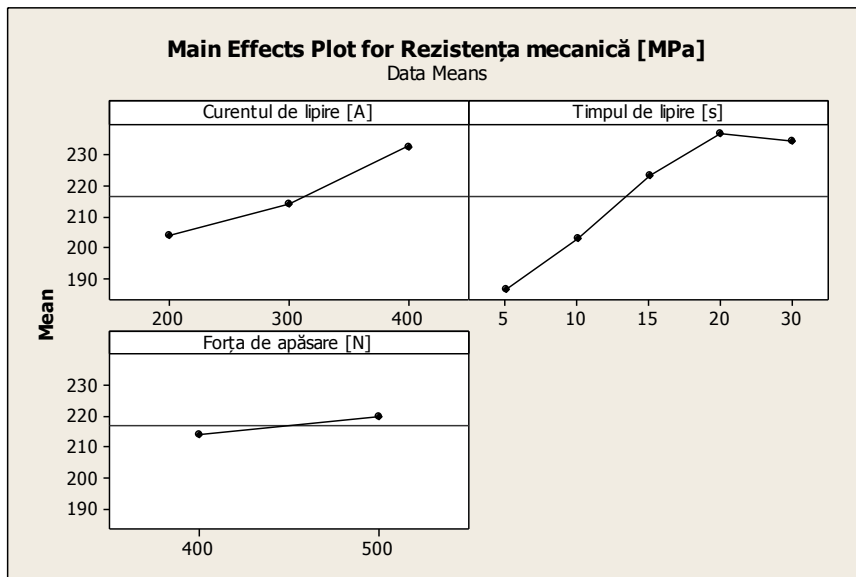


Fig. 6.16 Graficul efectelor factorilor de influență

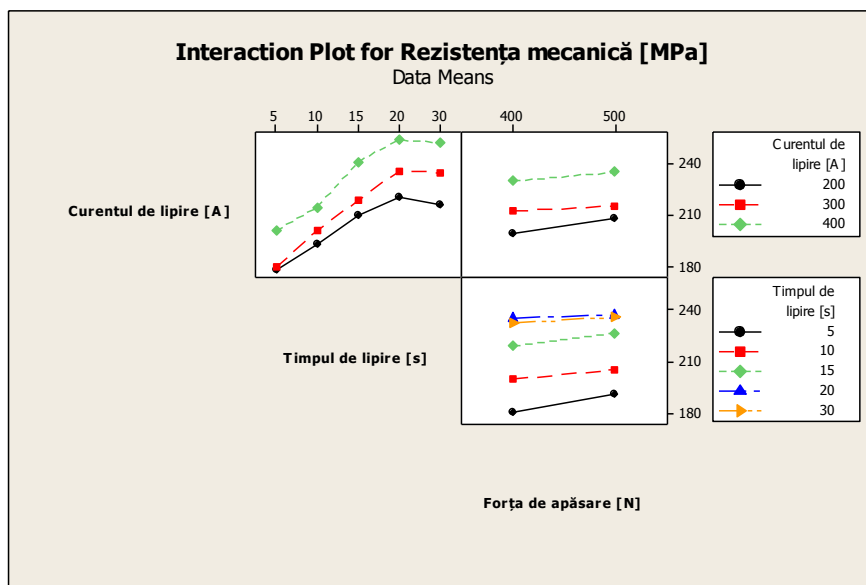


Fig. 6.17 Graficul de interacțiune între factorii de influență

Din graficele de contur prezentate în figurile 6.18, 6.19 și 6.20 se pot observa combinațiile de factori care conduc la valori ale rezistenței mecanice la forfecare cuprinse între 180 și 260 MPa. Datele experimentale sunt reprezentate și în format 3D (figurile 6.21, 6.22 și 6.23) și interpolate pentru a genera o suprafață continuă a funcției de răspuns.

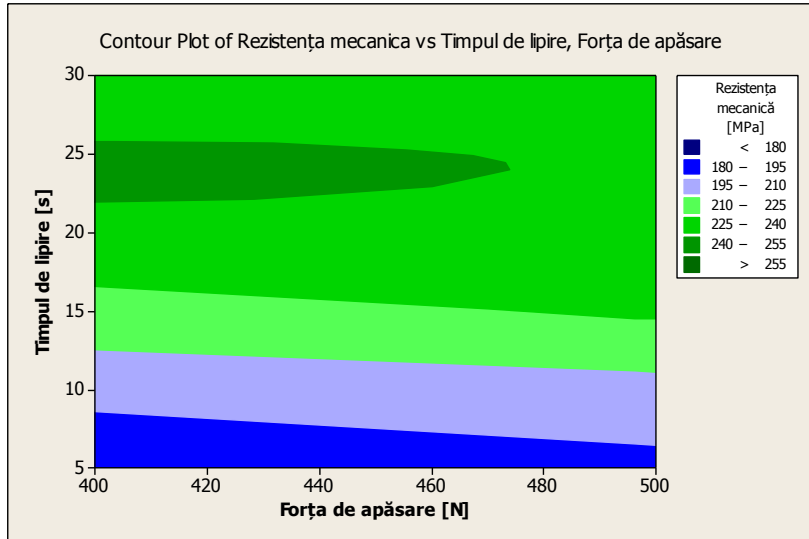


Fig. 6.18 Graficul de contur al interacțiunii principalele (dintre timpul de lipire și forța de apăsare) asupra Rf

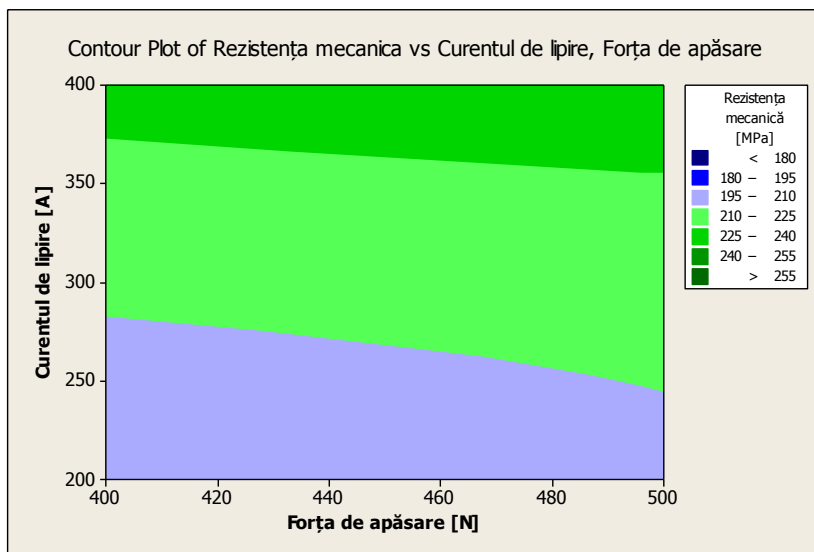


Fig. 6.19 Graficul de contur al interacțiunii principalele (dintre curentul de lipire și forța de apăsare) asupra Rf

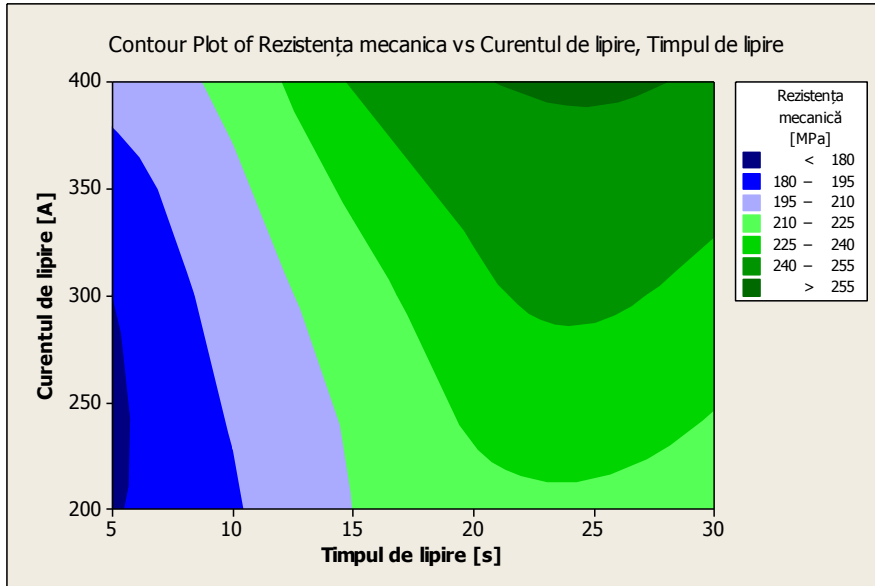


Fig. 6.20 Graficul de contur al interacțiunii principalele (dintre curentul de lipire și timpul de lipire) asupra Rf

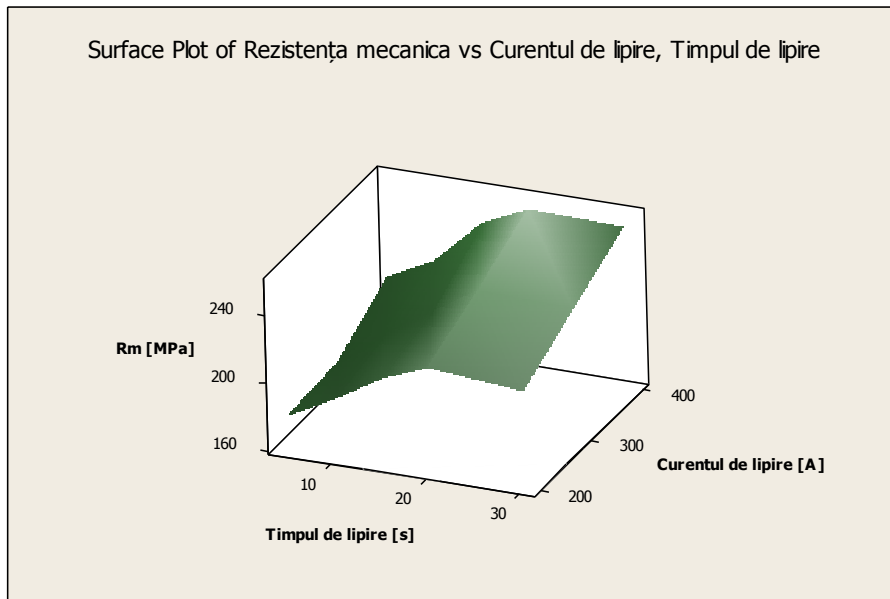


Fig. 6.21 Reprezentarea 3D a interacțiunii principalele (dintre timpul de lipire și curentul de lipire) asupra Rf

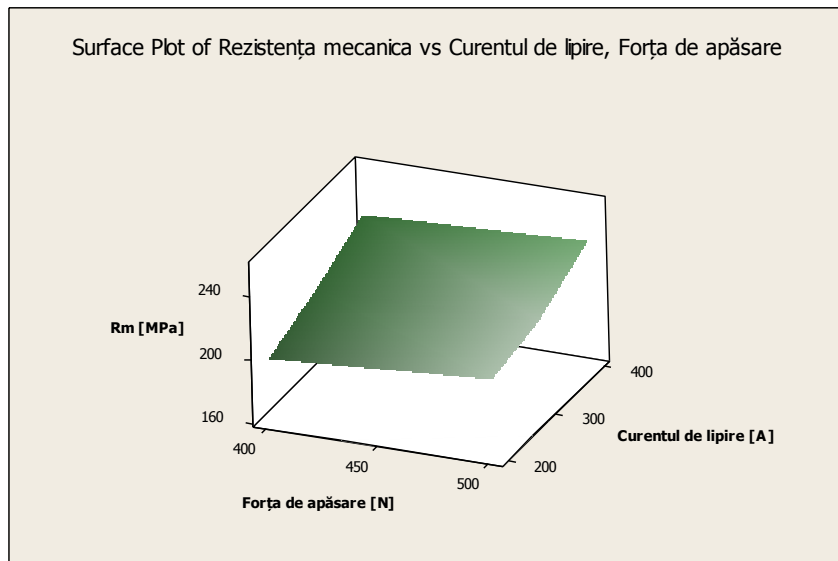


Fig. 6.22 Reprezentarea 3D a interacțiunii principalele (dintre forța de apăsare și curentul de lipire) asupra R_f

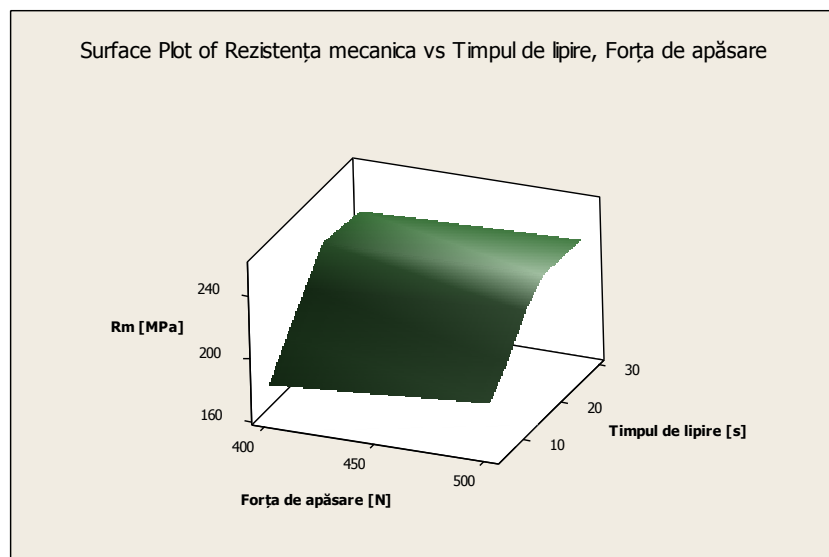


Fig. 6.23 Reprezentarea 3D a interacțiunii principalele (dintre forța de apăsare și timpul de lipire) asupra R_f

Ca și în cazul procesului de brazare Cu-Cu s-a realizat o optimizare a factorilor de influență, reprezentarea grafică a optimizării fiind redată în figura 6.24. Se observă că s-a găsit un optim local care asigură o rezistență mecanică la forfecare de 249 MPa. Factorii de influență care asigură aceste valori sunt prezentați în partea superioară a figurii, în paranteze pătrate. Pentru funcția de răspuns s-a determinat o proporție de realizare de 99%.

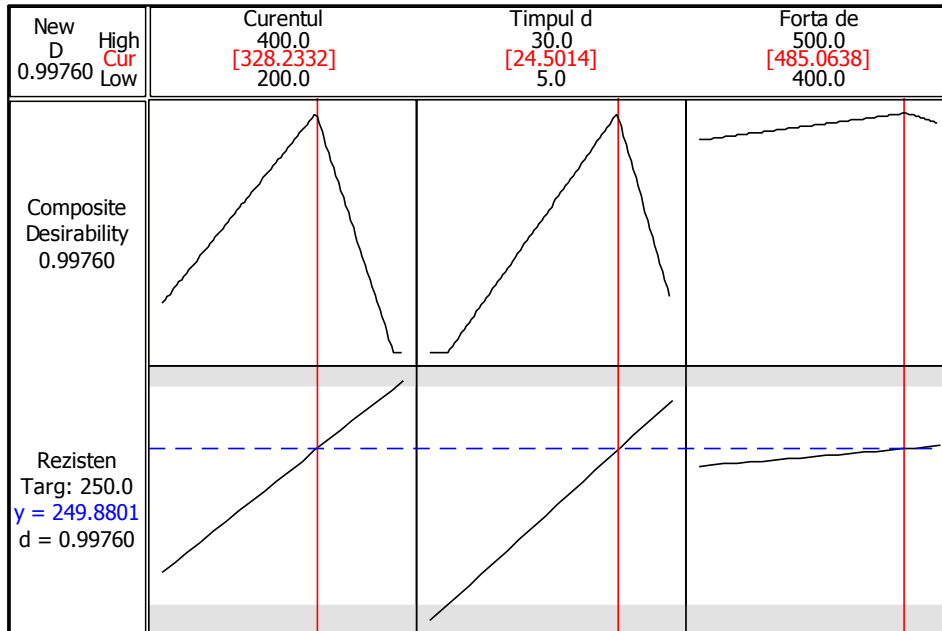


Fig. 6.24 Reprezentarea grafică a optimizării parametrilor

Ecuția de regresie liniară obținută în urma analizei experimentului este de forma:

$$R_f = 116 + 0,144 \cdot I_b + 1,99 \cdot t_b + 0,0573 \cdot F$$

Unde: R_f – rezistența mecanică la forfecare [MPa];

I_b – curentul de lipire [A];

t_b – timpul de lipire [s];

F – forța de apăsare [N]

6.3 Modelarea matematica prin experiment factorial complet general a procesului de brazare Inox-Inox cu aliaj amorf pe bază de Cu

Urmând același tipar, s-a realizat un experiment factorial complet general și pentru procesul de brazare inox-inox, folosind aceiași factori de influență și de răspuns. Matricea program este prezentată în tabelul 6.4.

Tabelul 6.4: Matrice-program pentru experimentul factorial general complet

StdOrder	Run Order	PtType	Blocks	Curentul de lipire, I_b [A]	Timpul de lipire, t_b [s]	Forța de apăsare, F [N]	Rezistența mecanică, R_f [MPa]
20	1	1	1	300	30	500	265
11	2	1	1	300	5	400	192
19	3	1	1	300	30	400	260
22	4	1	1	400	5	500	210
9	5	1	1	200	30	400	259
18	6	1	1	300	20	500	250
27	7	1	1	400	20	400	260
1	8	1	1	200	5	400	184
17	9	1	1	300	20	400	264
13	10	1	1	300	10	400	230
5	11	1	1	200	15	400	222
30	12	1	1	400	30	500	275
8	13	1	1	200	20	500	256
12	14	1	1	300	5	500	201
3	15	1	1	200	10	400	215
24	16	1	1	400	10	500	241
4	17	1	1	200	10	500	219
25	18	1	1	400	15	400	233
23	19	1	1	400	10	400	239
6	20	1	1	200	15	500	228
10	21	1	1	200	30	500	251
29	22	1	1	400	30	400	273
26	23	1	1	400	15	500	248
28	24	1	1	400	20	500	265
7	25	1	1	200	20	400	253
15	26	1	1	300	15	400	231
16	27	1	1	300	15	500	232
21	28	1	1	400	5	400	202
2	29	1	1	200	5	500	186
14	30	1	1	300	10	500	230

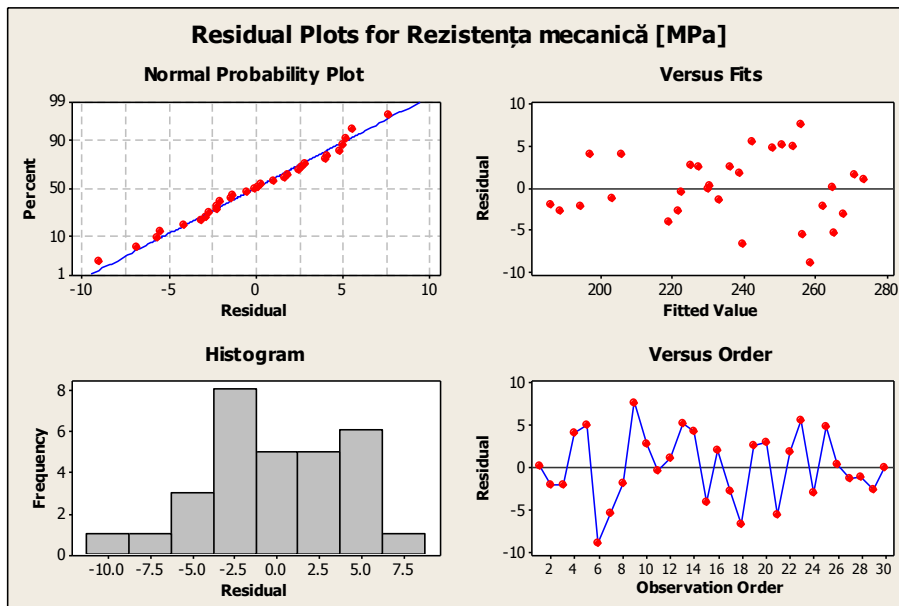


Fig. 6.25 Graficele reziduurilor

Analizând experimentul, s-au reprezentat pentru funcția de răspuns analizată: graficele reziduurilor, diagrama Pareto, graficul efectelor factorilor de influență, graficul de interacțiune între factorii de influență, graficele de contur ale funcției de răspuns, graficele suprafeței 3D ale funcției de răspuns și graficul de optimizare al parametrilor de proces. Reziduurile sunt aleatoriu distribuite, urmând un șablon normal, cu media zero. Se remarcă o distribuție aleatoare deasupra și sub linia de zero, fără tendințe de nici un fel. Ca și în cazul brazării Cu-Cu, cei mai importanți factori de influență sunt timpul de lipire și curentul de lipire, depășind pragul de 5 % din diagrama Pareto (fig. 6.26). Factorii de proces influențează pozitiv funcția de răspuns, influența cea mai mare fiind din partea timpului de lipire (fig. 6.27). Și de aceasta dată se observă că nu există interacțiuni între factorii de influență (fig. 6.28).

Graficele de contur (figurile 6.29, 6.30 și 6.31) prezintă combinațiile de factori care conduc la valori ale rezistenței mecanice la forfecare cuprinse între 200 și 280 MPa. Suprafețele 3D a funcției de răspuns sunt reprezentate în figurile 6.32, 6.33 și 6.34.

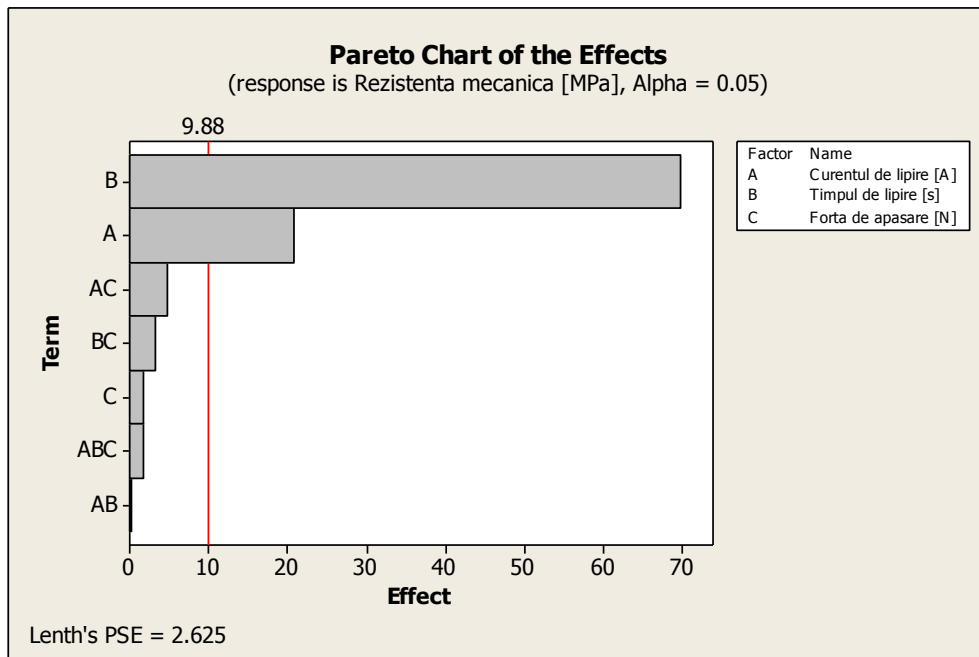


Fig. 6.26 Diagrma Pareto

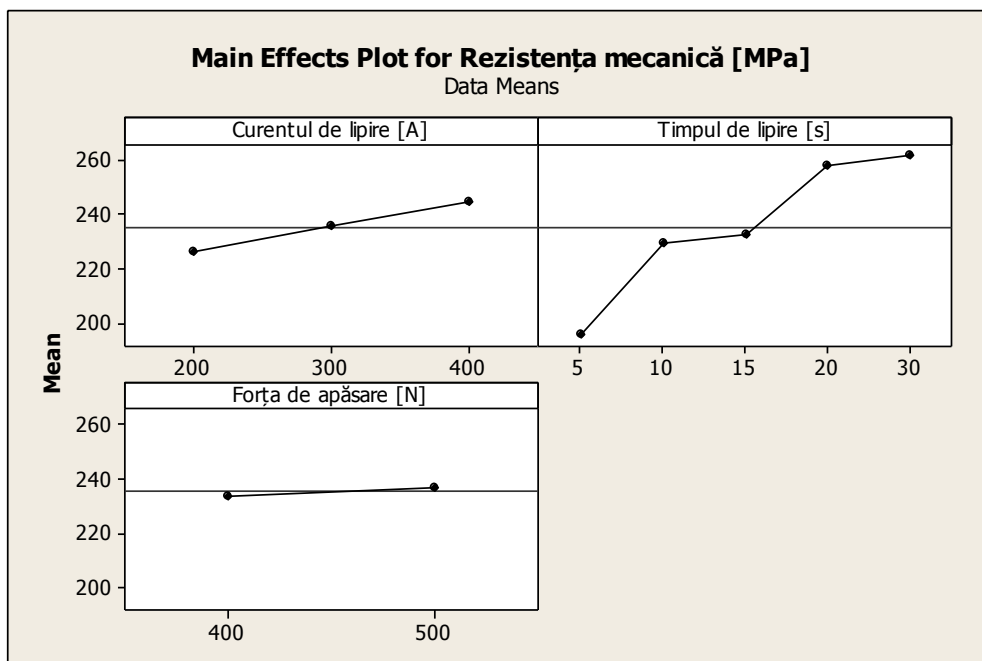


Fig. 6.27 Graficul efectelor factorilor de influență

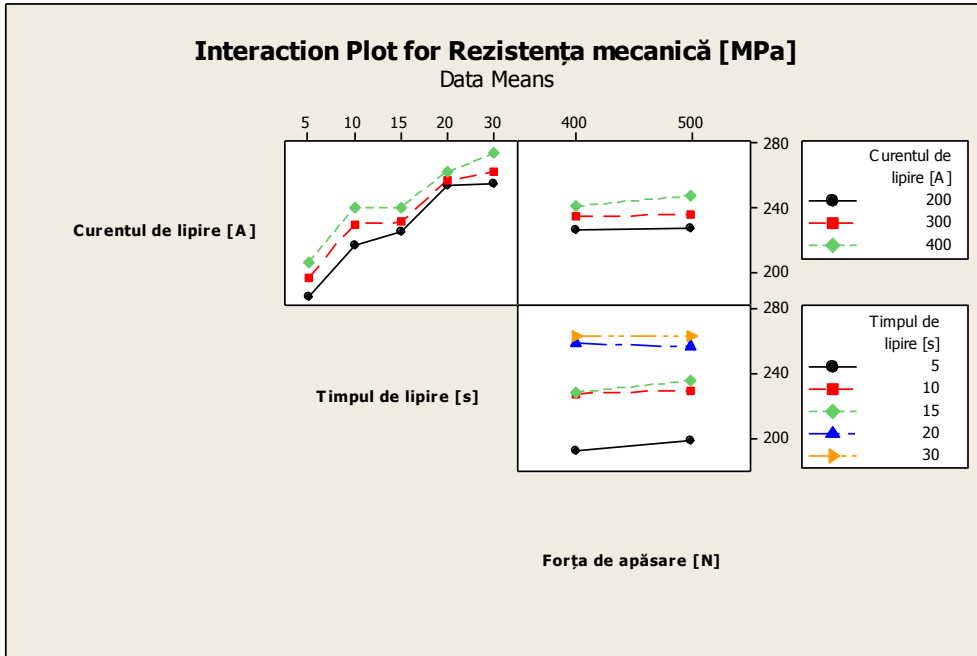


Fig. 6.28 Graficul de interacțiune între factorii de influență

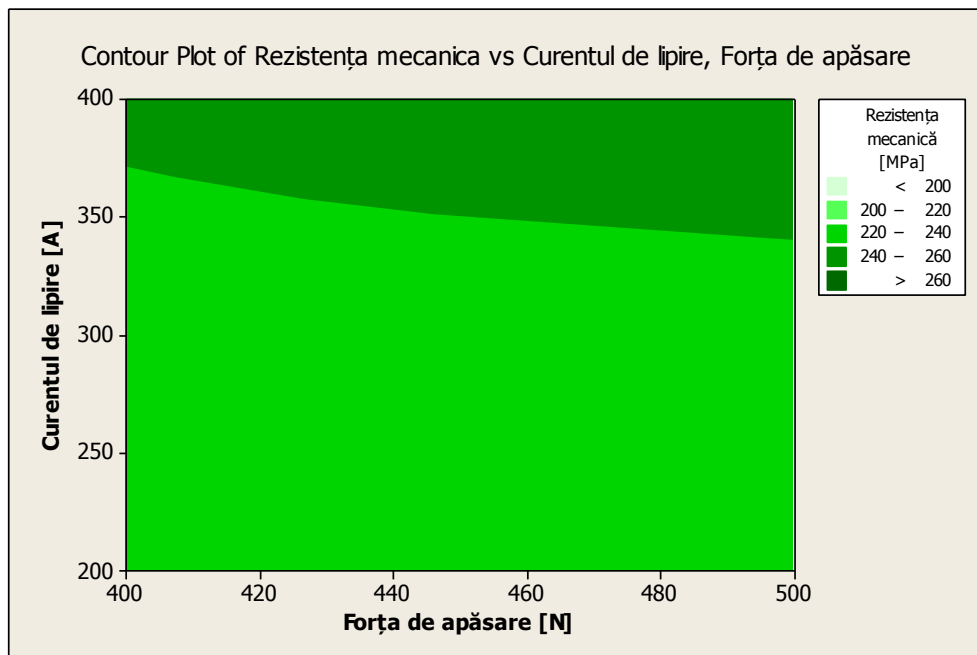


Fig. 6.29 Graficul de contur al interacțiunii principalele (dintre curentul de lipire si forța de apăsare) asupra R_f

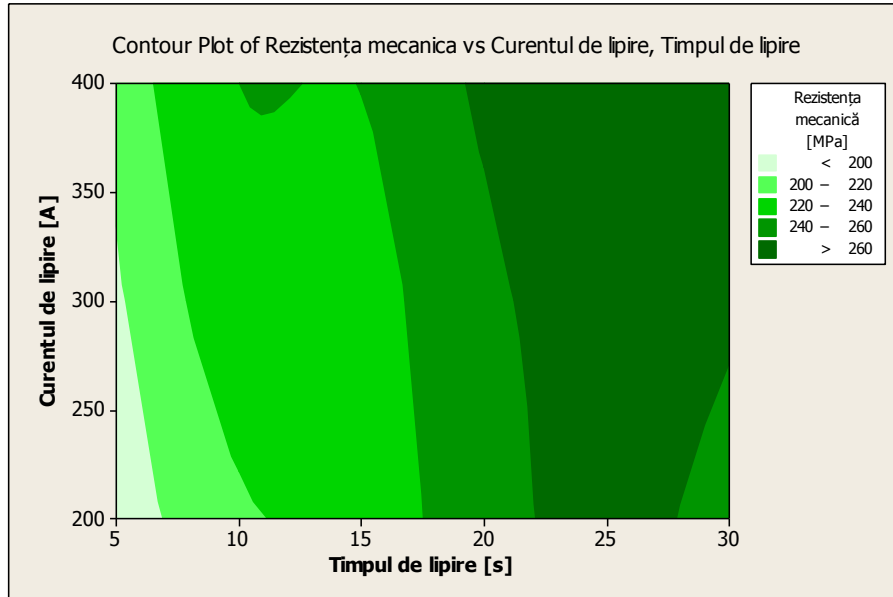


Fig. 6.30 Graficul de contur al interacțiunii principalele (dintre curentul de lipire și timpul de lipire) asupra R_f

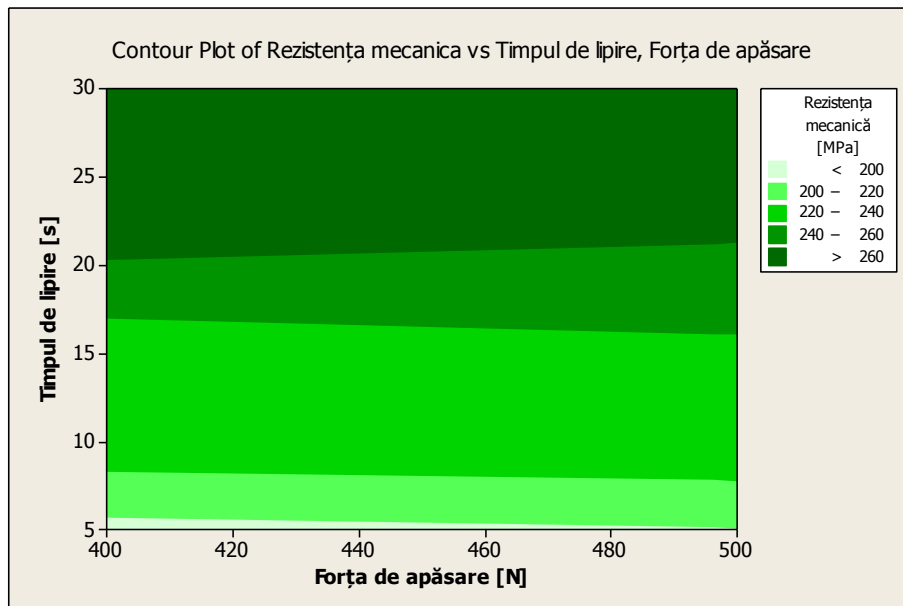


Fig. 6.31 Graficul de contur al interacțiunii principalele (dintre timpul de lipire și forța de apăsare) asupra R_f

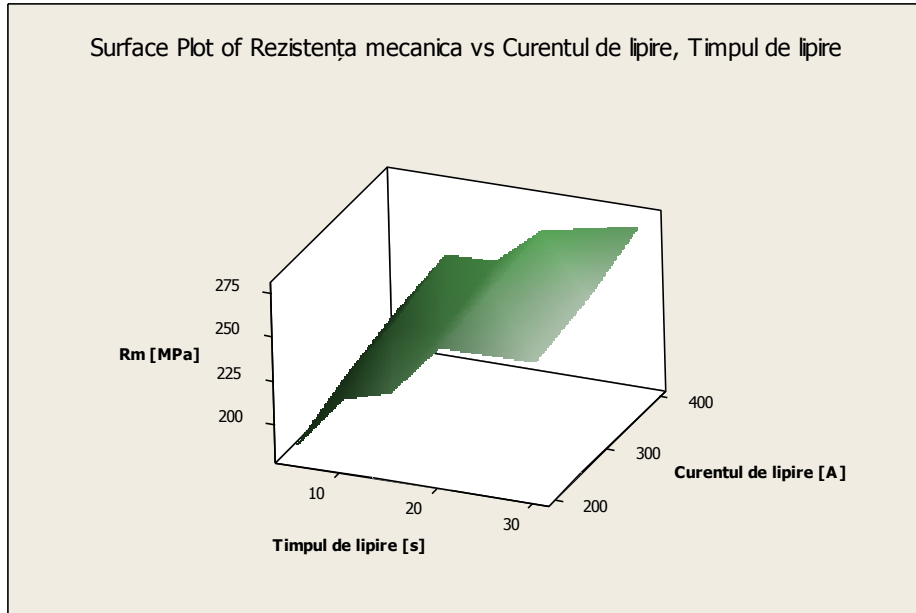


Fig. 6.32 Reprezentarea 3D a interacțiunii principalele (dintre timpul de lipire și curentul de lipire) asupra R_f

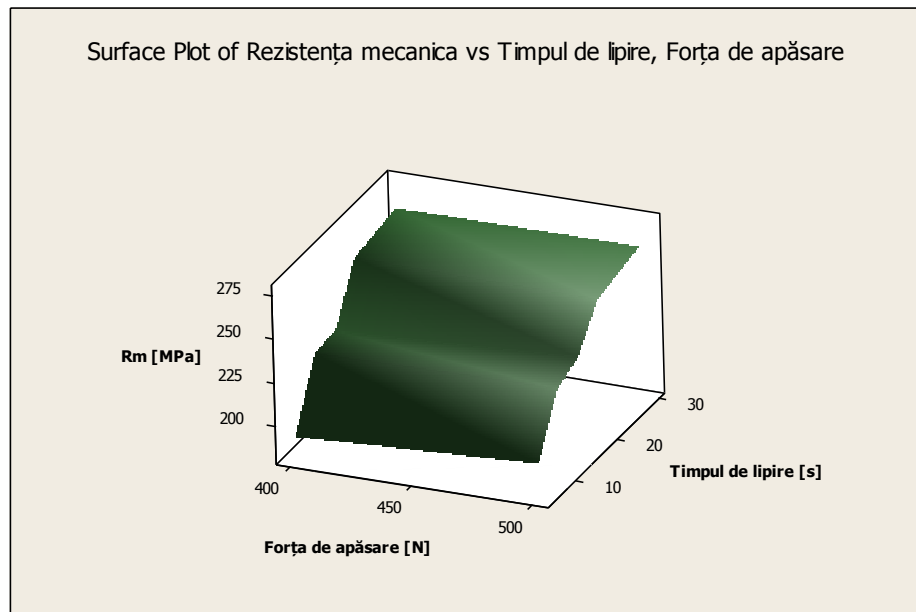


Fig. 6.33 Reprezentarea 3D a interacțiunii principalele (dintre forța de apăsare și timpul de lipire) asupra R_f

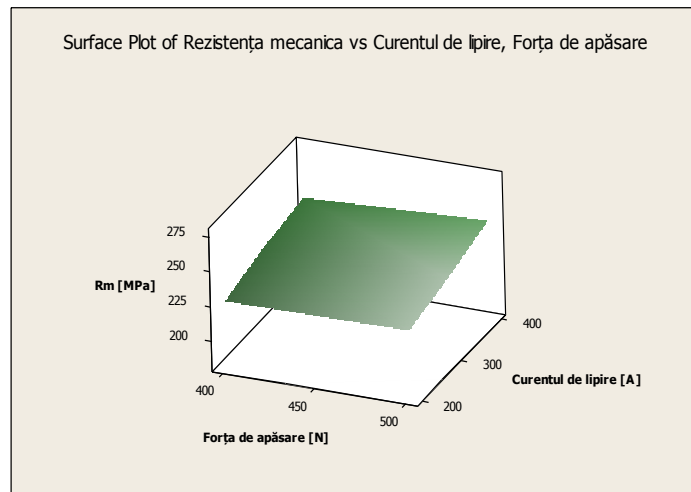


Fig. 6.34 Reprezentarea 3D a interacțiunii principalele (dintre forța de apăsare și curentul de lipire) asupra R_f

Valorile optime determinate de program sunt prezentate în graficul de optimizare, figura 6.35. S-a găsit un optim local care asigură o rezistență mecanică la forfecare de 278 MPa, factorii de influență care asigură această optim sunt prezentați, în paranteze drepte. Pentru această funcția de răspuns s-a determinat o proporție de realizare de 98%.

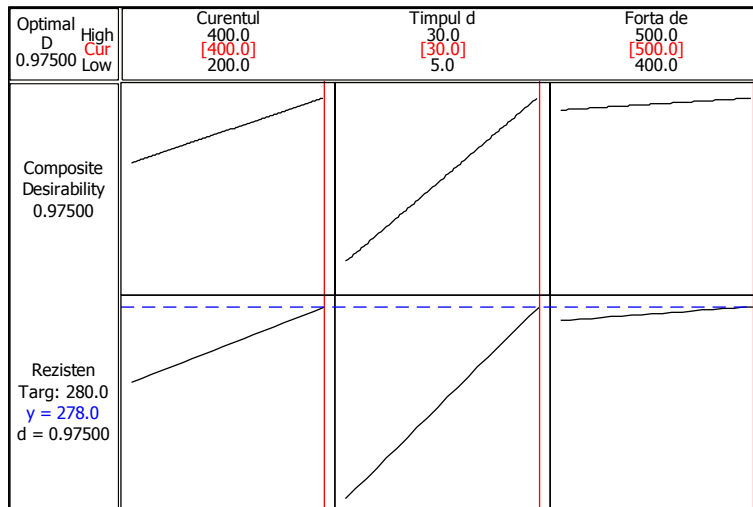


Fig. 6.35 Reprezentarea grafică a optimizării parametrilor

Ecuția de regresie liniară obținută în urma experimentului este de forma:

$$R_f = 156 + 0,0865 \cdot I_b + 2,61 \cdot t_b + 0,0267 \cdot F$$

Unde: R_f – rezistența mecanică la forfecare [MPa];

I_b – curentul de lipire [A];

t_b – timpul de lipire [s];

F – forța de apăsare [N]

7. Concluzii finale și contribuții originale

7.1 Concluzii finale

Stadiul actual al dezvoltării tehnologice impune extinderea domeniului de aplicare al brazării oțelurilor înalt aliate și a aliajelor neferoase pe bază de Cu, Al, Ni, Co, Ti, în industrii de vârf, cum ar fi: aero-spațială, energetică, chimică, etc. Având în vedere caracteristicile pe care trebuie să le îndeplinească îmbinările lipite (în special rezistență mecanică, rezistență la coroziune și ductilitate ridicate), se impune dezvoltarea unor aliaje de lipire și a unor procedee de brazare care să asigure îmbinării lipite caracteristicile de exploatare dorite.

Pentru brazarea oțelurilor inoxidabile și a aliajelor pe bază de cupru au fost dezvoltate mai multe familii de aliaje de brazare care să corespundă anumitor cerințe de exploatare.

Astfel, pentru brazarea oțelurilor inoxidabile au fost elaborate aliaje de brazare pe bază de Ni-Cr. Acestea sunt de regulă aliate cu B, Si și P pentru formarea unor eutectice care diminuează temperatura de topire relativ înaltă a matricilor de Ni respectiv Ni-Cr și astfel este îmbunătățită comportarea la curgere și capacitatea de umectare acestor aliaje.

Un mare dezavantaj al acestor aliaje pe bază de Ni este prezența în structură a fazelor dure ca boruri (Ni_3B , CrB) sau combinații chimice ale fosforului și siliciului cu Ni și Cr (Ni_3Si), care au ca efect o creștere a fragilității aliajului. Din această cauză, aceste aliaje de brazare sunt livrate sub formă de pulbere, cu sau fără element de legătură (un liant organic). Rolul elementului de legătură este de a obține aliajul de brazare sub forma unor benzi care să facă posibilă manevrarea mai ușoară, dozarea exactă și fixarea mai bună a acestuia în rostul capilar. Neomogenitatea chimică și neuniformitatea geometrică constituie însă principalele dezavantaje ale acestor benzi.

O altă grupă importantă de materiale de adaos pentru brazare o formează materialele de adaos cu metale nobile, pe bază de Au, Ag, Pd și Pt. Aceste materiale de adaos sunt ductile, datorită structurii formate dintr-o soluție solidă, formată în urma dizolvării reciproce a componentelor aliajului. Ele se caracterizează prin temperaturi de topire inferioare aliajelor pe bază de Ni și pot fi utilizate la brazarea unei game mai mare de materiale de bază deoarece pe lângă oțel înalt aliat și superaliaje se pot braza și metale și aliaje neferoase speciale și chiar ceramică metalizată. Aliajele de lipire pe bază de metale nobile prezintă dezavantajul unei rezistențe la coroziune nesatisfăcătoare în unele aplicații, precum și al unui preț de cost foarte ridicat [10,25].

Toate aliajele de brazare convenționale cu structură cristalină necesită utilizarea fluxurilor de lipire care au rolul pe de o parte de a curăți suprafețele componentelor și de a le proteja pe durata operației de lipire, iar pe de altă parte de a asigura o bună întindere și umectare aliajului de brazare. Dezavantajul utilizării fluxurilor de lipire constă în faptul că există posibilitatea corodării materialului de bază sau a îndepărtării parțiale a acestuia din rostul capilar de către aliajul de lipire, cu efect negativ asupra omogenității structurale a îmbinării brazate.

În ultimii ani s-au dezvoltat aliaje de brazare cu structură amorfă, în special pe bază de Ni sau Co, care se produc la nivel industrial sub formă de benzi ductile. Folosite ca și material de adaos la brazarea oțelurilor inoxidabile și a superaliajelor au condus la o creștere a rezistenței mecanice și în special a rezistenței la coroziune a îmbinărilor lipite [10, 19, 51, 58, 60, 66, 95]. Un dezavantaj al acestor aliaje îl reprezintă temperatura ridicată de topire, drept pentru care cercetările actuale se concentrează pe obținerea de aliaje de brazare amorfe cu temperaturi de topire mai mici, cum ar fi de exemplu cele pe bază de cupru.

Metodele și procedeele de brazare care se recomandă în cazul brazării cu aliaje de brazare amorfe sunt brazarea prin rezistență electrică și brazarea prin inducție. Aceste procedee asigură viteze de încălzire și de răcire mari, astfel încât să se creeze premisa pentru evitarea precipitării compușilor intermetalici și formării în imbinarea brazată a unei structuri monofazice de tipul unei soluții solide.

Cercetările efectuate au arătat că se pot obține benzi continue, ductile, cu structură amorfă din aliaje din familia Cu-Sn-Ni-P prin răcirea ultrarapidă a topiturii. În compoziția chimică a acestor aliaje un rol major îl are P, care pe de o parte mărește capacitatea de amorfizare a aliajului, iar pe de altă parte asigură aliajului de brazare un caracter autofluxant.

Analiza structurală prin difracție de raze X precum și analiza calorimetrică diferențială au pus în evidență existența fazei amorfe stabilă până la temperaturi de 200°C.

Cercetările cu privire la brazarea cuprului și a oțelurilor inoxidabile cu aliaje de lipire din familia Cu-Sn-Ni-P având structură amorfă au condus la concluzia că metodele de lipire electrică prin presiune în puncte și lipirea prin inducție sunt metode viabile de brazare a acestor materiale de bază. Ele asigură viteze mari de încălzire și răcire, evitându-se astfel precipitarea compușilor intermetalici. De asemenea, utilizarea brazării prin rezistență și a aliajului de brazare amorf a permis brazarea fără utilizarea fluxului de lipire chiar și cuprului cu oțel inoxidabil.

Analiza structurală prin microscopie optică și electronică a îmbinărilor brazate a pus în evidență prezența unei structuri omogene, monofazice, fără incluziuni sau compuși intermetalici. De asemenea nu s-a observat formarea oxizilor stabili pe suprafața pieselor.

Structura monofazică a îmbinărilor brazate este atestată și prin comportamentul ductil pe care acestea l-au prezentat la încercare de rupere prin forfecare. În cazul îmbinărilor cupru –cupru ruperea probelor supuse încercării la forfecare s-a produs în materialul de bază. La îmbinările oțel inoxidabil-oțel inoxidabil, respectiv cupru-oțel inoxidabil rezistența la rupere prin forfecare a prezentat valori superioare limitei de curgere a materialului de bază. Prin urmare, este necesară optimizarea parametrilor de proces (curent de lipire dar mai ales durata de lipire) care să conducă la o îmbinare lipită cu o structură monofazică, cu un comportament ductil și cu o bună rezistență la rupere prin forfecare.

Analiza structurală prin microscopie optică și electronică a îmbinărilor brazate prin inducție a pus în evidență o structură omogenă cu un aspect dendritic. Și în acest caz s-a constatat o bună întindere și umectare precum și caracterul autofluxant al aliajului de brazare cu structură amorfă, brazarea realizându-se fără flux de lipire.

La durate de brazare mai mari s-a constatat apariția unui ameste mecanic eutectic în structura îmbinării brazate, confirmând faptul că în cazul brazării prin inducție viteza de răcire a aliajului de lipire topit este mai redusă decât în cazul brazării prin rezistență în puncte.

Modelării matematice prin experiment factorial complet general a procesului de brazare prin rezistență a arătat că în toate situațiile (brazare cupru – cupru, inox-inox, cupru-inox) principalii factori de influență a rezistenței mecanice la forfecare sunt timpul de lipire și curentul de lipire. În toate situațiile s-au generat relații de regresie liniară multiplă ce stabilesc legătura dintre rezistența mecanică la forfecare și principalii parametri tehnologici ai procesului de brazare care permit optimizarea acestora.

7.2. Contribuții originale

Prin studiile și cercetările efectuate în cadrul acestei teze, s-au adus următoarele contribuții originale:

- ❖ S-a realizat o prezentare sintetică a stadiului actual privind brazarea a oțelurilor inoxidabile și aliajelor de cupru, identificându-se problemele ce apar la brazarea cu aliaje de lipire convenționale.

- ❖ S-au efectuat cercetări teoretice și practice privind posibilitatea elaborării unui aliaj de lipire pe bază de Cu, cu structură amorfă, prin răcirea ultrarapidă a topiturii.

- ❖ S-a elaborat un aliaj de lipire din familia Cu-Sn-Ni-P sub formă de bandă continuă, ductilă și uniformă din punct de vedere geometric, prin metoda melt-spinning, având o structură amorfă și caracter autofluxant.

- ❖ S-a realizat caracterizarea structurală a aliajului de lipire elaborat, punându-se în evidență structura amorfă a acestuia prin metode moderne de investigație: microscopie electronică (SEM, EDAX), difracție de raze X (RDX), analiză calorimetrică diferențială (DSC).

- ❖ S-au efectuat cercetări privind brazare cuprului și a oțelurilor inoxidabile cu aliajul de lipire elaborat, fără utilizarea fluxului de lipire. S-au abordat două procedee: brazarea electrică prin presiune în puncte și brazarea prin inducție.

- ❖ S-au caracterizat din punct de vedere structural și al proprietăților mecanice îmbinările brazate, punându-se în evidență structura monofazică a îmbinării brazate și compotamentul ei ductil. De asemenea, s-a remarcat faptul că îmbinările brazate prezintă o bună rezistență la rupere prin forfecare, superioară limitei de curgere a materialului de bază.

- ❖ S-a realizat modelarea matematică a procesului de brazare prin rezistență prin proiectarea unui experiment factorial complet general. S-au stabilit principalii parametri tehnologici care influențează rezistența mecanică la forfecare și s-au generat funcții de regresie liniară multiplă ce stabilesc legătura dintre rezistența mecanică la forfecare și aceștia. Astfel se poate realiza optimizarea parametrilor tehnologici pentru maximizarea rezistenței mecanice la forfecare.

7.3. Probleme de viitor

Rezultatele obținute deschid calea unor noi direcții privind dezvoltarea aliajelor cu structură amorfă pentru brazarea a oțelurilor înalt aliate și a aliajelor neferoase. Astfel, în viitor se pot aborda următoarele cercetări:

- realizarea mai multor tipodimensiuni de îmbinări brazate din materiale de bază diferite;
- comportarea îmbinărilor brazate în medii corozive;
- lărgirea gamei compoziționale și de dimensiuni a benzilor din aliaj cu structură amorfă pentru brazarea oțelurilor înalt aliate și a aliajelor neferoase;
- dezvoltarea unor tehnologii alternative de brazare cu aliaje cu structură amorfă.

Bibliografie

1. Borok, B.,A., Shchegoleva, R.,P., Golubeva, L.,S., Ostrovskaya, É.,N., Chikunov, M.,I., and Kunis, M.,I, . *Manufacture of powders of nickel-base brazing alloys*, Poroshkovaya Metallurgiya, No. 5 (113), pp. 82–88, May, 1972.
2. Botstein, O., Schwarzman, A., Rabinkin, A., *Induction brazing of Ti-6AL-4V alloy with amorphous 25Ti-25Zr-50Cu brazing filler metal*, Materials Science and Engineering, A206 (1995), p.14-23.
3. Bragaru, A., Picoș, C., Ivan, N., Optimizarea proceselor și echipamentelor tehnologice, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1996.
4. C. Codrean, V.A. Șerban, C. Stoian, *New technology for stainless steels brazing with copper based amorphous alloys*, BID-ISIM, SUDAREA ȘI ÎNCECAREA MATERIALELOR, Nr. 4/2010, pp. 49-52
5. Ceccone G., s.a., *The Brazing of Si_3N_4 with Ni-Cr-Si Alloys*, Journal of European Ceramic Society, 1995, p.563-572
6. Chen, H.S., leamy, H.J., Miller, C.E., *Preparation of Glassy Metals*, An.Rev.Mater. Sci., 1980, 363-391
7. Cicală, E., Metode de prelucrare statistică a datelor experimentale, Editura Politehnica, Timișoara, 1999.
8. Codrean C, Stoian C, Șerban V.A, Opreș C, *Stainless Steels Brazing with Nickel and Copper Based Amorphous Alloys*, METALURGIA INTERNATIONAL, Volume:18/2013, Special Issue: 5, Pages: 69-72
9. Codrean C, Stoian C, Uțu D., *Sheet brazing from similar and dissimilar materials with amorphous copper based brazing alloy*, SCIENTIFIC BULLETIN OF THE "POLITEHNICA" UNIVERSITY OF TIMIȘOARA, TRANSACTIONS ON MECHANICS Vol. 57 (71), Iss. 2, 2012, ISSN 1224 – 6077, pp. 11-16
10. Codrean C., *Cercetări privind procesul de lipire tare cu aliaje amorfe a oțelurilor inoxidabile și refractare*, Teză de doctorat, 2005
11. Codrean C., Mitelea I., Șerban V.A., *Selection Algorithms for Amorphous Alloys used in Brazing Austenitic Steels*, Scientific Bulletin of the „Politehnica” University of Timisoara, Tom 52(66),-Fasc.2, 2007, p. 13-18.
12. Codrean C., Mitelea I., Șerban V.A., *Structural Morphology of Transformation by Vacuum Oven Brazed Joints with Amorphous Alloys* , Advanced Materials Research, 23, 2007, p. 221-224.
13. Codrean C., Șerban V.A., Burcă M., Radu B., *Experiments Regarding Resistance Spot Brazing of Austenitic Stainless Steel With Amorphous Brazing Alloys*, Welding in the World, 51, 2007, p. 339-346.
14. Codrean C., *Tendencies in the Development of Brazing Alloys at High Temperatures*, Buletinul Științific al Universității „Politehnica” din Timișoara, Tom 46 (60), 2001
15. Codrean, C., Șerban, V.A., *Efectul borului asupra structurii aliajelor de brazare pe bază de Ni-Cr, obținute prin răcire ultrarapidă*, Conferința internațională „Metode de examinare a componentelor structurilor sudate”, ISIM, Timișoara, 19-29 noiembrie, Ed. Sudura, (2003) ISBN 973-8359-20-1.

16. Codrean, C., Șerban, V.A., *Elaborarea aliajelor din familia Ni-Cr-Fe-Si-B sub formă de benzi prin răcirea ultrarapidă a topiturii*, Zilele Academice Timișene, Simpozion „Materiale avansate, procesare și caracterizare”, 87-90, (2003) ISBN: 973-687-127-4.
17. Codrean, C., Șerban, V.A., Fîru, C., , *Ni-Cr Brazing Alloys With Metastable Structure*, The VIth International Symposium „Young People and Multidisciplinary Research”, 23-24 September, Timișoara, (2004) ISBN: 973-7911-77-6.
18. Codrean, C., Șerban, V.A., *Metale amorfe și nanocristaline*, Ed. Politehnica, Timișoara, 2009
19. Datta, A., Bose, D., DeCristofaro, N., Rabinkin, A., *High Strength Nickel-Palladium-Chromium Brazing Alloys*, Welding Journal, 64, 23-s (1985).
20. Datta, A., Bose, D., Rabinkin, A., *Rapidly Solidified Copper-Phosphorus Base Brazing Foils*, Welding Journal, 63, October, 14 (1984).
21. Dean A., Voss D., *Design and Analysis of Experiments*, New York, Editura Springer, 1999.
22. DeCristofaro N J, Henschel C, *Amorphous copper nickel phosphorus alloy - useful as homogeneous ductile foil for brazing copper*, Patent Number: EP10866-A
23. DeCristofaro, N., *Amorphous Metals in Electric Powder Distribution Application*, Materials Research Society, MRS Bulletin, V.23, Nr.5 (1998), p.50-56.
24. DeCristofaro, N., Bose, D., *Brazing and Soldering With Rapidly Solidified Filler Metals*, Allied Metals Products Parsippany, NJ 07043, USA.
25. Dorn, L., s.a., *Hartlötten. Grundlagen und Anwendungen*, Expert Verlag, 1985.
26. Dumitrescu T., *Optimizarea proceselor tehnologice de lipire tare a oțelurilor carbon pentru obținerea îmbinărilor cu rezistență ridicată*, Teză de Doctorat, IPTVT, 1985.
27. Eagar, T.W., Zhuang, W.D., *High Temperature Brazing by Liquid Infiltration*, Welding Journal, vol. 78, nr. 12, 1997, p. 520-535.
28. Gâdea S., s.a., *Aliaje amorfe*, Editura Științifică și Enciclopedică, București, 1988
29. Heap, H.R., Riley C.C., *Development of Brazed Austenitic-Ferritic Steel Steam Pipe Joints for Turbines*, Welding Journal Supplement 50, 1971, p. 253.
30. Hicks, C. K., *Fundamental Concepts in the Design of Experiments*, Holt, Rinehart and Winston, Inc. New York, 1982.
31. Huschke, E.G., Hoppin, G.S., *High Temperature Vacuum Brazing of Jet-Engine Materials*, Welding Journal Supplement 37, 1958, p. 233.
32. Iliina I.N., Pashkov I.N., and Rodin I.B. *Interaction of Some Non-Silver Brazing Metals with Base Materials (Microstructure and Properties)*. Proc. of the 6th Int. Conf. "Lot'01", 2001, Aachen, pp. 326-328
33. Kalin, B.A., Fedotov, V.T., Grigoriev, A.V., Sevriukov, O.N., Pliushev, A.N., Skuratov, L.A., Polski, V.I., Yakusin, V.L., Virgiliev, Y.S., Vasiliev, V.L., Tserevitinov, S.S., *Application of Amorphous Filler Metals in Production of Fusion Reactor High Heat Flux Component*, Fusion Engineering and Design, 28 (1995), p. 119-124.
34. Kalin, B.A., Fedotov, V.T., Sevryukov, O.N., Grigoryev, A.E., Pliushev, A.N., Ivanov, V.M., Strebkov, Y.S., *Application of Amorphous and Microcrystalline Filler Metals for Brazing of Beryllium With Metals*, Journal of Nuclear

- Materials 233-237 (1996)
35. Khorunov, V.F., *Brazing: achievements and prospects*, "AVT. SV.", nr. 11, 1998, p. 51-53.
 36. Kohlmeler, A., *Lipirea tare cu material de adaos a aluminiului*, "Pract. Sud", an II, nr. 1, 1998, p.12-15.
 37. Kurt, E., *Rapidly Solidified Active Filler Alloys for Direct Brazing of Non-metallized Ceramics*, Vaccumschmelze GmbH Research and Development Division
 38. Lakedemonski, A.V., Hreapin, V.E., *Lipirea și aliaje pentru lipit*, E.T., București, 1962
 39. Lin C C., Chen R B., Shiu R K., *A wettability study of Cu/Sn/Ti active braze alloys on alumina*, JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE 36 (2000) 2145 – 2150
 40. Linderoth S., *Synthesis and Properties of Amorphous and Nanocrystalline Alloys*, Proceedings of 22nd Riso International Symposium on materials Science, Denmark, 2001.
 41. Mihail, R., *Introducere în strategia experimentării cu aplicații în tehnologia chimică*, Editura Științifică și Enciclopedică, București, 1976.
 42. Militaru, C., Dumitrescu, A., Petrescu, E., *Statistică Tehnică*. Editura Printech, București 2000.
 43. Million, A., Million, C., *Lipirea și aliaje de lipit*, vol. I, II, Editura tehnică, București, 1975.
 44. Mitelea, I., Budău, V., *Studiul materialelor – îndreptar tehnic*, Ed. Facla, Timișoara, 1987.
 45. Mitelea, I., Lugscheider, E., Tillmann, W., *Știința materialelor în construcția de mașini*, Editura Sudura, Timișoara, 1999.
 46. Mitelea, I., Radu, B., *Materialografia îmbinărilor sudate*, Ed. de Vest, Timișoara, 2006.
 47. Nishikawa Hiroshi a, Piromsarn Krit Wong, Abe Hiroya, Takemoto Tadashi, Fukuhara Mikio, Wada Takeshi, Inoue Akihisa, *Wetting characteristics of Sn–Ag–Cu solder on Pd-based metallic glass*, Materials Science and Engineering B 148 (2008) 124–127
 48. Popovici, V., s.a., *Ghidul lucrărilor de sudare, tăiere, lipire*, Scrisul Românesc, Craiova, 1984.
 49. Rabinkin A. *Optimization of Brazing Technology, Structure integrity and Performance of Multi-Channeled, Three Dimensional Metallic Structures*, International brazing and Soldering Conference Proceedings, 2-5 April, 2000.
 50. Rabinkin A., *Brazing With (NiCoCr)-B-Si Amorphous. Brazing Filler Metals: Alloys, Processing, Joint Structure, Properties, Applications*, Honeywell int. METGLAS Solutions
 51. Rabinkin A., *Brazing with amorphous foil performs*, Advanced Materials and Processes, June, 2001
 52. Rabinkin, A. *Honeycomb Structure Brazing*, Chapter 32, "Brazing Manual", 2nd Edition, 1991. American Welding Society.
 53. Rabinkin, A., Chapter *Selection Criteria for Brazing and Soldering Consumables*, in "Metals Handbook", 10th Ed., ASM, 1994, vol. 6, "Welding, Brazing and Soldering", p. 903.
 54. Rabinkin, A., Liebermann, H., *Brazing Alloys by Rapid Solidification*, in "Encyclopedia of Materials Science and Engineering, First Supp.", R. Cahn, Ed., Pergamon Press, p. 59 (1989).

55. Rabinkin, A., Liebermann, H., *Brazing and Soldering Using RS Alloys*, Chapter in a textbook "Rapidly Solidified Alloys: Processes, Structures and Properties, and Applications", Ed. H.H. Liebermann, NY, 1993.
56. Rabinkin, A., Liebermann, H., Pounds, S., Taylor, T., Reidinger, F., Siu-Ching Lui, *Amorphous Ti-Zr-base Metglas® Brazing Filler Metals*, Scripta Met. et. Mat., 25, 399 (1991).
57. Rabinkin, A., *Melting Characteristics. Glass-Forming-Ability and Stability of Ni-Pd-Si and Ni-Pd-TM-Si Alloys in the Concentration Range 10 to 22 at % Si*, Materials Science and Engineering, A124, 251 (1990).
58. Rabinkin, A., *New Nickel-Chromium-based Amorphous Foil for Brazing Corrosion Resistant Heat Exchangers*, 1996 BABS Conference, p. 1-6.
59. Rabinkin, A., Pounds, S., *Effects of Load on Brazing with METGLAS® MBF-2005 Filler Metal*, Welding Journal, 67, N5, 33, (1998).
60. Rabinkin, A., *Recent Development in Metglas® Alloy Brazing Foil Applications*, Ibid., 68, N10, 39 (1989).
61. Rabinkin, A., Reidinger, F., Marti, J., Bendersky, L., *Processing, Structure and Performance of RS "Classical" Silver-Base Brazing Alloys*, in "Rapidly Quenched Materials," Part 1, Elsevier, 1991, p. 256.
62. Rabinkin, A., *Resistance of Copper/Copper Joints Brazed with Silver-Base and Amorphous Metglas® Alloys*, Materials Letters, 2, N 6A&B, 487 (1984).
63. Rabinkin, A., *Solders and Brazing Filler Metals*, Kirk-Othmer "Encyclopedia of Chemical Technology", vol. 22, pp. 482-496, John Wiley & Sons, NY, 1997.
64. Rabinkin, A., *Stability to Aging of Copper-to-Copper Joints Brazed with Metglas® MBF-2005 and BCuP-5 Filler Metals*, Ibid., 67, N10, 29 (1988).
65. Rabinkin, A., *Tinkering with Wettability, Fillet Formation, Erosion and Brazement Strength*, BABS Conference on Brazing and Soldering, Coventry, UK, 1988.
66. Rabinkin, A., Wenski, E., Ribando, A., *Brazing Stainless Steel Using a New MBF-Series of Ni-Cr-B-Si Amorphous Brazing Foils*, Welding Journal, Vol.77, Nr.2, 1998, p.66-75.
67. Roy R K.; Bapari H.; Panda A K.; Mitra A., *Development of high strength stainless steel brazed joints using rapidly solidified filler alloys*, Volume 18, Issue 3 (April 2013), pp. 216-221
68. Rumsiski, I., *Prelucrarea matematică a datelor experimentale*, Editura Tehnică, București, 1986.
69. Russell, C., Roberta S., Taylor III, Bernard, W., *Operations Management*, Prentice Hall, Inc.: Upper Saddle River, New Jersey, 2003.
70. Sakamoto C., s.a., *Optimizing Processing Variables in High-Temperature Brazing With Nickel-Based Filler Metal*, Welding Journal, 1997, p.157-162.
71. Senkov O.N., Miracle D.B., *Effect of The Atomic Size Distribution on Glass Forming Ability of Amorphous Metallic Alloys*, Materials research Buletin 36, 2001, p.2183-2198
72. Șerban V. A., Codrean C., Uțu D., Stoian C., *Technological Solutions to Reduce Energy Consumption by Obtaining of Advanced Brazing Alloys*, Proceedings of 6th WSEAS International Conference on Energy, Environment, Ecosystems and Sustainable Development (EESSD'10), October 21-23, 2010, pp. 176-181, ISSN: 1792-5924/ISSN: 1792-5940, ISBN: 978-960-474-237-0
73. Șerban V.A., Codrean C., Utu D., Opreș C., *Amorphous alloys for brazing copper based alloys*, Journal of Physics Conference Series 144, 2009, p. 12098.

74. Șerban V.A., Răduță A, *Știința și ingineria materialelor*, Ed. Politehnica, Timișoara, 2010
75. Șerban, V.A., *Elemente de știința și ingineria materialelor – Ingeria materialelor*, Vol.2, Ed. Politehnica, Timișoara, 1998.
76. Șerban, V.A., Witt, C.A., Cucuruz, R.L., , *Metallische Glaeser der Familie Fe-Cr(Mn)-P-Si-C*, Metall 51, Nr10/97, Berlin, 544 – 548, (1997) ISSN 0026-0746.
77. Sitte, G., Koppe, K., *Punktförmiges Widerstandslöten – oberflächenschonende Prozesse für Überlappverbindungen*. Vortrag zur Sondertagung „Widerstandsschweißen“ im Mai 2001 in Duisburg. DVS-Bericht 213, p.81-86, DVS-Verlag, Düsseldorf, 2001.
78. Sitte, G., *Punktförmiges Widerstandslöten-Die Alternative zum Widerstandspunktschweißen*. „Der Praktiker“ 53, 2001, H.5, p.196-200.
79. Sitte, G., *Widerstandspunktlöten an Stahlbechen bis 3 mm Dike*, Revista Sudura XIII, 2-2003, p.58-60, ISSN 1453-0384.
80. Song Q., Zhang W., Bay N., *An experimental study determines the electrical contact resistance in resistance welding*, Welding Journal, May 2005, pp. 73-76.
81. Steffens, H.D., *Vereinfachtes Hochtemperaturlotverfahren für Titanwerkstoffe mit Hilfe eines amorphen Lotes*, "Schw.Schn." vol. 42, nr. 5, 1990, p. 217-223.
82. Szewieczek, D., Tyrlik – Held, J., *Designing the Brazed Joint Properties With Application of Amorphous Tapes as a Filler Metal*, Journal of Materials Processing Technology, 53 (1995), p.405-412.
83. Terajima Takeshi, Nakata Kazuhiro, Matsumoto Yuji, Zhang Wei, Kimura Hisamichi, Inoue Akihisa, *Brazing of Cu with Pd-based metallic glass filler*, Materials Science and Engineering B 148 (2008) 128–131
84. Jițu, M., Oprean, C., Cicală, E. *Statistică tehnică și control statistic*, Editura Universității Lucian Blaga din Sibiu, 2001.
85. Jițu, M., Oprean, C., Cicală, E. *Tehnici și metode în conducerea proceselor tehnologice*, Editura Universității Lucian Blaga din Sibiu, 2001.
86. Todoran, I., *Tratarea matematică a datelor experimentale – funcții empirice*, Editura Academiei, București, 1976
87. Trușculescu M., Șerban, V.A., Trușculescu, D., *Metale Amorfe*, Editura Tehnică, București, 1988
88. Trușculescu, M., Eremia, A., - *Oțeluri inoxidabile și refractare* – Ed. Facla, 1983.
89. Wielage, B., ș.a., *Hochtemperaturlöten von X5CrNi 18 10 und NiCr20TiAl bei durch thermisches Spritzen aufgebrachtten Loten*, Schweißen und Schneiden, nr.5, 1990, p.228-231.
90. Wu X.W., s.a., *Wide Gap Brazing of Stainless Steel to Nickel-Based Superalloy*, Journal of Materials Processing Technology 113, 2001, p.215-221
91. Wu, X., Chandel, R.S., Li, H., Seow, H.P., Wu, S., *Induction Brazing of Inconel 718 to Inconel X-750 using Ni-Cr-Si-B Amorphous Foil*, Journal of Materials Processing Technology 104 (2000), p. 34-43.
92. Zienkiewicz O.C., Tazlor R.L., *The Finite Element Method, The Basis* volume 1, 5th Edition, Ed. Butterworth-Heinemann, Oxford, 2002.
93. Zienkiewicz O.C., Tazlor R.L., *The Finite Element Method*, volume 2 & 3, 5th Edition, Ed. Butterworth-Heinemann, Oxford, 2002.

-
94. ***http://cybebuzz.gatech.edu/asm_tms/phase_diagrams
 95. ***<http://www.metglas.com>
 96. *** "Best Practice" brazing via andit, "Welding", April, vol.67, nr. 3, 1999,p.18-22.
 97. *** Brazing Handbook, AWS, 1991
 98. *** EN 1044-1993 Aliaje pentru brazare.
 99. *** Neues in der Schwaisstechnik 1997, Schweissen & Schneiden, 1998, Heft5, p. 293-303.
 - 100.*** Neues in der Schwaisstechnik 1997, Schweissen & Schneiden, 1998, Heft 6, p. 336-383.
 - 101.*** STAS 10897/2-83.Încercări mecanice ale îmbinărilor lipite, Încercarea la forfecare.
 - 102.*** STAS 11212/1-84 Lipirea metalelor. Terminologie.
 - 103.*** STAS 11212/2-84 Lipirea metalelor. Procedee de lipire. Clasificare și terminologie.
 - 104.*** STAS 12113-82 Fluxuri pentru lipirea tare.
 - 105.*** STAS R 11593-83 Comportarea la lipire a metalelor. Elemente de bază.
 - 106.*** Welding Handbook, Eight Edition, Vol.2, Welding Processes, American Welding Society, 1991.