

CERCETĂRI ASUPRA PROCESULUI DE SUDARE ELECTRICĂ PRIN PRESIUNE A ALIAJELOR CU MEMORIE A FORMEI DIN FAMILIA FeMnSi ȘI CuZnAl

Rezumat

Teza de doctorat cu titlul *“Cercetări asupra procesului de sudare electrică prin presiune a aliajelor cu memorie a formei din familia FeMnSi și CuZnAl”*, este structurată în 5 capitole.

În capitolul 1 este prezentat stadiul actual al cercetării precum și diversele oportunități de îmbinare a aliajelor cu memorie a formei.

Aliajele cu memoria formei (AMF) fac parte din categoria „materialelor avansate” alături de ceramicele tehnice și de materialele compozite (compozite termorigide, metalice, celulare, etc.).

Aliajele cu memorie a formei prezintă mai multe efecte de recuperare a formei dar și alte proprietăți asociate. Un aliaj prezintă efecte de memorie a formei atunci când recuperarea formei are loc doar la încălzire. Ele au aplicații în domenii diverse, dintre care cele mai importante sunt: robotică, tehnica microsistemelor, bunuri de larg consum, construcții, medicină și în domeniul aerospațial.

În continuare sunt prezentate principalele aliaje la care s-a reușit punerea în evidență a efectului de memorie a formei.

Aliaje neferoase care prezintă efect de memorie: Au, Ag-Cd, Cu-Zn, **Cu-Zn-X** (X = Si, Sn, Al, Ga), Cu-Al-Ni, Cu-Sn, Cu-Au-Zn, Ni-Al, Ti-Ni, In-Ti, In-Cd, Mn-Cu.

Aliaje feroase cu efect de memorie a formei perfect sau aproape perfect: Fe-Pt, Fe-Pd, Fe-Ni-Co-Ti, Fe-Ni-C, **Fe-Mn-Si**, Fe-Cr-Ni-Mn-Si-Co.

Aliaje HEUSLER feromagnetice și cu memorie a formei: Ni-Mn-Ga, Co-Ni-X (X = Ga, Al)

Se remarcă totodată că efectul de memorie a formei nu este întâlnit la un aliaj particular, putând fi vorba despre domenii de compoziție din care acesta face parte.

Trecerea de la faza martensitică la faza austenitică este dependentă doar de temperatură și de tensiune, nu de timp, așa cum se întâmplă la transformările de fază, așadar nu este implicată difuzia.

Există mai multe metode de caracterizare a transformărilor din aliaje cu memorie a formei. Cea mai directă metodă este calorimetria diferențială DSC, (differential scanning calorimetry). Această metodă măsoară căldura absorbită sau cedată de o mică probă de material, pe măsură ce este încălzită sau răcită în domeniul temperaturilor de transformare. Picurile rezultate în urma reacțiilor endoterme și exoterme, pe măsură ce proba absoarbe sau cedează energie din cauza transformării, sunt bine evidențiate și ușor de detectat.

O altă metodă frecvent folosită este măsurarea rezistivității probei în timpul încălzirii sau al răcirii.

Familii de aliaje cu memorie a formei cu baza de fier

Aceste aliaje se caracterizează printr-o morfologie particulară a martensitei, apariția maclei fiind favorizată de apariția următorilor factori:

- austenita are limită de curgere ridicată și/sau modul de elasticitate scăzut;
- atât variația de volum cât și forfecarea de la transformare sunt reduse;

Principalele aliaje ale acestei familii sunt FeNiCoTi și FeMnSi. Concentrația de Si influențează calitatea efectului de memorie a formei și conduce la creșterea tensiunii critice în faza austenitică.

Atunci când aceste aliaje sunt supuse unei solicitări termomecanice specifice, ele evidențiază un efect complet de memorie a formei. Deformația transformării la aceste aliaje este în jur de 2,5 – 4,5%. [64].

Aliajele Fe-Mn-Si pot fi considerate de uz comercial fiind utilizate la producerea benzilor și filamentelor obținute prin solidificare ultrarapidă. Principalele avantaje ale acestor aliaje sunt legate de prețul redus și de prezența feromagnetismului, însă un mare dezavantaj îl reprezintă rezistența redusă la coroziune.

Aliaje pe bază de CuZnAl

O particularitate a familiei de aliaje Cu-Zn-Al este dată de prezența a două transformări de ordonare pe care le suferă faza β la răcire.

Cu un conținut redus de aluminiu (mai puțin de 6%) aliajul CuZnAl poate fi „finisat” la rece după ce i s-a aplicat o recoacere. Aliajul ce conține o cantitate mai mare de aluminiu este mai greu de prelucrat la rece.

Manganul micșorează temperatura de transformare atât la CuZnAl cât și la CuAlNi și se schimbă spre eutectoid cu un conținut la mare de aluminiu. Adesea se înlocuiește cantitatea de aluminiu pentru o conductibilitate mai bună.

Deoarece aliajele cu memoria formei pe bază de cupru sunt metastabile în natură, tratamentul termic de punere în soluție în faza mamă beta, și răcirile ulterioare controlate sunt necesare pentru a menține faza beta pentru a se păstra efectele de memorie a formei.

Oportunități de îmbinare a aliajelor cu memoria formei

Aliajele cu memoria formei (AMF) pot fi îmbinate prin diferite procedee. Selecția procedurii de îmbinare cel mai potrivit depinde de mai mulți factori, cum ar fi:

- proprietățile ce trebuie atinse în metalul de bază din apropierea regiunii de îmbinare și zona influențată termic;
- mărimea ansamblului și a componentelor;
- limitele de aplicare a procedeelelor;
- proprietățile termofizice ale materialelor ce se vor îmbina;
- aplicația dorită;
- condițiile de solicitare impuse;
- condițiile de asigurare a calității.

Desigur, funcție de cerințele de exploatare ale ansamblului sudat, se ia decizia, care proprietăți sunt absolut obligatorii să fie păstrate (de exemplu: rezistența la încovoiere, rezistența mecanică, comportarea la coroziune, comportarea la oboseală).

În timp ce o proprietate-caracteristică este obligatorie, alte proprietăți pot varia de-a lungul zonelor îmbinării.

În cazul AMF, este logic să se spere că „proprietatea” îmbinării care să fie cea mai apropiată de cea a materialului de bază trebuie să fie efectul de memorie a formei.

Caracteristicile ce trebuie păstrate între metalul de bază și zona de îmbinare sunt compoziția chimică și microstructura care dictează răspunsul la memoria formei.

Parametrii regimului de sudare prin presiune în puncte

În capitolul 2 este prezentat procesul de sudare electrică prin presiune în puncte a aliajelor cu memorie a formei FeMnSi și CuZnAl, împreună cu rezultatele examinărilor micro și macrografice.

La alegerea regimului de sudare se pornește de la proprietățile materialelor de sudat, de la grosimea acestora și de la posibilitățile mașinilor.

Acest regim de sudare se poate stabili prin calcul, prin calcul și experimentări sau numai prin experimentări. Oricum se stabilește acest regim, practica arată că aceste valori sunt doar orientative, în practică fiind necesară experimentarea lor până la obținerea unor valori optime.

Valorile orientative ale parametrilor de sudare se aleg în funcție de materialul componentelor (compoziție chimică, stare metalurgică, caracteristici mecanice și electrice, conductibilitate termică etc.), grosimea și forma componentelor, starea suprafețelor etc.

Parametrii tehnologici la sudarea electrică prin presiune în puncte sunt:

- curentul de sudare I_s ;
- timpul de curent, t_c ;
- forța de apăsare, prin intermediul electrozilor F ;
- tipul electrozilor;
- dimensiunile electrozilor, etc.

În afară de principalii parametri de sudare, calitatea sudurii mai poate fi influențată și de: factorii tehnologici, factori constructivi.

Materialele folosite la procedura experimentală sunt aliajele cu memorie a formei cu bază de fier: Fe₆₂Mn₃₂Si₆, având grosimea: 0,52-0,54mm; și lățimea: 4,58-4,75mm, și cel cu bază de cupru: Cu₇₀Zn₂₃Al₆, având grosime: 0,4 – 0,5mm, lățime: 3 – 4 mm.

Experimentele au fost conduse pe o instalație PPN28 din dotarea firmei Zopas prezentată în figura 2.5, controler sudură MIYACHI model WELTOUCH CT110.

Pentru optimizarea parametrilor de regim s-au făcut mai multe încercări, utilizându-se probe de aceeași calitate și aceleași dimensiuni. Probele sudate au fost executate pentru diferite valori ale curentului, variind timpul de curent și forța de apăsare.

Cercetările efectuate au demonstrat că parametrii de bază ai procesului de sudare sunt: curentul de sudare, durata de acțiune a acestuia și presiunea electrozilor în cursul sudării și a forjării ulterioare.

Sudare cu energie înmagazinată în condensatoare a aliajelor cu memorie a formei

În capitolul 3 este prezentat de asemenea principiul procedurii de sudare cu energie înmagazinată în condensatoare, împreună cu rezultatele experimentale.

Sudarea cu energie înmagazinată în câmp electrostatic sau cum mai este denumită, sudarea cu energie înmagazinată în condensatoare este un procedeu tehnologic prin care se realizează o îmbinare între cele două sau mai multe piese prin trecerea curentului de sudare sub forma unui impuls dat de o anumită cantitate de energie, acumulată în prealabil într-o baterie de condensatoare.

Un avantaj important al procedurii este determinat de faptul că acumularea energiei se face într-un timp mai îndelungat (câteva secunde), cu putere mică, în timp ce cedarea energiei se face rapid (miimi de secunde), cu puteri optime, procesului de sudare.

De asemenea, prin acest procedeu se pot suda între ele materiale diferite, parametrii procesului de sudare fiind determinați de natura și grosimea pieselor ce se sudează.

Echipamentele pentru sudare cu energie înmagazinată în condensatoare se clasifică în:

- echipamente cu descărcare directă a energiei din bateriile de condensatoare pe circuitul de sudare,
- echipamente cu descărcare prin transformator intercalat între circuitul de sudare și bateria sau bateriile de condensatoare.

De aceea, sudarea cu energie înmagazinată în condensatoare are multe avantaje tehnologice și energetice, găsindu-și câmp de aplicare la sudarea tablelor de Al, Cu, etc. de grosime între 0,05...1,0mm. Se remarcă în primul rând puterea foarte mică absorbită de la rețea la încărcarea bateriei de condensatoare, care este principalul consumator al mașinii de sudat, pe de o parte, și utilizarea lor la sudarea unor materiale cu cele mai diverse proprietăți: Al, Cu, Mg, Ni, Zn, etc. necesare unor domenii industriale și care cer noi tehnologii de sudare, pe de altă parte.

Din punct de vedere energetic, avantajul procedurii de sudare cu energie înmagazinată în câmp electrostatic, se datorește timpilor de încărcare și descărcare ai bateriei de condensatoare mult diferiți, în sensul că timpul de încărcare t_{inc} , este cu mult mai mare față de timpul de descărcare t_d : $t_{inc} \gg t_d$

Tehnologic, procedul de sudare cu energie înmagazinată în condensatoare, asigură o concentrare a căldurii într-un anumit spațiu, (permite dozarea precisă a energiei de sudare) și pe lângă procedul de sudare cu unde ultrasonore este unul din procedeele ce se aplică la sudarea tablelor și foliilor din aluminiu, cupru și oțeluri speciale.

Calculul și modelarea curentului de sudare pentru aliajele FeMnSi și CuZnAl cu efect de memorie a formei

Calculul curenților de sudare și determinarea formei impulsului de descărcare prin transformatorul de sudare necesită cunoașterea prealabilă a parametrilor circuitului de descărcare, parametrilor constructivi ai transformatorului de sudare și a parametrilor circuitului exterior .

În funcție de acești parametri, descărcarea condensatoarelor prin transformatorul de sudare poate avea un caracter aperiodic, periodic amortizat sau cu antrenare critică.

Cercetările experimentale, au arătat că la valori mici ale forței de strângere a pieselor ($F \leq 10\text{daN}$), cu toate măsurile luate în vederea pregătirii suprafețelor acestora în condiții optime, rezistențele de contact și implicit rezistența totală variază mult cu forța de strângere a electrozilor.

Astfel, la o mașină de sudat, se poate fixa, conform tehnologiei de sudare, capacitatea C și tensiunea de încărcare U_c a condensatoarelor, respectiv raportul de transformare K al transformatorului de sudare.

În urma examinărilor micrografice ale îmbinărilor sudate la parametri de regim utilizați în experiment a rezultată că la folosirea unor parametri de regim corespunzători s-au obținut îmbinări sudate de calitate, fără retasuri de contracție în centrul punctului sudat.

Deoarece la temperatura camerei structura martensitică este moale și se poate deforma ușor în timpul procesului de sudare, experimentele au fost efectuate pe probe mai moi călite, structura martensitică, dar și pe probe îmbătrânite, cu precipitate α , probe care sunt mai dure.

Investigații asupra structurii fine a aliajelor cu memorie a formei FeMnSi și CuZnAl

Experimentele au fost efectuate atât pentru sudarea aliajelor în stare recoaptă cât și a aliajelor în stare călită. Una dintre problemele sudării aliajelor în stare călită este legată de faptul că suprafețele în contact sunt moi și ca urmare apare o deformare puternică a acestora în cazul sudării electrice prin presiune în puncte.

Experimentele efectuate au pus în evidență amprente mici și suduri de calitate necorespunzătoare, spre deosebire de acestea în cazul materialelor aflate în stare recoaptă rezultatele sudurilor au fost mult mai bune.

Experimentele pe secțiunea transversală a îmbinărilor sudate arată modificări ale morfologiei structurii în zona sudată, fără însă ca acestea să fie însoțite și de diferențe majore de compoziție chimică.

Parametrii de proces stabiliți experimental au condus la o recuperare a formei benzilor testate de 87 91 % (figura 3.48).

Întrucât microstructura punctului sudat este afectată în mică măsură, și proprietățile mecanice ale îmbinărilor sudate sunt ridicate, efectul de memorie a formei se va păstra nealterat.

Microstructura zonei sudate este dendritică cu grăunți columnari extrem de fini, iar valorile de duritate sunt similare celor specifice metalului de bază.

Simularea procesului de sudare prin presiune în puncte a aliajelor cu memorie a formei

În capitolul 4 s-a încercat o modelare cu element finit a procesului de sudare prin presiune electrică în puncte a aliajelor cu memorie a formei FeMnSi și CuZnAl.

Calculule moderne de rezistența materialelor, chiar dacă se aplică în cazul problemelor clasice de teoria elasticității sau plasticității nu pot fi concepute fără utilizarea metodelor numerice de calcul. Această situație este o consecință directă a progreselor obținute în domeniul calculatoarelor electronice, atât în domeniul hardware cât și software.

Modelarea s-a realizat utilizând tot programul de simulare în element finit ANSYS. S-au considerat geometria electrodului și a piesei, proprietățile dependente de temperatura materialelor tablelor și electrozilor; a fost admisă pierderea de căldură prin convecție a suprafețelor exterioare ale electrozilor și a tablelor, răcirea cu apă a electrozilor. S-au considerat interfețele piese – electrod și piesă – piesă.

La începutul operației de sudare, căldura este localizată la contactul componentelor datorită suprafețelor de contact foarte mici dintre componente, adică a unei rezistențe de contact mari, deci și a unei densități de curent mari.

Pe măsura încălzirii locului de contact, materialul se înmoaie, suprafața de contact (de trecere a curentului) crește, iar când întregul volum de material care formează proeminența devine plastic, acesta se aplatizează, determinând apropierea componentelor.

Forța la care sunt supuse componentele, prin intermediul plăcilor electrod, asigură uniunea la nivel atomic a componentelor ajunse la temperatura de sudare.

Simularea mecanică este efectuată în 10 pași, timpul total al simulării fiind de 5,4 secunde. Cunoscând parametrii câmpului termic, se pot aprecia transformările structurale, și tensiunile interne ce intervin, adică calitatea sudurii.

Variația în timp a deformației plastice totale, demonstrează că aliajul CuZnAl are o deformație echivalentă mai mare decât aliajul FeMnSi. Deformația plastică este rezultatul formării contactului fizic, a activării atomilor și formării legăturilor metalice.

Modelarea procesului de sudare electrică prin presiune în puncte cu element finit a contribuit la aprofundarea mecanismului de formare a nucleului ale metalului topit și de cristalizare primară și secundară a acestuia cu obținerea unui punct sudat având structură și proprietăți corespunzătoare.

Mărimile suprafețelor de contact, determinate de repartiția tensiunilor și deformațiilor precum și temperaturile dezvoltate în diversele puncte ale îmbinării sudate au demonstrat că sursele de căldură au o dispunere neuniformă și că optimizarea procesului de sudare impune cunoașterea interacțiunii dintre diversele fenomene de natură fizică, mecanică și metalurgică.

Concluzii și contribuții originale

În capitolul 5 sunt prezentate principalele concluzii și contribuții originale, care pot fi sintetizate astfel:

1. Stabilirea prin experiment a **parametrilor optimi ai procesului** de sudare prin presiune în puncte a aliajelor Fe-Mn-Si și Cu-Zn-Al, care să asigure formarea unui nucleu de metal topit respectiv unui punct sudat fără defecte de continuitate de tipul fisurilor, retasurilor de contracție și porozităților.

Astfel, la aliajele Fe-Mn-Si parametrii energetici vor fi :

- curentul de sudare, 2kA;
- timpul de sudare, 6per (0,12s);
- presiunea de sudare și forjare, 4,7 - 5 bari,

iar la aliajele Cu-Zn-Al, aceștia au valorile:

- curentul de sudare, 4kA;
- timpul de sudare, 3per (0,06s);
- presiunea de sudare și forjare, 2,2 – 2,5 bari.

2. Elucidarea unor **aspecte fenomenologice** care apar la sudare și care privesc în esență transformările structurale declanșate în punctul sudat și în zona influențată termic, interacțiunea dintre materialul componentelor și al electrozilor, lucrarea aducând contribuții referitoare la:

- efectul curentului de sudare asupra dimensiunilor punctului sudat;
- prevenirea expulzărilor de metal topit;
- căldura dezvoltată și fenomenele de conducție în zonele limitrofe ale sudurii.

3. Oportunitatea îmbinării celor două categorii de aliaje prin **sudare cu energie înmagazinată în condensatoare**, aceasta oferind avantajul reducerii puterii instalate și al unei dozări mai exacte a energiei transmise în zona de contact a pieselor.

Prin experiment se demonstrează că acest proces de sudare asigură regimuri termice relativ dure într-un timp de descărcare foarte scurt, iar căldura este generată doar de rezistența de contact, în absența timpului de disipare a acesteia în masa de material.

4. Stabilirea prin calcul a **parametrilor circuitului de încărcare** a bateriei de condensatoare, care a făcut posibilă optimizarea regimului tehnologic de sudare, și care asigură o productivitate ridicată la costuri rezonabile. Se demonstrează că valoarea maximă a curenților de sudare și cunoașterea formei impulsului de descărcare influențează în mare măsură durata unui ciclu de sudare și implicit morfologia punctului sudat.

5. Rezultatele **examinărilor macrografice** reliefează că îmbinările realizate prin ambele tehnici de sudare au un aspect plăcut, o geometrie corespunzătoare, nu prezintă defecte de legătură și discontinuități ale punctului sudat.

Profilul și lățimea zonelor caracteristice ale îmbinărilor realizate în urma contactului lichid – solid sub presiune, variază în funcție de parametrii câmpului electric care este neomogen datorită unor cauze geometrice (forma particulară a sudurilor) și cauze termice (câmpul termic neuniform determină curentul să aleagă calea minimei rezistențe, adică zonele mai puțin încălzite).

6. La ambele categorii de materiale, **microstructura** zonei sudate este dendritică cu grăunți columnari extrem de fini, iar valorile de duritate sunt similare celor specifice metalului de bază.

7. Spectrele de **dispersie în energie a razelor X**, alături de rezultatele analizelor chimice cantitative în microvolume de material folosind microsonda electronică, au demonstrat că pe secțiunea transversală a punctului sudat apar variații în limite restrânse ale concentrațiilor în elemente de aliere determinate esențial de particularitățile procesului de solidificare a nucleului topit și de recristalizare a punctului sudat.

Acest fapt constituie un avantaj esențial pentru păstrarea nealterată a caracteristicilor de memorare a formei.

8. Cercetările de **difracție cu raze X** conduse în zone care să includă întreaga îmbinare sudată au indicat apariția unor reacții de precipitare specifice supraîncălzirii aliajelor cu efect de memorie a formei și au permis evidențierea fazelor secundare, a dimensiunilor cristalelor și a parametrilor de rețea cristalină.

9. Stabilirea **prin calcul a corelației** dintre capacitatea bateriei de condensatoare, raportul de transformare al transformatorului, inductivitatea circuitului exterior și valorile curentului și timpului de sudare. Astfel s-a demonstrat că impulsurile curentului de sudare și de preîncălzire au un caracter aperiodic sau cu atenuare critică, chiar la capacitatea minimă de 50 μF și la o tensiune redusă, de cca $200V_{cc}$.

10. **Modelarea cu element finit** a procesului de sudare electrică prin presiune în puncte a simulat formarea punctului sudat, a stabilit prin calcul repartiția tensiunilor și a a câmpului termic în îmbinările sudate, precum și mărimea deformațiilor rezultate la aplicarea ciclului de sudare. Valorile diferite ale temperaturilor și tensiunilor pe secțiunea îmbinărilor sudate atestă că sursele de căldură au o dispunere neuniformă. Pentru condițiile inițiale impuse au rezultat următoarele observații:

- la aliajul Fe-Mn-Si, temperatura vârfului nucleului topit scade de la 1540°C la temperatura camerei, 22°C , în timp de 5 s, iar la aliajul Cu-Zn-Al, pentru același timp de răcire, de la 950°C la temperatura ambiantă, 22°C ;
- forța de apăsare crește rapid cu timpul de curent, iar după atingerea unui maxim de 0.5MPa în cazul aliajului Fe-Mn-Si, și de 0,25 MPa pentru aliajul Cu-Zn-Al, începe să scadă;
- deformația maximă pentru aliajul Fe-Mn-Si este de $2,7219 \times 10^{-5} \text{mm/mm}$ și apare după un timp de 1,06s și 1,12s, iar pentru aliajul Cu-Zn-Al este de $3,6913 \times 10^{-5} \text{mm/mm}$ la aceleași niveluri de timp.

În încheiere, se subliniază faptul că abordarea și rezolvarea în limitele propuse a temei de cercetare ce face obiectul tezei de doctorat, prin urmărirea sistematică, punerea în evidență și fundamentarea științifică a procesului de sudare prin presiune a aliajelor cu efect de memorie a formei, reprezintă o contribuție originală.

Îmbinarea cercetării laturii aplicative a acestor investigații din punctul de vedere al optimizării procesului de sudare cu latura fenomenologică, a determinării și explicării științifice a transformărilor structurale declanșate în îmbinările sudate, face ca lucrarea să se înscrie în tendințele și metodologia modernă utilizată în cercetarea științifică.