

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

Teză destinată obținerii
titlului științific de doctor inginer
la
Universitatea "Politehnica" din Timișoara
în domeniul INGINERIA MATERIALELOR
de către

Ing. Claudia – Mariana Dorohoi

Conducători științifici:	Prof.univ.dr.ing. Ion Mitelea Prof.univ.dr.ing. Viorel - Aurel Șerban
Referenți științifici:	Conf.dr.ing. Corneliu Crăciunesc Prof.dr.ing. Valeriu Deac Cer. pr. I, dr. Nicolae Fabras
Ziua susținerii tezei:	05.06.2012

CUPRINS

1 STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR PRIVIND SUDAREA ELECTRICĂ PRIN PRESIUNE A ALIAJELOR CU MEMORIE A FORMEI.	7
1.1 Scurt istoric.	7
1.2 Caracteristi generale.	7
1.3 Caracteristici microstructurale ale aliajelor cu memorie a formei.	14
1.4 Comportamentul pseudoelastic.	15
1.5 Metode de caracterizare a transformărilor structurale din aliaje cu memorie a formei.	16
1.6 Familii de aliaje cu memorie a formei cu baza de fier.	17
1.7 Aliaje pe bază de CuZnAl.	18
1.8 Aplicații ale aliajelor cu memoria formei	22
1.8.1 Dispozitive de acționare realizate din aliaje cu memoria formei.	22
1.8.2 Structuri mecanice acționate de pistoane cu materiale cu memorie.	23
1.8.3 Robotică.	23
1.8.4 Aliaje cu memoria formei în medicină.	24
1.8.5 Aliaje cu memoria formei în alte aplicații industriale.	26
1.9 Oportunități de îmbinare a aliajelor cu memoria	27
1.9.1 Matricea cerințelor de proprietăți impuse îmbinărilor sudate din aliaje cu memoria formei.	28
1.9.2 Diferite procedee de îmbinare a aliajelor cu efect de memorie a formei.	29
1.10 Obiectivele tezei de doctorat.	32
2 CERCETĂRI ASUPRA PROCESULUI DE SUDARE ELECTRICĂ PRIN PRESIUNE ÎN PUNCTE A ALIAJELOR CU MEMORIE A FORMEI.	33
2.1 Particularitățile sudării electrice prin presiune în puncte a aliajelor cu memoria formei.	33
2.2 Clasificarea procedeelelor de sudare prin presiune.	35
2.3 Principiul procesului de sudare prin presiune în puncte.	35
2.3.1 Clasificarea sudării electrice prin presiune în puncte SPP.	38
2.3.2 Condițiile de formare a îmbinărilor sudate.	38
2.3.3 Parametrii regimului de sudare prin presiune în puncte.	39
2.3.4 Pregătirea suprafețelor pentru sudarea SPP.	40
2.4 Rezultate experimentale	41
2.4.1 Descrierea instalației de sudare PPN28.	43
2.5 Analiza macro și microscopică asupra sudurilor din aliaje FeMnSi.	48
2.6 Analiza de difracție cu raze X.	52
2.7 Parametrii de proces la sudarea aliajului CuZnAl.	56

2.8 Încercări de duritate	61
2.9 Concluzii.	63
3 CERCETĂRI ASUPRA PROCESULUI DE SUDARE CU ENERGIE ÎNMAGAZINATĂ ÎN CONDENSATOARE A ALIAJELOR CU MEMORIE A FORMEI.	64
3.1 Introducere.	64
3.1.1. Factori tehnologici.....	66
3.1.2 Mașina de sudat electric prin presiune în puncte cu energie înmagazinată în condensatoare.....	69
3.2 Procesul de încărcare a condensatoarelor la sudarea cu energie înmagazinată a aliajelor FeMnSi și CuZnAl cu memorie a formei.....	71
3.3 Calculul și modelarea curentului de sudare pentru aliajele FeMnSi și CuZnAl cu efect de memorie a formei.	78
3.3.1 Influența parametrilor circuitului exterior asupra curentului de sudare.	78
3.3.2 Calculul curentului de sudare.....	85
3.3.3.Determinarea caracterului procesului de descărcare a condensatoarelor.....	86
3.3.4 Valoarea maximă și evoluția în timp a curentului de sudare.....	88
3.4 Investigații metalografice și examinări sclerometrice.....	91
3.5 Investigații asupra structurii fine a aliajului CuZnAl.....	104
3.6 Concluzii.	119
4 SIMULAREA PROCESULUI DE SUDARE PRIN PRESIUNE ÎN PUNCTE A ALIAJELOR CU MEMORIE A FORMEI Fe-Mn-Si și Cu-Zn-Al	120
4.1 Generalități.	120
4.2 Evoluția și stadiul actual al cercetărilor în domeniu.	111
4.3 Rezultate experimentale.	123
4.3.1 Modelul geometric	123
4.4 Simularea stării de echilibru termic.	124
4.4.1 Variația temperaturii.	129
4.5 Simulare mecanică statică.	133
4.5.1 Tensiunea echivalentă.	135
4.5.2 Tensiunea de forfecare.	138
4.5.3 Tensiunea normală.	141
4.5.4 Deformația totală.....	144
4.5.5 Deformația plastică echivalentă (după Von Mises).....	147
4.6 Concluzii.	151
5. CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII ORIGINALE.	154
BIBLIOGRAFIE.....	158

STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR PRIVIND SUDAREA ELECTRICĂ PRIN PRESIUNE ÎN PUNCTE A ALIAJELOR CU MEMORIE A FORMEI

1.1 Scurt istoric

Primele referiri cu privire la transformarea aliajelor cu memorie a formei au fost făcute de Chang și Read în 1932 [1], odată cu analiza aliajului Au - Cd care prezenta la temperatura camerei o elasticitate deosebită - de aproximativ 8 % - elasticitate care a fost numită de "tip cauciuc" [54].

Efectul propriu-zis de memorie a formei a fost descoperit mai întâi la Au-Cd în 1951 și apoi la In-Ti în 1953. La acestea s-au adăugat și alte aliaje neferoase dintre care le amintim pe cele mai importante: Cu - Zn (1956), Ti - Ni (1963), Cu - Al - Ni (1964) [30] și Cu - Zn - Al (1970) [114], precum și o serie de aliaje feroase cum ar fi: Fe - Mn - Si [94], Fe - Ni - Co - Ti și Fe - Ni - C [52].

Pe măsură ce efectul de memorie a formei a fost tot mai bine înțeles, un număr tot mai mare de sisteme de aliaje care prezintă efect de memorie a formei, au fost cercetate.

Lista aliajelor cu memoria formei (AMF) este impresionantă însă de uz comercial au devenit numai aliajele pe bază de Ni-Ti, Cu-Zn-Al, Cu-Al-Ni și Fe-Mn-Si. Principalul fenomen considerat responsabil pentru comportarea efectului de memorie a formei este cunoscut de peste 100 de ani și perpetuează amintirea metalografului german Von Martens - transformarea martensitică [97].

1.2 Caracteristi generale

Termenul de aliaje cu memorie a formei se aplică aceluși grup de materiale care și-au demonstrat capacitatea de a reveni la forma avută înaintea deformării plastice, atunci când sunt încălzite peste o anumită temperatură. În general aceste materiale pot fi deformate plastic la o temperatură relativ scăzută, iar după încălzirea într-un interval de temperatură dependentă de compoziția aliajelor acestea vor reveni la forma care au avut-o înainte de deformare.

Aliajele cu efect de memorie a formei au aplicații în domenii diverse, dintre care cele mai importante sunt: industrie, bunuri de larg consum, construcții, medicină și în domeniul aerospațial.

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.

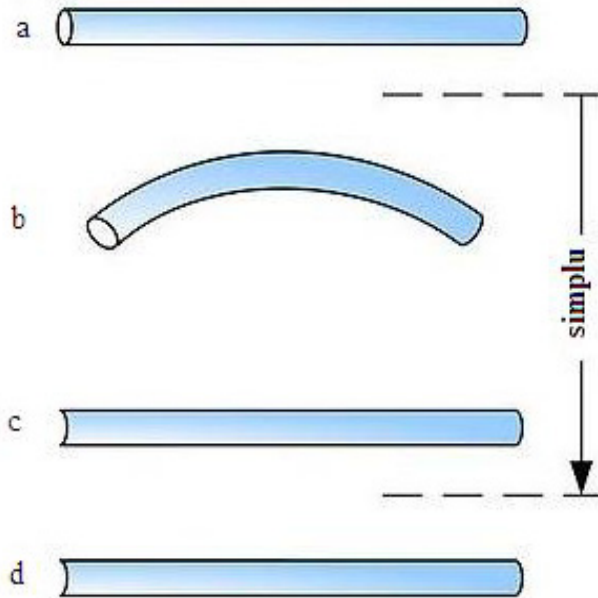


Figura 1.1 Aliaj cu memorie a formei simplu [64]

Când un aliaj cu memorie a formei este în starea corespunzătoare formei „rece”, materialul poate fi deformat și își va menține această formă până când temperatura materialului la încălzire atinge temperatura A_s , peste această temperatură începe recuperarea formei care durează până la atingerea temperaturii A_f , la răcire materialul va rămâne în forma „caldă” până când este deformat din nou.

La efectul simplu, răcirea materialului de la temperaturi mari nu este însoțită de schimbări macroscopice de formă. Este necesară întotdeauna o deformare în stare rece pentru a se putea pune în evidență efectul de memorie a formei. Intervalul de temperatură în care are loc recuperarea formei este de 2 - 20°C, depinzând de compoziția aliajelor, de tratamentele termice aplicate și de condițiile de solicitare.

Cel de-al doilea tip de efect de memorie a formei este efectul în dublu sens. Efectul de memorie a formei se caracterizează prin faptul că materialul trece spontan dintr-o formă în alta atât la încălzire cât și la răcire.

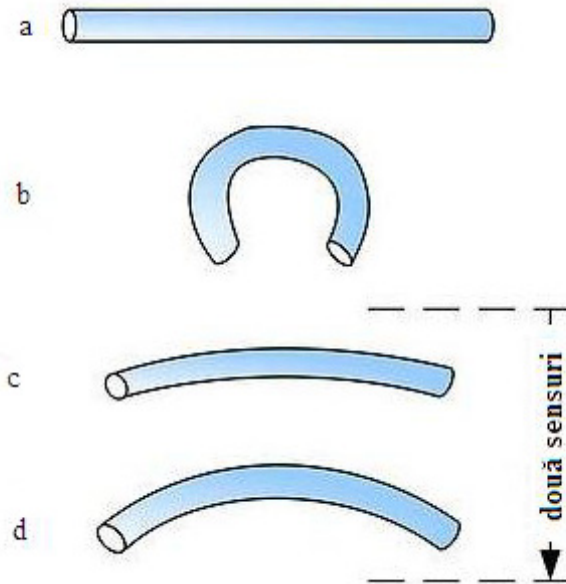


Figura 1.2 Aliaj cu memorie a formei în dublu sens [64]

Unele aliaje cu memorie a formei pot prezenta efectul dublu de memorie a formei în urma unor tratamente termomecanice. Tratamente termomecanice numite și de educare (training) presupun frecvent aplicarea unor cicluri de deformare și ciclare termică în urma cărora materialul devine capabil de recuperarea spontană a formei atât la încălzire cât și la răcire.

Avantajul principal al efectului în dublu sens, care rezultă din eliminarea intervenției externe la fiecare ciclu este contrabalansat de o capacitate limitată de recuperare a formei, comparativ cu cazul efectului simplu. În afară de inducerea efectului dublu prin tratamente termice sau termomecanice complexe acestea mai pot fi obținute în urma iradierii, a deformării plastice localizate. În afară de acestea proprietățile aliajelor cu memorie a formei mai pot prezenta și alte proprietăți numite asociate dintre care cele mai importante sunt:

- superelasticitatea,
- capacitatea de amortizare,
- biocompatibilitatea și mai recent magnetostricțiunea [36].

Aliajul cu memorie a formei cel mai des întâlnit este cel pe bază de Ni-Ti, Nitinol și cele pe bază de cupru CuZnAl și CuAlNi, deși mai nou atenția este focalizată și pe aliaje feroase, respectiv aliaje magnetostrictive pe bază de Ni-Co.

Evidențierea repetată a efectului de memorie a formei poate duce la o schimbare a caracteristicilor temperaturilor de transformare (acest efect fiind cunoscut sub numele de oboseală funcțională, fiind totodată strâns legat de schimbarea proprietăților microstructurale și funcționale ale materialului). [64]

Proprietățile aliajelor cu memorie a formei pot fi alterate până la dispariție prin încălzirea la o temperatură superioară unei temperaturi critice specifice fiecărei compoziții.

Aliajele cu memoria formei au ca principală caracteristică microstructurală prezența transformării martensitei termoelastice și reversibile.

Particularitățile acestei transformării sunt schițate în figura 1.3 pentru cazul unei transformări induse termic.

Temperaturile caracteristice asociate cu transformarea martensitei indusă termic sunt M_s , M_f , A_s , A_f .

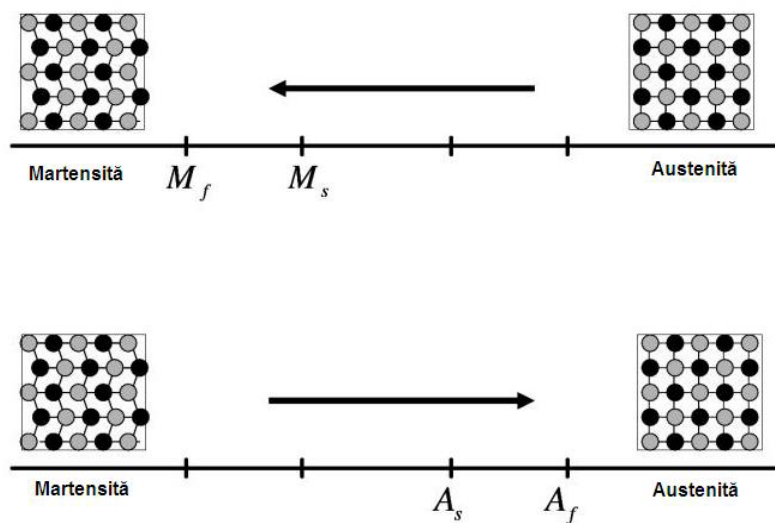


Figura 1.3 Temperaturile caracteristice și modificările structurale în cursul transformării induse termic [64].

În cursul răcirii, austenită (în general cu structura ordonată) începe să se transforme în martensită la atingerea temperaturii M_s , transformarea se finalizează și materialul va prezenta o structură complet martensitică la atingerea temperaturii M_f ; la încălzire, temperaturile caracteristice sunt A_s (la care martensita începe să se transforme în austenită) și A_f la care transformarea martensitei în austenită se încheie.

Deformarea martensitei sub temperatura M_f are ca efect reorientarea variantelor de martensită, astfel încât la depășirea unei tensiuni (σ_f) întreaga structură ajunge să fie alcătuită dintr-o singură variantă (figura 1.4).

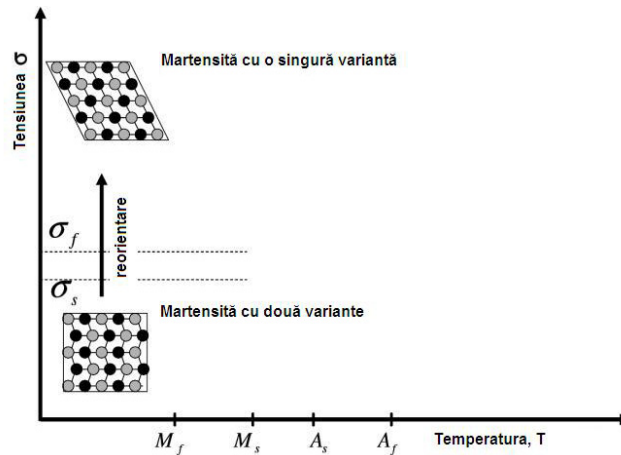


Figura 1.4 Reorientarea variantelor de martensită, sub acțiunea tensiunii mecanice [64]

Deformarea martensitică a aliajelor cu memorie a formei, este recuperată prin încălzire atunci când martensita tinde să adopte un aranjament cristalin ordonat al austenitei caracterizat de starea minimă de energie.

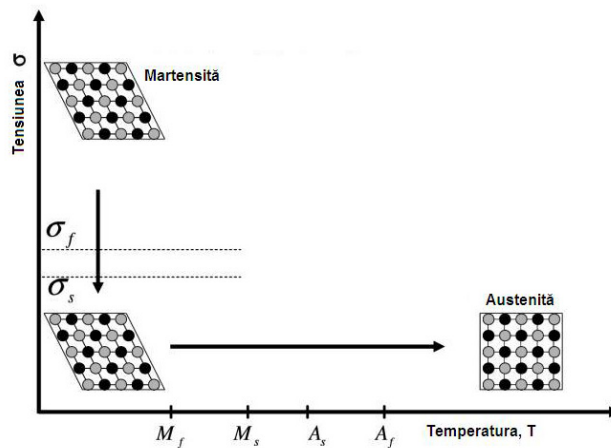


Figura 1.5 Modificari microscopice apărute în cursul recuperării formei [64]

Dacă la încălzire există un singur aranjament ordonat (cel al austenitei) în care materialul poate să treacă, la răcire există mai multe posibilități de reorientare a martensitei, ca urmare recuperarea formei apare doar la încălzire cât timp nu se crează condiții ca la răcire să apară un singur aranjament favorizat.

În tabelul 1.1 sunt prezentate aliajele, la care s-a reușit punerea în evidență a efectului de memorie a formei.

Tabelul 1.1 Familii de aliaje cu memorie a formei [11], [5].

ALIAJ	COMPOZIȚIE [%]	HISTEREZIS [%]	ORDONAT
ALIAJE NEFEROASE CARE PREZINTĂ EFECT DE MEMORIE			
Au,Ag-Cd	44-49%Cd	~15	ordonat
Cu-Zn	38,5-41,5%Zn	~10	ordonat
Cu-Zn-X (X=Si;Sn;Al;Ga)	X% scăzute	~10	ordonat
Cu-Al-Ni	28-29% Al 3-4,5%Ni	~35	ordonat
Cu-Sn	15%Sn	-	ordonat
Cu-Au-Zn	23-28%Au 45-47%Zn	~6	ordonat
Ni-Al	36-38%Al	~10	ordonat
Ti-Ni	49-51%Ni	20-100 1-2	ordonat
In-Ti	18-23%Ti	~4	dezordonat
In-Cd	4-5%Cd	~3	dezordonat
Mn-Cu	5-35%Cu	-	dezordonat
ALIAJE FERROASE CU EFECT DE MEMORIE A FORMEI PERFECT SAU APROAPE PERFECT			
Fe-Pt	25%Pt	mic	ordonat
Fe-Pd	30%Pd	mic	dezordonat
Fe-Ni-Co-Ti	33%Ni;10%Co;4%Ti(%masă)	mic	dezordonat
Fe-Ni-C	31%Ni; 0,4%C(%masă)	mare	dezordonat
Fe-Mn-Si	30%Mn; 5%Si (%masă)	mare	dezordonat
Fe-Cr-Ni-Mn-Si-Co	10%Cr; <10%Ni; <15%Mn; < 7%Si; <15%Co(%masă)	mare	dezordonat
ALIAJE HEUSLER FEROMAGNETICE ȘI CU MEMORIE A FORMEI			
Ni-Mn-Ga	50%Ni;25%Mn;25%Ga	mare	ordonat
Co-Ni-X (Ga,Al)	50%Co; 25%Ni; 25%Ga	mare	ordonat
CFC- cubic cu fețe centrate; TVC – tetragonal cu volum centrat, respectiv cu fețe centrate; HCP – hexagonal compact; B2, DO ₃ , L1 ₂ – suprafețele.			

Din acest tabel se poate observa că nu toate aliajele au efectul de memorie a formei bine evidențiat; existența unei faze mamă nu este o condiție obligatorie iar histerezisul transformării variază în limite destul de largi.

Remarcăm 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. [36].

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.

Terminologia pentru faza caracteristică temperaturii ridicate este diversă:

- faza mamă,
- faza de temperatură înaltă sau austenita (după transformarea martensitică din oțeluri),
- faza caracterizată de temperatura joasă sau martensită (termen similar cu cel de la oțeluri), dar la oțeluri transformarea nu este reversibilă și nici termoelastică.

Dacă austenita se caracterizează prin aranjament ordonat (în general la lungă distanță), analiza metalografică a structurii martensitei pune în evidență prezența variantelor autoaranjate în mod asemănător structurilor maclate.

Ciclograma transformării martensitei arată că transformarea $M \leftrightarrow A$ este completă și prezintă un histerezis, figura 1.6.

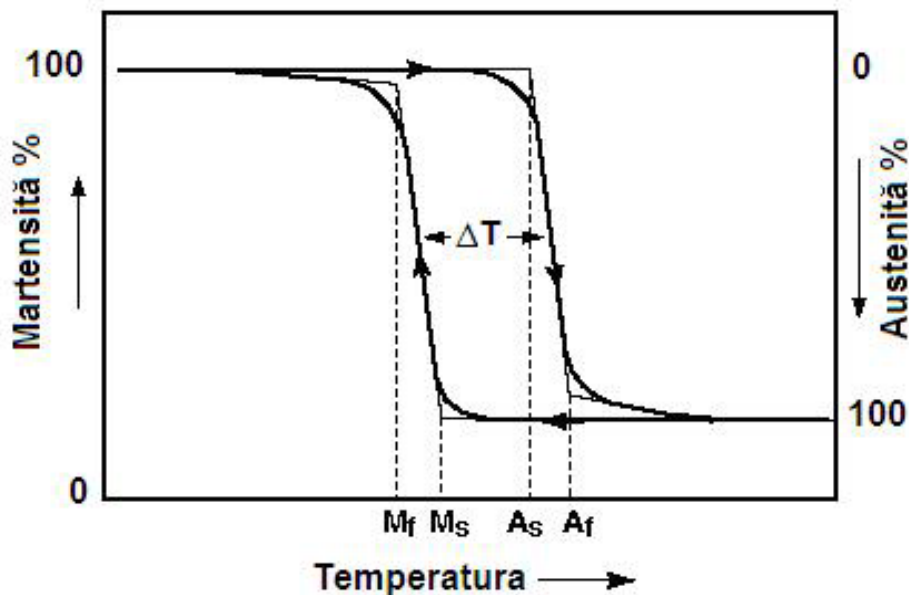


Figura 1.6. Transformarea martensitică termoelastică tipică cu evidențierea Histerezis-ului de transformare [8].

Cele mai multe dintre transformări au loc într-un interval de temperatură relativ mic, deși la începutul și la sfârșitul transformării în timpul încălzirii sau al răcirii, viteza de transformare scade.

Histerezis-ul de transformare, evidențiază disiparea energiei în timpul transformării, iar alura curbei este influențată și de alte particularități, cum ar fi gradul de aliere, și ecrusarea [8].

Câteva caracteristici termice ale transformării martensitice din principalele aliaje cu memorie a formei sunt date în tabelul 1.2.

Tabelul 1.2. Aliaje care prezintă efect de memorie a formei. [8]

Aliajul	Compoziție	Temperatura de transformare	Histerezis (aprox.)
		°C	°C
Ag-Cd	44/49%Cd	- 190...- 50	15
Au-Cd	46,5/50%Cd	30...100	15
Cu-Al-Ni	14-14,5%Al ¾,5%Ni	- 140...100	35
Cu-Sn	≈ 15%Sn	- 120...30	
Cu-Zn	38,5/41,5%Zn	- 180...- 10	10
Cu-Zn-X (X= Si, Sn, Al)	%X	- 180...200	10
In-Ti	18/23%Ti	60...100	4
Ni-Al	36/38%Al	- 180...100	10
Ni-Ti	49/51%Ni	- 50...110	30
Fe-Pt	≈ 25%Pt	≈ - 130	4
Mn-Cu	5/35%Cu	- 250...180	25
Fe-Mn-Si	32%Mn, 6%Si	- 200...150	100

1.3 Caracteristici microstructurale ale aliajelor cu memorie a formei

Martensita termoelastice este caracterizată prin capacitatea mare de disipare ca urmare a prezenței energiei între variantele de martensită. Structura tipică a martensitei este alcătuită din variante autoaranjate, un exemplu de transformare martensitică reversibilă în cursul evidențierii efectului de memorie a formei în procesul de răcire – deformare – încălzire este detaliat în figura 1.7.

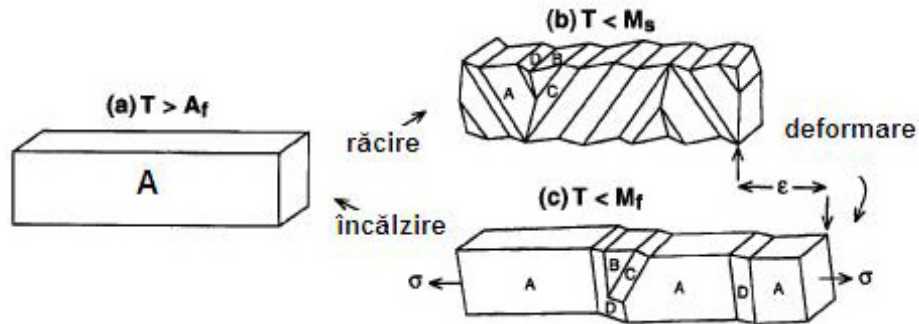


Figura 1.7. a) austenită, b) variante autoaranjate A, B, C, D, apărute la transformarea la răcire în martensită, c) creșterea variantei favorizate la deformare [8].

Prezența variantelor autoaranjate face ca la simpla răcire transformarea martensitei să nu fie însoțită de modificări macroscopice de formă. Doar la aplicarea tensiunii σ , creșterea unei variante de martensită duce la un efect macroscopic major, care este recuperat prin încălzire.

1.4 Comportamentul pseudoelastic

Proprietățile mecanice ale aliajelor cu memorie a formei depind foarte mult de temperatură.

În figura 1.8 este descrisă comportarea unui aliaj Ni-Ti, la diverse solicitări mecanice, la diverse temperaturi astfel:

- dacă aliajul este testat la temperaturi corespunzătoare fazei A ($T_1 > M_d > A_f$) comportarea este redată de curba a,
- dacă temperatura de testare este corespunzătoare stării martensitice ($T_2 < M_s$) curba caracteristică este b,
- există însă un interval de temperatură cuprins între temperatura M_d și A_f în care transformarea din A \rightarrow M poate fi indusă prin tensiune, curba c.

Acest tip particular de comportament pseudoelastic mai poartă și denumirea comercială de superelasticitate având numeroase domenii de aplicații în medicină.

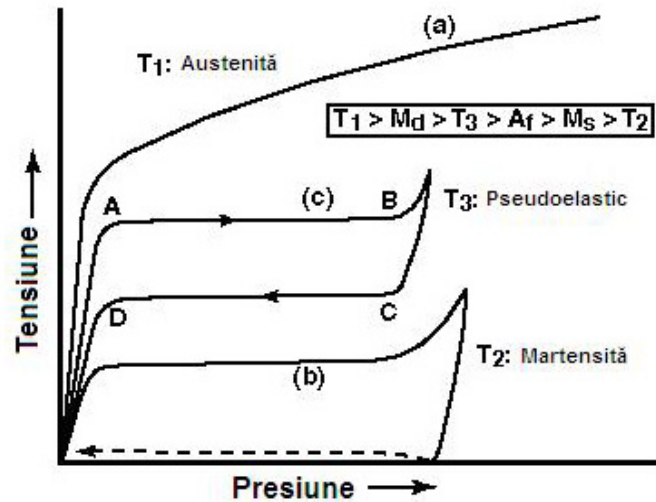


Figure 1.8. Curba de tensiune – presiune la diferite temperaturi de transformare, a) austenită, b) martensită, c) comportamentul pseudoelastice [8]

1.5 Metode de caracterizare a transformărilor structurale din aliaje cu memorie a formei

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. Prezența modificării alurii curbei cu picurile rezistivității peste domeniul temperaturilor de transformare, analiza transformărilor de fază sau a modificărilor de proprietăți mecanice nu au fost relevate. De asemenea, deși apar adesea modificări ale curbei rezistivității după ciclarea de mai multe ori, totuși corelația acestor schimbări se modifică.

Una dintre cele mai directe metode este încercarea mecanică prin care unei probe din aliajul cercetat i se aplică o tensiune constantă, urmând să se înregistreze modificarea parametrilor încercării în timpul ciclării termice.

Valorile obținute pentru punctele de transformare, M_s și A_f , sunt ușor diferite față de cele obținute în urma analizei diferențiale calorimetrice (DSC).

Aceasta se întâmplă deoarece la metoda DSC transformarea nu este indusă prin tensiune, iar creșterea tensiunii în momentul examinării va duce la creșterea valorilor temperaturilor de transformare

1.6 Familii de aliaje cu memorie a formei cu baza de fier

Aceste aliaje se caracterizează printr-o morfologie particulară a martensitei, apariția maclării 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;
- creșterea gradului de tetragonalitate contribuie la reducerea atât a forfecării și demaclării cât și a energiei limitelor de macle;
- Ms este scăzut ceea ce defavorizează deformația prin alunecare [7].

Principalele aliaje ale acestei familii sunt FeNiCoTi și FeMnSi. A fost raportat că un aliaj $\text{FeNi}_{30}\text{Co}_{10}\text{Ti}_3$, după un tratament termomecanic specific prezintă efect de memorie a formei. Histerezisul termic al acestui aliaj este de aproximativ 150°C .

O altă familie de aliaje feroase este 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 prezintă un EMF aproape perfect în intervalul Fe-(28-34)Mn-(4-6,5)Si(%), după cum se observă din figura 1.9 (a), [7, 8].

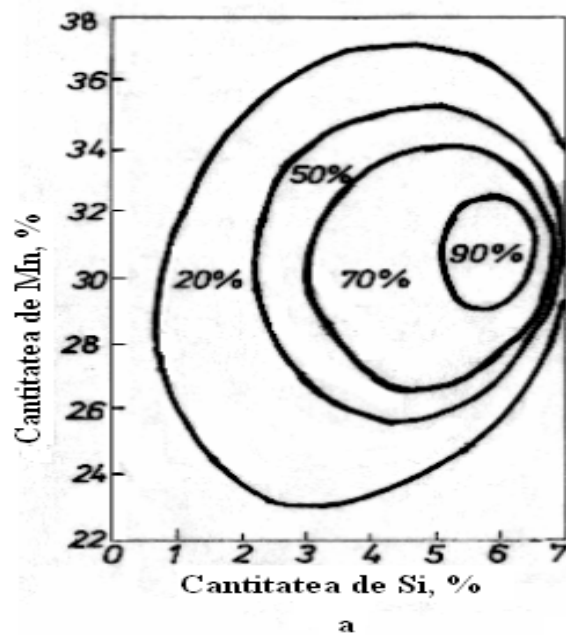


Figura 1. 9. Caracteristicile memoriei termice la aliajele Fe-Mn-Si; diagramă structurală a valorilor EMF pe diverse domenii de concentrație [3].

În urma cercetării literaturii de specialitate, s-a constatat că ciclul de histerezis al aliajelor Fe-Mn-Si, (care este în jur de 100°C), se caracterizează printr-o ușoară asimetrie, din cauză că viteza de transformare martensitică directă este mai mică decât cea de la transformarea inversă.

Se constată că singurul aliaj la care transformarea inversă se produce cu viteză mai mare decât cea directă este Fe-26 Mn-4 Si (%). Odată cu creșterea numărului de cicluri s-au observat și alte efecte cum ar fi: creșterea durității și a temperaturilor de transformare sau reducerea EMF [14].

Aliajele Fe-Mn-Si pot fi considerate de uz comercial fiind utilizate la producerea benzilor și filamentelor obținute prin solidificare ultrarapidă [13]. Principalele avantaje ale acestor aliaje sunt legate de prețul redus și de prezența feromagnetismului, însă un mare dezavantaj îl reprezintă rezistența redusă la coroziune [14].

1.7 Aliaje pe bază de CuZnAl

Diagrama de echilibru ternară a sistemului de aliaje din familia CuZnAl este prezentată în figura 1.10.

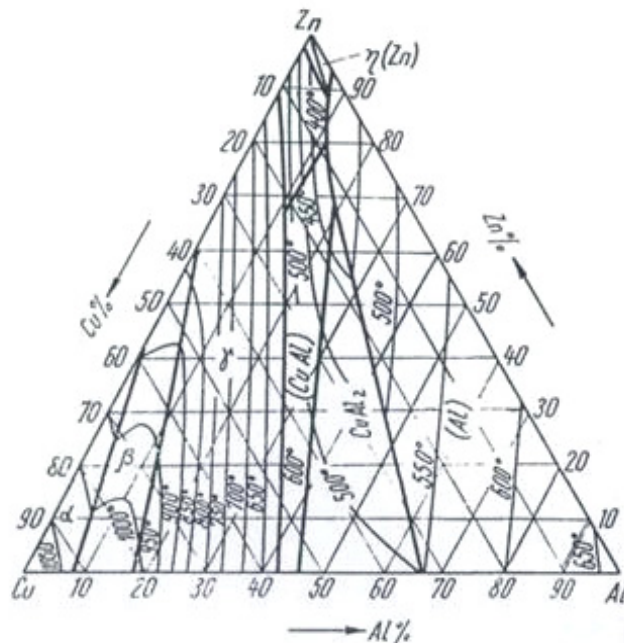


Figura 1.10. Diagrama ternară CuZnAl [3]

Influența aluminului asupra sistemului de referință Cu-Zn este de a îngusta domeniul de existență a fazei α deplasând totodată domeniul fazei β spre regiuni de concentrație mai scăzută în Zn [3]. Ca urmare a acestor deplasări, în gama compozițională de existență a aliajelor cu memorie a formei apare o creștere a domeniului de stabilitate a fazei β , cu atât mai importantă cu cât conținutul în aluminiu este mai ridicat.

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. Prima ordonare are loc la temperatura θ_{B_2} și are drept efect formarea unei suprafețe de tip B_2 , iar a doua apare sub temperatura θ_{DO_3} și are drept efect ordonarea în suprafețe de tip DO_3 . Pentru aliajele uzuale θ_{B_2} se situează în jurul valorii de 500°C iar θ_{DO_3} se situează la 350 - 400°C, în funcție de compoziție.

O reprezentare a acestei tendințe este prezentată în figura 1.11.

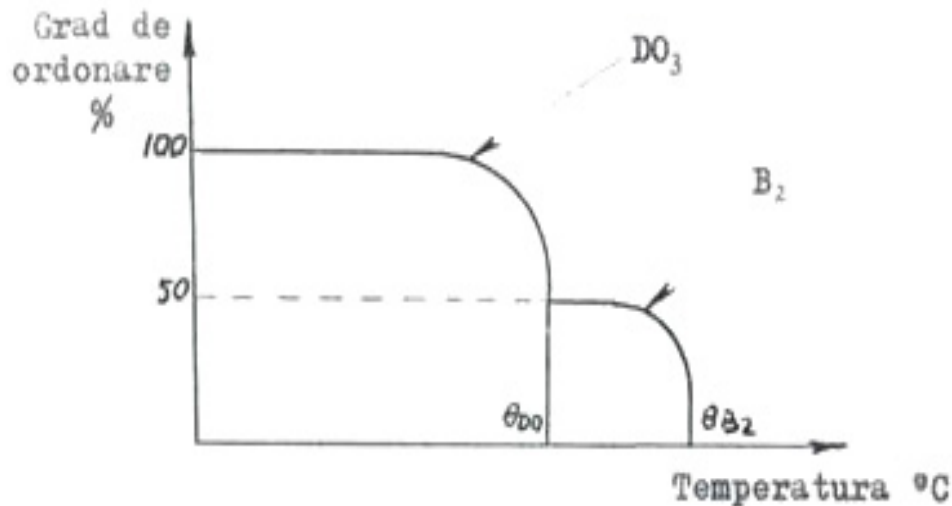


Figura 1.11. Evoluția gradului de ordonare în funcție de temperatură la aliajele CuZnAl [3]

Cele mai importante proprietăți ale acestor aliaje sunt prezentate în tabelul 1.3.

Tabelul 1. 3 Proprietățile aliajului cu efect de memorie a formei CuZnAl

Proprietățile aliajului cu efect de memorie a formei CuZnAl	
Temperatura de topire	950 - 1020°C
Densitatea	7800 - 8000kg/m ³
Rezistivitatea electrică	0,017 - 0,12 · 10 ⁻⁶ Ω
Conductibilitatea termică	120W/m°C
Coeficientul de dilatare	16 - 18 · 10 ⁻⁶ /°C
Căldura specifică	7000 - 9000 J/kg °C
Entalpia de transformare	700 - 800 J/kg
Modulul de elasticitate	70 - 100 GPa
Limita de curgere	150 - 300 MPa
Alungirea la rupere	10 - 15 %
Domeniul temperaturilor de transformare	- 200 + 120 °C
Histerezis	10 - 20 °C (Af, As)
Memorie în sens unic	50%
Temperatura de supraîncălzire	160 - 200 °C
Capacitatea de amortizare	30%
Rezistență la coroziune	acceptabilă

Temperatura martensitei start Ms și compoziția aliajului CuZnAl se prezintă în figura 1.12. Temperatura transformării martensitice poate fi ajustată în funcție de compoziția chimică a aliajului.

Figura 1.12 și relația de mai jos sunt utile pentru a se obține o estimare a temperaturii de transformare.

$$\text{CuZnAl: } Ms^{\circ\text{C}} = 2212 - 66,9\%Zn - 90,65\%Al \quad [8]$$

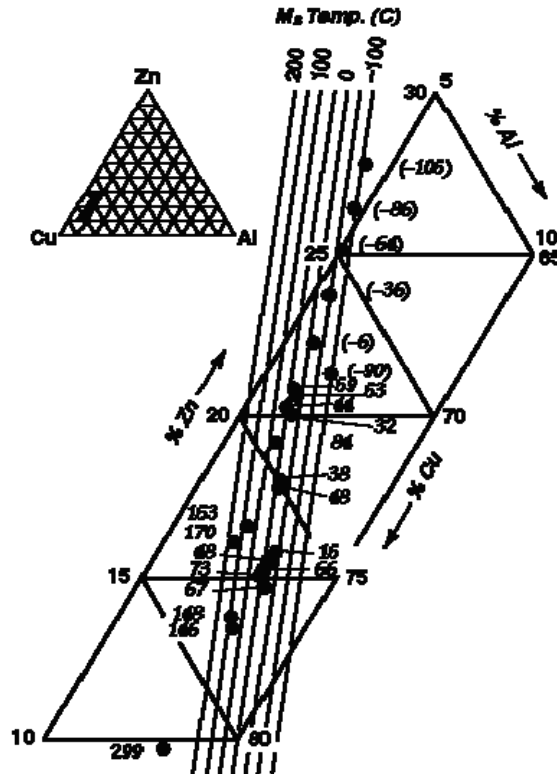


Figura 1.12. Temperatura Ms și compoziția aliajului cu memorie a formei CuZnAl [8]

Topirea aliajelor cu memoria formei pe bază de Cu este similară cu topirea aliajelor de aluminiu și a bronzurilor. Majoritatea aliajelor sunt topite prin inducție. Folosirea unui flux protector la topire și utilizarea gazelor inerte sau nitrogene în timpul topirii sunt necesare pentru a preveni evaporarea zincului și oxidarea aluminiului. Pudra metalurgică și solidificarea rapidă sunt folosite de asemenea pentru a rezulta aliaje cu grăunți fini fără aditivi de rafinare a grăunților.

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 [10]. 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.

1.8 Aplicații ale aliajelor cu memoria formei

Aliajele cu memoria formei, AMF, prin potențialul de care dispun și-au găsit o aplicabilitate directă în industrie, în prezent fiind exploatate în numeroase domenii care pot beneficia de comportamentul deosebit al acestor materiale inteligente.

Identificarea posibilelor aplicații ale aliajelor cu memoria formei, precum și înțelegerea modului cum acționează ele, se pot realiza evidențiind cu claritate principiile de utilizare ale aliajelor cu memoria formei (AMF):

- utilizarea efectului de memorie propriu-zis: vizează aplicațiile care folosesc AMF în structura reclamelor publicitare, în industria jucăriilor sau în opere de artă, utilizând efectul de memorie numai pentru aspectul lui „inedit”;
- utilizarea deplasării produse de efectul de memorie: permite acționarea sau activarea comandată a unor elemente, apărând un domeniu nou, actuatorica;
- utilizarea capacității de senzor: datorită modificării suferite de AMF sub acțiunea temperaturii, acestea pot fi folosite, cu succes, direct ca elemente senzoriale termice sau indirect ca senzori de curent;
- superelasticitatea: utilizată datorită capacității AMF de a realiza deformări de valoare ridicată (de aproximativ zece ori mai mare decât la aliajele obișnuite) în condițiile păstrării unei forțe aproximativ constante (se folosesc mai ales în domeniul medical, unde temperatura constantă a corpului uman constituie o premiză ideală);
- capacitatea de amortizare a vibrațiilor: permite folosirea acestor materiale acolo unde se impun condiții severe privind limitarea zgomotelor sau a vibrațiilor;

Pe baza principiilor de utilizare prezentate se dezvoltă trei direcții importante de aplicare în practică:

- înlocuirea subansamblelor realizate din materiale clasice cu subansamble realizate cu materiale cu memorie, care dispun de caracteristici superioare;
- simplificarea structurilor clasice prin reproiectarea acestora pornind de la caracteristicile fizico-chimice ale materialelor cu memorie;
- dezvoltarea unor noi aplicații care reprezintă soluții diferite față de cele existente și care au la bază proprietățile deosebite ale AMF.

1.8.1 Dispozitive de acționare realizate din aliaje cu memoria formei

Există dispozitive de acționare bazate pe utilizarea materialelor cu memorie, disponibile în varianta comercială, furnizate de firma DSM – Mission Critical Motion Control. Acestea asigură o mișcare de 28 mm, având posibilitatea să manevreze o forță de 9 N. Firul cu memorie este alimentat cu un curent de maxim 3A și o tensiune de 15 V. Prin alimentarea corespunzătoare, forța manevrată poate varia între 0 și 9 N, în timp ce deschiderea dispozitivului de acționare va fi cuprinsă între 0 și 28 mm.

O aplicație recentă este un SMAC (Shape Memory Actuated Cylinder: servo – motor cu memorie a formei), care poate înlocui sistemele de comandă tradiționale. În acest caz, un element electric auto-limitat (PTC) este integrat în axă și încălzește resortul din AMF. Acest resort se opune resortului de menținere a poziției prin ușița resortului și produce o mișcare liniară. Prin piuliță este posibilă reglarea momentului (temperaturii) de declanșare a resortului cu memorie a formei.

Principalul avantaj al acestui servo-sistem este deplasarea sa liniară și uniformă, astfel nemaifiind nevoie de un mecanism auxiliar care să transforme mișcarea de rotație într-o mișcare de translație. Caracteristicile acestui dispozitiv sunt: manipularea unei sarcini de până la 400N; deplasarea 10 mm (greutate: 400 N); activarea utilizând orice tensiune; forță 0,5 kgf.

Prima versiune destinată acționării unui „space gripper” (clești robotizați pentru spațiul cosmic) a fost concretizată într-un dispozitiv pentru manipularea experiențelor științifice într-o stație spațială [50].

1.8.2 Structuri mecanice acționate de pistoane cu materiale cu memorie

Ca element de bază a fost folosit un piston a cărui acționare se bazează pe un arc cu memorie. Arcul cu memorie internă intră în componența pistonului, într-o cameră inferioară, protecția acestui arc la suprasolicitări mecanice realizându-se prin includerea în structură a unui arc de suprasarcină.

O astfel de structură poate fi folosită cu succes la dispozitivele de prindere – eliberare ale mașinilor unelte, roboților, echipamentelor electrocasnice. Noua structură înlocuiește pistoanele hidraulice cu pistoanele cu materiale cu memorie.

1.8.3 Robotică

Robotica este unul din domeniile în care AMF au perspective frumoase de utilizare, în special acolo unde se dispune de spații mici sau, de exemplu, în medii ostile, cum sunt câmpurile magnetice intense care interzic utilizarea micromotoarelor electrice clasice [51].

De cele mai multe ori doar componente ale roboților se realizează din aliaje cu memoria formei. Din rândul ultimelor sisteme fac parte și mâinile acționate cu materiale cu memorie. O realizare notabilă este reprezentată de mâna realizată de compania Oaktree Automation.

Antebrațul mâinii adăpostește 108 fire în paralel, de Flexinol de 250 μ m, fire care permit închiderea și deschiderea mâinii, respectiv apucarea și eliberarea unui obiect. Această mână a fost folosită pentru a asigura comunicarea tactilă a persoanelor cu handicap vizual și auditiv.

Compania Hitachi Ltd. a realizat o mână având ca sistem de acționare, fire din materiale cu memorie. Cele 4 degete aveau o greutate de 4,5 kg și o lungime de 70 cm, inclusiv antebrațul, putând manevra o sarcină de 2 kg. Posibile aplicații ale acestei realizări au inclus, mediile ostile, micromanipularea și activitățile submarine.

A fost realizat, de asemenea, un prototip al unui robot construit din tuburi de AMF prin care se poate circula un lichid cald sau rece, variația de temperatură asigurând efectuarea mișcărilor. Acționarea se poate realiza în diverse medii, un exemplu fiind utilizarea aliajelor cu memoria formei în tehnica aerospațială. La telescopul spațial Hubble un știft din aliaj cu memorie Ni-Ti „și-a adus aminte” de forma sa (la temperatura de +155°C) și s-a îndreptat, permițând acționarea mecanismului de dirijare a celulelor solare.

Totodată, au fost dezvoltate și o serie de cercetări destinate construcției unei structuri robotice complet acționate de aliaje cu memorie.

Un exemplu comercial, în acest domeniu, care face parte, însă din sfera divertismentului, este robotul BioMetal Silent Demo, dezvoltat de TOKI Robotics [51].

1.8.4 Aliaje cu memoria formei în medicină

Datorită proprietăților și comportării excelente la acțiunea corozivă, acest tip de aliaj a deschis noi piețe și oportunități. Aliajele cu memoria formei de tipul NiTi sunt folosite într-o varietate de aplicații în medicină ca instrumente [52]. Aproximativ 90% din toate aplicațiile medicale fac uz de superelasticitate iar restul de 10% folosesc caracteristicile de deformare martensitică ale acestui tip de aliaj.

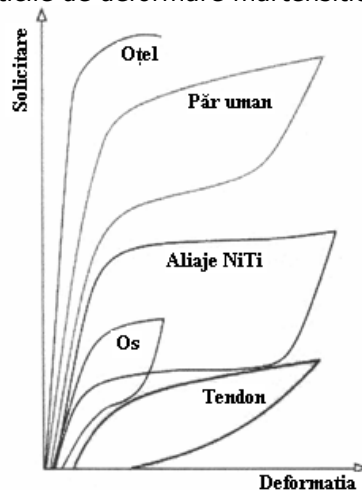


Figura 1.13. Dependența dintre deformația și solicitarea unor materiale/țesuturi folosite în medicină.

Depărtătorul din figura 1.14 este un instrument superelastic folosit cu precădere în operații pe cord deschis. Instrumentul se obține prin decuparea cu ajutorul unui laser de tăiere iar apoi este supus unui tratament termic pentru ca în utilizare să se depună un efort minim pentru deschiderea cavității toracice.



Figura 1.14. Depărtător

În figura 1.15 este prezentat un cateter folosit în chirurgia cardiovasculară pentru măsurarea diametrului interior și lărgirea vaselor coronariene. Principalul avantaj este flexibilitatea vârfului în formă de con. Instrumentul este pe deplin reutilizabil.

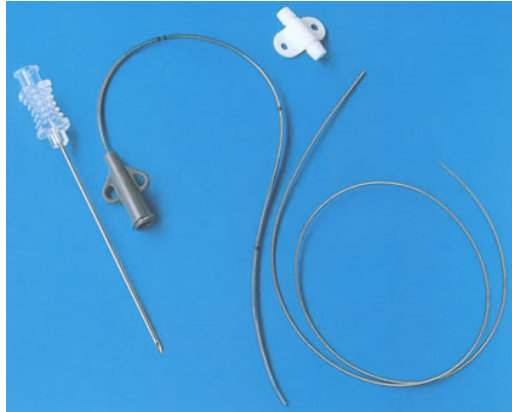


Figura 1.15. Cateter.

În figura 1.16 sunt prezentate diferite proteze - implanturi ce pot fi găsite pe piață. Aceste obiecte medicale pot fi elaborate sub formă de tuburi sau folii cu ajutorul laserului.

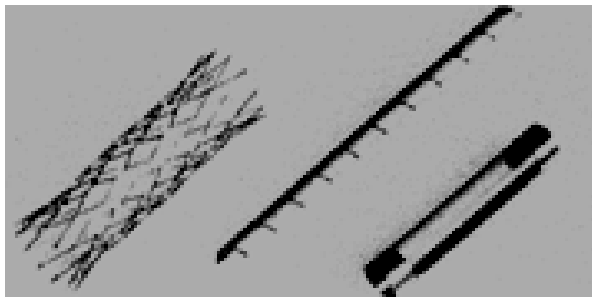


Figura 1.16. Repere procesate cu laser

1.8.5 Aliaje cu memoria formei în alte aplicații industriale

Componentele din aceste tipuri de aliaje sunt folosite într-un număr mare de soluții industriale, la navele terestre și cosmice ca de altfel în interconectarea de tubulatură. Alte arii de aplicații cum ar fi fabricarea de autovehicule și Formula 1 folosesc componente din aliaj NiTi. Evident multe din aceste aplicații se folosesc de efectul de memorie a formei al aliajului.

Un racord „mamă/tată” bazat pe efectul de contracție/ dilatare termică oferit de aliajul cu memoria formei este prezentat în figura 1.17.



Figura 1.17. Racord mamă / tată.

În figura 1.18 este prezentat un manșon de cuplare a tubulaturii din titan la navele spațiale, manșon care asigură conectivitatea bazându-se pe efectul termic de memorie a formei al aliajului ternar NiTiNb.

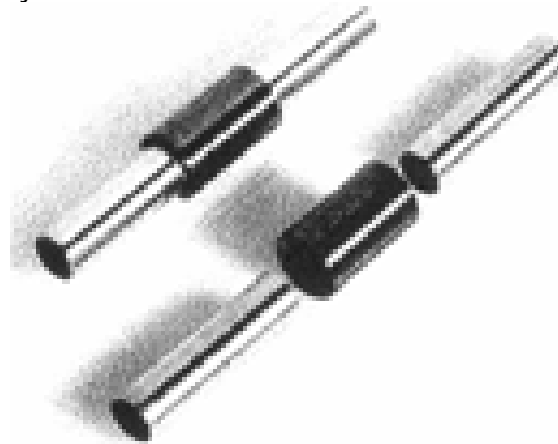


Figura 1.18. Manșon de cuplare

1.9 Oportunități de îmbinare a aliajelor cu memoria formei.

Aliajele cu memoria formei (AMF) pot fi îmbinate prin diferite procedee. O sistematizare a procedeelelor de îmbinare, este dată în figura 1.19.

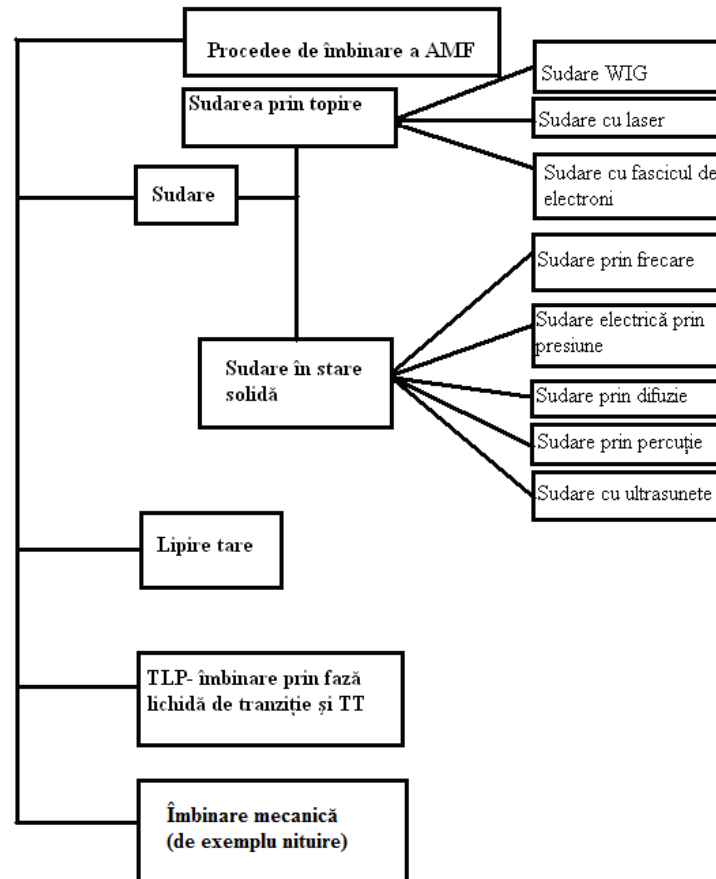


Figura 1.19. Prezentarea schematică a posibilităților de îmbinare a aliajelor cu memoria formei (AMF)

Selecția procedeeului 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.

În baza analizării tuturor acestor factori, proiectantul va fi cel ce optează pentru varianta finală.

Factorii care influențează alegerea procedurii de îmbinare, sunt prezentați mai jos:

- tipul materialului de bază din categoria AMF;
- grosimea componentului respectiv;
- mărimea reperului (ansamblu, subansamblu);
- proprietățile care trebuie atinse în zona îmbinării AMF (continuitate mecanică, efect de memorie a formei) și ZIT;
- limitele de aplicare a procedurii (dimensiuni – grosimi, mărimi, forme, componente);
- proprietățile termofizice;
- condițiile de solicitare impuse;
- condițiile de asigurare a calității.

1.9.1 Matricea cerințelor de proprietăți impuse îmbinărilor sudate din aliaje cu memoria formei.

De cele mai multe ori, îmbinările obținute prin sudare sau lipire, trebuie să aibă proprietăți identice celor ale materialelor de bază. Procedurii de îmbinare alese nu trebuie să altereze proprietățile materialelor de bază ce se îmbină. Datorită caracteristicilor inerente ale proceselor de sudare, unele proprietăți variază foarte mult de la o zonă a îmbinării la alta [113].

În timpul procesului de îmbinare, zona de îmbinare, sau uneori întreg ansamblul, sunt supuse acțiunii ciclurilor termice. Ca rezultat al acțiunii acestora, microstructura și proprietățile din diferite zone ale îmbinării pot fi diferite. De asemenea, este probabil ca îmbinarea să dezvolte o distribuție complexă a tensiunilor reziduale, reducând în timp, durata de viață a îmbinării.

Acceptând faptul că va exista o variație a proprietăților de-a lungul îmbinării, trebuie să se facă un compromis de genul optării pentru acele proprietăți ale îmbinării care trebuie „asociate” cu cele ale materialului de bază și ce proprietăți ale materialului de bază trebuie păstrate în îmbinare.

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 [115].

În cazul AMF, este logic să se sperie 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.

Dacă la aliajele structurale convenționale cum sunt oțelul, aliajele de titan sau aluminiu, pot fi obținute îmbinări corespunzătoare, în profida compozițiilor chimice diferite și a microstructurilor metalului de bază și ZIT-ului existent, în cazul aliajelor cu memoria formei, apar alte aspecte suplimentare.

Îmbinarea AMF, cu utilizarea procedeelor de îmbinare convenționale este foarte dificilă, datorită faptului că nu este posibil să se controleze atât de precis dezvoltarea microstructurală și compoziția chimică a zonei sudurii, pe cât necesită aceste materiale de bază [116].

1.9.2 Diferite procedee de îmbinare a aliajelor cu efect de memorie a formei

Există eforturi pentru realizarea de asamblări sudate pe bază de aliaje cu memorie a formei prin diverse procedee.

Sudarea aliajului Ni-Ti prezintă probleme majore în primul rând din cauza degradării materialului în zona de sudat ca urmare a încorporării de oxigen și a formării de compuși intermetalici fragili.

Între metodele analizate pentru sudarea aliajelor NiTi se enunță sudarea cu laser, sudarea prin fricțiune, sudarea cu plasmă sau brazarea, iar problemele calității îmbinărilor sudate apar atât în asamblările similare cât și disimilare.

În continuare s-au prezentat câteva exemple de aliaje cu memorie a formei sudate prin diferite procedee [115].

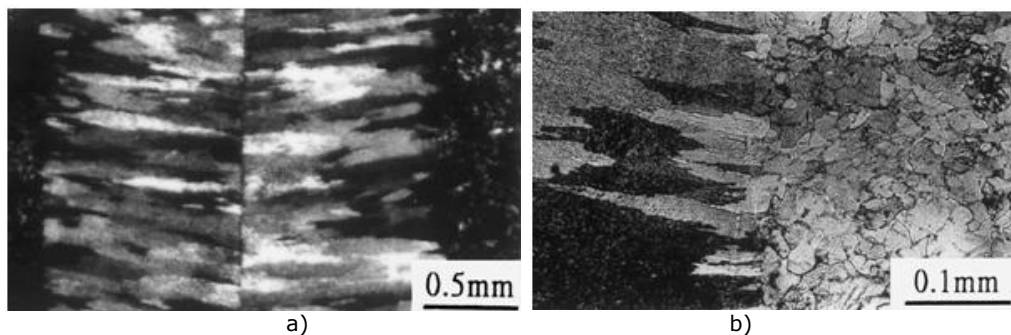
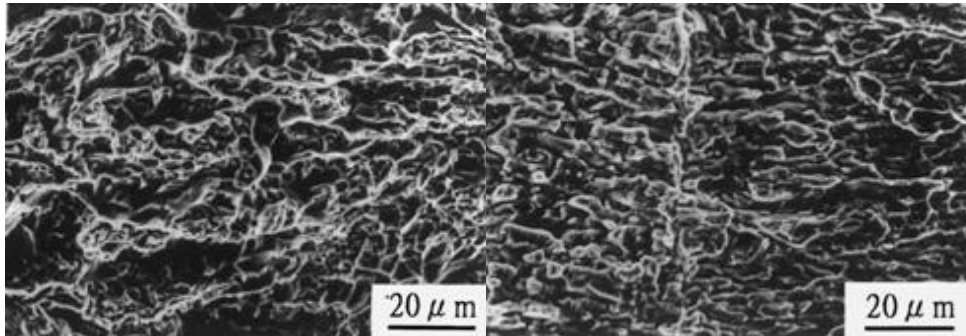


Figura 1.20 Microstructura aliajului NiTi
a- suprafața zonei sudată cu laser
b- limita zonei de fuziune [65]



a) b)
Figura 1.21 Microstructura aliajului Ni50Ti50
a- suprafața nesudată
b- NiTi – sudare cu laser [65]

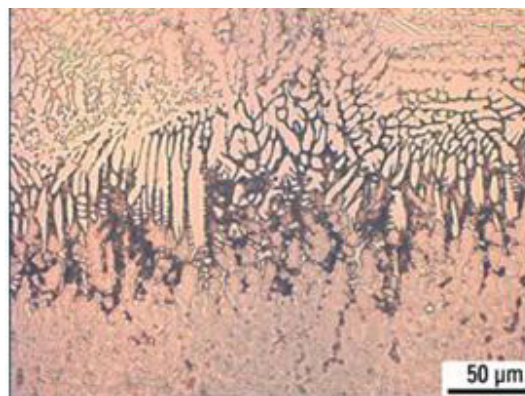


Figura 1.22 NiTi-NiTi sudare cu plasmă, zona de fuziune [58]

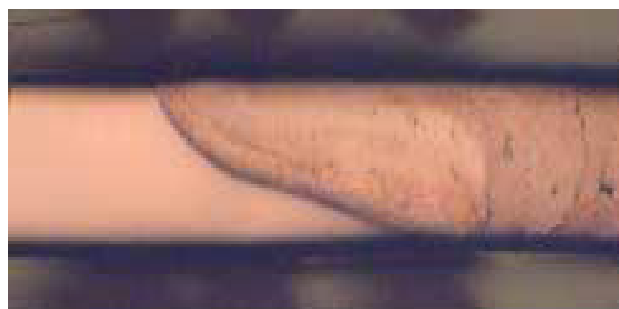


Figura 1.23 Microstructura - Ni-Ti sudat cu Hastelloy – zona de sudare [61]



Figura 1.24 Fisuri apărute la sudarea NiTi cu un oțel inoxidabil [62]

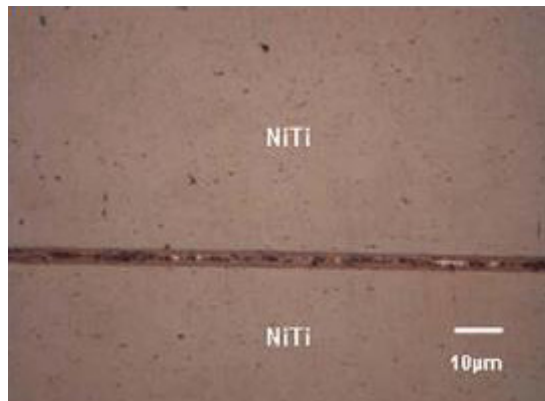


Figura 1.25 Microstructura aliajului NiTi lipit tare cu NiTi la 875°C timp de 5 minute cu aliajul CB [60]

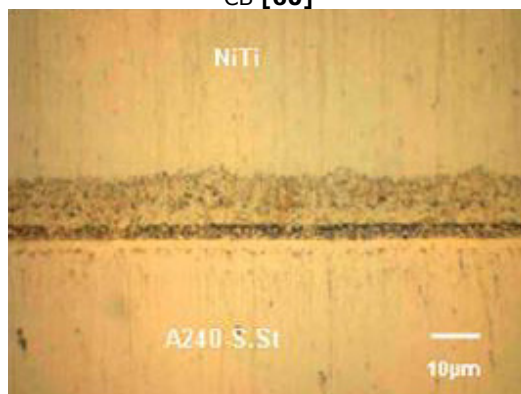


Figura 1.26 . Microstructura aliajului NiTi lipit tare cu oțelul inoxidabil A240 la 1000°C timp de 5 minute cu aliajul CB2 [59]

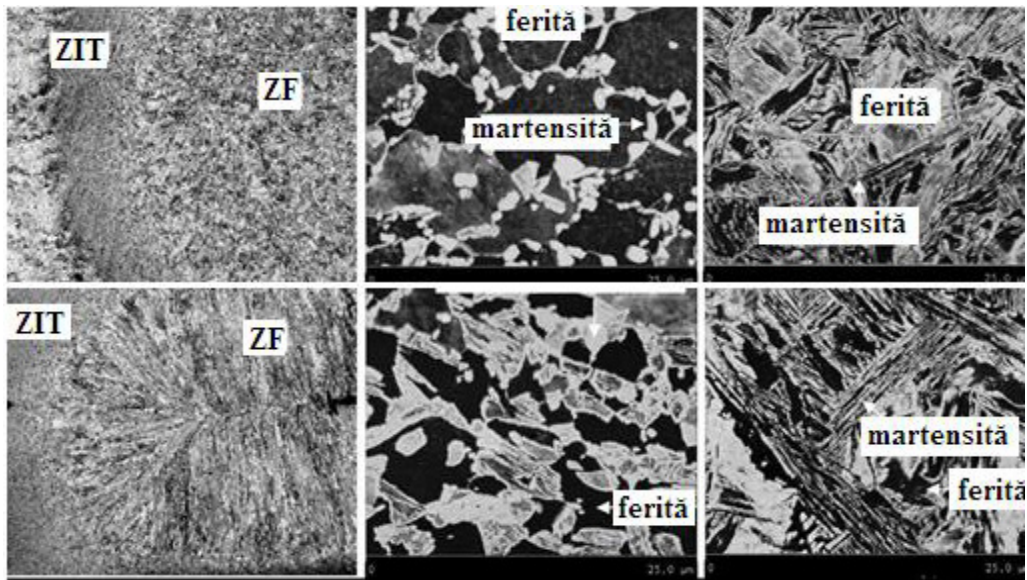


Figura 1.27. — Sudarea electrică prin presiune în puncte a aliajelor cu memorie a formei [58]

1.10 Obiectivele tezei de doctorat

1. Oportunitatea îmbinării prin sudare prin presiune a aliajelor cu memoria formei, cu stabilirea experimentală a parametrilor optimi ai procesului și aprofundarea mecanismului de formare a sudurilor la acțiunea ciclului termodeformațional
2. Caracterizarea microstructurii și a proprietăților mecanice ale îmbinărilor sudate prin presiune în puncte realizate din aliaje feroase FeMnSi și neferoase CuZnAl
3. Studiul procesului de sudare prin presiune cu energie înmagazinată în condensatoare care oferă avantajul reducerii puterii instalate și al unei dozări mai exacte a energiei din zona de contact. Întrucât timpul de descărcare este extrem de redus, de ordinul milisecundelor, iar căldura este generată doar de rezistența de contact, se preconizează inducerea unor modificări structurale favorabile la sudarea acestor materiale
4. Modelarea cu element finit a procesului de sudare prin presiune electrică în puncte a aliajelor cu memorie a formei.

CERCETĂRI ASUPRA PROCESULUI DE SUDARE ELECTRICĂ PRIN PRESIUNE ÎN PUNCTE A ALIAJELOR CU MEMORIE A FORMEI

2.1 Particularitățile sudării electrice prin presiune a aliajelor cu memorie a formei.

Realizarea unei îmbinării nedemontabile între două piese (materiale) presupune stabilirea unei legături între rețelele cristaline ale celor două materiale. Prin urmare, dacă cele două suprafețe ale pieselor s-ar apropia la distanțe comparabile cu parametrul rețelei cristaline (la distanțe interatomice), astfel ca între atomii celor două materiale să se manifeste forțe de interacțiune, s-ar realiza spontan o îmbinare sudată, nedemontabilă.

Stabilirea unei astfel de interacțiuni prin simpla suprapunere a celor două suprafețe ale unor corpuri metalice identice din punct de vedere al compoziției chimice, în condiții normale de presiune și temperatură, este imposibilă de realizat.

Dintre cauzele cele mai importante în acest sens se enumeră:

- imposibilitatea realizării unui contact între toate punctele ce aparțin celor două suprafețe (cea mai fină prelucrare a suprafeței poate asigura o rugozitate de 10^{-5} cm, pe câtă vreme distanțele interatomice sunt de ordinul a 10^{-6} – 10^{-7} cm);
- existența pe suprafața metalelor a unui strat nemetalic format din oxizi, molecule de aer absorbit, particule de praf ionizate, molecule de apă, etc.;
- existența barierelor de potențial pe suprafața metalelor care împiedică formarea legăturilor între rețelele cristaline ale celor două materiale [75].

Rezultă că pentru a putea obține o îmbinare nedemontabilă între cele două materiale este necesară asigurarea următoarelor două condiții:

- apropierea suprafețelor de îmbinat la o distanță comparabilă cu parametrul rețelei cristaline, distanță la care devine posibilă stabilirea interacțiunii energetice;
- stabilirea interacțiunii energetice între atomii rețelei cristaline aparținând doar celor două suprafețe de contact.

Realizarea celor două condiții presupune o activare energetică din exterior care poate fi de natură termică, prin introducerea unei cantități de căldură având ca efect creșterea temperaturii, sau activarea mecanică, prin acțiunea unor forțe, care produc o deformare plastică în zona îmbinării.

Corelația dintre cei doi parametri temperatură - presiune necesari realizării unei îmbinări sudate constituie o caracteristică specifică fiecărui material metalice. Îmbinarea se poate obține atât prin acțiunea separată cât și simultană a celor două forme de activare.

Curba trasată pentru fierul tehnic pur separă spațiul corespunzător parametrilor tehnologici presiune-temperatură în două domenii, și anume domeniul de sub curbă în care sudarea nu este posibilă respectiv domeniul de deasupra curbei în care sudarea se poate realiza.

În figura 2.1 se prezintă domeniul temperatură/presiune pentru realizarea unei îmbinări sudate.

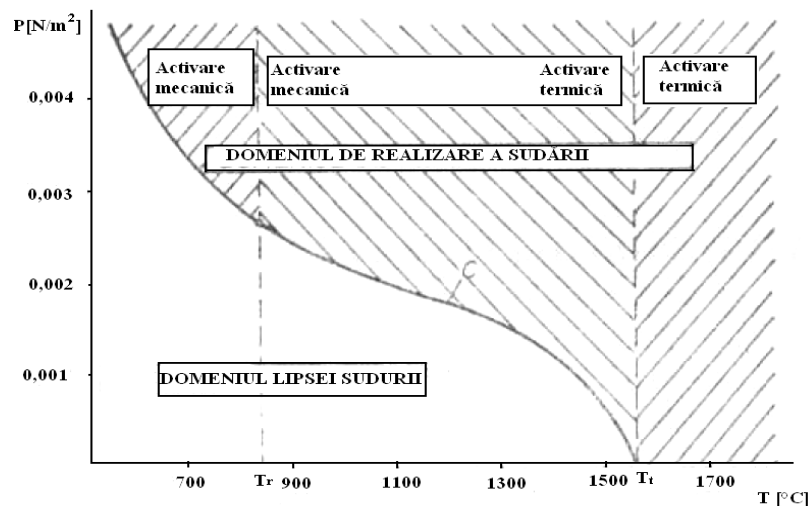


Figura 2.1 Domeniul de realizare a sudurii [75]

Domeniul din urmă la rândul lui este împărțit în trei zone specifice determinate de forma de activare care intervine pentru realizarea îmbinării sudate:

- zona activării mecanice, cuprinsă între temperatura mediului ambiant și temperatura de recristalizare T_r ($\approx 800^\circ\text{C}$), în care sudarea se realizează exclusiv sub acțiunea presiunii.

Deoarece procesul se desfășoară fără o activare termică însemnată (temperatura corpurilor este inferioară temperaturii de recristalizare) procesul de sudare este denumit „sudare prin presiune la rece”.

- zona acțiunii simultane a celor două forme de activare, cuprinsă între T_r - T_t (T_t - temperatura de topire), în care îmbinarea se realizează în stare solidă la valori ale presiunii din ce în ce mai mici pe măsura creșterii temperaturii.

Procesul de sudare corespunzător parametrilor tehnologici din această zonă este numit „sudare prin presiune” (sudare în stare solidă). Se poate considera deci că sudarea prin presiune la rece este un caz particular al sudării prin presiune ($T < T_r$).

- zona activării termice în care temperatura depășește valoarea temperaturii de topire a celor două materiale, îmbinarea obținându-se fără o deformare plastică. Procesul este cunoscut ca „sudarea prin topire”.

2.2 Clasificarea procedeelor de sudare prin presiune

Se poate face după mai multe criterii:

- *după temperatura atinsă în zona sudării:*
 - sudare la rece;
 - sudare în stare solidă la cald;
 - sudare prin presiune prin topire .
- *după sursa de energie utilizată pentru încălzirea componentelor:*
 - efectul Joule-Lenz la trecerea unui curent electric alternativ sau continuu;
 - arcul electric;
 - flacăra de gaze;
 - focul de forjă;
 - reacția exotermă;
 - frecarea între două piese;
 - energia US.
- *în funcție de forma îmbinării:*
 - cap la cap;
 - prin suprapunere;
 - în cruce.
- *în funcție de caracteristicile tehnologice ale procedeului:*
 - sudarea electrică:
 - prin rezistență: - cap la cap – în stare solidă SSS;
 - prin topire intermediară STI: cu topire directă sau preîncălzire,
 - prin suprapunerea:
 - în puncte SPP;
 - în relief SPR;
 - în linie SPL,
 - cu curenți de înaltă frecvență CIF;
 - cu arc electric rotitor;
 - cu energie înmagazinată;
 - sudarea la rece;
 - sudarea prin forjare;
 - sudarea prin frecare;
 - sudarea prin explozie;
 - sudarea cu US;
 - sudarea prin difuzie;
 - sudarea cu flacăra de gaze;
 - sudare cu termit;

2.3 Principiul procesului de sudare prin presiune în puncte

Constă în realizarea unei îmbinări sudate între suprafețele de contact a două sau mai multe componente suprapuse în zonele prin care trece curentul de sudare. Schema de principiu a procesului este prezentată în figura 2.2.

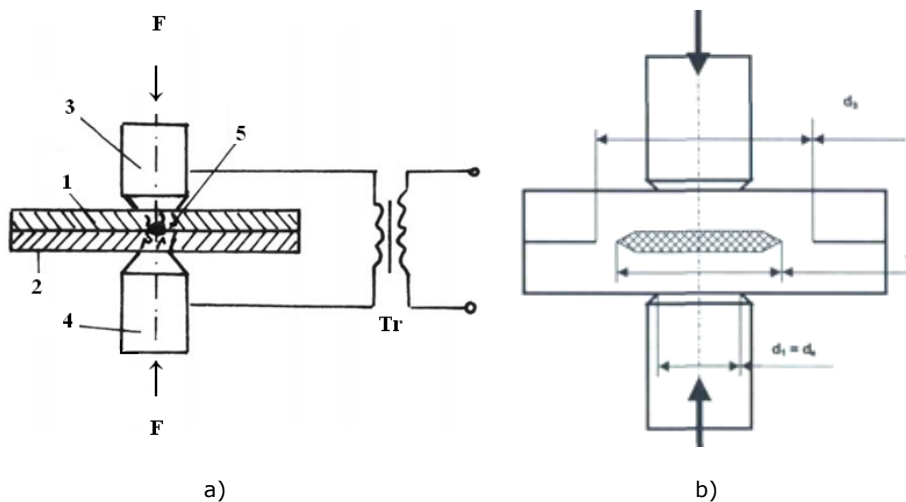


Figura 2.2 Schema de principiu la sudarea SPP

Principiul de lucru este cel prezentat în figura 2.2, unde componentele de sudat sunt strânse între electrozii de contact (3 și 4), cu o forță F . Ei sunt conectați la sursa de curent, ce furnizează un curent de intensitate ridicată (de ordinul miilor de amperi) și o tensiune mică (de ordinul volților).

La început, încălzirea maximă se obține la contactul componentelor apăsate de electrozi deoarece rezistența de contact este mai mare, iar rezistența de contact electrod-piesă este mică. Rezistența de contact scade însă foarte repede până la anularea ei datorită încălzirii locale și a acțiunii forței de apăsare ca urmare a creșterii secțiunii în zona de contact (înmuierea și aplatizarea asperităților suprafețelor). Încălzirea în continuare a componentelor are loc datorită creșterii rezistivității electrice a materialului componentelor fapt ce intensifică efectul Joule – Lenz prin creșterea rezistenței volumice. Prin urmare componentele se încălzesc în continuare. Pentru oțeluri nealiat rezistivitatea crește de cca. zece ori în apropierea nucleului topit față de valoarea ei la temperatura ambiantă.

Când temperatura atinge o anumită valoare, începe formarea unui nucleu topit (diametrul d_2 din figura 2.2 b), înconjurat de o zonă de sudare în stare solidă (diametrul d_3 , figura 2.2 b).

Dacă curentul nu se întrerupe rezultă un nucleu topit cu diametrul d_2 , care este înconjurat în planul de contact de un inel d_3 de grăunți cristalini comuni formați prin sudarea în stare solidă sub acțiunea forței de apăsare.

O operație simplă de sudare prin presiune în puncte necesită parcurgerea următoarelor faze (figura 2.3).

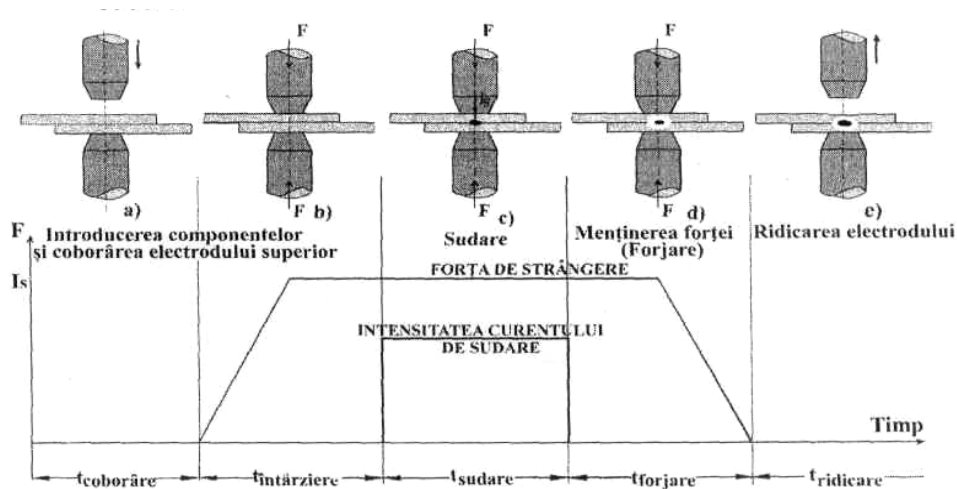


Figura 2.3 Fazele operației de sudare electrică prin presiune în puncte

- a) introducerea componentelor de sudat suprapuse între electrozii de contact, în poziția necesară;
- b) coborârea electrodului superior și strângerea componentelor între cei doi electrozi cu forța F ;
- c) conectarea curentului de sudare pentru un timp determinat, care duce la inițierea și dezvoltarea nucleului topit (sudarea);

- d) întreruperea curentului de sudare și solidificarea nucleului topit sub acțiunea forței de strângere F (forjarea);

- e) ridicarea electrodului de contact superior și retragerea componentelor, urmând ca succesiunea fazelor să se repete pentru un alt punct de sudură.

Diagrama prezentată în (figura 2.3), reprezintă un ciclu de sudare, în care forța de sudare și intensitatea curentului de sudare au valori constante în timp.

În cazurile concrete de sudare este necesară stabilirea judicioasă a duratei fiecăreia din fazele prezentate, astfel încât să se poată obține o calitate corespunzătoare a punctului sudat, în condițiile unei productivități ridicate:

- 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 sudare, încălzirea și formarea nucleului topit prin efect Joule Lentz în zona de contact dintre componente;
- întreruperea curentului de sudare (după un timp foarte scurt) și menținerea forței de apăsare;
- anularea forței de apăsare și retragerea electrodului superior.

Caracteristicile mecanice ale punctului sudat sunt influențate de însușirile metalului din nucleul topit și ZIT precum și de dimensiunile nucleului topit.

2.3.1 Clasificarea sudării electrice prin presiune în puncte SPP

- după poziția electrozilor:
 - sudarea SPP directă, la care electrozi de contact sunt plasați de o parte și de alta a componentelor;
 - sudarea SPP indirectă, la care electrozii de contact sunt plasați de aceeași parte a componentelor; aceasta se poate realiza folosind un singur electrod de contact, sau doi electrozi de contact plasați pe o singură parte.
- după numărul de puncte realizate:
 - sudarea în puncte individuale prin realizarea unui singur punct;
 - sudarea în puncte duble, la care pentru realizarea fiecărui punct se utilizează câte un electrod de contact și un electrod comun sub formă de placă.

Această variantă se folosește la sudarea componentelor de maxim 1,5...2 mm grosime. Dacă componenta inferioară are o grosime de 2...3 ori mai mare decât cea superioară se poate renunța la placa de cupru.

sudarea în puncte multiple, când se utilizează mai mulți electrozi de contact, realizându-se două sau mai multe puncte simultan sau într-o secvență controlată automat.

2.3.2 Condițiile de formare a îmbinărilor sudate

Pentru a se forma o îmbinare sudată trebuie ca în zona de contact dintre componentele de sudat să se formeze un nucleu de metal topit.

Formarea punctului sudat are loc în trei etape principale:

- prima etapă începe cu conectarea curentului, când se formează contactul electric dintre componente.

Metalul componentelor se încălzește și se dilată, astfel că se mărește spațiul dintre componente.

După formarea nucleului de metal topit, sub acțiunea forței de apăsare, acesta este împins înspre marginile solide, astfel că se formează o bariera în jurul metalului topit.

- în a doua etapă, dimensiunile nucleului topit cresc (în funcție de grosimea componentelor), în timp ce suprafața de contact se mărește.

Impuritățile superficiale de pe componente se amestecă cu metalul topit și sunt împinse spre marginile lui. Metalul se dilată în continuare și este deformat plastic.

- etapa finală începe cu deconectarea curentului.

Metalul topit se solidifică și recristalizează, formându-se punctul sudat.

Forța de apăsare are rolul de a favoriza contactul dintre componente, de a împiedica expulzările de metal topit înaintea solidificării lui și de a împiedica accesul aerului în zona de îmbinare.

De asemenea, prin intermediul ei se poate controla procesul de recristalizare.

Principalele fenomene care apar la sudarea în puncte sunt:

- formarea tensiunilor remanente și modificări de forma la răcire,
- efectul căldurii asupra metalului din zona influențată termic (ZIT),
- interacțiunea dintre materialele componentelor și ale electrozilor.

Aceste fenomene produc defecte: fisuri, retasuri, amprente, expulzări, porozități.

2.3.3 Parametrii regimului de sudare prin presiune în puncte

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
 - grosimea materialului,
 - diametrul la vârf al electrodului de contact,
 - calitatea suprafețelor în contact cu componentele de sudat.
 - factori constructivi
 - influența circuitului secundar și a masei magnetice introdusă între brațele instalației de sudat,
 - fenomenul de șuntare,
- amplasarea punctelor față de marginea componentelor de sudat, etc.

2.3.4 Pregătirea suprafețelor pentru sudarea SPP

Pentru a obține calitatea ridicată și uniformă a punctelor sudate este necesară o pregătire corespunzătoare a suprafețelor componentelor.

Pregătirea cuprinde, de obicei, două etape:

- îndepărtarea murdărilor, grăsimilor, uleiurilor sau vopselelor utilizând solvenți ca acetona, benzina, etc;
- curățarea mecanică sau chimică a stratului de oxid în funcție de importanța construcției din care face parte îmbinarea.

Curățarea mecanică se face în soluție de acid ortofosforic cu bicarbonat de potasiu și apă sau soluție de acid azotic cu acid fluorhidric în apă.

O îmbunătățire a condițiilor de sudare se obține printr-o creștere și descreștere controlată (lentă) a curentului. Prin creșterea lentă se favorizează stabilirea unui contact bun între electrozii de contact și componente înainte de a se atinge valoarea maximă a curentului, micșorându-se astfel rezistența de contact dintre electrozi și componente R_c . Rezistența R_c fiind mică, căldura degajată la contactul electrozi-componente este nesemnificativă și se evită astfel lipirea electrozilor de componente mărindu-se durata lor de utilizare.

Micșorarea rezistenței R_c posibilă ca urmare a creșterii lente a curentului permite micșorarea forței de apăsare fapt ce conduce la reducerea adâncimii amprentei.

Descreșterea lentă a curentului împiedică solidificarea rapidă a nucleului topit, permițând astfel o forjare mai bună a punctului și ca urmare evitarea formării fisurilor sau golurilor punctului sudat.

La sudarea componentelor cu grosimi până la 1,5 mm se obțin rezultate bune dacă forța de apăsare este constantă. În acest caz presiunea necesară este de 160...220 MPa valori mari corespunzând aliajelor cu rezistență mecanică ridicată.

La sudarea componentelor cu grosimea mai mare de 1,5 mm se utilizează o forjare ulterioară sudării (după întreruperea curentului) cu o forță de (2...4) ori mai mare ca forța din timpul sudării.

În unele cazuri, când nu se aplică creșterea controlată a curentului, înainte de conectarea acestuia se mărește forța mai mult decât valoarea necesară sudării propriu-zise în vederea realizării unui contact electric bun între electrozi și componente.

Dacă se sudează două componente de grosime inegală, parametrii regimului de sudare se aleg corespunzător componenteii mai subțiri.

O ușurare a condițiilor de sudare se obțin prin plasarea între electrozi și componente a unor plăcuțe din oțel inoxidabil cu grosimea de 0,1...0,2 mm.

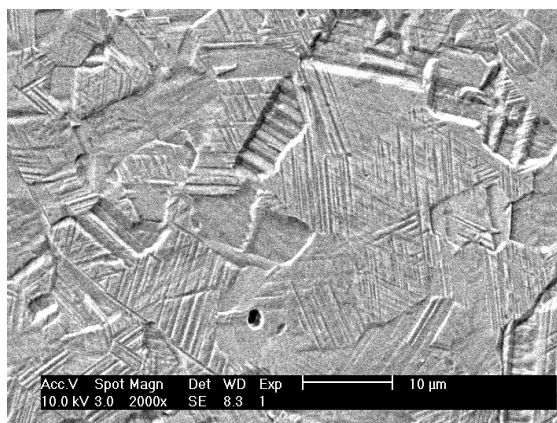
2.4 Rezultate experimentale

În tabelul 2.1 se prezintă ecartul compoziției chimice a aliajului pe bază de FeMnSi, respectiv CuZnAl utilizate în cadrul experimentelor.

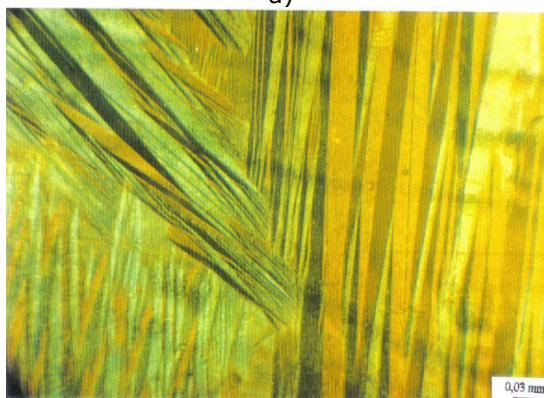
Tabelul 2.1. Compoziția chimică a aliajelor cu efect de memorie a formei

FeMnSi ($Fe_{62}Mn_{32}Si_6$)		CuZnAl ($Cu_{70}Zn_{23}Al_5$)	
Compoziția chimică [%]		Compoziția chimică [%]	
Fe	Rest	Cu	Rest
Mn	28-34	Zn	25 - 35
Si	4-6,5	Al	4 - 6

În figura 2.4 sunt prezentate imaginile microstructurale ale celor două tipuri de aliaje cercetate.



a)



b)

Figura 2.4 Microstructura celor două tipuri de aliaje:
a - aliajul $Fe_{62}Mn_{32}Si_6$; b - aliajul $Cu_{70}Zn_{23}Al_5$

Experimentele au fost conduse pe o instalație PPN28 din dotarea firmei Zopas prezentată în figura 2.5, controler sudură MIYACHI model WELTOUCH CT110. Electrozii folosiți sunt din Erconit, cu suprafața de atac de 5 x 4,2mm.



Figura 2.5 Vederea de ansamblu a instalației de sudare electrică prin presiune în puncte PPN28.

2.4.2 Descrierea instalației de sudare PPN28

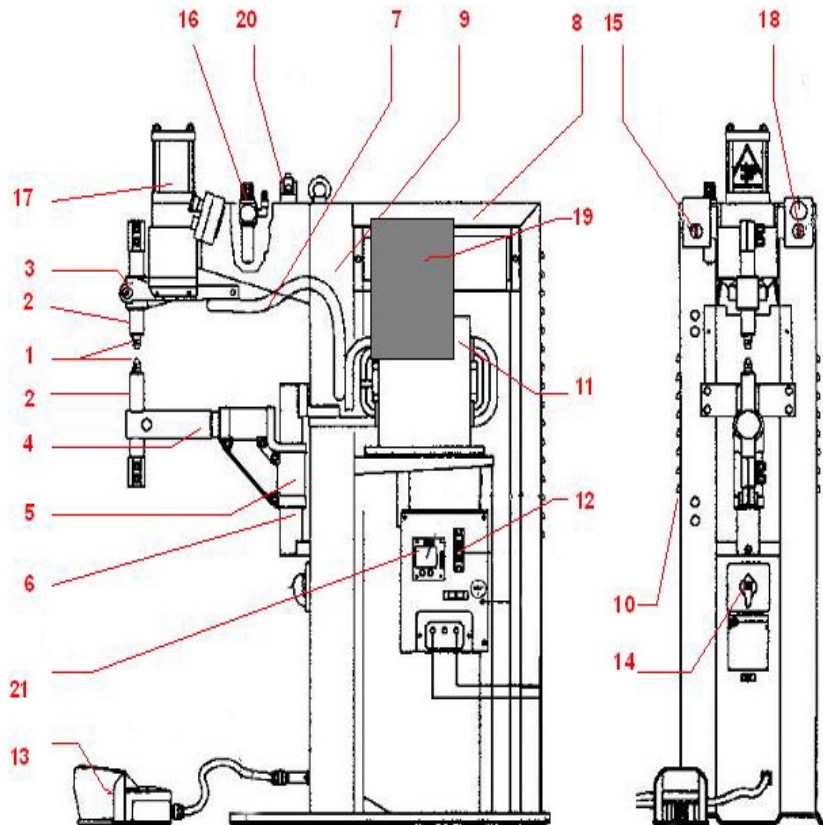


Figura 2.6 Instalația de sudare electrică prin presiune

Părțile componente ale acestei instalații (figura 2.6) sunt:

- 1 - electrozi de contact;
- 2 - portelectrozi;
- 3 - braț superior;
- 4 - braț inferior
- 5 - suport pentru brațul inferior;
- 6 - suport pentru reglarea brațului inferior;
- 7 - cuplaj electric elastic;
- 8 - carcasă - partea superioara;
- 9 - carcasă - partea frontala;

- 10 – fante (în carcasa) de aerisire;
- 11 – transformator de sudură;
- 12 – legarea la rețea (tensiunea de alimentare de 380 V);
- 13 – pedala de picior;
- 14 – pornire / oprire generală;
- 15 – buton de acționare (funcționează doar apăsat simultan cu butonul 18);
- 16 – manometru și filtru de aer
- 17 – cilindru de presiune;
- 18 – buton de acționare (funcționează doar apăsat simultan cu butonul 15);
- 19 – controler – ul (dispozitivul de reglare a parametrilor);
- 20 – drosel;
- 21 – minitransformator (pentru circuitul de comanda).

Circuitul de comandă al instalației de sudare este alimentat de la secundarul unui transformator, separat de cel care generează curentul de sudare, și care furnizează o tensiune de 24 V curent continuu. Primarul transformatorului de comandă este alimentat tot de la rețeaua de alimentare trifazată.

Instalația este cuplată la circuitul de aer comprimat, care are rolul de a deplasa brațele, și de a transmite forța de apăsare la sudare.

Această forță este transmisă prin intermediul electrozilor. Reglarea forței de apăsare se face prin intermediul reglării presiunii de lucru de la manometru.

De asemenea, instalația de sudare este alimentată la circuitul de apă, care are rol de răcire. Este de menționat că instalația este dotată cu termostat, care întrerupe funcționarea instalației (se întrerupe circuitul de comandă) în cazul în care debitul de apă este insuficient (adică nu se realizează răcirea), ceea ce duce la supraîncălzirea transformatorului și a circuitului de sudare. De asemenea, dacă circuitul de apă este obturat, este posibil ca anumite instalații să nu sudeze (există un presostat care detectează lipsa apei din circuit).

Faza de pornire a operației de sudare

Ciclul de sudare poate începe ca urmare a acționării:

- pedalei (trebuie introdusa cheia);
- apăsarea concomitentă a butoanelor.

Important responsabilul de producție trebuie să se asigure că electorul cu cheie este în poziția cea mai potrivita pentru munca care trebuie sa se execute.

Pornirea ciclului prin pedala de picior necesită introducerea cheii și poate fi folosită doar atunci când piesele de sudat sunt prea mari pentru a permite ca mâinile operatorului să ajungă în zona de lucru a electrodului.

Pornirea ciclului de sudare prin apăsarea simultană a butoanelor este utilizată când piesele de sudat nu sunt prea mari. In acest caz, șeful de producție trebuie să poziționeze cheia astfel încât să nu se poată acționa începerea ciclului de sudare prin pedala.

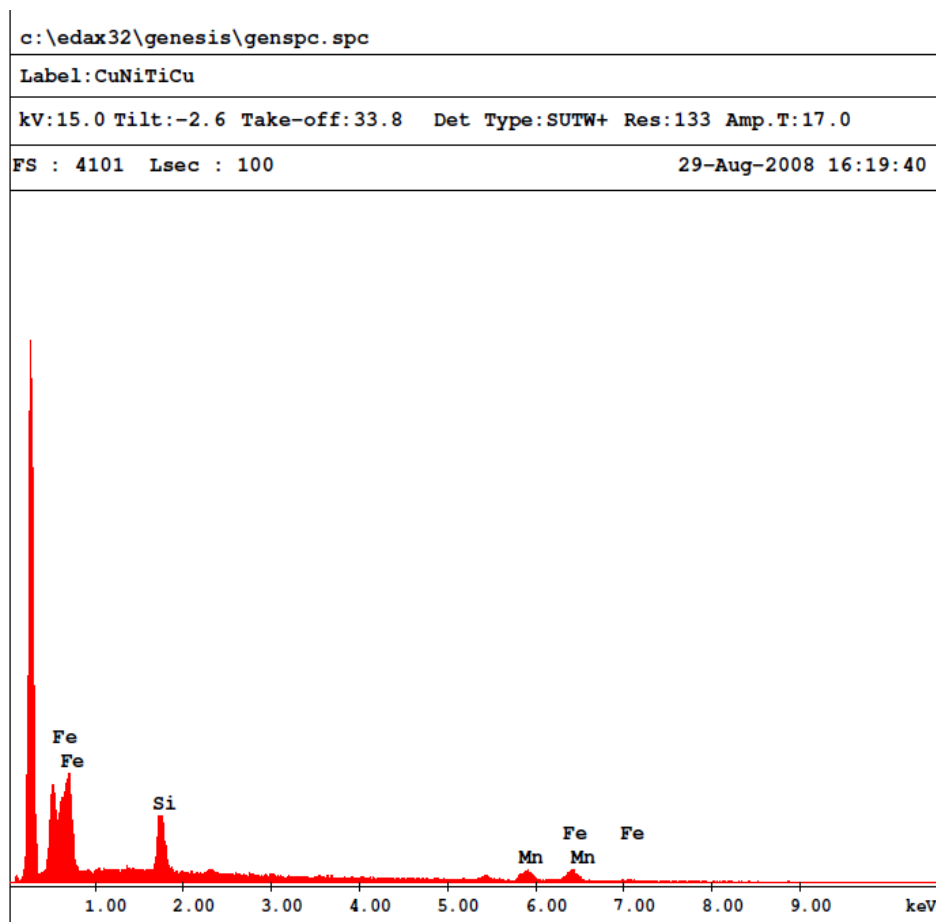
Reglarea forței de apăsare

Trebuie să se stabilească cu ajutorul reductorului de presiune valoarea forței pe care o dorim, in funcție de sudura care trebuie executata.

In cazul instalațiilor echipate cu cilindri standard, o creștere a presiunii aerului cu un bar corespunde la **380 N** (pentru modelul PPN 28).

Materialele folosite la procedura experimentală sunt aliajele $\text{Fe}_{62}\text{Mn}_{32}\text{Si}_6$, având grosimea: 0,52-0,54mm; și lățimea: 4,58-4,75mm, și cel cu bază de cupru $\text{Cu}_{70}\text{Zn}_{23}\text{Al}_6$, având grosime: 0,4 – 0,5mm, lățime: 3 – 4 mm.

În figura 2.7 se prezintă spectrul de dispersie în energie a razelor X pentru aliajul FeMnSi și spectrul de difracție pentru aliajul CuZnAl.



a)

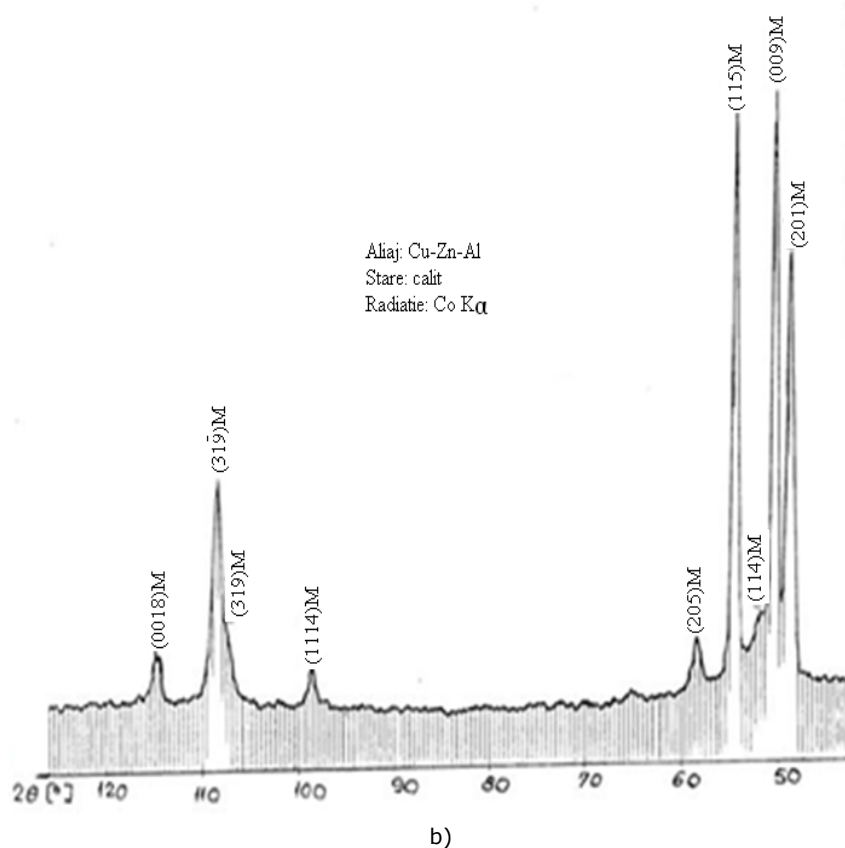


Figura 2.7 a). Spectrul de dispersie în energie a razelor X la aliajul $Fe_{62}Mn_{32}Si_6$.
b). Curba de difracție obținută pentru aliajul $Cu_{70}Zn_{23}Al_5$.

Pentru stabilirea experimentală a parametrilor optimi ai procesului de sudare (curentul de sudare, I_s , timpul de curent, t_c și forța de apăsare, F), s-a pornit de la proprietățile particulare ale aliajelor ce urmează a fi îmbinate și de la grosimea acestora, livrate sub formă de benzi.

În tabelul 2.2 și 2.5 sunt redată valorile parametrilor de regim reținute pentru o analiză comparativă în urma unui număr mare de experimente. Se face observația că tipul, forma și dimensiunile electrozilor s-au păstrat constante.

Ei au dimensiuni mici și sunt realizați din două părți: o parte de prindere, executată dintr-un material bun conducător de electricitate și o parte activă, cu o conductivitate electrică și termică relativ bună, dar cu bune caracteristici de rezistență mecanică și rezistență la uzare. Aceste părți active sunt special realizate mai lungi pentru a putea fi recondiționate periodic, în vederea asigurării unei bune suprafețe de contact.

La componentele subțiri, diametrul punctului sudat este de cca. 1.3 din diametrul electrozilor.

La componentele groase, cu cât dimensiunile electrozilor sunt mai mici, cu atât crește tendința liniilor de curent de a se extinde, ceea ce determină o densitate de curent redusă la contactul componentelor.

De aceea, este posibil ca uneori să apară nuclee de metal topit distincte în interiorul componentelor.

Tabelul 2.2 Parametrii utilizați la sudarea aliajului FeMnSi.

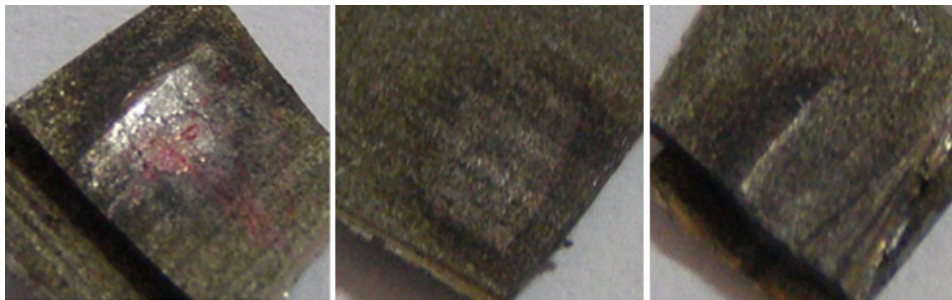
Proba I	Proba II	Proba III
SQ = 25 per	SQ = 25 per	SQ = 25 per
W1 = 0	W1 = 0	W1 = 0
C1 = 0	C1 = 0	C1 = 0
S1 = 0	S1 = 0	S1 = 0
W2 t_s = 3 per(0,06s) I_s = 3,5KA	W2 t _s = 6 per (0,12s) I _s = 2,5KA	W2 t _s = 6 per (0,12s) I _s = 2,0KA
C2 = 0	C2 = 0	C2 = 0
W3 = 0	W3 = 0	W3 = 0
S2 = 0	S2 = 0	S2 = 0
HO = 10 per	HO = 10 per	HO = 10 per
UNGHI DESC.= 180	UNGHI DESC.= 180	UNGHI DESC.= 180
Pres. = 3,4 - 3,7 bari	Pres. = 4,7 - 5 bari	Pres. = 4,7 - 5 bari
Observații: SQ = reglarea timpului, W1 = timp de curent (sudare), C1 = timp de pauză (de răcire) I, S1 = panta de creștere a curentului (timp de creștere), W2 = timp de curent (sudare) II, C2 = timp de pauză de răcire, W3 = timp de curent (de sudare) III, S2 = panta de scădere a curentului (timp de scădere), HO = timp de menținere post-sudare (răcire controlată), t _s = timpul de sudare, I _s = intensitatea curentului de sudare, Forța de apăsare (presiunea)		

Pentru optimizarea acestor parametri 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. În acest fel a fost restrâns câmpul de valori din care se vor selecta parametrii optimi, ținând seama și de caracteristicile mașinii de sudare și de condițiile concrete de desfășurare a operației.

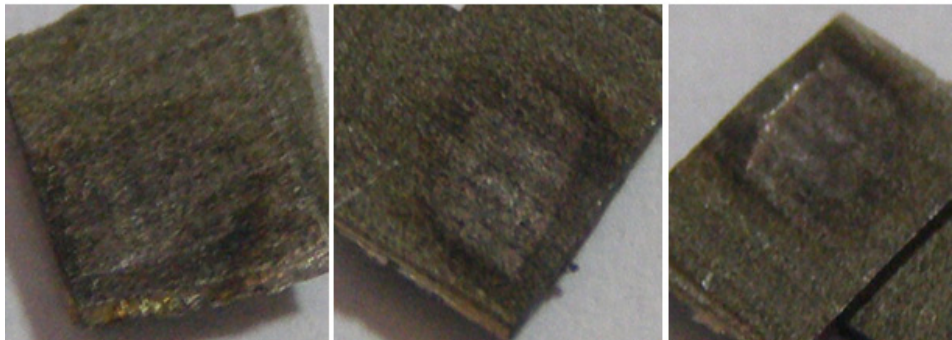
2.5 Analiza macro și microscopică asupra sudurilor din aliaje FeMnSi

Analiza macroscopică și microscopică a probelor sudate a permis obținerea de informații referitoare la calitatea acestora și la valorificarea în practică a concluziilor la care s-a ajuns:

- la valori mari ale curentului de sudare, 3,5 kA, timp de sudare scurt, 3 per (0,06s), și presiune mare, 3,4 - 3,7 bari, apare străpungere de material (figura 2.8, proba a și b),
- la valori ale curentului de 2,5 kA, timp de sudare mare, 6 per (0,12s), și o presiune mărită de 4,7 - 5 bari, se observă o îmbunătățire a calității punctului sudat (figura 2.8, proba c și d),
- în fine la valori ale curentului de 2 kA, timp de sudare și presiune constantă calitatea punctului sudat este foarte bună (figura 2.8, proba e și f).



a – proba I, zona superioară, b – proba I, zona inferioară c – proba II, zona superioară



d – proba II, zona inferioară, e – proba III, zona superioară, f – proba III, zona inferioară

Figura 2.8 Macrostructura probelor sudate.

Examinarea micrografică a secțiunilor perpendiculare pe axa longitudinală a sudurii (figura 2.9) demonstrează că la valori mari ale curentului de sudare și timpilor scurți de operare se produce o evacuare a metalului topit sub formă de scântei (fenomen numit „expulzare”), iar calitatea punctului sudat este degradată (figura 2.9 a...d).

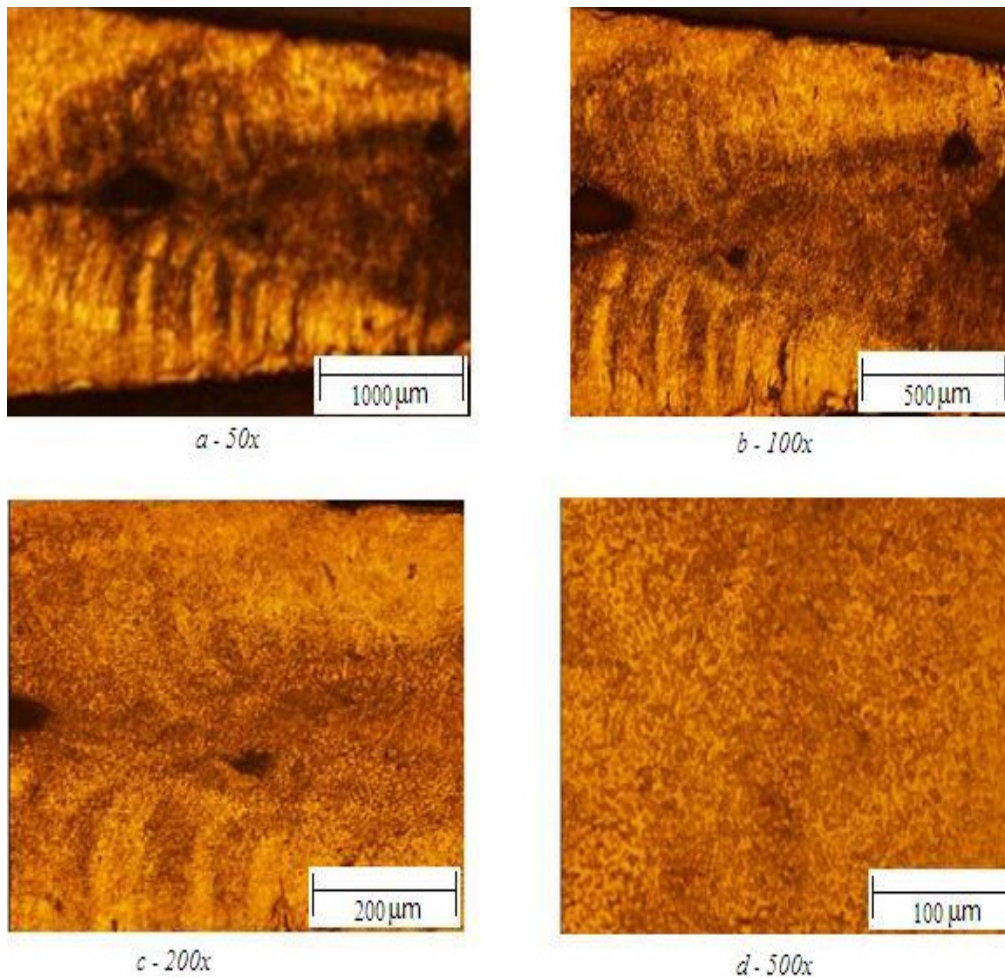


Figura 2.9 Micrografii ale probelor sudate după regimul I

Reducerea curentului de sudare la valori de 2,5kA concomitent cu mărirea ușoară a timpului de operare și a forței de apăsare, îmbunătățește comportarea la sudare, deși în unele locuri mai apar zone străpunse (figura 2.10 a...d).

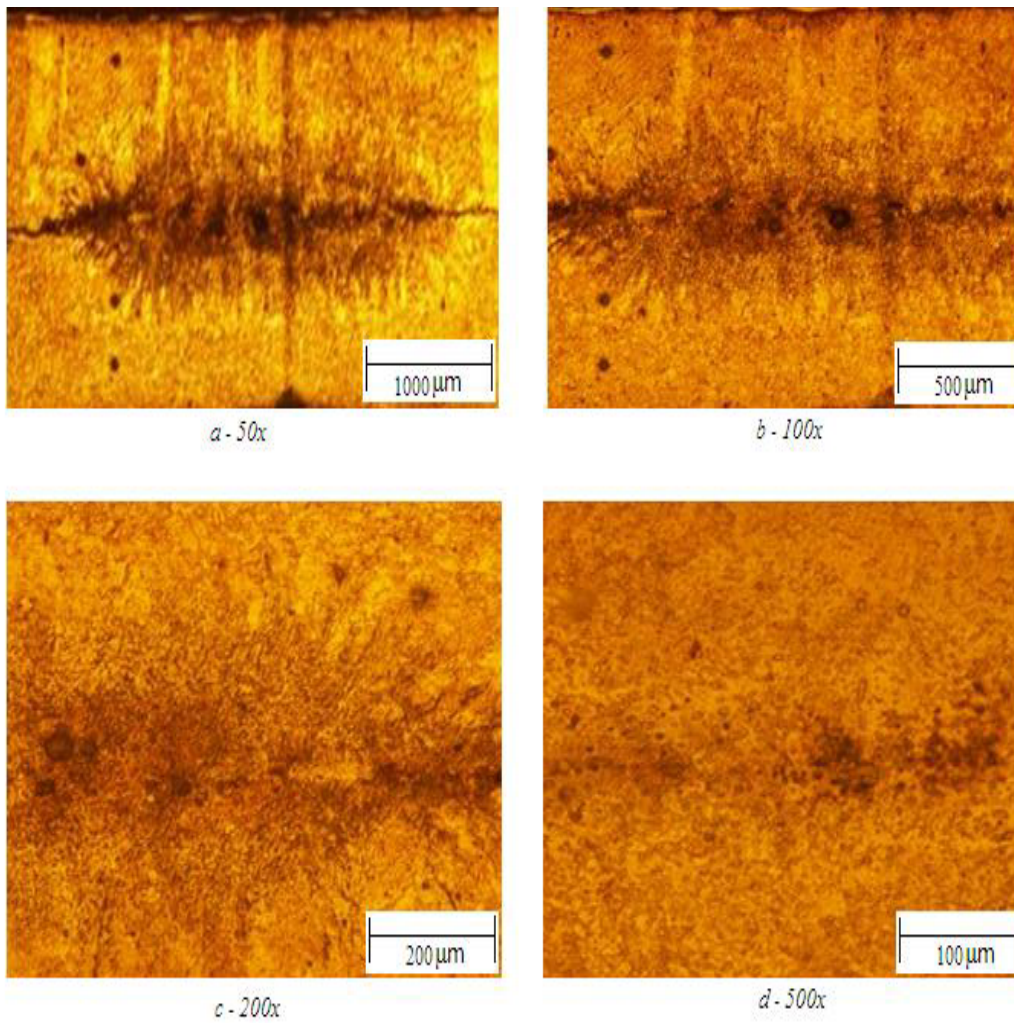


Figura 2.10 Micrografii ale probelor sudate după regimul II

În fine, la valori ale curentului de 2,0 kA, forță de apăsare și timp de operare păstrați constanți, se obțin îmbinări sudate de calitate (figura 2.11 a...d).

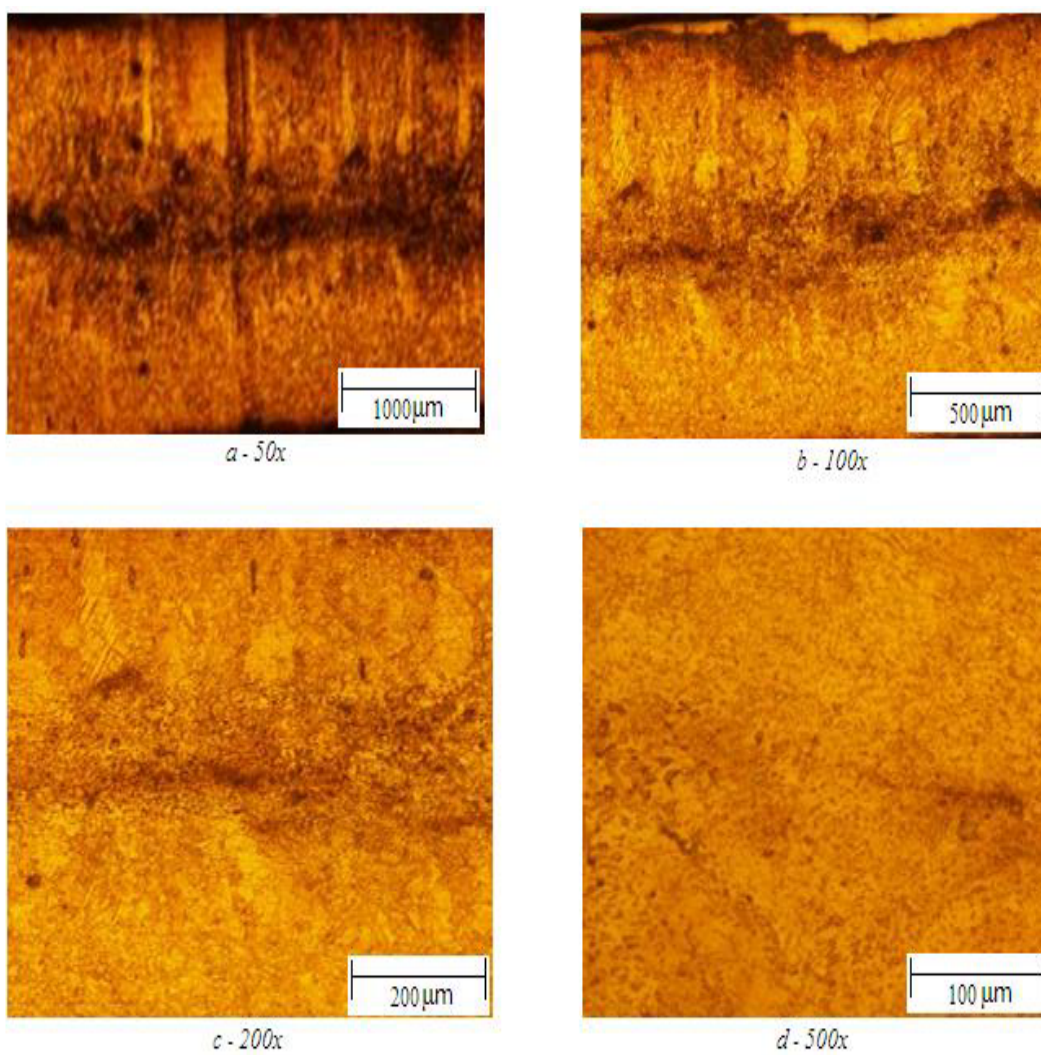


Figura 2.11 Micrografii ale probelor sudate după regimul III

2.6 Analiza de difracție cu raze X

Asupra punctului sudat la parametrii optimi de proces s-au efectuat investigații de difracție cu raze X. Acestea au fost conduse pe un difractometru tip D8 Advance, Bruker – AXS Germania – 2000 figura 2.12.



Figura 2.12 Difractometru de raze X tip D8

Principalele sale caracteristici tehnice sunt:

- tuburi de raze X cu anod de Cu și Mo;
- goniometru vertical; scanare θ - 2θ , sau θ , sau 2θ ,
- pas minim $2\theta = 0.0001^\circ$;
- viteză maximă de scanare $25^\circ/\text{s}$;
- accesoriu pentru analiza straturilor subțiri în geometrie de incidență razantă (GIXRD);
- soft achiziție și interpretare;
- banca de date PDFICDD la nivelul anului 2005

Tehnica de difracție cu raze X a respectat instrucțiunile SR EN 13925-1,2/2003 și 13925-3/2005.

Inregistrarea s-a efectuat cu ajutorul programului "IMMEDIATE MEASUREMENT".

În virtutea configurării inițiale a sistemului, parametrii de alimentare ai tubului de raze X oferiti de program au fost: tensiunea de alimentare = 40kV, curentul de filament = 40 mA.

Parametrii de înregistrare care pot fi variați sunt: unghiul inițial, unghiul final, viteza și pasul.

În general, valorile acestor parametri sunt: unghiul inițial, 10° , unghiul final, 100° , viteza, 2 sec/pas, pasul, $0,04^\circ$.

Probele cercetate având un grad înalt de cristalinitate nu necesită aceste valori ale vitezei și pasului, fiind suficientă o viteză de $0,1$ sec/pas, și un pas de $0,1^\circ$, viteza putând fi exprimată și în grade/minut.

La stabilirea domeniului unghiular s-a ținut cont de compoziția probelor, de exemplu, la tubul cu anod de cupru, pentru probe metalice prima linie de difracție apare de obicei la peste 25° , zeoliții au linii de difracție până în 50° .

La tubul cu anod de molibden aceste valori sunt mai mici datorită lungimii de undă mai mici a radiației, astfel încât nu apar niciodată linii de difracție la valori mai mari de 70° .

Pentru analiza de fază calitativă automată s-a folosit programul de evaluare – interpretare XRD EVALUATION PROGRAM. La început s-a efectuat căutarea fazelor cristaline mai complexe (cu mai multe linii de difracție), urmata de căutarea compusilor cu structură cristalină cu simetrie mai mare (linii mai puține).

Intrucât s-a cunoscut compoziția chimică calitativă a probei, cu ajutorul tabelului periodic s-a putut limita căutarea doar la elementele respective. Identificarea este completă dacă toate liniile din difractograma au corespondență în liniile compusilor identificați.

Difractograma prelucrată și identificată a putut fi salvată împreună cu lista compusilor identificați (figura 2.13).

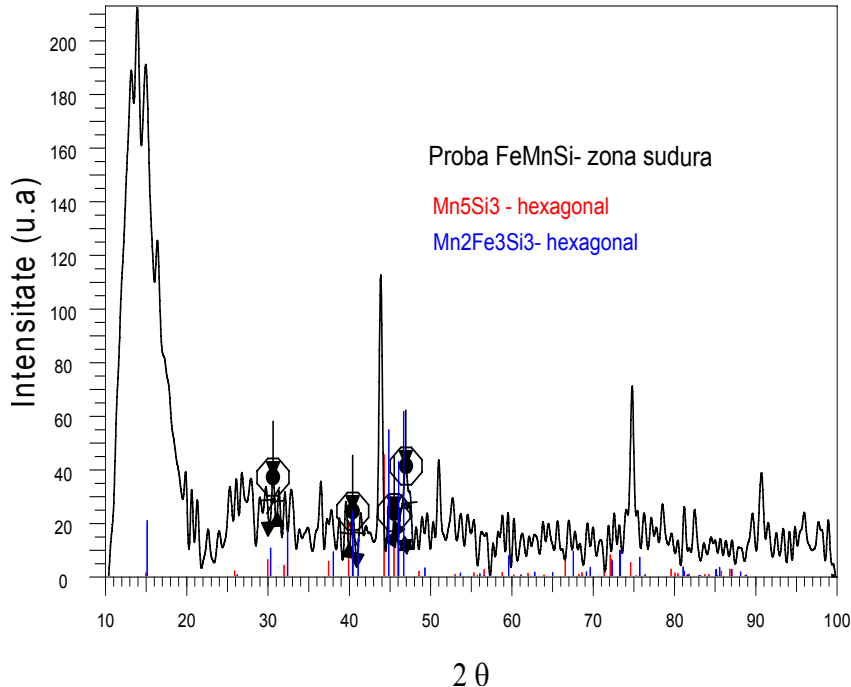


Figura 2.13 Difracție de raze X

Din lărgimea distribuției unei linii de difracție s-a determinat **dimensiunea medie de cristalit** cu ajutorul formulei Debye-Scherrer:

$$D_{hkl} = \frac{0,9\lambda}{B \cos \theta} \quad (1)$$

unde λ = lungimea de undă;

$B = B_{\text{proba}} - B_{\text{etalon}}$ = lărgimea liniei de difracție;

θ = jumătatea unghiului de difracție;

B_{proba} = lărgimea distribuției liniei de difracție pentru planul (hkl) al probei;

B_{etalon} = lărgimea distribuției liniei de difracție a unei probe etalon (cristalite de ordin micronic) pentru unghiul cel mai apropiat de unghiul la care apare linia de difracție pentru planul (hkl) la proba.

Din poziția maximului au fost determinați **parametrii celulei elementare** în baza relației dintre distanța interplanară d_{hkl} (h, k și l sunt indicii Miller care indică planul cristalin) și parametrii celulei, relație care depinde de sistemul cristalin.

Tabelul 2.3 Caracteristicile sistemelor cristaline

Sistemul cristalin	Parametrii celulei elementare	Nr. par. determinati	Relatia dintre d_{hkl} și parametrii celulei
Cubic	$a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	1	$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}$
Tetragonal	$a = b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	2	$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2 \left(\frac{a}{c}\right)^2}}$
Hexagonal	$a = b \neq c$ $\alpha = \beta = 90^\circ; \gamma = 120^\circ$	2	$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{\frac{4}{3}(h^2 + k^2 + hk) + l^2 \left(\frac{a}{c}\right)^2}}$
Ortorombic	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	3	$d_{hkl} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{h}{a}\right)^2 + \left(\frac{k}{b}\right)^2 + \left(\frac{l}{c}\right)^2}}$

În tabelul 2.4. sunt calculate dimensiunile cristalitelor și ale parametrilor celulei elementare cu ajutorul formulei Debye-Scherrer.

Tabelul 2.4 Dimensiunile de cristalit și a parametrilor celulei elementare

Denumire proba	Faza	Sistemul de cristalizare	D [nm]	Parametrii celulei elementare	Fisa nr.
FeMnSi – zona de sudura	Mn ₅ Si ₃	Hexagonal	44,9 h,k,l : 3,0,0	a = b = 6,906 c = 4,819	01-089-4976 a = b = 6,912 c = 4,812
	Mn ₂ Fe ₃ Si ₃	Hexagonal	35,5 h,k,l : 2,0,0	a = b = 6,760 c = 4,724	01-089-1901 a = b = 6,830 c = 4,739

2.7 Parametrii de proces la sudarea aliajului CuZnAl

Experimentele au conduse la parametrii de proces prezentați în tabelul 2.5.

Tabelul 2.5 Parametrii utilizați la aliajul CuZnAl.

Proba I	Proba II	Proba III
SQ = 35 per	SQ = 35 per	SQ = 35 per
W1 = 0	W1 = 0	W1 = 0
C1 = 0	C1 = 0	C1 = 0
S1 = 0	S1 = 0	S1 = 0
W2 $t_s = 3$ per (0,06s) $I_s = 4$ KA	W2 $t_s = 6$ per (0,12s) $I_s = 5$ KA	W2 $t_s = 2$ per (0,04s) $I_s = 6,4$ KA
C2 = 0	C2 = 0	C2 = 0
W3 = 0	W3 = 0	W3 = 0
S2 = 0	S2 = 0	S2 = 0
HO = 10 per	HO = 10 per	HO = 10 per
UNGHII DESC.= 180	UNGHII DESC.= 180	UNGHII DESC.= 180
Pres. = 2,2 – 2,5 bari	Pres. = 2,2 – 2,5 bari	Pres. = 3,4 – 3,7 bari
Observații: SQ = reglarea timpului, W1 = timp de curent (sudare), C1 = timp de pauză (de răcire) I, S1 = panta de creștere a curentului (timp de creștere), W2 = timp de curent (sudare) II, C2 = timp de pauză de răcire, W3 = timp de curent (de sudare) III, S2 = panta de scădere a curentului (timp de scădere), HO = timp de menținere post-sudare (răcire controlată), t_s = timpul de sudare, I_s = intensitatea curentului de sudare, Forța de apăsare (presiunea)		

Examinarea macrografică a îmbinarilor sudate permite următoarele observații:

- la valori mari ale curentului de sudare, de 6,4 kA, timp de sudare scurt, 2 per (0,04 s), și presiune mare, 3,4 – 3,7 bari, apare expulzare de material (figura 2.14, proba e și f);
- la valori ale curentului de 5 kA, timp de sudare mare, 6 per (0,12s), și o presiune scăzută de 2,2 – 2,5 bari, se observă o străpungere a punctului (figura 2.14, proba c și d);
- în fine, la valori ale curentului de 4 kA, timp de sudare de 3 per (0,06 s), și o presiune de 2,2 – 2,5 bari, calitatea punctului sudat este bună (figura 2.14, proba a și b).

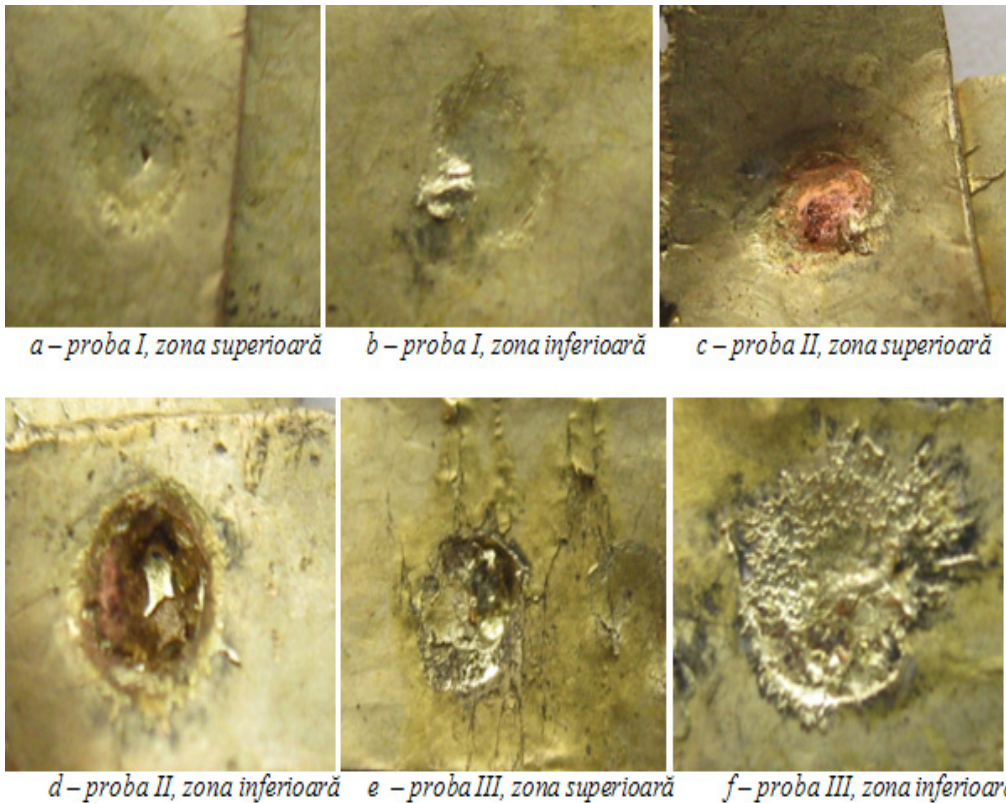


Figura 2.14 Macrostructura probelor sudate

În urma analizei microscopice se observă că la valori ale curentului de 4 kA, timp de sudare de 3 perioade (0,06 s) și o presiune de 2,2 - 2,5bari, obținem o îmbinare sudată de calitate (figura 2.15 a...d).

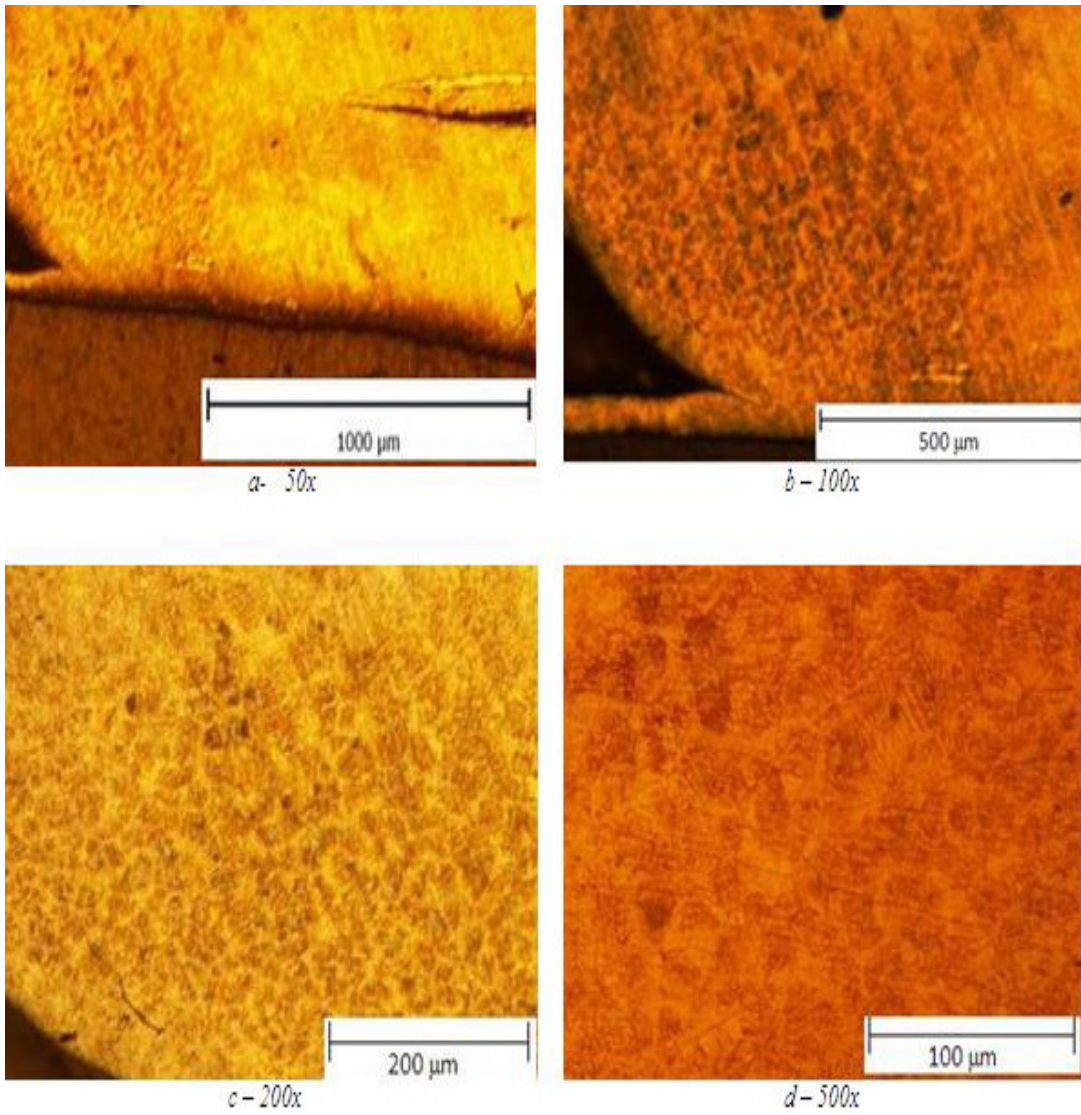


Figura 2.15 Micrografii ale probelor sudate după regimul I.

Mărind curentul și timpul de sudare, iar presiunea păstrând-o constantă, calitatea îmbinării sudate nu este acceptabilă, deoarece în structură apar defecte de continuitate metalică de tipul porozităților (figura 2.16 a...d).

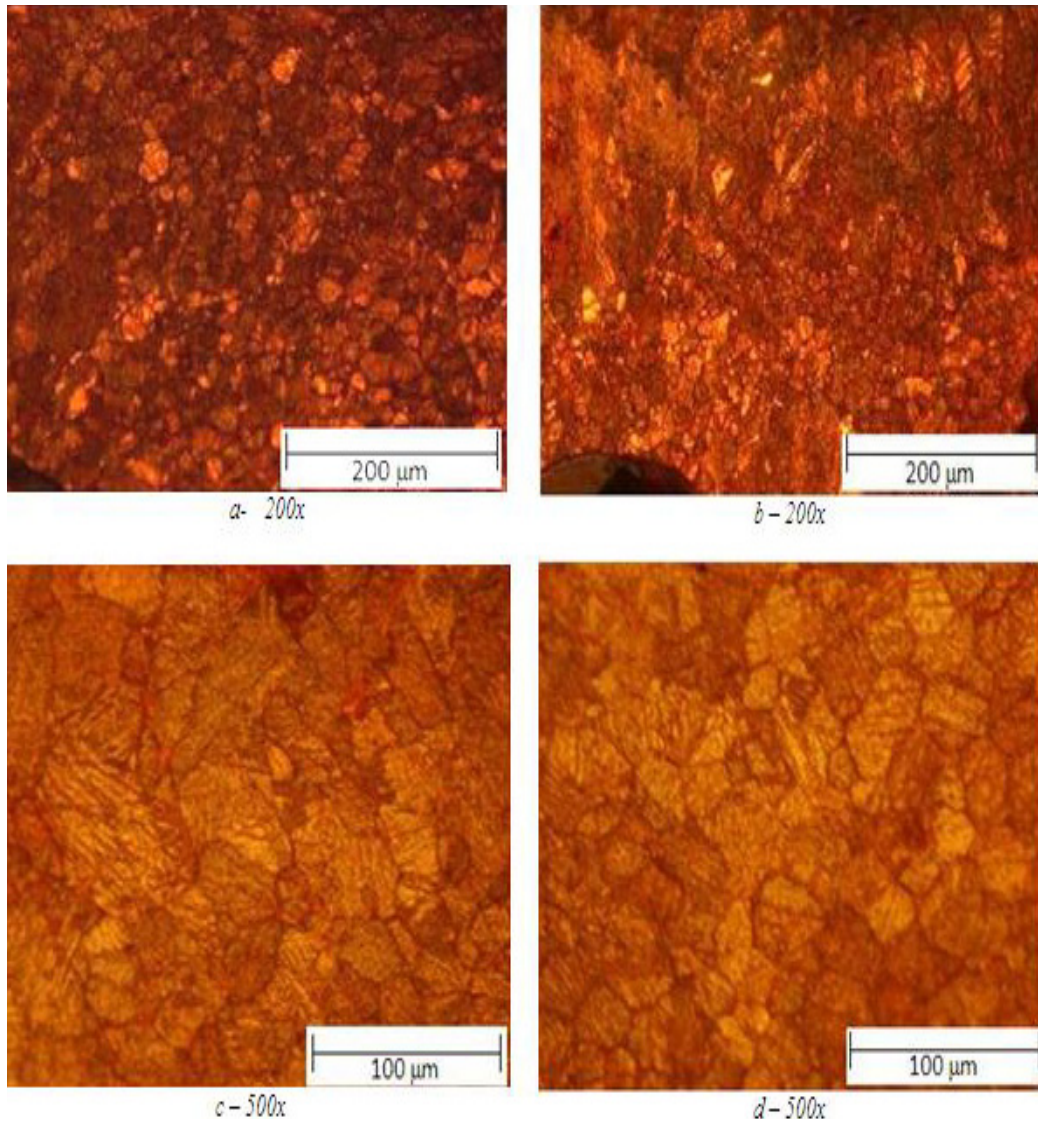


Figura 2.16 Micrografii ale probelor sudate după regimul II

La valori ale curentului și a presiunii mai mari și scăzând timpul de sudare calitatea punctului este satisfăcătoare, observându-se o creștere a grăunților epitaxiali la interfața dintre metalul de bază și punctul sudat (figura 2.17 a...d).

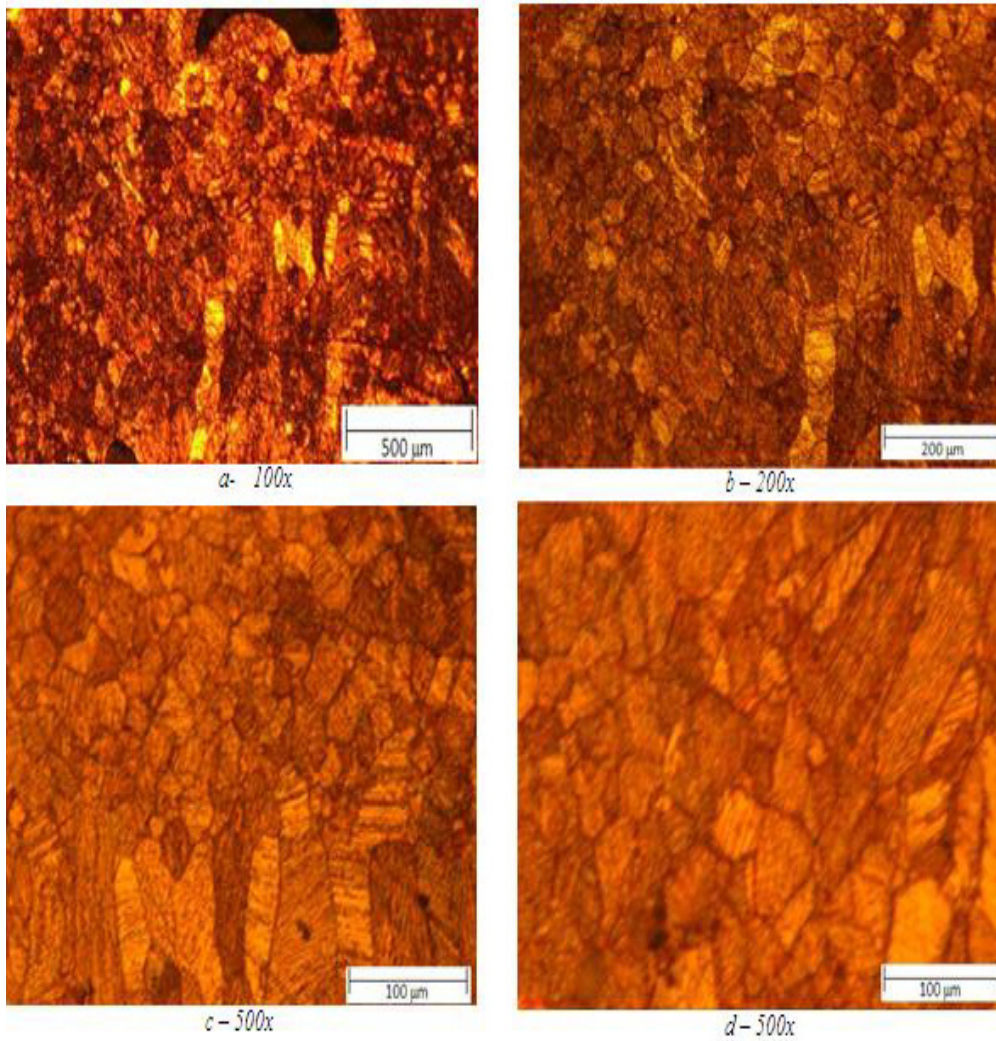


Figura 2.17 Micrografii ale probelor sudate după regimul III

2.8 Încercări de duritate

Rezultatele încercărilor de duritate pentru aliajele cu memorie a formei FeMnSi și CuZnAl sunt prezentate în tabelele 2.6 și 2.7, și în figurile 2.18 și 2.19.

Tabelul 2.6 Valorile durității pentru aliajul FeMnSi

d [mm]	Regimul I			Regimul II			Regimul III		
	HV _{0,2} - PCT	HV _{0,2} - ZIT	HV _{0,2} - MB	HV _{0,2} - PCT	HV _{0,2} - ZIT	HV _{0,2} - MB	HV _{0,2} - PCT	HV _{0,2} - ZIT	HV _{0,2} - MB
0.5	105	101	106	104	100	105	105	102	106
1	100	99	104	100	98	103	100	100	104
1.5	103	101	105	102	98	102	103	98	103
2	100	100	101	100	100	100	100	100	100
2.5	104	101	103	103	100	103	104	102	104

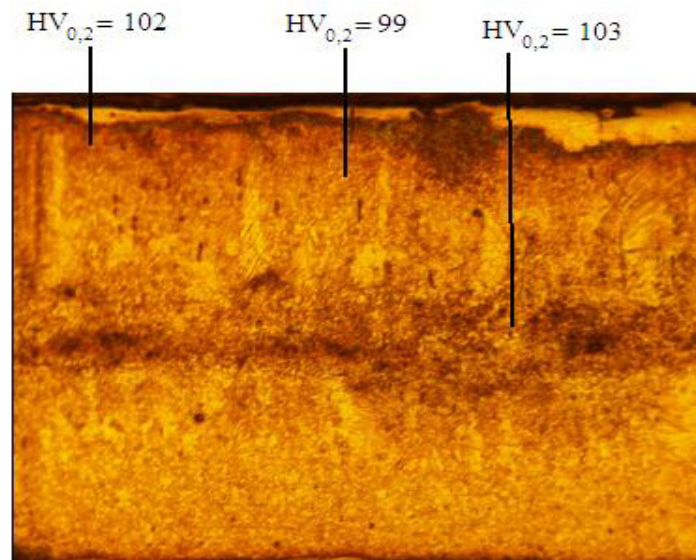


Figura 2.18 Valorile medii ale durității în îmbinarea sudată

Tabelul 2.7 Valorile durtății pentru aliajul CuZnAl

d [mm]	Regimul I			Regimul II			Regimul III		
	HV _{0,2} - PCT	HV _{0,2} - ZIT	HV _{0,2} - MB	HV _{0,2} - PCT	HV _{0,2} - ZIT	HV _{0,2} - MB	HV _{0,2} - PCT	HV _{0,2} - ZIT	HV _{0,2} - MB
0.5	76	88	86	74	87	85	75	88	86
1	91	77	88	90	75	87	91	77	88
1.5	89	86	85	88	84	84	89	86	85
2	85	85	85	84	83	84	85	85	85
2.5	85	83	85	84	81	84	85	85	85

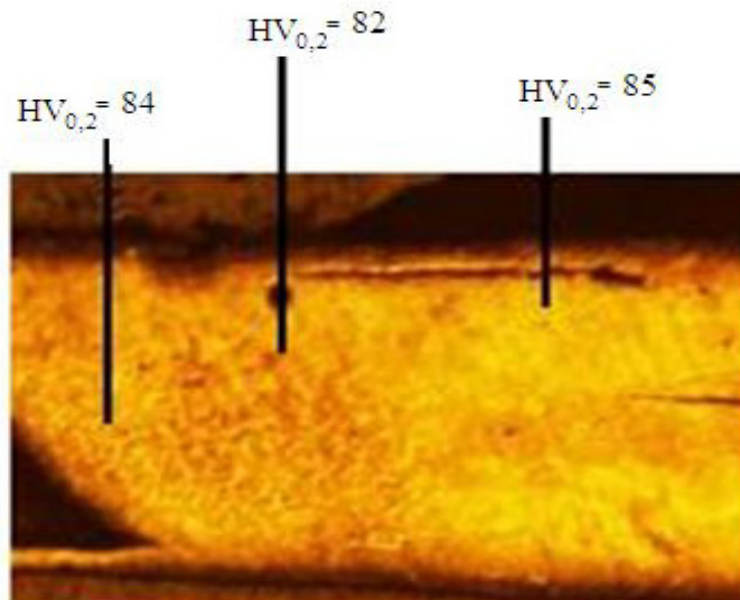


Figura 2.19 Valorile medii ale durtății în îmbinarea sudată

2.9 Concluzii

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.

Analiza microscopică a secțiunilor prin îmbinări sudate permite următoarele observații:

a. Aliaje FeMnSi:

- la valori mari ale curentului de sudare, 3,5 kA, timp de sudare scurt, 3 per (0,06 s), și presiune mare, 3,4 – 3,7 bari, apare o străpungere de material (figura 2.8, proba a și b);
- la valori ale curentului de 2,5 kA, timp de sudare mare, 6 per (0,12), și o presiune mărită de 4,7 - 5 bari, se observă o îmbunătățire a calității punctului sudat (figura 2.8, proba c și d);
- în fine, la valori ale curentului de 2 kA, timp de sudare și presiune constantă calitatea punctului sudat este foarte bună (figura 2.8, proba e și f).

b. Aliaje CuZnAl:

- la valori mari ale curentului de sudare, 6,4 kA, timp de sudare scurt, 2 per (0,04 s), și presiune mare, 3,4 – 3,7 bari, apare expulzare de material (figura 2.14, proba e și f);
- la valori ale curentului de 5 kA, timp de sudare mare, 6 per (0,12 s), și o presiune scăzută de 2,2 – 2,5 bari, se observă o străpungere a punctului sudat (figura 2.14, proba c și d);
- în fine, la valori ale curentului de 4 kA, timp de sudare de 3 per (0,06 s), și o presiune de 2,2 – 2,5 bari, calitatea punctului sudat este bună (figura 2.14, proba a și b).

Analiza microscopica a imbinarilor sudate a reliefat urmatoarele aspecte:

- **aliaje FeMnSi** - folosirea unor curenți de sudare de 2,0 kA, a unor timpi de operare de 6 per (0,12 s) și a unei presiuni de 4,7 – 5 bari, a condus la obținerea unor îmbinări de calitate, cu un volum minim de retasură și o granulație fină,
- **aliaje CuZnAl** - folosirea unor curenți de sudare de 4,0 kA, a unor timpi de operare de 3 per (0,06 s), și a unei presiuni de 2,2 – 2,5 bari, a condus la obținerea unei îmbinări de calitate.

CERCETĂRI ASUPRA PROCESULUI DE SUDARE CU ENERGIE ÎNMAGAZINATA ÎN CONDENSATOARE A ALIAJELOR CU MEMORIE A FORMEI

3.1 Introducere

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:

$$E = \frac{C \cdot U_c^2}{2}$$

3.1

unde:

- E – energia înmagazinată în condensatoare [Joule];
- C – capacitatea tuturor condensatoarelor legate în paralel [F];
- U_c – tensiunea de încărcare a bateriei de condensatoare [V].

Sudarea cu energie înmagazinată în condensatoare face parte din categoria procedeelelor de *sudare prin presiune cu impuls* și se caracterizează prin aceea că *energia absorbită de la rețeaua de curent alternativ* nu este utilizată direct în procesul de sudare, ci este transformată de elementele schemei de alimentare într-un impuls de curent cu anumite caracteristici.

Un avantaj important al procedeeului 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.

Schema de principiu a sudării prin puncte cu energie înmagazinată în condensatoare este prezentată în figura 3.1. Componentele de sudat 1, sunt presate de electrozii 2 cu o anumită forță F, bine determinată după care între cei doi electrozi se închide un curent I_s , curent ce trece și prin piesele 1.

Căldura rezultată ca urmare a rezistenței de contact, va realiza între componente, punctul sudat 3.

Căldura Q degajată la sudare va fi dată de legea lui Joule:

$$Q = I_s^2 \cdot R_c \cdot t [J] = 0,24 \cdot I_s^2 \cdot R_c \cdot t [cal] \quad 3.2$$

unde:

- I_s – curentul de sudare [A];
- R_c – rezistența de contact între două materiale, [ohmi];
- t – timpul de trecere al curentului I_s , [sec].

Ca urmare a faptului, că în timpul sudării, rezistența de contact R_c și curentul I_s rămân constante, căldura Q se determină cu relația:

$$Q = 0,24 \int_0^t I_s^2 \cdot R_c dt$$

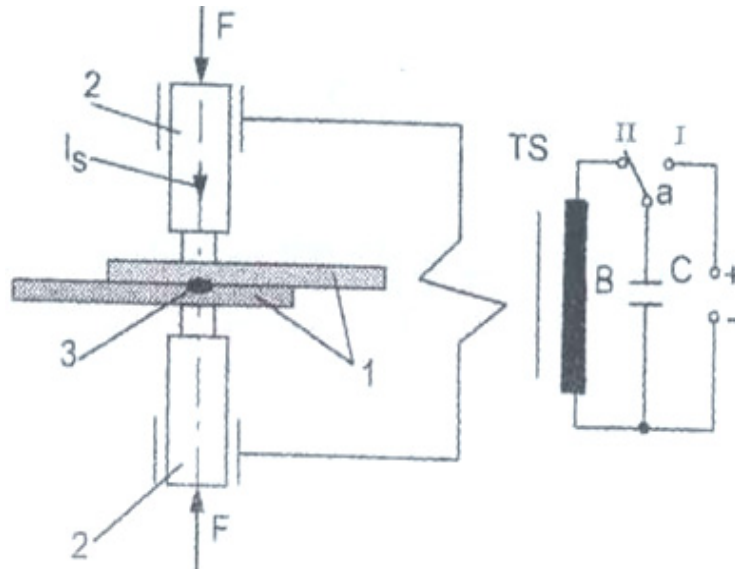


Figura 3.1. Schema de principiu a sudării în puncte; TS – transformator de sudare; a – întrerupător; BC – bateria condensatoare

În caz concret, căldura este funcție de următorii parametri:

- curentul de sudare I_s ,
- rezistența de contact R_c sau t și nu toată este utilizată la topirea materialului din spațiul pieselor supuse sudării.

O parte din căldură se pierde prin metal (piese) și electrozi, iar o parte prin transmiterea ei în spațiul dintre electrozi și piese. Topirea materialului dintre piese va depinde de raportul creșterii căldurii față de pierderile menționate.

În afara acestor fenomene, apare o căldură, dată tot de legea lui Joule, pe rezistența pieselor R_c .

Experimental s-a constatat la mașinile clasice de c.a. 50Hz că o parte mare din energie se pierde datorită transmiterii de căldură spre exterior și numai câteva procente din cantitatea de energie este utilizată la sudare. De exemplu, în cazul pieselor din metal, cantitatea de căldură utilă este de cca 7%, în cazul pieselor de aluminiu cca 3%, iar la cupru și mai mică.

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, procedeul 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 procedeul de sudare cu unde ultrasonore este unul din procedeele ce se aplică la sudarea tablelor și foliilor din aluminiu, cupru și oțeluri speciale.

Din cercetările experimentale făcute se pot preciza următoarele:

- pentru grosimi sub 0,5 mm este procedeul ce se recomandă la sudarea aluminiului, cuprului, alături de sudarea cu unde ultrasonore;
- pentru grosimi între 1,0 – 0,5 (0,2) mm, poate concura cu orice procedeu de sudare posibil de aplicat grosimilor respective.
- pentru grosimi de peste 1,0 mm, procedeul se poate folosi, însă fără avantaje deosebite față de procedeul de sudare electrică prin presiune.

3.1.1. Factori tehnologici

a) Tipul electrodului.

Datorită durității regimului de sudare căldura nu are timp să se împrăștie iar electrozul rămâne rece, deci nu este necesară răcirea forțată a acestuia. Deși putem folosi electrozi clasici, tip creion, se preferă electrozii prezentați în figura 3.2.:

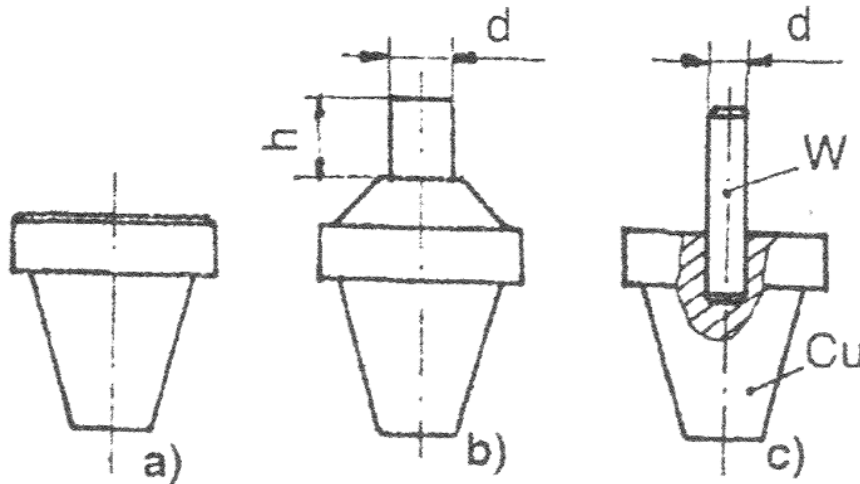


Figura 3.2. Forma electrozilor

- a) electrod plan din cupru; se recomandă ca electrod inferior de conducere a curentului sau pentru sudarea în relief;
- b) electrod cu vârf cilindric, din cupru, pentru sudarea oțelurilor; față de cei conici, are avantajul constanței diametrului după pilire (curățare); pentru vârf se recomandă lungimea; $L = (2...2,5)d_e$
- c) electrod asamblat cu vârful din wolfram sau molibden; se utilizează la sudarea cuprului sau aliajelor sale pentru evitarea sudării electrozilor de suprafața pieselor.

Diametrul pieselor se alege în funcție de grosimea componentelor astfel:

- pentru $s \leq 0,5\text{mm}$ $d_e = 2,5s + 1\text{mm}$, obișnuit $d_e = 2\text{mm}$,
- pentru $s > 0,5\text{mm}$ $d_e = 2s + 2\text{mm}$.

Fiind utilizate dimensiuni mici, este importantă cercetarea precisă a electrozilor.

Verificarea paralelismului suprafețelor de contact se face luând amprenta ca în figura 3.3 unde 1 și 7 sunt vârfurile electrozilor, 2 și 6 indigo de copiat, 3 și 5 hârtie albă subțire, 4 este o tăbliță din oțel, iar 8, o foaie din carton.

Electrozii sunt corecți dacă pe ambele fețe ale cartonului 8 apar suprafețe circulare înnegrite de la indigo.

Această operație nu mai este necesară dacă folosim electrozi cu vârf bombat (sferic).

În cazul folosirii unui electrod inferior plan se recomandă ca acesta să fie plasat excentric față de cel superior astfel ca să poată fi refolosit prin rotire succesivă în timp.

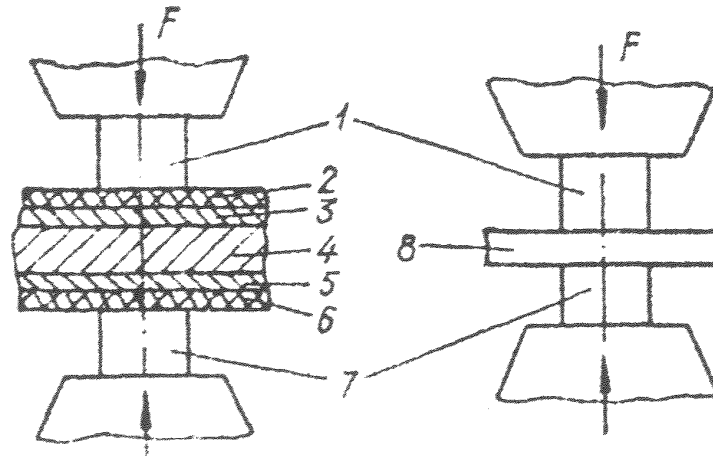


Figura 3.3 Centrarea electrozilor.

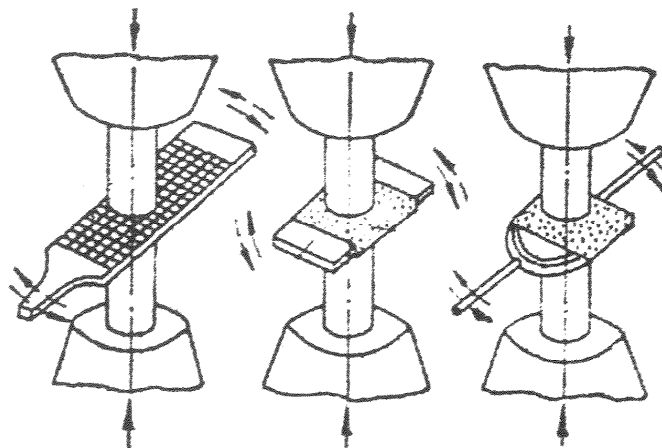


Figura 3.4 Curățarea electrozilor

În cazul producerii accidentale a unor străpungeri, descărcări explozive sau a sudării electrozilor de piese este recomandată curățarea imediată a electrozilor ca în figura 3.4, cu pila sau cu șmirghel pus pe o bucată de cauciuc sau pe ambele vârfuri (electrozii sunt presați), pentru evitarea apariției abaterii de la paralelism.

b) Curățarea suprafețelor

Deoarece sudarea se obține numai pe baza rezistenței de contact, uniformitatea calității punctelor succesive impune o curățare îngrijită și uniformă a componentelor pe ambele fețe. Curățarea se face mecanic sau chimic la fel ca la sudarea obișnuită.

c) Forța de apăsare

Se folosesc presiuni ceva mai reduse decât la sudarea în puncte în special la grosimi mici, pentru evitarea deformării la rece a foliilor. Din cauza diametrelor mici de contact și forțele necesare sunt foarte mici, ușor de obținut prin acționarea manuală.

d) Energia înmagazinată

Se alege în funcție de grosimea și tipul materialului de sudat. Energiile cele mai mari sunt necesare la sudarea cuprului și aliajelor sale.

Pentru majoritatea metalelor (în condițiile folosirii unui raport de transformare $K = 100$) se poate utiliza o energie specifică, raportată la grosimea pieselor, de:

- 100 J/mm la $s < 0,5$ mm;
- 60...70J la $s \geq 0,5$ mm.

3.1.2 Mașina de sudat electric prin presiune în puncte cu energie înmagazinată în condensatoare

În general o mașină de sudare prin presiune electrică în puncte cu energie înmagazinată în condensatoare conține următoarele subansamble:

- batiul,
- transformatorul de sudare,
- circuitul exterior (electrozi, portelectrozi, brațul inferior, brațul superior, legăturile la secundarul transformatorului de sudare),
- instalație de acționare a brațului mobil,
- bateria de condensatoare,
- instalația electrică a circuitului de comandă și a curentului de sudare.

Caracteristici tehnice.

Principalele caracteristici tehnice ale mașinii MSCIPT - 2, realizată prin autodotare la catedra Știința Materialelor și a Sudării din Universitatea Politehnica din Timișoara sunt:

- tensiunea de alimentare de 220V la $f = 50$ Hz;
- tensiunea maximă de încărcare a bateriei de condensatoare: 500V;
- energia maximă: 1,25KJ (la capacitatea totală de 10.000 μ F);
- forța de strângere 5...80daN;
- cursa electrodului: 50mm;
- capacitatea bateriei proprii: 4000 μ F,
- capacitatea bateriei auxiliare: 600 μ F;
- acționare pneumatică.



Figura 3.5 Instalația experimentală de sudare cu energie înmagazinată

3.2 Procesul de încărcare a condensatoarelor la sudarea cu energie înmagazinată a aliajelor FeMnSi și CuZnAl cu memorie a formei

Parametrii circuitului de sudare, respectiv parametrii mașinii de sudat cu energie înmagazinată, determină atât procesul de încărcare, cât și de descărcare al condensatoarelor. Astfel, la o stabilire incorectă a parametrilor circuitului de încărcare a bateriei de condensatoare se poate ajunge, fie la situația când puterea de încărcare este aproximativ egală cu puterea utilă de descărcare a BC ($t_{inc} = t_{desc}$), fie la cealaltă extremă, când puterea este așa de mică încât rezultă o productivitate scăzută a mașinii.

Cea mai simplă schemă de încărcare a condensatoarelor de la o sursă de curent continuu, este prezentată în figura 3.6.

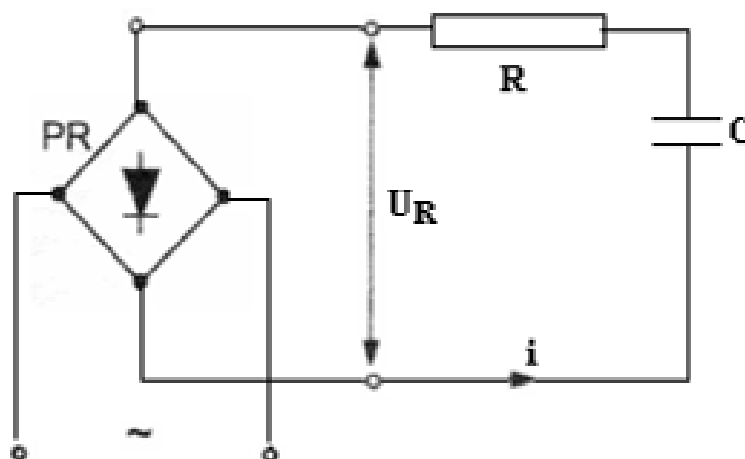


Figura 3.6 Circuitul de încărcare al condensatoarelor [59].

Programul experimental a fost condus pe probe plate din aliaje $Fe_{62}Mn_{32}Si_6$, având grosimea de 0,52-0,54mm și lățimea de 4,58-4,75mm, și din aliaje cu bază de cupru, $Cu_{70}Zn_{23}Al_6$, având grosimea de 0,4 - 0,5mm și lățimea de 3 - 4 mm.

În cazul unui circuit R - C, variația tensiunii U_c pe condensatoare, este descrisă de relația (1), iar curentul de încărcare de relația (2). S-a considerat că la: $t = 0$ și $U_c = 0$.

$$U_c = U \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) = 0 \quad (1)$$

și:

$$i = \frac{U}{R} e^{-\frac{t}{T}} \quad (2)$$

Unde:

- $T = R \cdot C$ – constantă de timp a circuitului de încărcare;
- R = rezistența de limitare a curentului de încărcare;
- C = capacitatea condensatoarelor.

În urma efectuării cercetărilor experimentale au rezultat următoarele valori:

Pentru **FeMnSi**:

- Tensiunea de încărcare: $U_c = 350$ V,
- Rezistența de limitare a curentului de încărcare: $R = 200\Omega$,
- Capacitatea bateriei de condensatoare: $C = 1200\mu\text{F}$.
- Timpul: $t = 0,5; 1; 1,5; 2$ secunde.

$$T = R \cdot C = 200\Omega \cdot 1200\mu\text{F} = 200 \cdot 1,2 = 240\text{mF} \rightarrow T = 240\text{mF}.$$

Pentru **CuZnAl**:

- Tensiunea de încărcare: $U_c = 360$ V,
- Rezistența de limitare a curentului de încărcare: $R = 200\Omega$,
- Capacitatea bateriei de condensatoare: $C = 3500\mu\text{F}$.
- Timpul: $t = 0,5; 1; 1,5; 2$ sec.

$$T = R \cdot C = 200\Omega \cdot 3500\mu\text{F} = 200 \cdot 3,5 = 700\text{mF} \rightarrow T = 700\text{mF}.$$

Înlocuind aceste date în relațiile (1) și (2) se obțin valorile indicate în tabelul 3.1:

Tabelul 3.1. Valorile tensiunii și curentului, după relațiile (1) și (2).

FeMnSi		CuZnAl	
U_c [V]	i [A]	U_c [V]	i [A]
0,52	1,247	0,21	1,499
1,247	1,494	0,5	1,748
2,181	1,739	0,856	1,996
3,319	1,983	1,284	2,244

Calculule efectuate mai sus, sunt însă valabile numai la primul proces de încărcare a bateriei de condensatoare, deoarece în procesul tranzitoriu, de descărcare a bateriei de condensatoare, spre sfârșitul primei alternanțe tensiunea U_c pe condensatoare își schimbă sensul, figura 3.7.

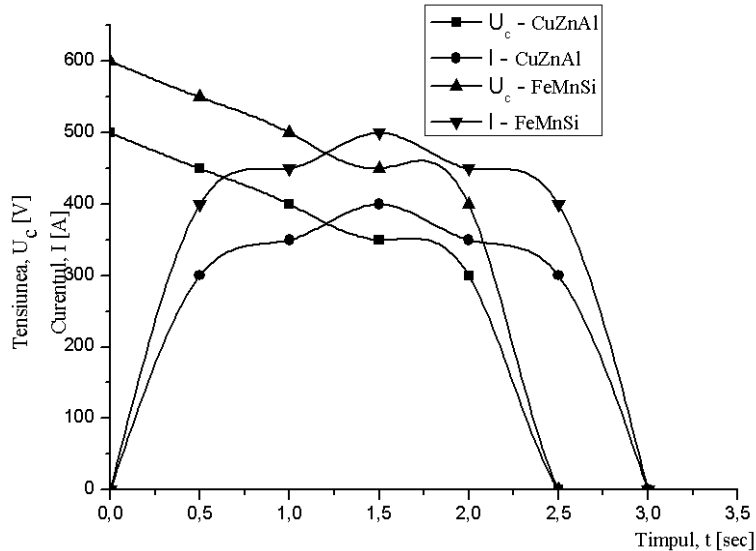


Figura 3.7 Variația tensiunii de descărcare a condensatoarelor și a curentului prin transformatorul de sudare: 1 - $U_c = f(t)$ și 2 - $i_1 = f(t)$

Analizând acest grafic putem observa că pentru ambele aliaje:

- o dată cu creșterea timpului de încărcare a bateriei de condensatoare, tensiunea U_c crește, iar la scăderea timpului, curentul I_s scade.
- parametrii optimi determinați au fost:
 - pentru aliajul **FeMnSi**: tensiunea de încărcare: $U_c = 350$ V, timpul: $t = 1,5$ s; curentul $I_s = 300$ A,
 - pentru aliajul **CuZnAl**: tensiunea de încărcare: $U_c = 450$ V, timpul: $t = 2$ s; curentul $I_s = 300$ A.

Pentru schema din figura 4.1., pe durata unui ciclu, se poate determina valoarea medie a curentului, relația (3), precum și puterea de calcul P_c ; curentul maxim de încărcare I_{max} ; puterea maximă P_{max} ; puterea medie disipată de rezistența R ; randamentul circuitului η .

$$I = \sqrt{\frac{1}{t_c} \int_0^{t_c} i^2 \cdot dt} \quad (3)$$

Unde:

- t_c = timpul unui ciclu de încărcare a condensatoarelor;
- i = curentul dat de relația (2).

Utilizând în calcule valoarea medie a curentului de încărcare notată cu I_{mi} :

$I_{mi} = \frac{C \cdot U_c}{t_{in}}$, și valoarea medie a puterii utile $P_{mu} = \frac{C \cdot U_c^2}{2 \cdot t_{in}}$, mărimile: I^* ; P_c^* ; I_{max}^* ; P_{max}^* ; P_R^* și η în unități relative sunt date de relațiile (4).

Unde:

$$I^* = \sqrt{\frac{t_{in}^* (1 - e^{-2t_{in}^*})}{2(1 - e^{-t_{in}^*})^2}} \cdot \sqrt{DA} [A]; \quad P_c^* = \sqrt{\frac{2 \cdot t_{in}^* (1 - e^{-2t_{in}^*})}{(1 - e^{-t_{in}^*})^4}} \cdot \sqrt{DA} [W];$$

$$I_{max}^* = \frac{t_{in}^*}{1 - e^{-t_{in}^*}} [A]; \quad P_{max}^* = \frac{2 \cdot t_{in}^*}{(1 - e^{-t_{in}^*})^2} [W]; \quad \eta = \frac{1 - e^{-t_{in}^*}}{2};$$

$$t_{in}^* = \frac{t_{in}}{T}; [s] \quad (4)$$

$P_c = U \cdot I$ - puterea de calcul [W]

$DA = \frac{t_{in}}{t_c}$ - durata relativă de lucru.

Înlocuind în relațiile (4) obținem următoarele valori:

a) pentru **aliajul FeMnSi**:

$$I = \sqrt{\frac{1}{2} \int_0^2 400^2 \cdot dt} = 400 [A]; \quad P_{mu} = \frac{1200 \cdot 350^2}{2 \cdot 5} = 4,2 \times 10^5 [W];$$

$$I_{mi} = \frac{1200 \cdot 350}{5} = 8,4 \times 10^5 [A]$$

Tabelul 3.2. Mărimi de intrare și de ieșire pentru aliajul FeMnSi

T [s]	t _{inc} [s]	DA	I* [A]	P _c * [W]	I _{max} * [A]	P _{max} * [W]	η	P _c [W]
0,5	2,083 x10 ⁻³	0,25	0,5	0,013	1,001	962, 002	1,041 x10 ⁻³	1,4 x10 ⁵
1	4,167 x10 ⁻³	0,5	0,707	0,015	1,002	482, 002	2,079 x10 ⁻³	1,4 x10 ⁵
1,5	6,25 x10 ⁻³	0,75	0,866	0,018	1,003	322, 005	3,115 x10 ⁻³	1,4 x10 ⁵
5	8,33 x10 ⁻³	1	1	0,022	1,004	242, 007	4,149 x10 ⁻³	1,4 x10 ⁵

a) pentru aliajul CuZnAl:

$$I = \sqrt{\frac{1}{2} \int_0^2 400^2 \cdot dt} = 400[A]; \quad P_{mu} = \frac{3500 \cdot 360^2}{2 \cdot 5} = 4,536 \times 10^7 [W];$$

$$I_{mi} = \frac{3500 \cdot 360}{5} = 8,64 \times 10^4 [A]$$

Tabelul 3.3. Mărimi de intrare și de ieșire pentru aliajul CuZnAl

T [s]	t _{inc} [s]	DA	I* [A]	P _c * [W]	I _{max} * [A]	P _{max} * [W]	η	P _c [W]
0,5	7,143 x10 ⁻⁴	0,25	0,5	3,923	1	2,802 x10 ³	3,57 x10 ⁻⁴	1,44 x10 ⁵
1	1,429 x10 ⁻³	0,5	0,707	1,387x 10 ⁶	1,001	1,402 x10 ³	7,14 x10 ⁻⁴	1,44 x10 ⁵
1,5	2,143 x10 ⁻³	0,75	0,866	7,549x 10 ⁵	1,003	935,273	1,07 x10 ⁻³	1,44 x10 ⁵
5	2,857 x10 ⁻³	1	1	4,915x 10 ⁵	1,004	702,037	1,426 x10 ⁻³	1,44 x10 ⁵

Mărimile date de relațiile (4), sunt prezentate grafic în figura 3,9, în funcție de timpul de încărcare $t_{in}^* = \frac{t_{in}}{T}$ și de durata relativă de lucru DA, după cum urmează:

- puterea de calcul Pc și puterea maximă Pmax, trec printr-un minim, una în intervalul $(2 - 2,3)t_{in}^*$ și cealaltă în intervalul $(1 - 1,5)t_{in}^*$.

Astfel:

- dacă condensatoarele s-ar încărca de la un generator de c.c., regimul de încărcare optim se alege în intervalul în care puterea disipată să fie minimă, adică timpul de încărcare să fie egal cu $(2 - 2,3)t^*$ (fig.3.8).
- în cazul când condensatoarele sunt încărcate de la o punte redresoare printr-o rezistență, timpul de încărcare va fi egal cu t_{in}^* și anume în intervalul $t_{in}^* = 1,5 - 2,0$.

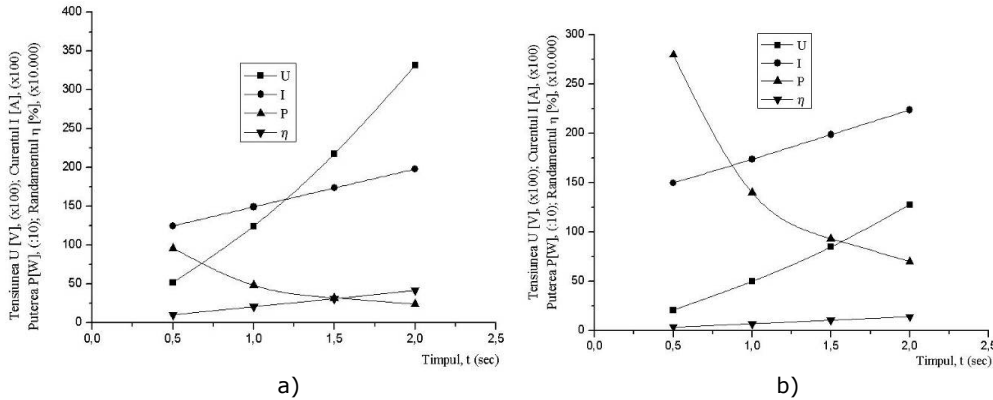


Figura 3.8. Variația curentului, puterii, randamentului și a tensiunii, în funcție de timp.
a) FeMnSi; b) CuZnAl

Analizând graficul putem observa că:

- o dată cu creșterea timpului de încărcare a bateriei de condensatoare, crește tensiunea U (V) și randamentul η, curentul I (A) și scade puterea P(W).
- parametrii optimi au fost:
 - pentru aliajul **FeMnSi**: tensiunea de încărcare $U_c = 2,181V$, timpul $t = 1,5$ s, curentul $I_s = 2,8A$, puterea $P = 1,8W$, randamentul $\eta = 3$;
 - pentru aliajul **CuZnAl**: tensiunea de încărcare $U_c = 3,5V$, timpul $t = 2$ s, curentul $I_s = 2A$, puterea $P = 2,3W$, randamentul $\eta = 4,2$.

În această situație, puterea transformatorului care este determinată direct de P_c^* este apropiată de puterea maximă, dar mai important este faptul că valoarea curentului este mult sub I_{max}^* și că în funcție de acel curent se va dimensiona puntea redresoare, respectiv se vor alege diodele pentru tensiunea U_c .

Acest fenomen face ca bateria condensatoare să nu fie ulterior încărcată de la o tensiune zero, ci de la o tensiune oarecare, negativă U_c^- . Valoarea U_c^- depinde de constanta de timp T' a circuitului de încărcare, și este mai importantă în cazul unei descărcări periodic amortizată.

Reîncărcarea condensatoarelor este legată de pierderile suplimentare de energie și în final de înrăutățirea indicilor energetici ai circuitului de încărcare: I^*_{max} ; P^*_{max} și η .

Pentru a ilustra prin calcul pierderile respective, se vor calcula mărimile date de relația (4), în cazul când rezistența circuitului de încărcare se consideră constantă adică $R = ct$.

Dependența puterii maxime, a curentului maxim și a randamentului funcție de raportul dintre valoarea negativă a tensiunii și cea pozitivă, notată cu γ , se reprezintă grafic în figura 3.9.

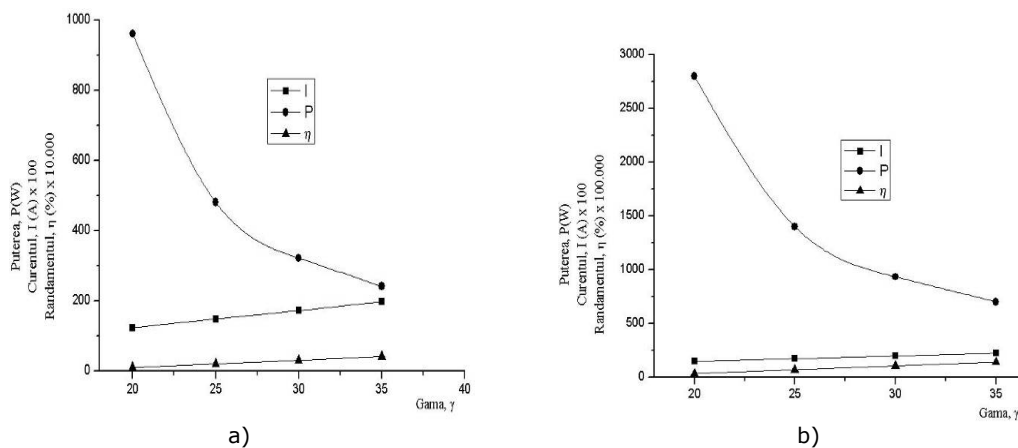


Figura 3.9 Variația puterii maxime, a curentului maxim și randamentului, funcție de γ : $P_{max} = f(\gamma)$, $I_{max} = f(\gamma)$, $\eta = f(\gamma)$.
a) Fe-Mn-Si; b) Cu-Zn-Al

Analizând acest grafic putem observa că:

- o dată cu creșterea raportului dintre valoarea negativă și cea pozitivă a tensiunii notată cu γ , crește randamentul (η) și curentul I_s (A), și scade puterea P (W),
- parametrii optimi au fost:
 - pentru aliajul **FeMnSi**: curentul $I_s = 1,003$ A, puterea maximă $P = 3,22$ W, randamentul $\eta = 3,115$ și raportul dintre valoarea negativă și cea pozitivă a tensiunii, notată cu $\gamma = 35$.

- pentru aliajul **CuZnAl**: curentul $I_s = 4,003$ A, puterea maximă $P = 2,22$ W, randamentul $\eta = 2,115$ și raportul dintre valoarea negativă și cea pozitivă a tensiunii, notată cu $\gamma = 40$.

Încărcarea condensatoarelor de la mașinile de sudat cu energie înmagazinată cu o tensiune negativă, adică $\gamma < 0$, conduce la înrăutățirea parametrilor de bază ai acesteia. Încărcarea la o tensiune pozitivă, adică $\gamma > 0$, îmbunătățește indicii energetici ai mașinii

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

Analizându-se procesul de sudare al bateriilor de condensatoare prin transformatorul de sudare, s-au stabilit ecuațiile diferențiale care, rezolvate, dau expresiile curenților și tensiunii pe condensatoare.

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. Forma impulsului de descărcare și valoarea maximă a curentului de sudare, sunt parametri tehnologici deosebit de importanți, la sudarea prin presiune a metalelor neferoase și a oțelurilor înalt aliate.

Aceste mărimi sunt influențate de valorile parametrilor sub care este înmagazinată energia în condensatoare și raportul de transformare K al transformatorului de sudare.

3.3.1 Influența parametrilor circuitului exterior asupra curentului de sudare

Parametrii circuitului exterior, inductivitatea și rezistența, influențează curentul de sudare în felul următor:

- inductivitatea L_{sc} este în mare parte decisă prin construcția mașinii, sau prin modificarea lungimii brațelor circuitului exterior în funcție de gabaritul pieselor sudate și în mai mică parte de îmbinarea realizată;
- rezistența electrică a pieselor R_p , variază mult în cursul procesului de sudare ca urmare, variază și rezistența totală a circuitului de sudare.

Cercetările experimentale, au arătat că la valori mici ale forței de strângere a pieselor ($F \leq 10$ 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, figura 3.10. Pentru transformatorul mașinii MSC – 2700:

a) La **aliajul FeMnSi**:

- rezistența de scurtcircuit are valoarea de $20 \mu\Omega$,
- cea a circuitului exterior are valoarea de $80 \mu\Omega$,
- iar rezistența piesei este dată de relația $R_p = \rho \frac{2s}{\pi d_e^2}$ și are valoarea

$$R_p = 5,836 \mu\Omega$$

Unde:

- $\rho = 15 \mu\Omega\text{cm}$, rezistivitatea electrică a aliajului $\text{Fe}_{62}\text{Mn}_{32}\text{Si}_6$,
- $d_e = 0,55 \text{ cm}$, diametrul electrodului,
- $s = 0,55 \text{ mm}$, grosimea componentelor de sudat.

b) La **aliajul CuZnAl**:

- rezistența de scurtcircuit are valoarea de $30 \mu\Omega$,
- cea a circuitului exterior are valoarea de $90 \mu\Omega$,
- iar rezistența piesei este dată de relația $R_p = \rho \frac{2s}{\pi d_e^2}$ și are valoarea

$$R_p = 4,787 \mu\Omega$$

Unde:

- $\rho = 2 \mu\Omega\text{cm}$, rezistivitatea electrică a aliajului $\text{Cu}_{70}\text{Zn}_{23}\text{Al}_5$,
- $d_e = 0,55 \text{ cm}$, diametrul electrodului,
- $s = 0,47 \text{ mm}$, grosimea componentelor de sudat.

Efectuând aceste calcule, se obține graficul de variație a rezistențelor în funcție de forța de sudare.

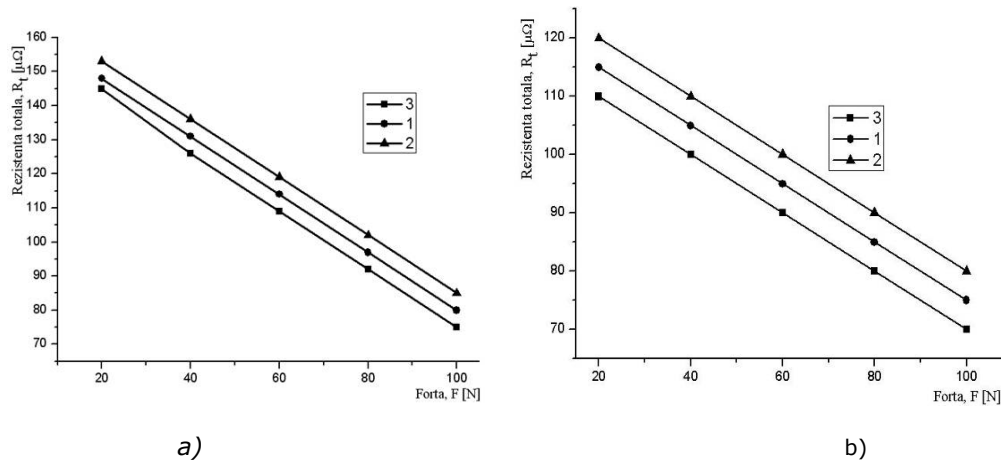


Figura 3.10. Variația rezistențelor în funcție de forța de sudare a pieselor;
 1 – valoarea medie a R_t ; 2 și 3 – limitele superioare și inferioare ale rezistențelor;
 abaterea de la grosimea tablelor care se sudează: $\pm 0,5\text{mm}$;
 a) FeMnSi; b) CuZnAl

În general, variația forței de sudare nu se dă numai pentru rezistența pieselor ci și pentru rezistența totală; considerând că rezistența de scurtcircuit și rezistența circuitului exterior sunt constante, graficul rezistenței piesei funcție de forță are aceeași alură cu cel prezentat în lucrare.

La sudarea cu energie înmagazinată, temperatura în zona punctului sudat este cea ambientă (timpul de sudare fiind foarte mic).

Statistic s-a determinat că 90 % dintre suduri rămân în intervalul 1 - 3 (limita inferioară) și respectiv 1,5 - 4 peste limita superioară.

Abaterile rezistențelor de contact și ale rezistenței totale față de anumite limite vor putea influența în mică măsură derularea procesului de sudare. De aceea, se impune ca și rezistența de contact să se stabilizeze la o anumită valoare pentru a se evita apariția unor defecte, celelalte rezistențe fiind constante.

Acest deziderat se poate îndeplini prin realizarea unor cicluri de sudare cu două impulsuri. Primul impuls asigură curățirea suprafețelor de contact ale pieselor, iar cel de-al doilea realizează sudarea acestora. Cele două impulsuri sunt independente și sunt generate de la două baterii de condensatoare independente prin contactoare statice cu tiristoare. Primul impuls fiind mai mic nu realizează punctul de sudură, ci asigură un contact mai intim între cele două piese pentru următorul impuls.

Astfel, s-a constatat că rezistența de contact poate să scadă la 85 % din valoarea ei și ca urmare, se modifică și rezistența totală. În calculele inițiale această rezistență nu s-a inclus, drept consecință abaterile se vor încadra mai aproape de valoarea medie (linia 1 din figura 3.11) cu $\pm 10\%$ (figura 3.12).

În figura 3.12 se observă că, dacă se ia în considerare și rezistența de contact, atunci graficul R_t funcție de timpul de sudare are alura din figura 3.11.

Pentru aliajul $Fe_{62}Mn_{32}Si_6$ se apreciază că rezistența totală are valori cuprinse în domeniul $4000 - 35.000 \mu\Omega$, iar pentru CuZnAl, rezistența totală are valori cuprinse în domeniul $2000 - 25.000 \mu\Omega$, la un timp de sudare scurt, cuprins între 0 - 30 ms, pentru ambele aliaje; extrapolând graficul, rezistența scade pronunțat cu timpul de sudare.

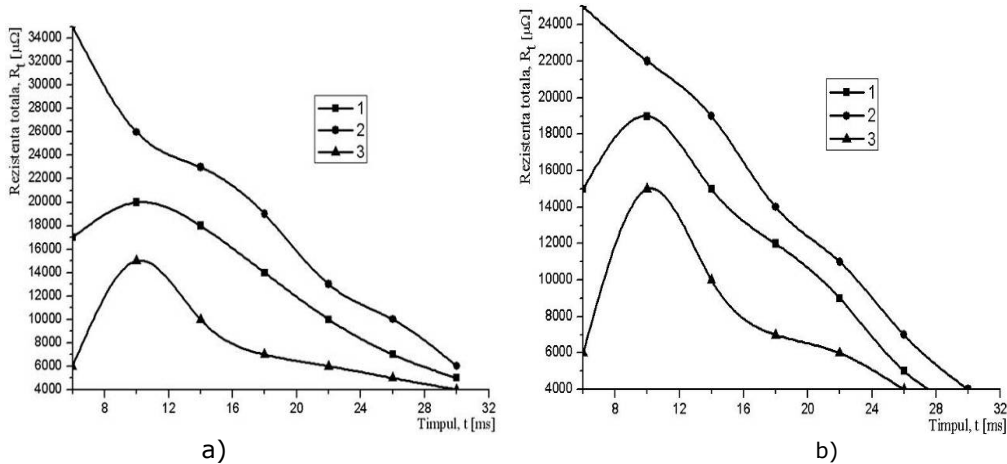


Figura 3.11. Variația rezistențelor în timpul procesului de sudare
1 – valoarea medie a R_t ; 2 și 3 – limitele superioare și inferioare ale rezistențelor;
abaterea de la grosime a tablelor care se sudează: $\pm 0,4$ mm;
a) FeMnSi; b) CuZnAl

Urmare a timpului foarte scurt de sudare (identic cu durata descărcării condensatoarelor), încălzirea materialului sudurii are loc cu viteză foarte mare, zona din jurul punctului topit nu este încălzită semnificativ, iar răcirea se va face de asemenea cu viteză mare. Încălzirea materialului sudurii are loc în timpul impulsului de bază, prin efectul Peltier.

Căldura Q_p obținută prin efectul Peltier, se adună la căldura totală Q_t , conform relației (5):

$$Q = Q_t + Q_p \quad (5)$$

unde:

$$Q_t = \int_0^t R_t \cdot I_s^2 \cdot dt - \text{căldura totală}$$

Unde:

- $Q_p = k_p \cdot I_{sc} \cdot t_s$ – căldura dezvoltată prin efectul Peltier;
- t_s – timpul de sudare [s];
- I_{sc} – valoarea maximă a impulsului reprezentat prin oscilogramă [kA];
- k_p – coeficientul Peltier [mV].

Mărimile calculate au valorile prezentate în tabelul 3.4.

Tabelul 3.4. Valorile calculate pentru principalii parametri

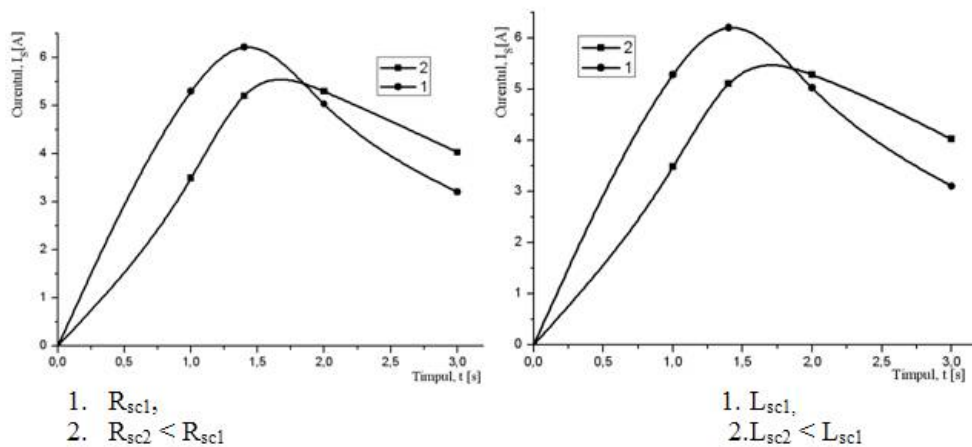
Parametrul	k_p [mV]	I_s [A]	t_s [s]	Q_p [cal]	Q_t [cal]	Q_p [cal]
Valoarea	52	6210	0,02	$6,458 \times 10^3$	$7,777 \times 10^7$	$7,778 \times 10^7$

Din relația (5), rezultă proporționalitatea căldurii Q_t cu pătratul curentului de sudare și a căldurii Q_p cu valoarea echivalentă a curentului de sudare I_{sc} , care se determină grafic, prin construirea și integrarea diagramelor I_{sc} relația (6):

$$I_{sc} = \sqrt{\frac{1}{t_s} \int_0^t I_s^2 \cdot dt} \quad (6)$$

Influența rezistenței electrice R_{sc} și a inductivității L_{cs} , asupra formei curentului de sudare este arătată în figura 3.12. Au fost păstrate constante raportul de transformare K , capacitatea condensatoarelor și tensiunea de încărcare a acestora.

Din figura 3.12 rezultă că modificarea valorilor R_{sc} și/sau L_{cs} influențează forma, respectiv caracterul și valoarea maximă a curentului de descărcare.



a)

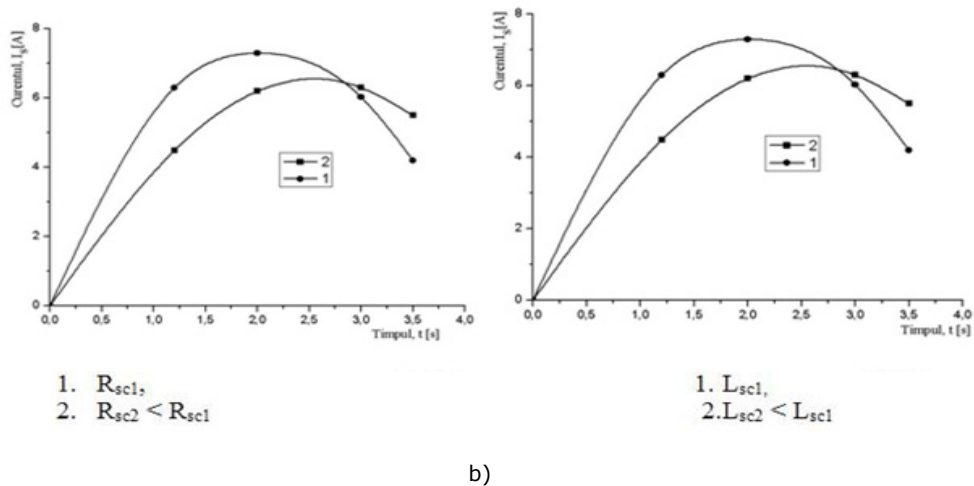


Figura 3.12 Caracterul descărcării condensatoarelor în funcție de rezistența electrică, R_{sc} și de inductivitatea, L_{sc} a circuitului de sudare: a. $R_{sc} = f(t)$ la $L_{sc} = \text{const.}$; b. $L_{sc} = f(t)$ la $R_{sc} = \text{const.}$
a) FeMnSi; b) CuZnAl

Astfel, la o mașină de sudat dată, 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.

Mărimile C , U_c și K au valori reglabile, astfel:

- C – se modifică în trepte 1-2 între 500 μF și 100.000 μF ;
- U_c – se modifică continuu de la 0 - 250 V pentru FeMnSi și de la 0 - 360 V pentru CuZnAl;
- K – se modifică în patru trepte 15; 20; 45; 60 prin modificarea numărului de spire primare ale transformatorului de sudare.

Influența acestor parametri asupra caracterului și valorii maxime a impulsului de descărcare este prezentată în figura 3.13.

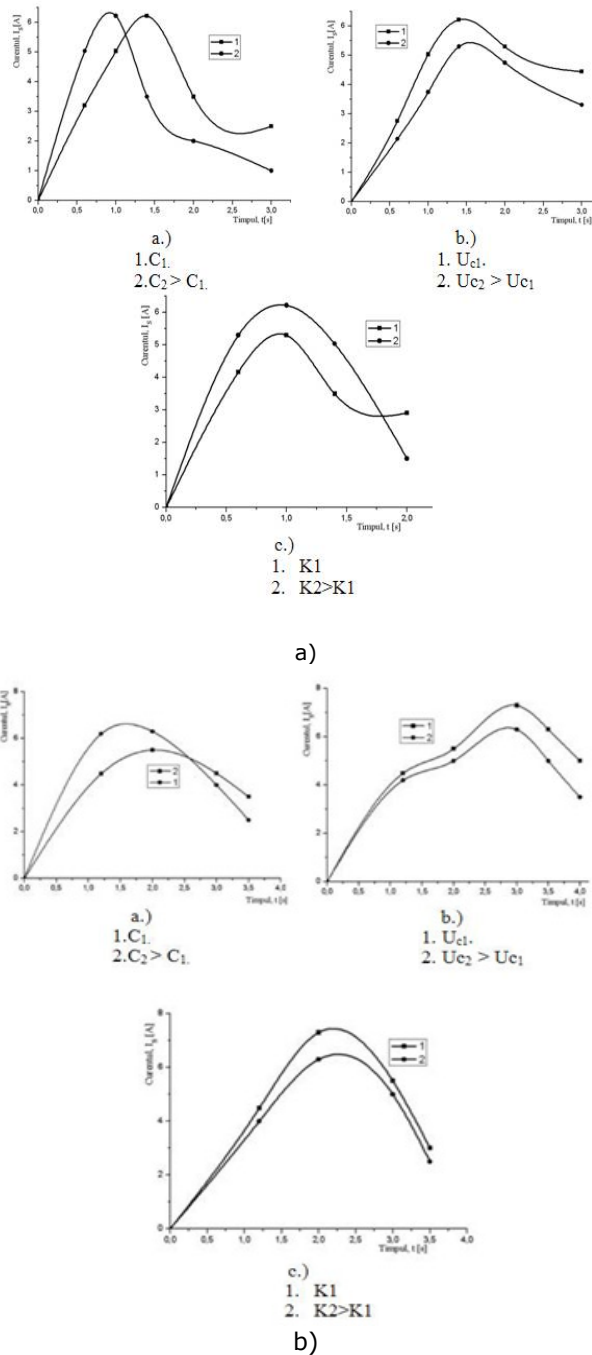


Figura 3.13. Forma curentului de sudare $I_s = f(t_s)$: a). capacitatea reglabilă $C_2 < C_1$; b). tensiunea reglabilă $U_{c2} < U_{c1}$; c). raportul de transformare reglabil $K_2 < K_1$. a) FeMnSi; b) CuZnAl

Din analiza figurilor 3.12 și 3.13 se pot trage următoarele concluzii:

- prin modificarea capacității bateriei de condensatoare și menținerea constantă a celorlalți parametri, se păstrează neschimbată valoarea maximă a curentului de sudare, iar timpul de sudare crește sau scade odată cu creșterea respectiv scăderea capacității condensatoarelor (figura 3.13a);
- la valori constante ale lui C și K, curentul maxim de sudare variază proporțional și în același sens cu tensiunea de încărcare a condensatoarelor (figura 3.13b);
- modificându-se tensiunea de încărcare a condensatoarelor la $C = \text{const.}$ și $K = \text{const.}$, raportul de transformare K al transformatorului influențează curentul de sudare după caracteristica dată în figura 3.13c, adică, pentru un K mic crește curentul de sudare, respectiv scade timpul de descărcare și invers;
- inductivitatea circuitului exterior influențează curentul și timpul de sudare, după variația dată în figura 3.12b; curentul de sudare scade cu creșterea inductivității, iar timpul de sudare crește;

creșterea rezistenței totale provoacă o scădere a curentului de sudare și o creștere a timpului de sudare figura 3.12a.

3.3.2 Calculul curentului de sudare

După analizarea procesului de descărcare a bateriei de condensatoare prin transformatorul de sudare și prin tiristor, se obțin ecuațiile care descriu procesul de sudare electrică prin presiune în puncte cu energie înmagazinată în câmp electrostatic.

Expresia curentului de sudare este dată de relația (7), [59]:

$$i_2(t) = \frac{M(s_1)}{N(s_1)} \cdot e^{s_1 t} + \frac{M(s_2)(s_2 - s_1) - M(s_2)}{(s_2 - s_1)} \cdot e^{s_2 t} \frac{M(s_2)}{s_2 - s_1} \cdot e^{s_2 t} [kA] \quad (7)$$

unde:

$$M(s) = \frac{M \cdot U_t (Q^-)}{L_1 \cdot L_t} \cdot s [V \cdot mm/H]$$

$$N(s) = s^3 + s^2 \frac{R_t \cdot L_1 + R_1 \cdot L_t}{L_1 \cdot L_t} + s \frac{L_t + R_t \cdot R_1 \cdot C}{C \cdot L_1 \cdot L_t} + \frac{R_t}{C \cdot L_1 \cdot L_t} [\text{ohm} \cdot \text{mm}/H]$$

Pe baza acestor relații au fost calculați parametrii electrici din tabelul 3.5.

Tabelul 3.5. Valorile parametrilor electrici calculați cu relația (7).

Par.	R _{sc} [μΩ]	R _{ceș} [μΩ]	R _p [μΩ]	R _t [μΩ]	X _e [μΩ]	X _{sci} [μΩ]	X _{ti} [μΩ]	L [H]	L ₁ [H]	L ₂ [H]	L _t [H]
Val.	10.. 30	60.. 100	4.. 15	100, 836	200... 350	20.. 30	270. 300	200, 637	8,914 x 10 ⁸	9, 524	88, 889

3.3.3 Determinarea caracterului procesului de descărcare a condensatoarelor

În funcție de parametrii de proces, forma impulsului de descărcare a bateriei de condensatoare poate fi aperiodică, cu atenuare critică și periodic amortizată.

Pentru mașina de sudat cu care s-au făcut experimentările, (modelul experimental MSC-2700) sunt cunoscuți atât parametrii circuitului de descărcare (C, L₁ și R₁), cât și parametrii circuitului de sudare (L₂, R₂, R_s și L_s), putându-se determina astfel forma curentului de sudare dat de relația lui Hevised [3].

Soluțiile k_B scrise cu coeficienți concentrați, sunt date de relația (8), iar valorile obținute sunt centralizate în tabelul 3.6.

$$s^3 + k_1 \cdot s^2 + k_2 \cdot s + k_3 = 0 \quad (8)$$

unde:

$$k_1 = \frac{R_t \cdot L_1 + R_1 \cdot L_t}{L_1 \cdot L_t - M^2} = \frac{k_A}{k_B}$$

$$k_2 = \frac{L_t + R_t \cdot R_1 \cdot C}{C \cdot (L_1 \cdot L_t - M^2)} = \frac{k_C}{C \cdot k_B}$$

$$k_3 = \frac{R_t}{C(L_1 \cdot L_t - M^2)} = \frac{R_t}{C \cdot k_B}$$

$$k_A = R_t \cdot L_1 + R_1 \cdot L_t$$

$$k_B = L_1 \cdot L_t - M^2$$

$$k_C = L_t + R_t \cdot R_1 \cdot C$$

$$k_D = R_1 \cdot R_t + \frac{L_t}{C}$$

Tabelul 3.6. Valorile calculate pentru coeficienții concentrați

Mar.	S1	S2	S3	kA	kB	kC	kD	k1	k2	k3	M(s) [V·mm /H]	N(s) [Ohm· Mm /H]	i ₂ max [kA]
Val.	-3	1,5	1,5	6,32 X 10 ³	1,56 X 10 ⁴	320, 55	2,67 X 10 ⁵	0, 405	17, 11	5, 83	10, 16	172, 07	42, 05

Pentru un caracter aperiodic sau cu atenuare critică, a rezultat condiția dată de relația (9), [12], pentru care expresia „E” trebuie să tindă la zero ($E \rightarrow 0$):

$$E = \frac{1}{27} \left[R_1 \cdot R_t + \frac{L_t}{C} - \frac{1}{3} \cdot k_1 (R_1 \cdot L_t + R_t \cdot L_1) \right]^2 + \frac{1}{4} \left[\frac{R_t}{C} \cdot \frac{1}{3} k_1 (R_1 \cdot R_t + \frac{L_t}{C}) + \frac{2}{27} k_1^2 (R_1 \cdot L_t + R_t \cdot L_1) \right]^2 \quad (9)$$

Dacă se notează cu k_D suma $R_1 \cdot R_t + \frac{L_t}{C}$, se obține relația (10):

$$E = \frac{1}{27} \left(k_D - \frac{1}{3} k_1 \cdot k_A \right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{R_t}{C} - \frac{1}{3} k_1 \cdot k_D + \frac{2}{27} \cdot k_1^2 \cdot k_A \right)^2 = 6,99 \cdot 10^{14} \Rightarrow \log E = 14,844 \quad (10)$$

Graficul de variație a lui E în funcție de capacitatea „C” a condensatoarelor, este prezentat într-o diagramă semilogaritmă în figura 3.14.

Capacitatea condensatoarelor mașinii model experimental MSC - 2700 pentru sudarea electrică prin presiune în puncte cu energie înmagazinată este cuprinsă între 50 4000 μ F.

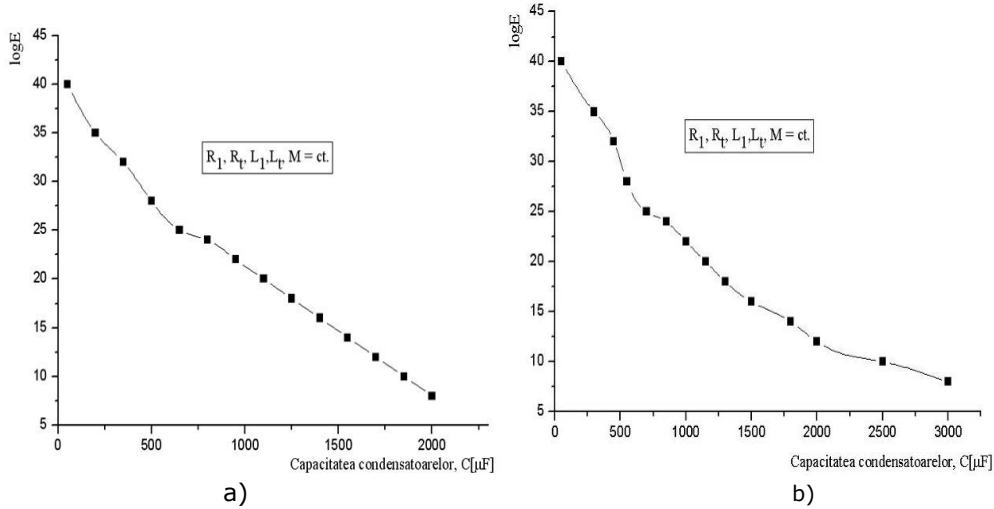


Figura 3.14. Dependența expresiei „E” în funcție de capacitatea condensatoarelor „C”
a) FeMnSi; b) CuZnAl

Dependența arătată în figura 3.15, pentru valorile: R₁; R_t; L₁; L_t și M ale modelului experimental MSC - 2700, arată că impulsurile curentului de sudare și de preîncălzire trebuie să aibă un caracter aperiodic sau cu atenuare critică, chiar și la o capacitatea minimă de 50 µF și o tensiune mică de încărcare (cca. 200 V_{c.c}).

3.3.4 Valoarea maximă și evoluția în timp a curentului de sudare

Întreaga energie înmagazinată se consumă la prima alternanță, dacă curentul de sudare, respectiv curentul de preîncălzire au caracter aperiodic sau cu atenuare critică.

În continuare, s-a încercat să se determine valoarea maximă a curentului și variația acestuia în timp pentru diferite valori ale parametrilor modelului experimental MSC - 2700.

Expresia curentului dată de relația (6) are următoarea formă:

$$i_2(t) = \frac{\frac{M \cdot U_c^{(0+)}}{L_t \cdot L_1} \cdot s_1}{s_1^3 \cdot s_2^2 \cdot \frac{R_t \cdot L_1 + R_1 \cdot L_t}{L_t \cdot L_1} + s_1 \cdot \frac{L_t + R_1 \cdot R_t \cdot C}{C \cdot L_t \cdot L_1} + \frac{R_t}{C \cdot L_t \cdot L_1}} \cdot e^{s_1 t} + \frac{\frac{M \cdot U_c^{(0+)}}{L_t \cdot L_1} \cdot s_2 (s_2 - s_1) - \frac{M \cdot U_c^{(0+)}}{L_t \cdot L_1} \cdot s_2}{(s_2 - s_1)^2} \cdot e^{s_2 t} + \frac{\frac{M \cdot U_c^{(0+)}}{L_t \cdot L_1} \cdot s_2}{(s_2 - s_1)} \cdot t \cdot e^{s_2 t} \quad (11)$$

După înlocuirea valorilor în relația (11), se obține valoarea curentului de sudare ca fiind:

$$i_2(t) = 57.601[kA].$$

Datele de intrare sunt: L_1 ; L_t ; R_1 ; R_t ; M ; C ; timpul t și raportul de transformare K . Valorile obținute și curbele de variație a curentului de sudare în timp, sunt prezentate în tabelul 3.7, respectiv, figura 3.15.

Tabelul 3.7. Valorile punctelor $I_s = f(t)$, pentru diferite valori: 1. L_1 ; 2. L_t ; 3. R_1 ; 4. R_t ; 5. M ; 6. C

t [ms]	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
P ₁	0	3,8	3,5	2,8	2	1,5	1,5	1,5	1,3	1,3
P ₂	0	4,3	4	3	2,4	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8
P ₃	0	7,2	6	5,2	4	3,6	2,8	2,1	2,1	2,1
P ₄	0	10	9,5	8	6	5	4	3,5	2,4	2,4
P ₅	0	13	12	10	8	6	5	4,2	4	3,8
P ₆	0	16	15,8	14	12	8	6,3	4,8	3	1,3

Variația curentului de sudare $i_2(t)$ și curbele 1...6 prezentate, au caracter aperiodic, ceea ce confirmă valabilitatea relațiilor folosite.

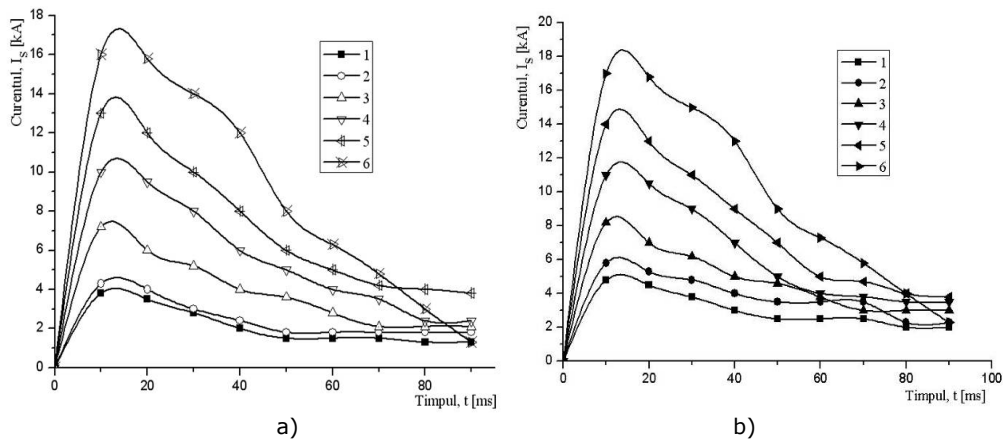


Figura 3.15 Variația curentului de sudare calculat în funcție de timp după relația (11): 1 - L_1 ; 2 - L_t ; 3 - R_1 ; 4 - R_t ; 5 - M ; 6 - C ; a) FeMnSi; b) CuZnAl

Valorile maxime ale curenților de sudare pentru rapoartele de transformare de 60, 45, 30 și 15, la modificarea tensiunii și capacității condensatoarelor, vor fi confruntate cu oscilogramele ridicate pentru modelul MSC – 2700.

Concluzii

- Prin schimbarea capacității bateriei de condensatoare cu păstrarea constantă a celorlalți parametri, are loc o variație direct proporțională a timpului de sudare;
- La modificarea tensiunii de încărcare a condensatoarelor, valoarea maximă a curentului de sudare variază în același sens cu aceasta;
- Raportul de transformare K , al transformatorului influențează curentul de sudare, adică: pentru un K mic crește curentul de sudare, iar timpul de descărcare scade; pentru un K mare scade curentul de sudare, iar timpul de descărcare crește;
- Inductivitatea circuitului exterior influențează curentul de sudare și timpul de sudare după cum urmează: curentul de sudare scade odată cu creșterea inductivității și a rezistenței totale, iar timpul de sudare crește;
- Pentru valorile R_1 ; R_t ; L_1 ; L_t și M , dependența trasată arată că impulsurile curentului de sudare și de preîncălzire au un caracter aperiodic sau cu atenuare critică, chiar la capacitatea minimă de 50 μF și o tensiune redusă de cca 200V_{cc}.

3.4 Investigații metalografice și examinări sclerometrice

Calculule prezentate anterior au fost valorificate prin experimente conduse pe câte două seturi de probe din fiecare categorie de aliaj, iar valorile parametrilor optimi de proces sunt centralizate în tabelul 3.8.

Tabelul 3.8 Parametrii utilizați la sudarea prin presiune cu energie înmagazinată în condensatoare.

Parametrii	FeMnSi		CuZnAl	
	Regim I	Regim II	Regim I	Regim II
U_c (V)	350	400	360	360
R (Ω)	200	200	200	200
C (μF)	1200	1250	3500	3500
t (sec)	2	2	1,5	1,5

Din îmbinările realizate au fost executate probe cu fețe transversale care au fost supuse operațiilor de șlefuire – lustruire pe o instalație specială.

Atacul metalografic s-a efectuat cu următorii reactivi chimici:

- 3ml Glicerina, 4ml HCl, 1ml HNO₃, timp de 15 s, la temperatura de 20°C pentru aliajul feros FeMnSi,
- clorură cuprică ferică, timp de 3 s, la temperatura de 20°C, pentru aliajul neferos CuZnAl.

În continuare sunt exemplificate câteva imagini micrografice ale îmbinărilor sudate la parametrii de regim utilizați în experiment.

aliaj FeMnSi:

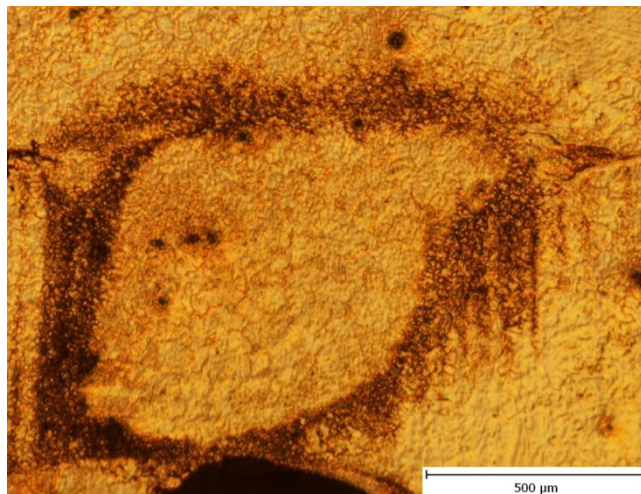
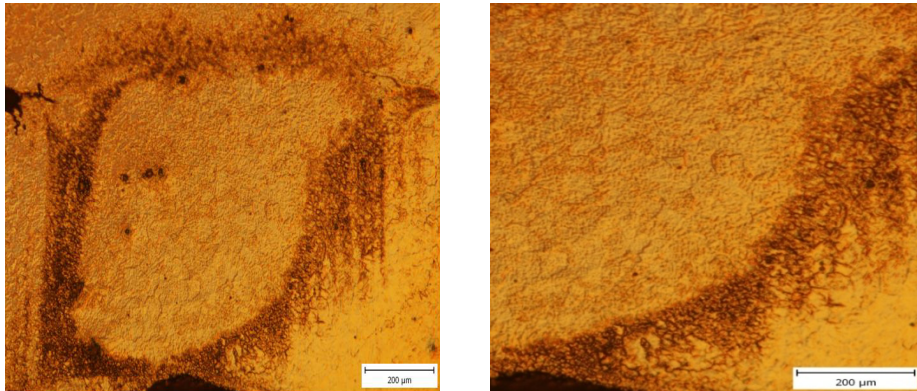
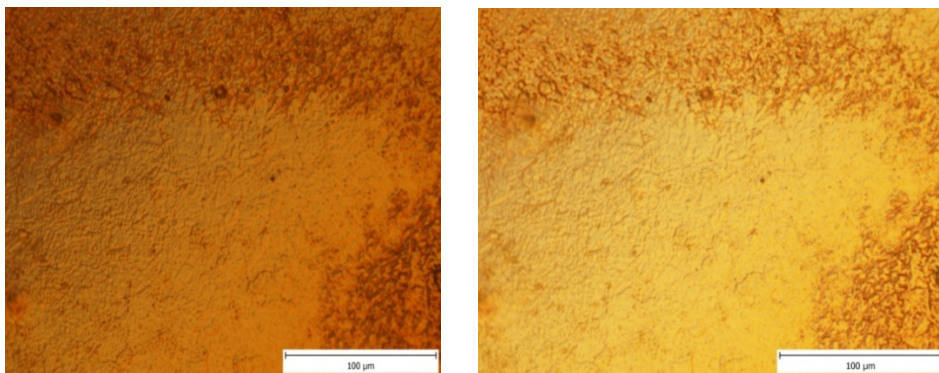


Figura 3.16. Punctul de sudură, regim I

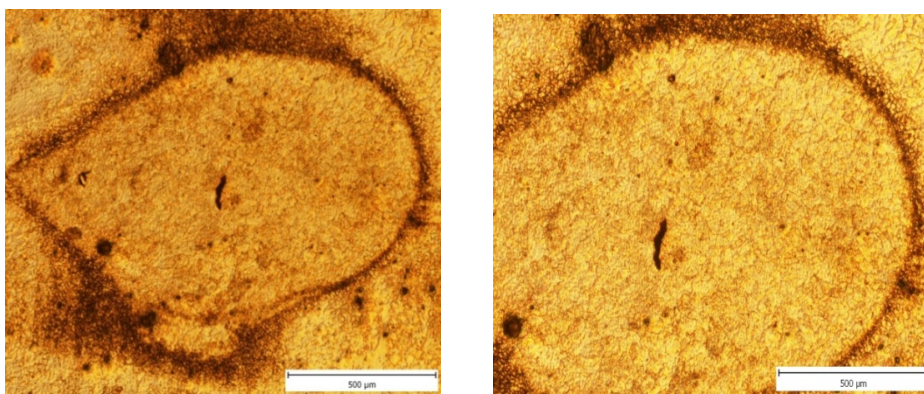


a) b)
Figura 3.17. Zona centrală, regim I



a) b)

Figura 3.18. Zona centrală, regim I



a) B)

Figura 3.19. Zona centrală, regim II

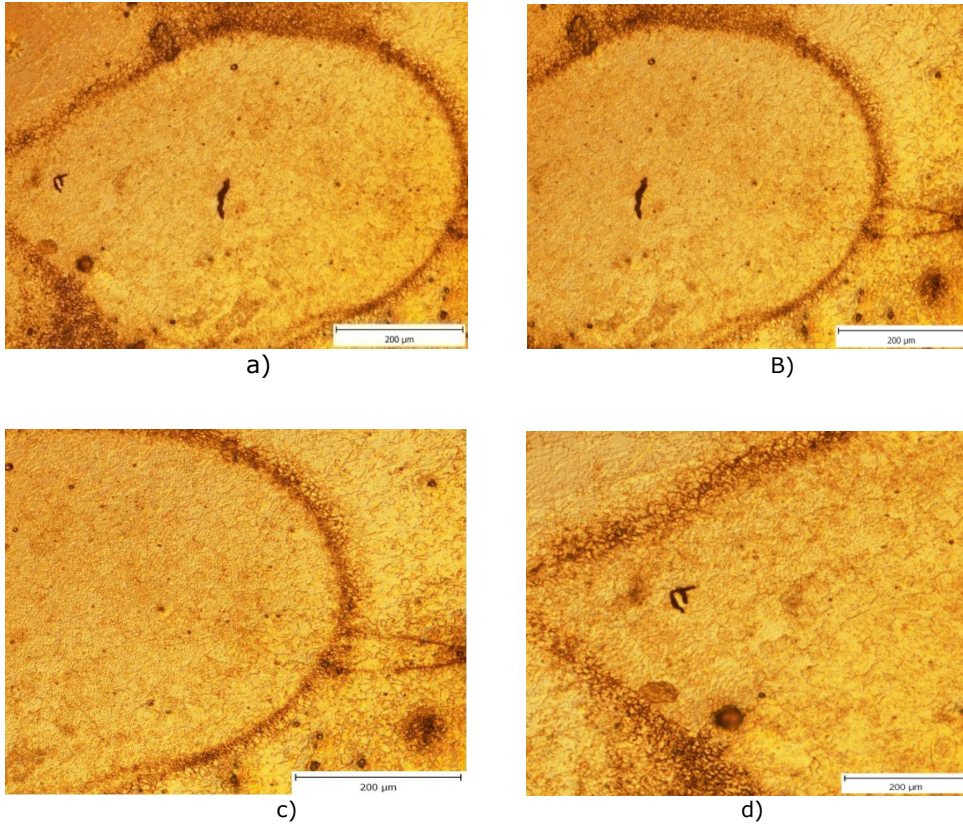


Figura 3.20. Zona de imbinare, regim II
a,b – Punct sudat;
c,d – interfața sudură – material de bază

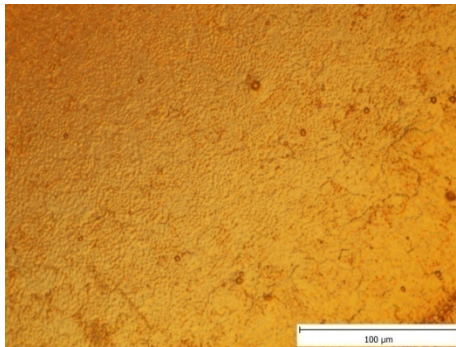


Figura 3.21. Zona centrală, regim II

Analizand figurile de mai sus putem observa că la primul regim de sudare s-au obtinut îmbinări sudate de calitate, nefiind prezente retasuri de contracție în centrul punctului sudat, situație caracteristică celui de-al doilea regim termic.

Rezultatele încercărilor de duritate pentru aliajul feros FeMnSi sunt prezentate în tabelele 3.9, 3.10 și figurile 3.22, 3.23.

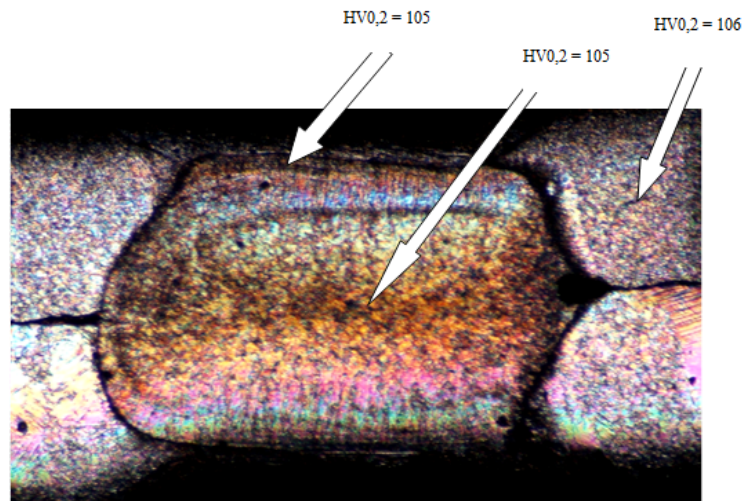


Figura 3.22. Distribuția durității în îmbinarea sudată, regim I

Tabelul 3.9 Valorile durității pentru aliajul FeMnSi, regim I

d [mm]	HV _{0,2} - PCT	HV _{0,2} - ZIT	HV _{0,2} - MB
0.5	105	103	106
1	100	100	104
1.5	103	103	105
2	100	103	101
2.5	104	105	103

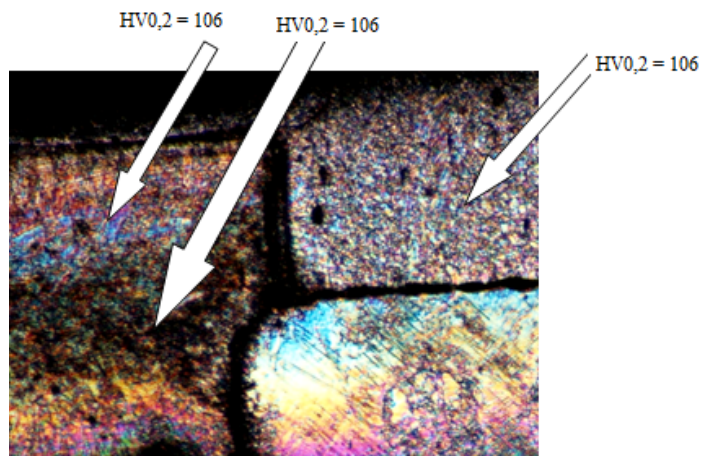


Figura 3.23. Distribuția durității în îmbinare la cel de-al doilea regim

Tabelul 3.10 Valorile durității pentru aliajul FeMnSi pentru cel de-al doilea regim

d [mm]	HV _{0,2} - PCT	HV _{0,2} - ZIT	HV _{0,2} - MB
0.5	106	106	106
1	100	100	104
1.5	100	103	105
2	101	105	101
2.5	105	103	103

În continuare sunt prezentate imaginile macro- și micrografice ale aliajului CuZnAl, sudat cu energie înmagazinată în condensatoare.

Experimentele au fost conduse pe probe din aliaje cu efect de memorie a formei CuZnAl (având compoziția chimică: 25,83%Zn, 3,99%Al iar restul Cu determinate prin EDX), figura 3.24.

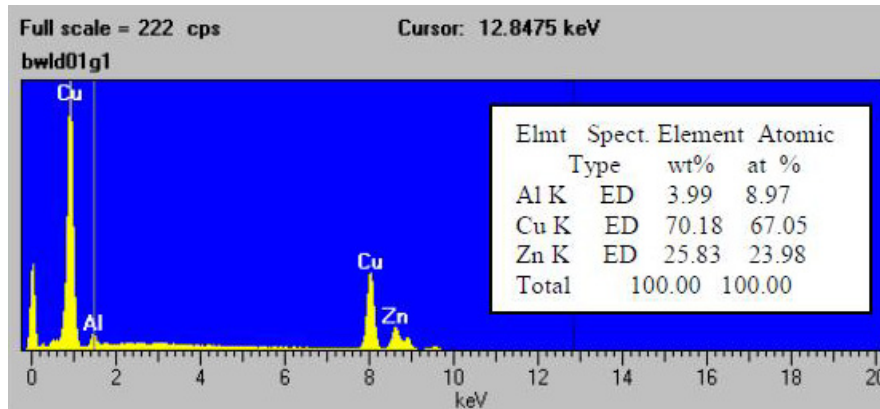


Figura 3.24. EDX compoziția chimică

Grosimea probelor a fost aproximativ 0,5mm, fiind obținută prin forjare și laminare la rece cu recoacere intermediară.

Tratamentul termic aplicat a fost cel de călire de la 850°C timp 10 minute cu răcire în apă clocotită. Un set de probe au fost îmbătrânite la 400°C timp de 1h.

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, așa cum este prezentat în figura 3.25 - structura martensitică, dar și pe probe îmbătrânite, cu precipitate α , figura 3.26, probe care sunt mai dure.

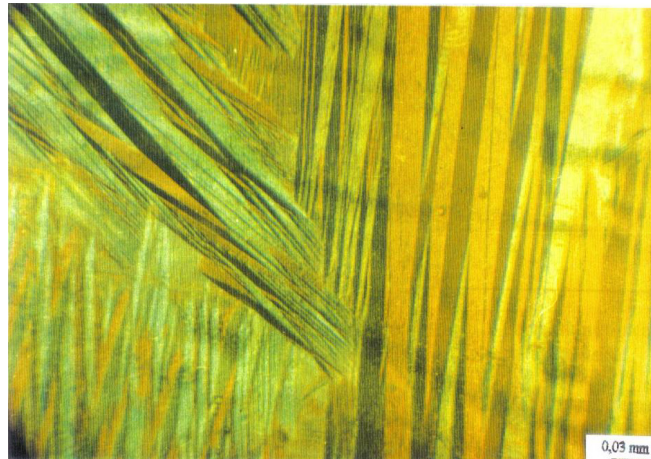


Figura 3.25. Martensită de călire

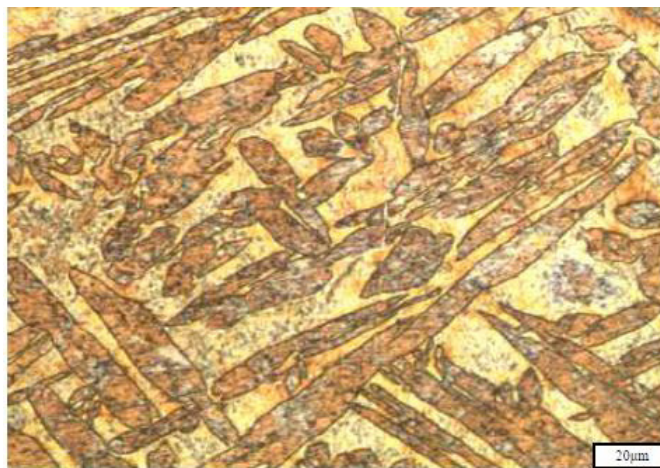


Figura 3.26. Martensită îmbătrânită

Probele călite (structură martensitică), prezintă deformații locale mai mari, la contactul piesei cu electrodul, în comparație cu probele care au fost și îmbătânite, din cauza caracteristicilor diferite de plasticitate. Aceasta a condus la strapungerea probelor călite, la care s-a utilizat energie mare de sudare, strapungere ce nu a fost observată și la piesele îmbătrânite.

Imaginile macroscopice ale probelor din aliajul cu efect de memorie a formei CuZnAl, în stare martensitică, sudat la diferite regimuri sunt prezentate în figura 3.27.

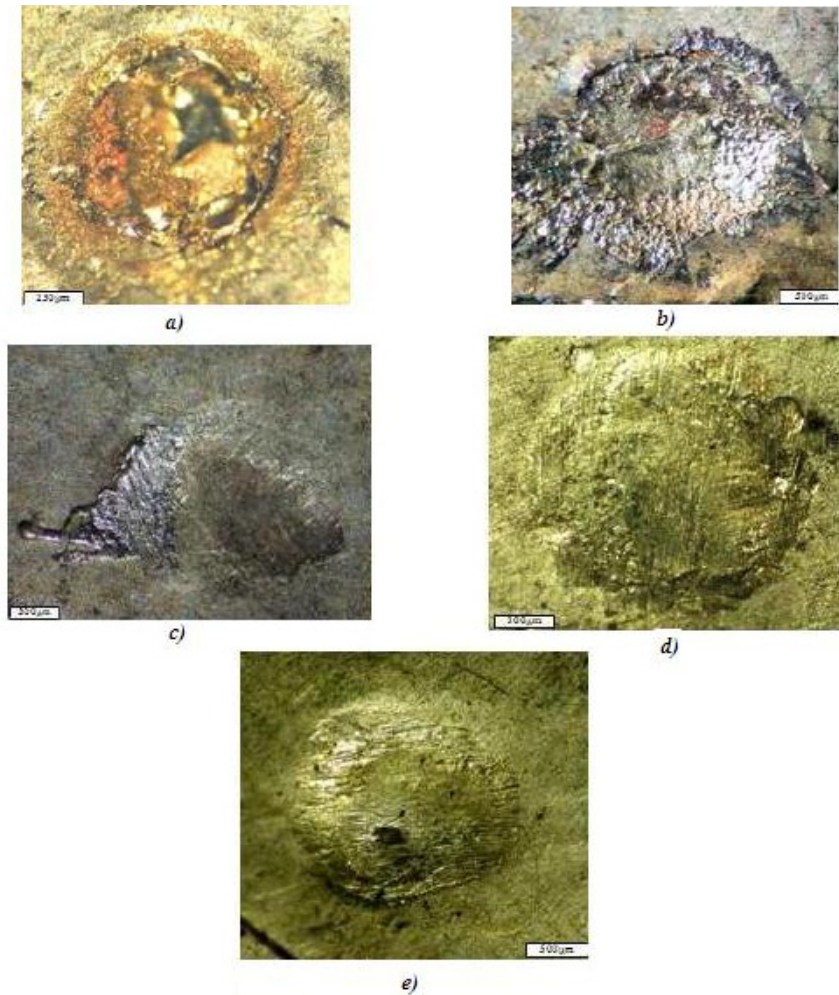


Figura 3.27. Imaginile macroscopice ale aliajului CuZnAl, în stare martensitică, sudate cu energie înmagazinată la diferiți parametri: a) 3950 μ F; 340V; 228J - punctul topit și străpuns semnificativ; b) 3250 μ F; 340V; 188J - punct topit fără străpungere; c) 3750 μ F; 300V; 169J - amprenta punctului cu ușoară topire; d) 3250 μ F; 300V; 146J - amprenta punctului, fără topire; e) 3000 μ F; 360V; 194J - amprenta punctului, fără topiri majore, cu străpungere punctiformă.

Principalele observații sunt legate de faptul că parametrii mai duri utilizați la sudarea cu energie înmagazinată (340 V și 3000 la 4000 μ F), provoacă topirea locală, chiar și la interfața electrod – probă. Reducerea energiei generează amprente locale, dar nu rezultă zone de topire.

Totuși pentru o tensiune mare și capacitate scăzută, au fost observate pătrunderi locale, fără topiri la interfața dintre electrod și probele de sudat (figura 3.28)

În continuare sunt prezentate imaginile microscopice ale aliajului CuZnAl.



Figura 3.28. Punct de sudura – CuZnAl

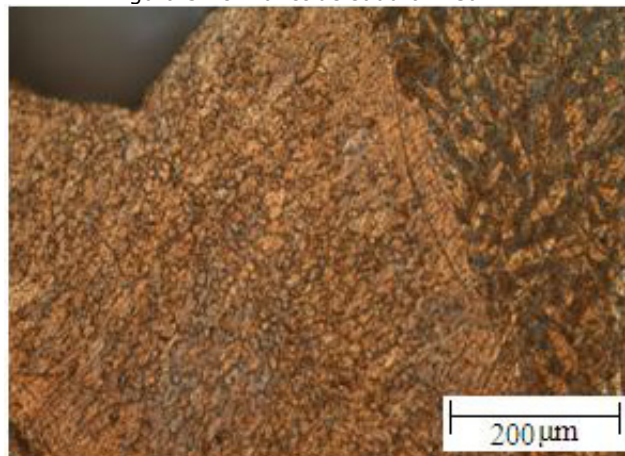


Figura 3.29. Zona de creștere epitaxială – CuZnAl

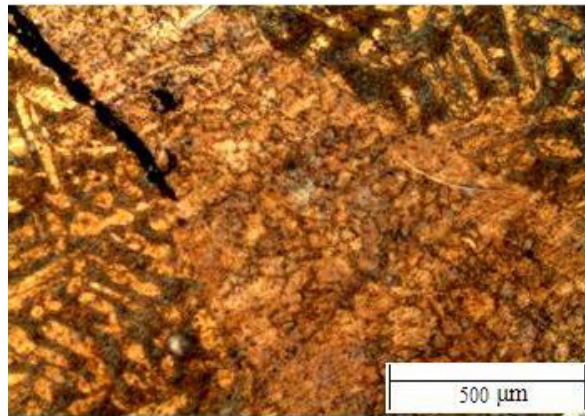


Figura 3.30. Structură dendritică - CuZnAl

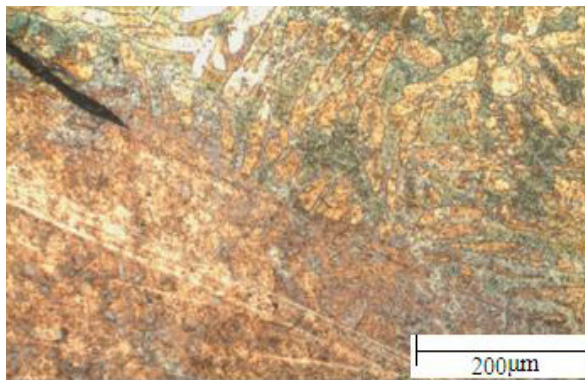


Figura 3.31. Structură Z.I.T. - CuZnAl

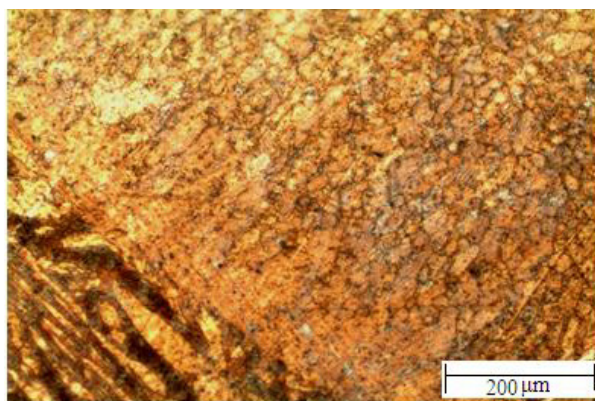


Figura 3.32. Zona de imbinare, parte exterioara - CuZnAl

La alegerea parametrilor greșiți pot să apară defecte în îmbinarea sudată așa cum se prezintă în figurile de mai jos.

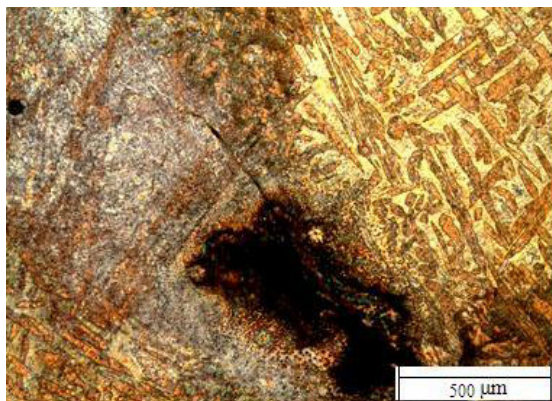


Figura 3.33 Zonă cu defect de tipul retasurii de contracție - CuZnAl



Figura 3.34. Zona cu defect de tipul fisurii - CuZnAl

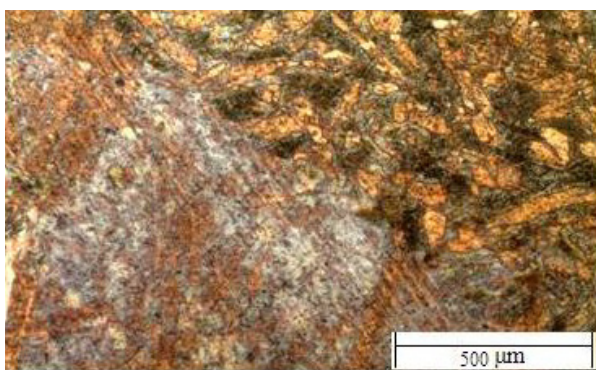


Figura 3.35. Interfața dintre metalul de bază și îmbinarea sudată - CuZnAl

Rezultatele încercărilor de duritate pentru aliajul neferos CuZnAl sunt prezentate în tabelele 3.11, 3.12 și figurile 3.36, 3.37.

Tabelul 3.11 Valorile durității pentru aliajul neferos CuZnAl, pentru regimul I

d [mm]	HV _{0,2} - PCT	HV _{0,2} - ZIT	HV _{0,2} - MB
0.5	76	90	86
1	91	79	88
1.5	89	88	85
2	85	87	85
2.5	85	85	85



Figura 3.36. Distribuția durității în îmbinare, regimul I

Tabelul 3.12 Valorile durității pentru aliajul neferos CuZnAl, pentru regimul I

d [mm]	HV _{0,2} - PCT	HV _{0,2} - ZIT	HV _{0,2} - MB
0.5	90	88	90
1	90	89	83
1.5	91	87	89
2	88	82	89
2.5	89	83	83

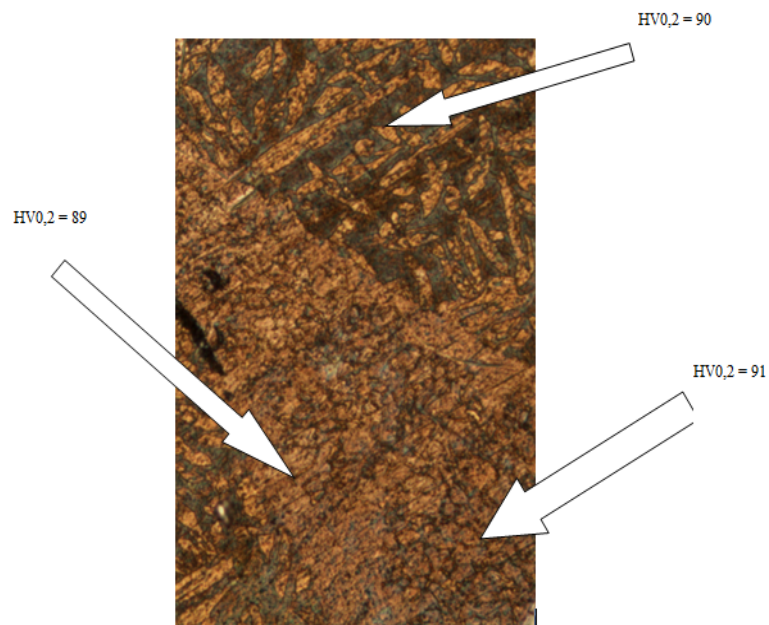
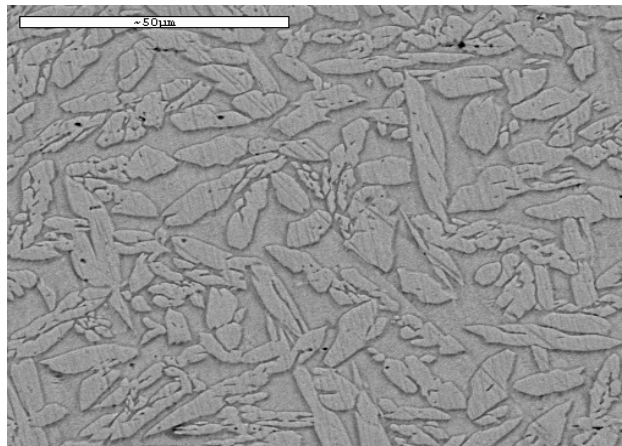


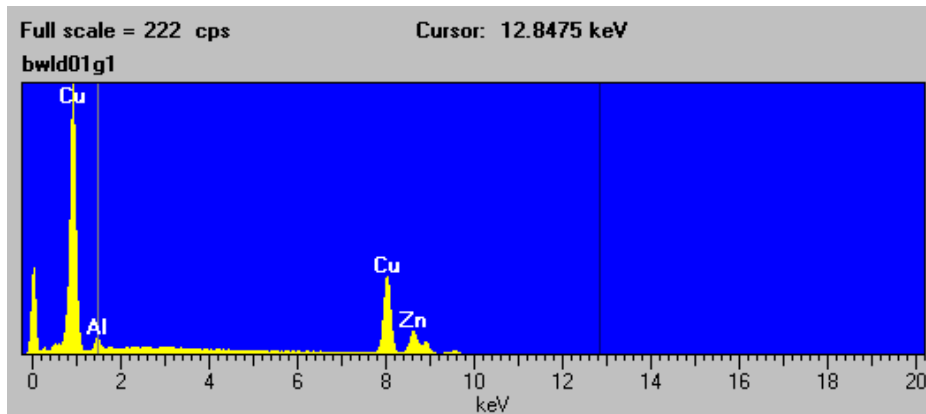
Figura 3.37. Distribuția durității maxime, pentru regimul II

3.5 Investigații asupra structurii fine a aliajului CuZnAl

Pentru experimente s-a folosit un aliaj CuZnAl din domeniul compozițional al aliajelor cu efect de memorie a formei. Caracteristicile aliajului în stare recoaptă sunt detaliate în figura 3.38 a, b, iar compoziția acestuia, în figura 3.38 c.



a)



b)

SEMQuant results. Listed at 2:36:37 PM on 5/12/10	Standards :			
Operator: CENIMAT	Al K	Al ₂ O ₃	23/11/93	
Client: All ISIS users	Cu K	Cu	01/12/93	
Job: Demonstration data SiLi detector	Zn K	Zn	01/12/93	
Spectrum label: Bwld01g1	Elemnt Type	Spect. %	Element %	Atomic %
System resolution = 109 eV Quantitative method: ZAF (3 iterations).	Al K	ED	3.99	8.97
	Cu K	ED	70.18	67.05
	Zn K	ED	25.83	23.98
Analyses all elements and normalized results.	Total		100.00	100.00
2 peaks possibly omitted: 0.04, 0.30 keV			* = <2 Sigma	

Figura 3.38. Caracteristicile aliajului CuZnAl, aflat în stare recoaptă

Aliajul se înscrie în limita de compoziție a aliajelor cu efect de memorie a formei, având o compoziție globală de 70, 18%Cu, 25,83%Zn, 3,99%Al (în procente de masă). Prin tratamentul termic de călire de punere în soluție la temperatura de 850°C urmată de răcire în apă cu gheață se obține o structură tipică de martensită, figura 3.39.

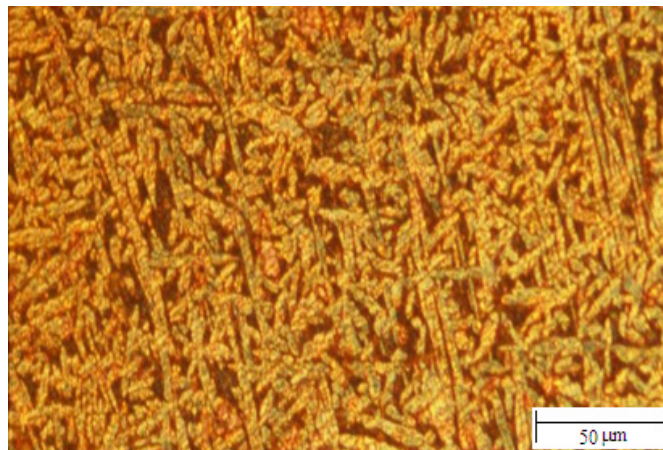


Figura 3.39. Structura aliajului CuZnAl

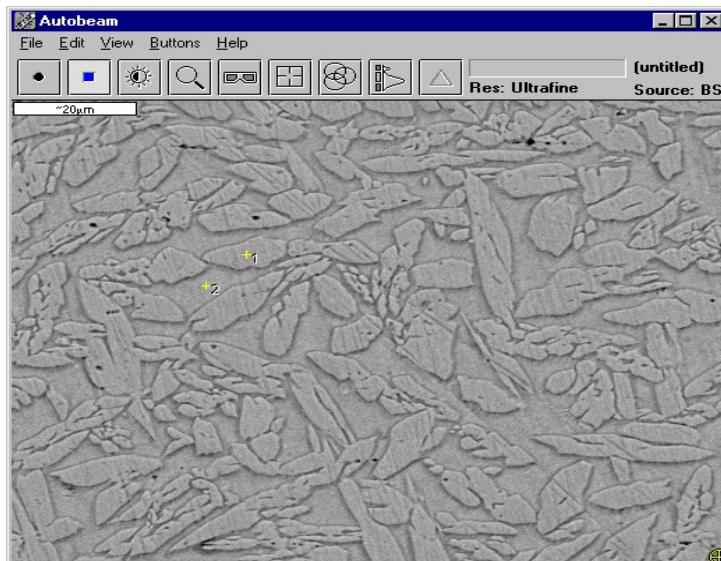
În sistemul CuZnAl este cunoscut faptul că faza mamă (CVC), se transformă în martensită prin călire. În aceste aliaje faza β la temperatura înaltă prezintă structură dezordonată tip A_2 , care prin răcire se transformă într-o structură β_2 , iar la răcirea în continuare apare tranziția $B_2 \rightarrow DO_3$. Călirea este necesară pentru evitarea descompunerii eutectoide de tip $\beta \rightarrow \alpha' + \gamma$.

Din punct de vedere al proprietăților, martensita din aliajul CuZnAl, se caracterizează prin duritate scăzută și deformabilitate mare în timp ce austenita este caracterizată prin duritate mare și deformabilitate redusă; de aceste proprietăți trebuie să se țină seama la alegerea soluției pentru sudarea electrică prin presiune în puncte, întrucât gradul de deformabilitate diferit al acestor două faze poate afecta atât parametrii procesului cât și repetabilitatea acestuia.

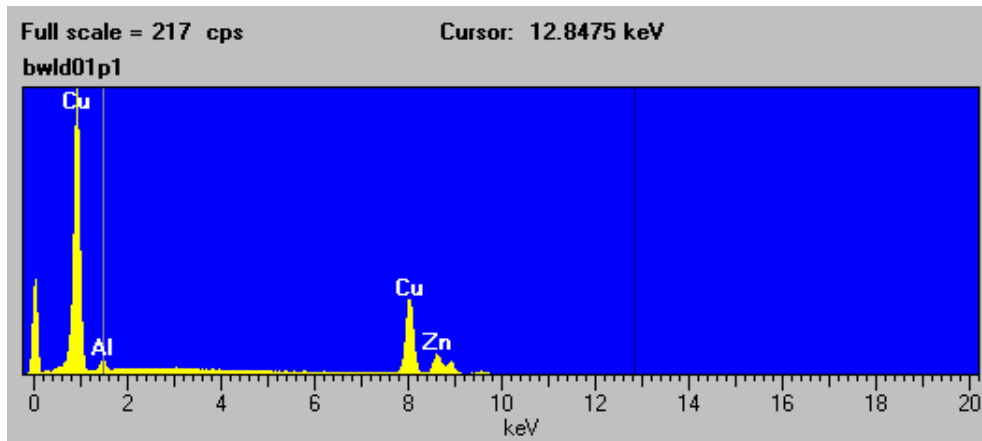
Experimentele au fost efectuate atât pentru sudarea aliajelor în stare recoaptă cât și a aliajelor în stare călită. Una dintre problemele sudării aliajelor în stare călită este legată de faptul că suprafețele în contact sunt moi și ca urmare apare o deformare puternică a acestora în cazul sudării electrice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

Structura în stare recoaptă este similară cu cea observată și de alți cercetători, fiind alcătuită din zone la care concentrația în Zn diferă puțin, figura 3.40 a, b, c, d, e.



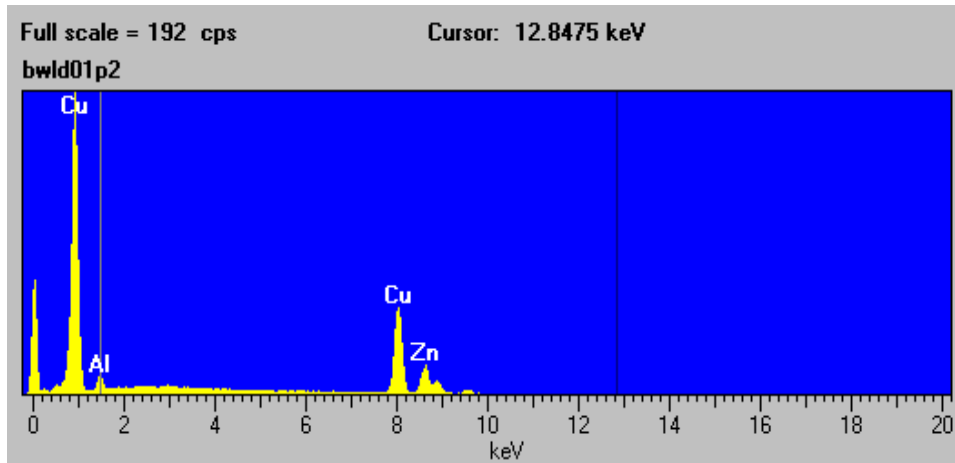
a)



b)

SEMQuant results. Listed at 2:43:39 PM on 5/12/10	Standards :																				
Operator: CENIMAT	Al K Al2O3 23/11/93																				
Client: All ISIS users	Cu K Cu 01/12/93																				
Job: Demonstration data SiLi detector	Zn K Zn 01/12/93																				
Spectrum label: Bwld01g1	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Elemt Type</th> <th>Spect.</th> <th>Element %</th> <th>Atomic %</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Al K</td> <td>ED</td> <td>3.76</td> <td>8.48</td> </tr> <tr> <td>Cu K</td> <td>ED</td> <td>71.80</td> <td>68.77</td> </tr> <tr> <td>Zn K</td> <td>ED</td> <td>24.44</td> <td>22.75</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Total</td> <td>100.00</td> <td>100.00</td> </tr> </tbody> </table>	Elemt Type	Spect.	Element %	Atomic %	Al K	ED	3.76	8.48	Cu K	ED	71.80	68.77	Zn K	ED	24.44	22.75	Total		100.00	100.00
Elemt Type	Spect.	Element %	Atomic %																		
Al K	ED	3.76	8.48																		
Cu K	ED	71.80	68.77																		
Zn K	ED	24.44	22.75																		
Total		100.00	100.00																		
System resolution = 109 eV Quantitative method: ZAF (3 iterations).																					
Analyses all elements and normalized results.																					
1 peaks possibly omitted: 0.04 keV	* = <2 Sigma																				

c)



d)

SEMQuant results. Listed at 2:52:37 PM on 5/12/10	Standards :			
Operator: CENIMAT	Al K	Al2O3	23/11/93	
Client: All ISIS users	Cu K	Cu	01/12/93	
Job: Demonstration data SiLi detector	Zn K	Zn	01/12/93	
Spectrum label: Bwd01g1	Elemnt Type	Spect. %	Element %	Atomic %
System resolution = 109 eV Quantitative method: ZAF (3 iterations).	Al K	ED	4.10	9.22
	Cu K	ED	68.93	65.77
	Zn K	ED	26.97	25.01
Analyses all elements and normalized results.	Total		100.00	100.00
3 peaks possibly omitted: 0.04, 5.68, 12.28 keV	* = <2 Sigma			

e)

Figura 3.40. Aliajul CuZnAl în stare recoaptă, concentrația în Zn

Experimentele pe secțiunea transversală a îmbinărilor sudate arată modificări ale morfologiei structurii în zona sudată figura 3.41, fără însă ca acestea să fie însoțite și de diferențe majore de compoziție chimică.

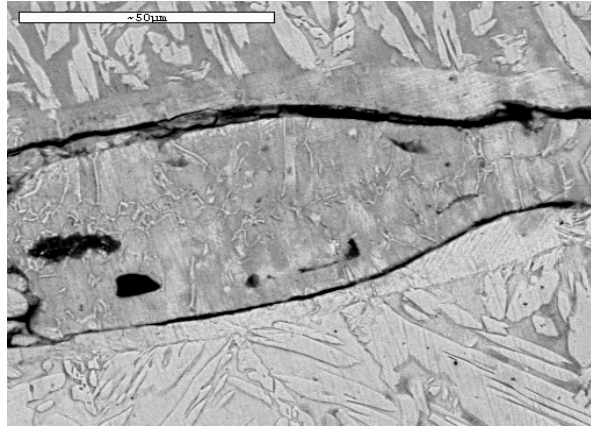
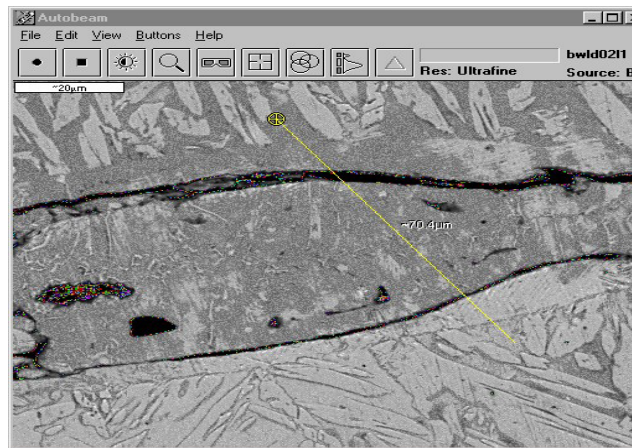
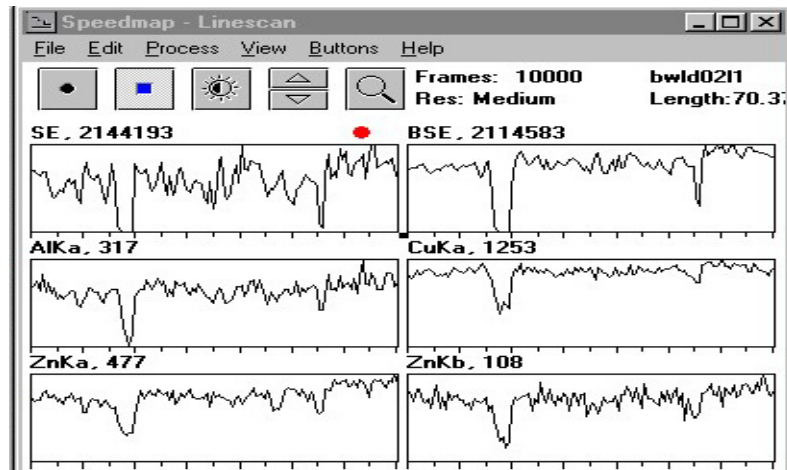


Figura 3.41. Imaginea microscopică a secțiunii transversale a îmbinării sudate

De exemplu, examinarea modificărilor compoziției pe o direcție figura 3.42, nu arată schimbări semnificative nici față de metalul de bază - CuZnAl.



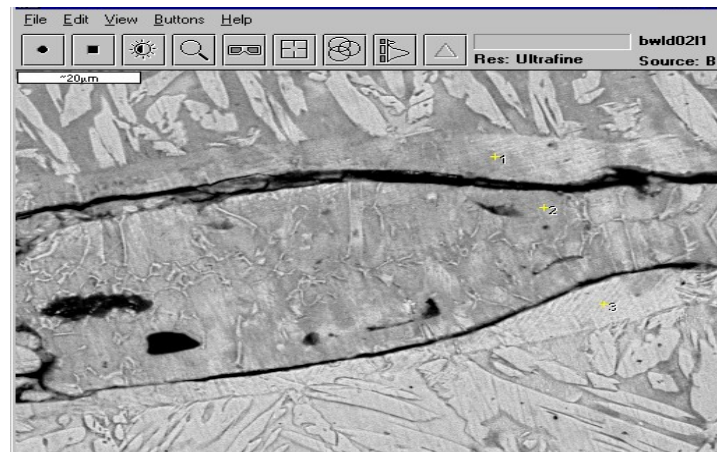
a)



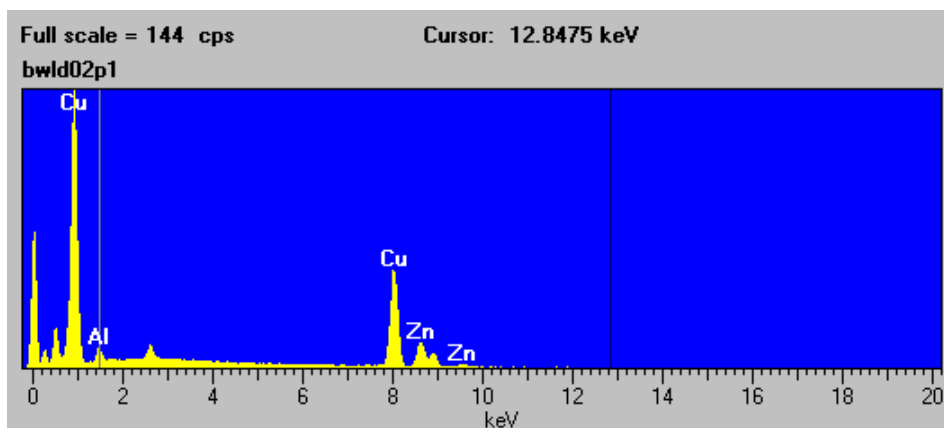
b)

Figura 3.42. Distribuția elementelor de aliere pe o direcție a îmbinării sudate

Se poate observa din figura 3.43 că în zona materialului topit pot să apară deteriorări care să conducă la separări, zona în care apare această separare pare mult mai aproape de materialul de bază decât de zona cu material topit. Este posibil ca deteriorarea să fie influențată de deformarea unor pori sau de apariția unor probleme legate de pierderi locale de Zn, figura 3.43 a, b, c, d, e, f, g.



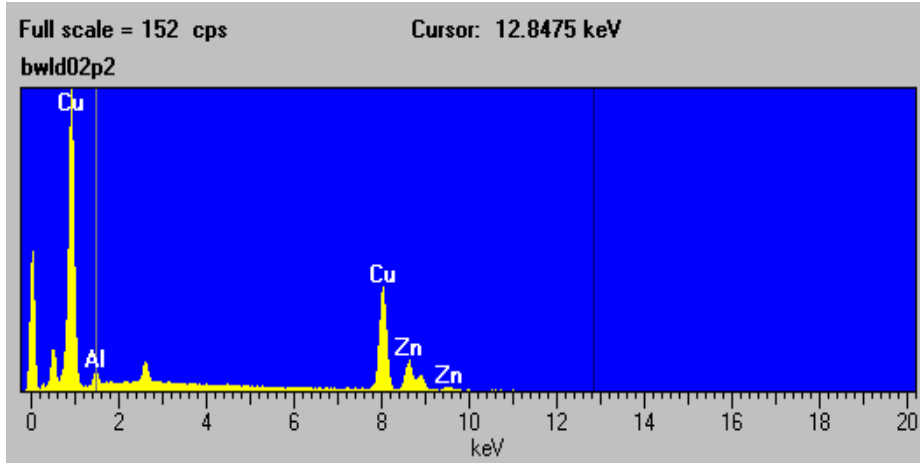
a)



b) - punctul 1

SEMQuant results. Listed at 3:25:12 PM on 5/12/10	Standards :			
Operator: CENIMAT	Al K	Al2O3	23/11/93	
Client: All ISIS users	Cu K	Cu	01/12/93	
Job: Demonstration data SiLi detector	Zn K	Zn	01/12/93	
Spectrum label: Bwld01g1	Elemnt Type	Spect. %	Element %	Atomic %
System resolution = 109 eV Quantitative method: ZAF (3 iterations).	Al K	ED	3.68	8.31
	Cu K	ED	71.57	68.63
	Zn K	ED	24.74	23.06
Analyses all elements and normalized results.	Total		100.00	100.00
3 peaks possibly omitted: 0.02, 0.28, 2.62 keV	* = <2 Sigma			

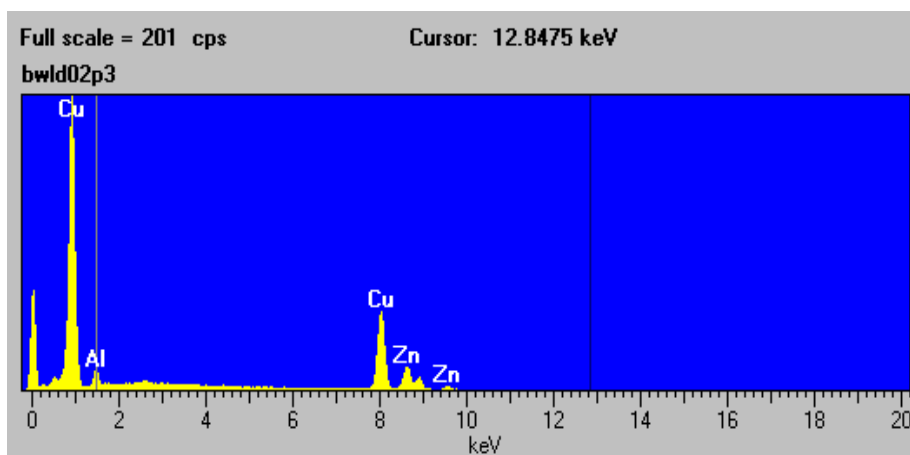
c) - punctul 1



d) - punctul 2

SEMQuant results. Listed at 3:26:07 PM on 5/12/10	Standards :			
Operator: CENIMAT	Al K	Al2O3	23/11/93	
Client: All ISIS users	Cu K	Cu	01/12/93	
Job: Demonstration data SiLi detector	Zn K	Zn	01/12/93	
Spectrum label: Bwld01g1	Elemnt	Spect. Type	Element %	Atomic %
System resolution = 109 eV Quantitative method: ZAF (3 iterations)	Al K	ED	3.67	8.28
	Cu K	ED	71.43	68.50
	Zn K	ED	24.90	23.21
Analyses all elements and normalized results.	Total		100.00	100.00
3 peaks possibly omitted: 0.04, 2.62, 7.18 keV	* = <2 Sigma			

e)- punctul 2



f) - punctul 3

SEMQuant results. Listed at 3:26:07 PM on 5/12/10	Standards :			
Operator: CENIMAT	Al K	Al ₂ O ₃	23/11/93	
Client: All ISIS users	Cu K	Cu	01/12/93	
Job: Demonstration data SiLi detector	Zn K	Zn	01/12/93	
Spectrum label: Bwd01g1	Elemnt Type	Spect. %	Element %	Atomic %
System resolution = 109 eV Quantitative method: ZAF (3 iterations)	Al K	ED	4.78	10.64
	Cu K	ED	69.30	65.53
	Zn K	ED	25.92	23.83
Analyses all elements and normalized results.	Total		100.00	100.00
2 peaks possibly omitted: 0.04, 2.62 keV	* = <2 Sigma			

g) - punctul 3

Figura 3.43. Analize calitative și cantitative EDX în 3 zone distincte ale îmbinii sudate

Chiar și așa în frontul de prelucrare metalografică sunt și zone în care materialul păstrează coeziunea cu materialul de bază, figura 3.44 și 3.45.

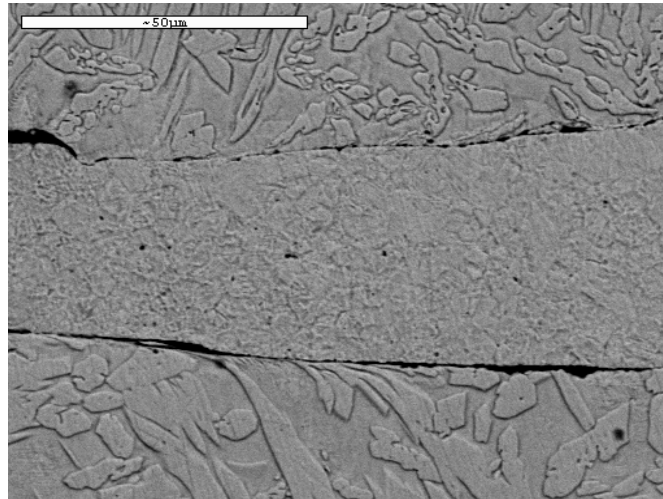
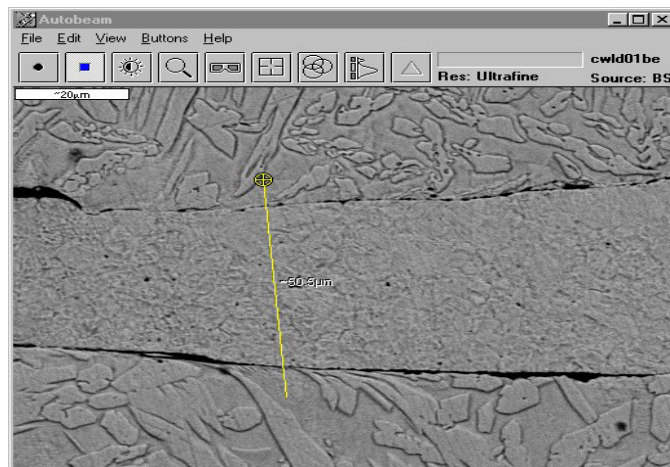
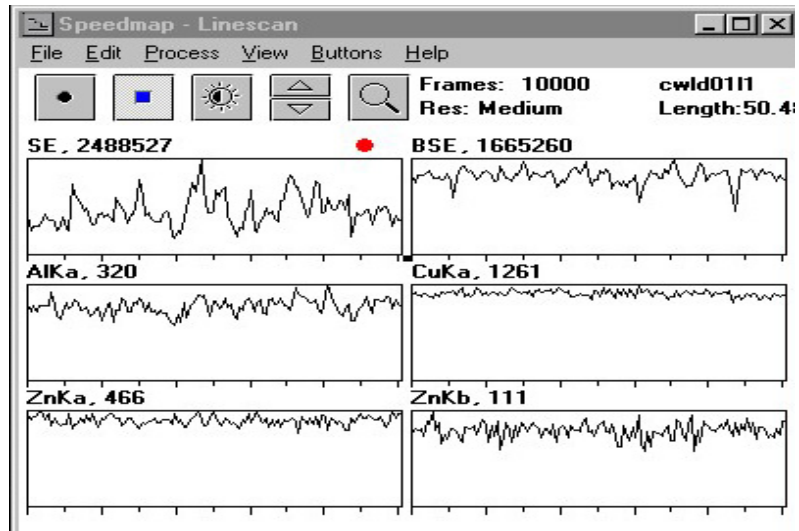


Figura 3.44. Defecte de continuitate metalică pe interfață



a)



B)

Figura 3.45. Distribuția elementelor de aliere în sudură și în ZIT

Cercetările prin difracție de raze X, făcute pe zone care să includă și îmbinarea sudată indică apariția unor reacții de precipitare specifice supraîncălzirii aliajelor cu efect de memorie a formei. În figura 3.46, este prezentat un spectru de difracție pentru aliajul CuZnAl, care conține zona îmbinării sudate, iar figura 3.47 a, b, c, d, e, ilustrează modificarea picurilor pentru diverși parametri utilizați la sudare.

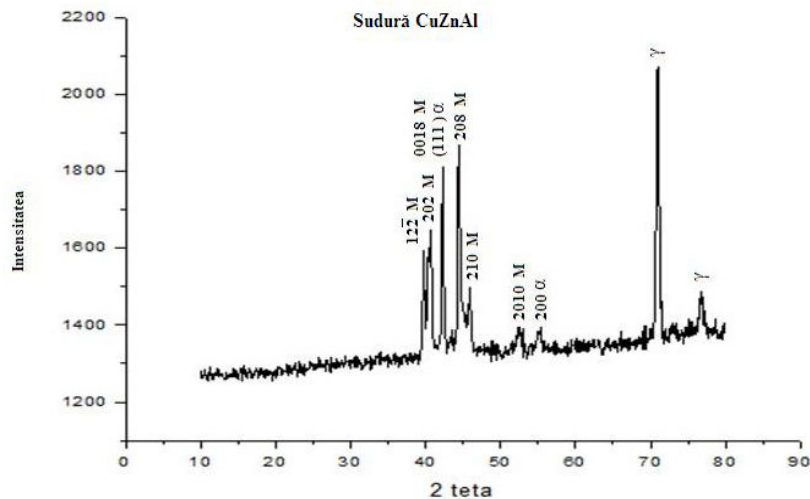
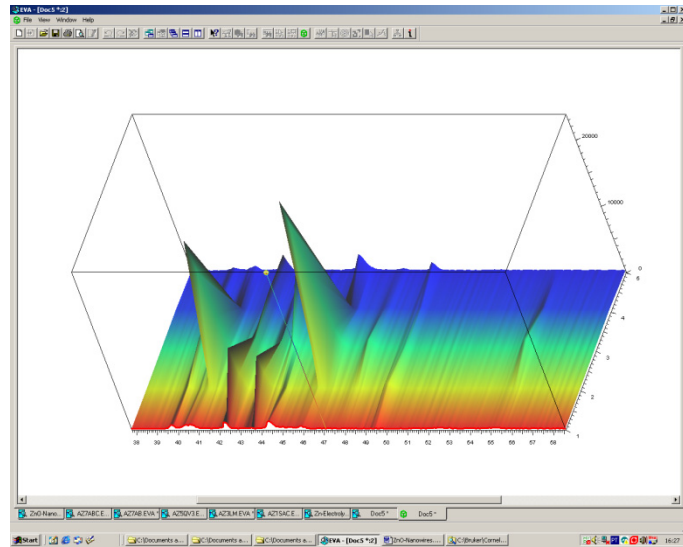
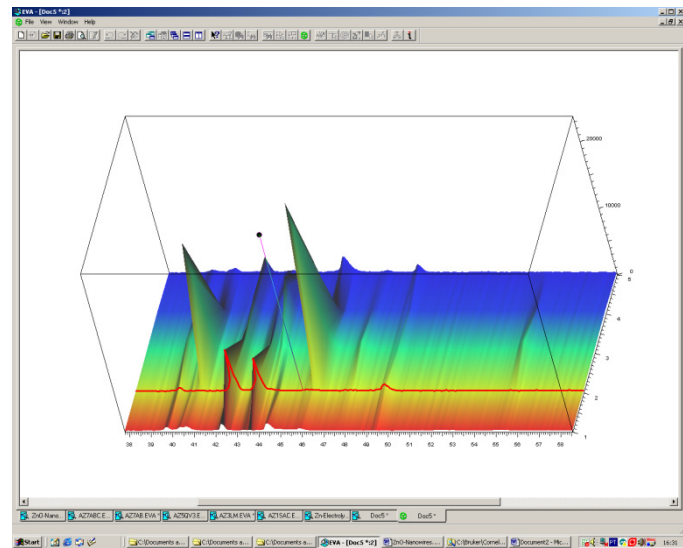


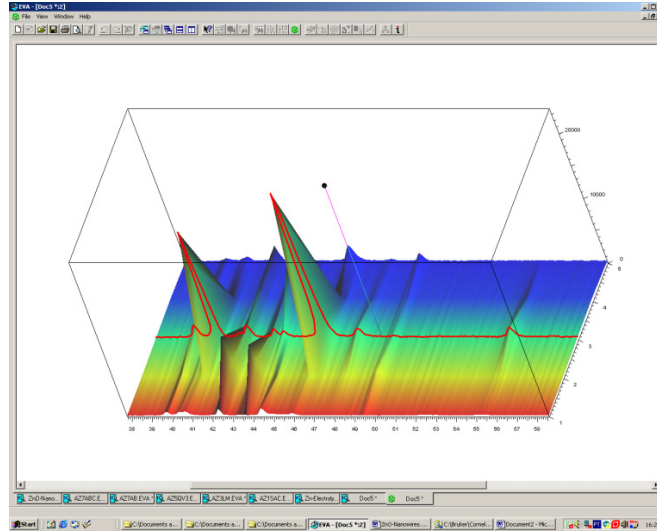
Figura 3.46. Spectrul de difracție pentru aliajul CuZnAl – zona sudurii



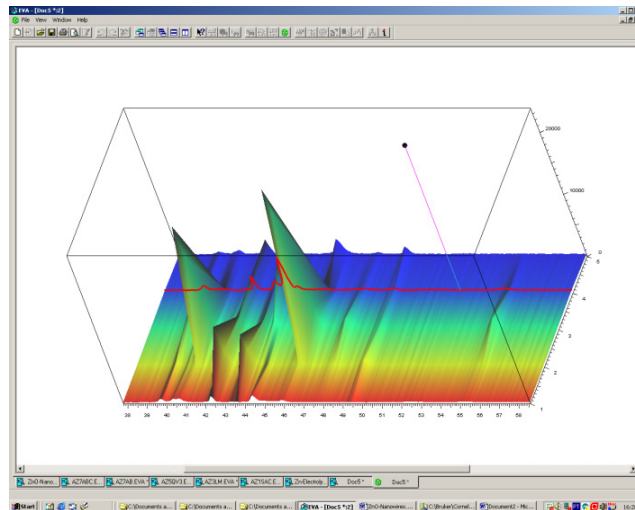
a) $3950\mu\text{F}$; 340V ; 228J



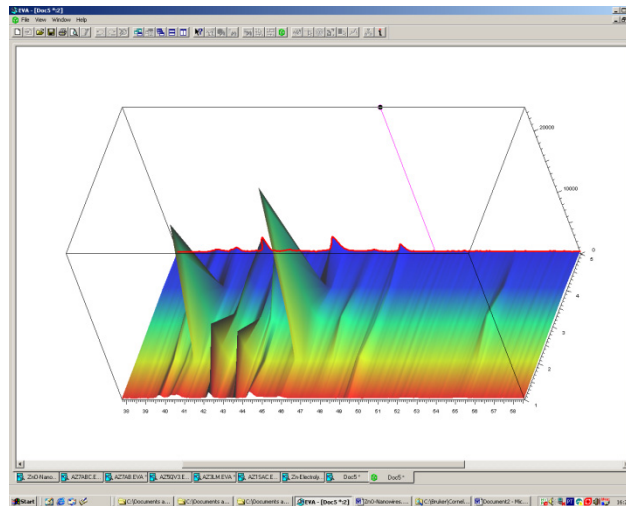
b) $3250\mu\text{F}$; 340V ; 188J



c) $3750\mu\text{F}$; 300V; 169J



d) $3250\mu\text{F}$; 300V; 146J



e) $3000\mu\text{F}; 360\text{V}; 194\text{J}$

Figura 3.47. Modificarea picurilor la diverși parametri

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.



Figura 3.48 Efectul de memorie a formei la îmbinările sudate din aliaj CuZnAl

3.6 Concluzii

Sudarea cu energie înmagazinată în condensatoare constituie un procedeu oportun de îmbinare a aliajelor cu memorie a formei, oferind avantajul reducerii puterii instalate și al unei dozări mai exacte a energiei transmise în zona de îmbinare a componentelor.

Procesul 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.

Stabilirea prin calcul a parametrilor circuitului de încărcare a bateriei de condensatoare permite optimizarea regimului de sudare și asigură o productivitate ridicată la costuri rezonabile.

Valoarea maximă a curenților de sudare și definirea formei impulsului de descărcare influențează în mare măsură durata unui ciclu de sudare și implicit morfologia nucleului punctului sudat.

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 EFECT DE MEMORIE A FORMEI FeMnSi ȘI CuZnAl.

4.1 Generalități

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.

Evoluția metodelor de calcul numeric executate pe calculatoarele electronice trebuie privite în strânsă concordanță cu următoarele direcții principale de cercetare:

- analiza erorilor care este deosebit de importantă în problemele de algebră liniară, cum este de exemplu rezolvarea sistemelor algebrice liniare, calculul valorilor vectorilor proprii ai matricelor, rezolvarea ecuațiilor polinomiale, etc.
- normele matriceale utilizate în studiul calitativ al metodelor de calcul numeric.
- metode de exploatare foarte utile în integrarea numerică, probleme cu valori la limită și inițiale, în rezolvarea ecuațiilor diferențiale ordinare.
- metode de interpolare care conduc la obținerea unei funcții polinomiale a cărui ordin este determinat de continuitatea pe intervalul considerat.
- analiza funcțională utilizată la rezolvarea numerică a ecuațiilor cu derivate parțiale și la rezolvarea numerică a ecuațiilor diferențiale ordinare.
- metoda elementului finit ca instrument de lucru generalizat în domeniul ingineriei structurilor de rezistență, transferului termic, curgerilor de fluide și studiul câmpurilor electromagnetice. Trebuie remarcat faptul că metoda elementului finit are o largă aplicabilitate calitativ al algoritmilor de calcul numeric.

Modelarea și simularea procesului de sudare electrică prin presiune a atras atenția multor cercetători datorită posibilităților sale analitice. În fazele de început ale metodei n-au putut fi realizate analize viabile datorită complexității fenomenului, care implică interacțiuni între multe fenomene fizice, mecanice, metalurgice ale procesului, precum și ale caracteristicilor suprafețelor în contact. Acești factori, considerați separat sau combinați, au o influență majoră asupra stării de tensiune și deformație care se creează în timpul fazelor ciclului de sudare, ca și asupra formării și geometriei punctului sudat.

Un model de simulare realizat poate înlocui un volum mare de lucrări experimentale prin simpla estimare a rezultatelor simulării, cu o detaliere atentă asupra fenomenelor care apar pe parcursul desfășurării procesului.

4.2 Evoluția și stadiul actual al cercetărilor în domeniu

În decursul timpului s-a încercat măsurarea a diverse variabile care influențează direct calitatea sudurii, pe parcursul desfășurării procesului de sudare electrică prin presiune.

Astfel, s-au luat în considerare diverse sisteme experimentale de măsurare fie a temperaturii punctului (cu termocuple sau emisii în infraroșu), semnale ultrasonice (foarte scumpe), emisiile acustice. Toate s-au dovedit a avea fie anumite limitări, fie costuri prea mari. În plus, numai experimentele nu pot cuprinde în totalitate multitudinea factorilor implicați în procesul de sudare electrică prin presiune și nici nu pot estima suficient de exact interacțiunea fenomenelor electrice, termice și mecanice ale procesului.

S-au dezvoltat astfel pentru început diverse modele matematice pentru modelarea teoretică a procesului, spre exemplu modelul diferenței finite (introdusă și dezvoltată de Greenwood, [61]). Ulterior au fost create (Houchen s.a [67]) două modele analitice utilizând metoda diferenței numerice pentru simularea sudării electrice prin presiune în puncte pentru a estima răspunsul termic și pătrunderea miezului pentru table de oțel; primul a fost un model unidimensional de transfer, iar cel de-al doilea un model axisimetric.

În 1987, Gould, Feng Z., [52] a studiat dezvoltarea punctului sudat, experimental și analitic, lucrarea fiind una de referință în domeniu. A utilizat tot un model unidimensional și o schemă de diferență finită pentru rezolvarea ecuațiilor diferențiale neliniare. Gould a luat în considerare geometria electrodului, generarea internă de căldură, schimbările de fază, proprietățile dependente de temperatură ale materialului și rezistența de contact, dar a neglijat pierderea de căldură prin materialul de sudat către mediul înconjurător.

În 1989, Cho ș.a., [30] și Han ș.a., [64] au dezvoltat diferite modele teoretice, ambii considerând proprietăți fizice identice, cu diverse scheme de diferență finită pentru determinarea distribuției temperaturilor și forma punctului sudat.

În ambele cazuri analiza termică și cea mecanică nu au fost cuplate. După cum se remarcă, analiza termo – mecanică cuplată a fost rar abordată.

În 1984, Nied a introdus un model axisimetric bidimensional cuplat termic – mecanic, utilizând programul de simulare în element finit ANSYS fără a da detalii asupra modului cuplării. S-au considerat geometria electrodului și a piesei, proprietățile dependente de temperatură și s-a realizat analiza termică, cu estimarea distribuției temperaturilor, și analiza mecanică, cu determinarea distribuției tensiunilor la nivelul interfeței.

În 1991, Tsai ș.a., [148] și apoi în 1992 [148] a simulat sudarea electrică prin presiune în puncte a două table de aceeași grosime. În ambele cazuri s-a utilizat un model axisimetric bidimensional, cuplat termic – mecanic și electric – termic. Modelarea s-a realizat utilizând tot programul de simulare în element finit ANSYS. S-au considerat geometria electrozilor 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. În prima lucrare menționată a lui Tsai s-a simulat formarea punctului sudat și s-au determinat prin simulare cu element finit curbele de sudabilitate și de variație a temperaturii, dilatarea și contractia pe parcursul procesului de sudare. În lucrarea a doua, având aceleași condiții pentru model, a fost determinată și evoluția tensiunilor termice și mecanice din procesul de sudare. Cele două lucrări ale lui Tsai ș.a. au avut condițiile limită impuse mai apropiate de realitate, cu mai puține aproximări decât cele anterioare prezentate.

Tot cu modelul bidimensional axisimetric, utilizând programul de simulare în element finit ABAQUS a realizat și Sun în cele trei lucrări publicate în 2000 – 2001 [145,146,147] modelarea în element finit a sudării în relief cu bosaj rotund de diferite înălțimi pentru oțel și aluminiu.

A creat un model cuplat termic – electric – mecanic prin subrutine introduse în ABAQUS, întrucât nu există pe piață programe capabile să realizeze introducerea rezultatelor din analiza termică – electrică în cea termică – mecanică, realizând astfel cuplarea termic – electric – mecanic.

Utilizând un model bidimensional axisimetric, cuplat termic – electric – mecanic prin subrutine introduse în ABAQUS, Feng ș.a- [52] au realizat evoluția rezistenței de contact din interfețe (doar cea datorată asperităților).

Greitmann [62] a determinat de asemenea variația temperaturilor în procesul de formare a punctului sudat, precum și dependența rezistivității de temperatură folosind modele și tridimensionale, utilizând programul de simulare în element finit ANSYS. A realizat analiza cuplată electric – termic și electric – termic – mecanic atașând ANSYS un program de simulare a efectelor cuplării.

Feng Z., Bae ș.a.[52] a abordat comportamentul la oboseală al sudurilor în puncte realizând cu programul ABAQUS un model axisimetric tridimensional, cuplat termic – mecanic.

Din cele trecute în revistă mai sus se pot remarca mai multe aspecte. În primul rând, simularea cu element finit a sudării electrice prin presiune a evoluat doar în măsura evoluției performanțelor calculatoarelor și a programelor aferente. Aceasta cu atât mai mult cu cât sudarea electrică prin presiune este un proces complex electric – termic – mecanic, care implică mulți factori pentru a căror simulare sunt necesare calculatoare foarte performante. Rezultă astfel de procese de simulare foarte mari, greu de rulat pe calculator, datorită dimensiunilor lor și care pot să nu se ajungă la convergență chiar și cu o mulțime de simplificări ale modelului.

Din aceste motive, marea majoritate a lucrărilor publicate recent au modele bidimensionale axisimetrice, cuplate doar electric – termic sau termic – mecanic. Cele cuplate electric – termic – mecanic, care abia au început să apară, au modelul bidimensional axisimetric, iar cele tridimensionale folosesc simulare cuplată electric – termic sau termic – mecanic, probabil tocmai din considerentele menționate.

4.3 Rezultate experimentale

4.3.1 Modelul geometric

S-a considerat cazul clasic de sudare electrică prin presiune în puncte a două table din aliaje cu memoria forme FeMnSi și CuZnAl cu grosime de 0,52 – 0,54mm respectiv 0,4 - 0,5mm, cu doi electrozi ce au suprafața de atac de 5x4,2mm.

În continuare este prezentată simularea procesului de sudare pentru 3 valori diferite ale timpului de sudare (1,06; 1,12; 1,2 s, atât pentru FeMnSi cât și pentru CuZnAl).

În figura 4.1 este prezentat modelul geometric al piesei, importat din Solid Works.

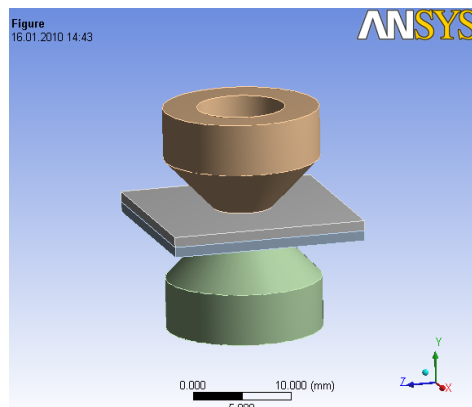


Figura 4.1 Modelul geometric (pentru cele 2 aliaje)

Legăturile (conexiunile între corpuri):

- Conexiune între fețe (față – față), și nu între muchii (neesențial)
- Regiunile de contact au fost definite între:
 - electrod 1 – placă 1,
 - placă 1 – placă 2,
 - placă 2 – electrod 2 (neesențial).
- Tipul contactului: suprafețe legate cu penalitate (frecare)

După cum se poate observa din figura 4.2 rețeaua de noduri (47.552) și elemente (74.660) este destul de fină în general, cu atât mai mult în zona dintre cei doi electrozi pentru a putea înregistra tensiunile și gradientii de temperatură mai mari din zonă.

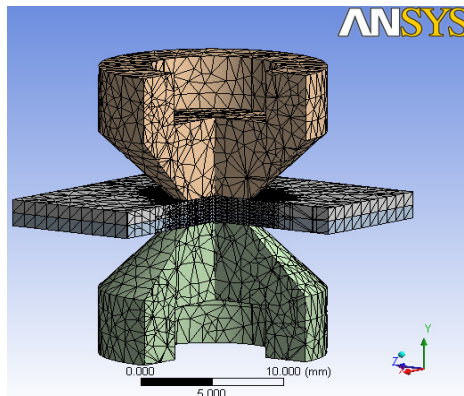


Figura 4.2 Rețeaua de noduri

4.4 Simularea stării de echilibru termic

Pentru ambele aliaje cu memoria formei, distribuția uniformă a temperaturii este de 22°C.

În tabelul 4.1. sunt prezentate setările simulării divizată, care se realizează în 10 pași, iar timpul total al simulării este de 5,4 s.

Tabelul 4.1. Setarea simulării în pași

Pași	Timpul (s)
1	1,
2	1,06
3	1,12
4	1,2
5	1,4
6	2,4
7	3,4
8	4,4
9	5,
10	5,4

În figura 4.3 este prezentată suprafața unde s-a luat în seamă convecția, iar în figura 4.4 este prezentată variația convecției, s-au efectuat încercări pe 18 fețe, iar coeficientul de convecție este de $1,8 \cdot 10^{-6} \text{ W/mm}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ (comun la toate încercările, la ambele aliaje).

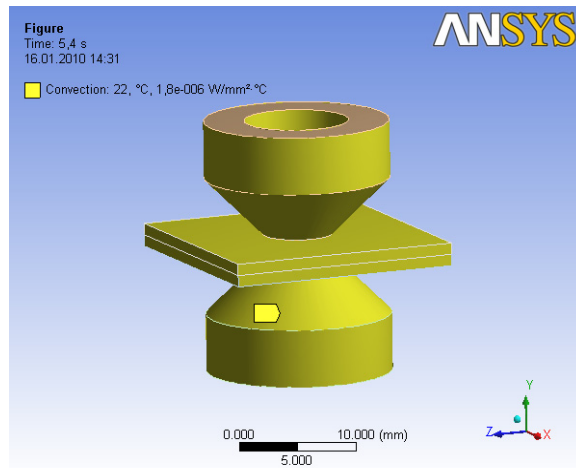


Figura 4.3 Suprafața de convecție

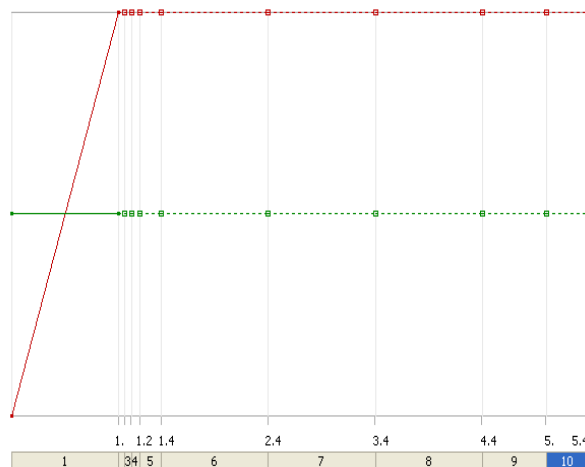


Figura 4.4 Variația convecției

Temperatura este după 2 fețe, (figura 4.5) iar în figura 4.6 este reprezentată variația temperaturii în timp, variația acesteia este tabelară, tabelul 4.2.

Tabelul 4.2 Variația temperaturii.

Pași	Timp [s]	Temperatura [°C]	
		FeMnSi	CuZnAl
1	0	22	22
	1		
2	1,06	1540	950
3	1,12	1482,4	935,87
4	1,2	1458,9	917,03
5	1,4	1400	869,92
6	2,4	1017,2	634,39
7	3,4	634,44	398,85
8	4,4	251,67	163,32
9	5	22	22
10	5,4	22	22

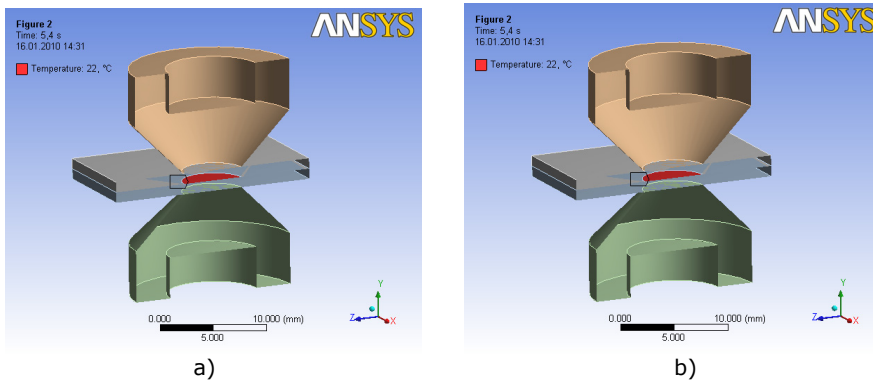


Figura 4.5. Temperatura a) - FeMnSi, b) - CuZnAl

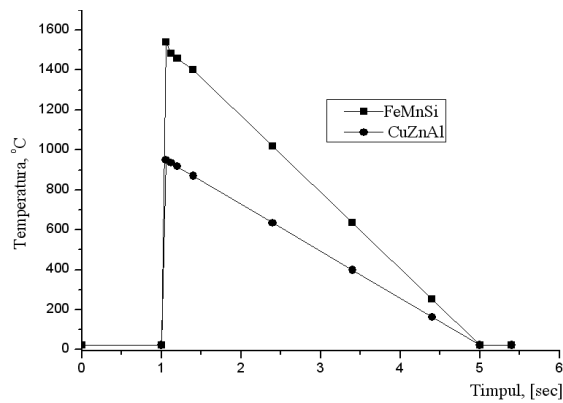


Figura 4.6 Variația în timp a temperaturii

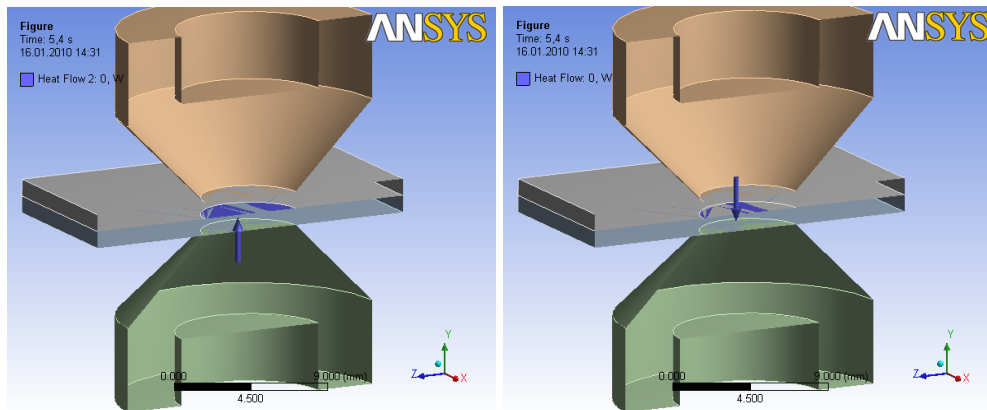
În urma condițiilor inițiale impuse rezultă:

- pentru aliajul FeMnSi - în timp de 5 s, temperatura vârfului nucleului topit scade de la 1540°C, la temperatura ambiantă 22 °C,
- pentru aliajul CuZnAl - în timp de 5 s, temperatura vârfului nucleului topit scade de la 950 °C la temperatura ambiantă 22 °C.

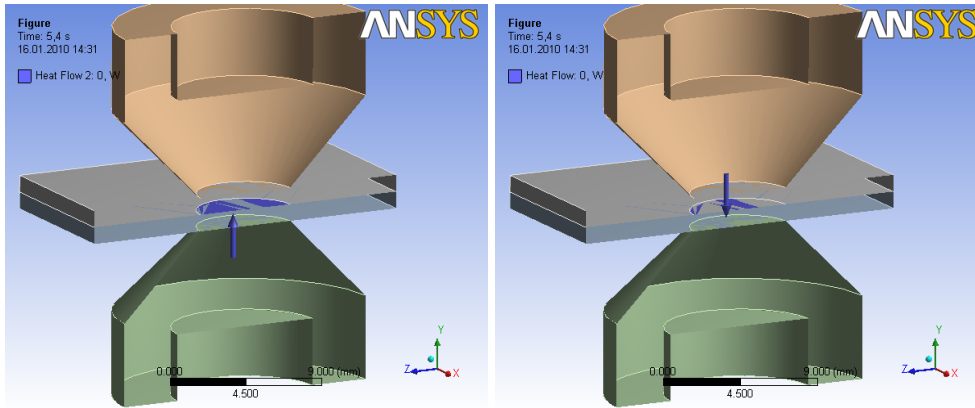
Transferul de căldură realizat după fiecare electrod, pentru ambele aliaje (FeMnSi și CuZnAl) este prezentat în tabelul 4.3 iar în figura 4.7 este reprezentată vederea de ansamblu a transferului de căldură, după ambii electrozi.

Tabelul 4.3. Transferul de căldură

Pași	Timp [s]	Transferul de căldură [W]			
		FeMnSi		CuZnAl	
		După primul electrod	După al doilea electrod	După primul electrod	După al doilea electrod
1	0				
	1	0	0	0	0
2	1,06	41	41	17,213	17,213
3	1,12	36,177	36,177	16,951	16,951
4	1,2	34,208	34,208	16,601	16,601
5	1,4	29,286	29,286	15,728	15,728
6	2,4	21,151	21,151	11,359	11,359
7	3,4	13,016	13,016	6,9901	6,9901
8	4,4	4,881	4,881	2,6213	2,6213
9	5	0	0	0	0
10	5,4	0	0	0	0



a)



b)

Figura 4.7. Vedere de ansamblu a transferului de căldură după cele 2 fețe
a) FeMnSi, CuZnAl

În figura 4.8 este reprezentat grafic variația în timp a transferului de căldură.

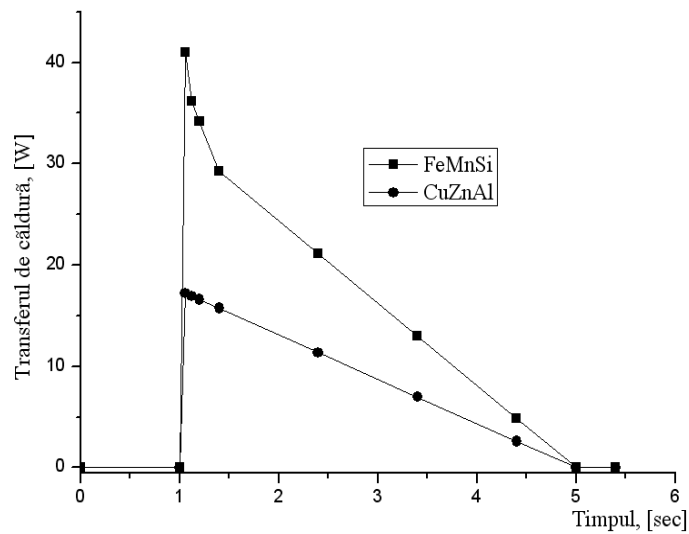


Figura 4.8 Variația în timp a transferului de căldură

Pentru aceleași condiții inițiale transferul de căldură variază în limitele:

- 41W – 4,88W – pentru aliajul FeMnSi,
- 17,21W – 2,621W – pentru aliajul CuZnAl.

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.

4.4.1 Variația temperaturii

a) Aliajul FeMnSi

În figurile de mai jos se prezintă variația temperaturii și a fluxului de temperatură, pentru toți cei 3 timpi (1,06, 1,12, 1,2 s., la ambele aliaje), la o presiune de 0,5MPa pentru FeMnSi, iar pentru CuZnAl presiunea este de 0,25MPa.

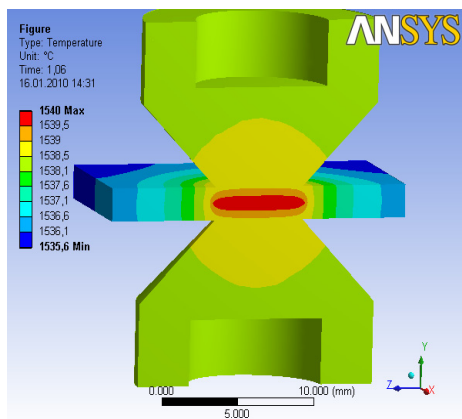


Figura 4.9. Variația temperaturii în ansamblu

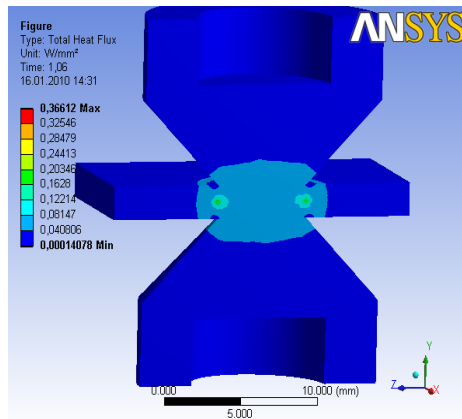


Figura 4.10. Variația fluxului de temperatură în ansamblu

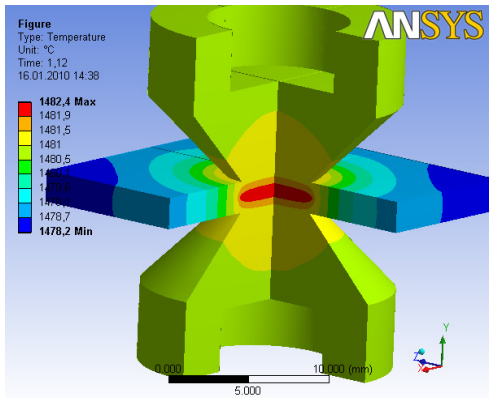


Figura 4.11. Variația temperaturii în ansamblu

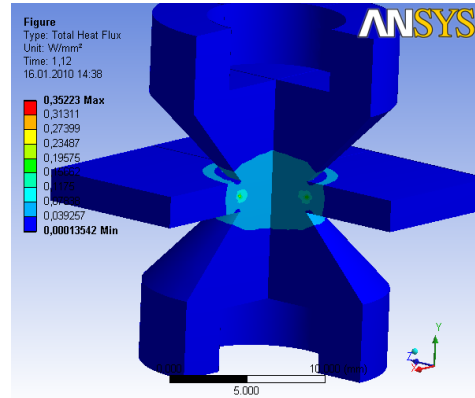


Figura 4.12. Variația fluxului de temperatură în ansamblu

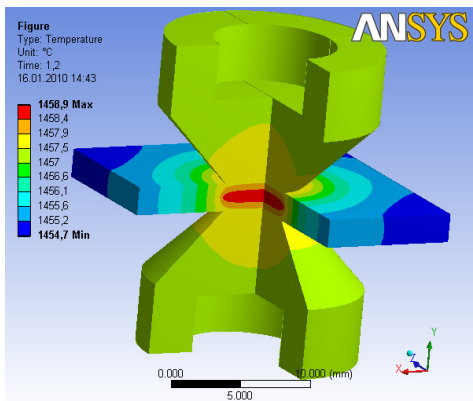


Figura 4.13. Variația temperaturii în ansamblu

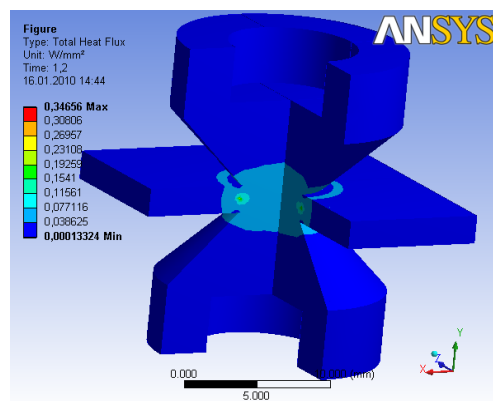


Figura 4.14. Variația fluxului de temperatur în ansamblu

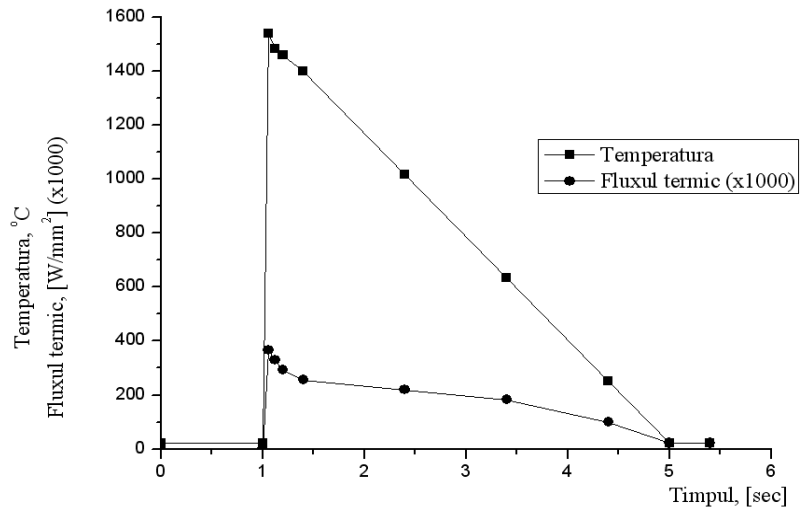


Figura 4.15 Variația în timp a temperaturii și a fluxului termic pentru aliajul FeMnSi

Valoarea maximă a temperaturii și a fluxului termic este:

- temperatura de 1540°C, și fluxul termic de 0,36612 [W/mm²], se atinge la 1,06s după care scade treptat până la temperatura ambiantă.

b) Aliajul CuZnAl

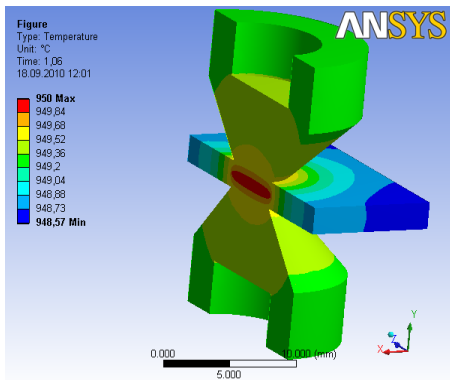


Figura 4.16 Variația temperaturii în ansamblu

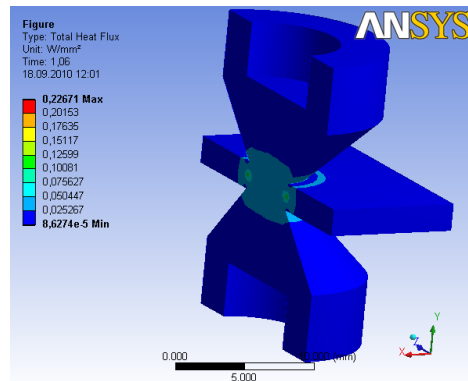


Figura 4.17 Variația fluxului de temperatură în ansamblu

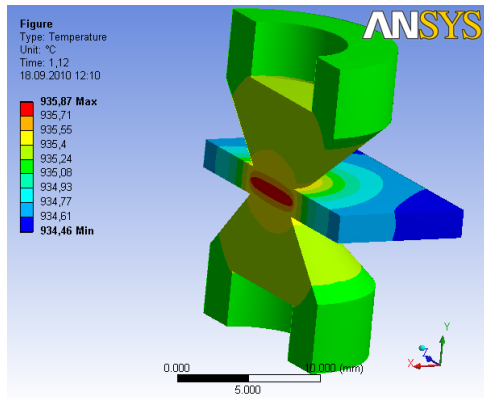


Figura 4.18 Variația temperaturii în ansamblu

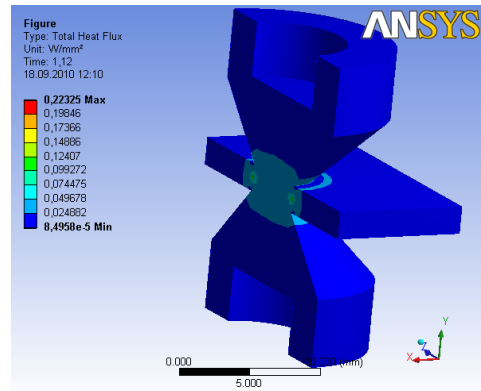


Figura 4.19 Variația fluxului de temperatură în ansamblu

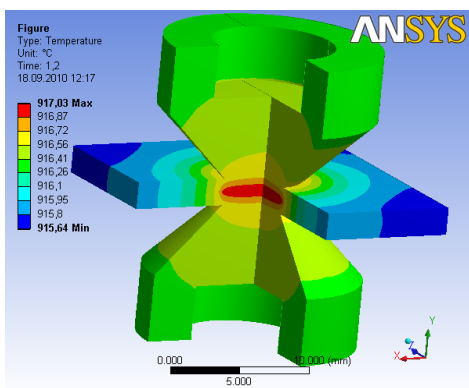


Figura 4.20 Variația temperaturii în ansamblu

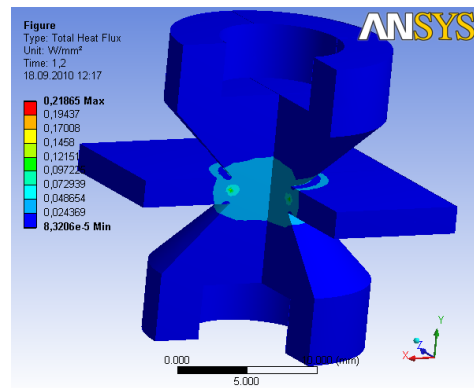


Figura 4.21 Variația fluxului de temperatură în ansamblu

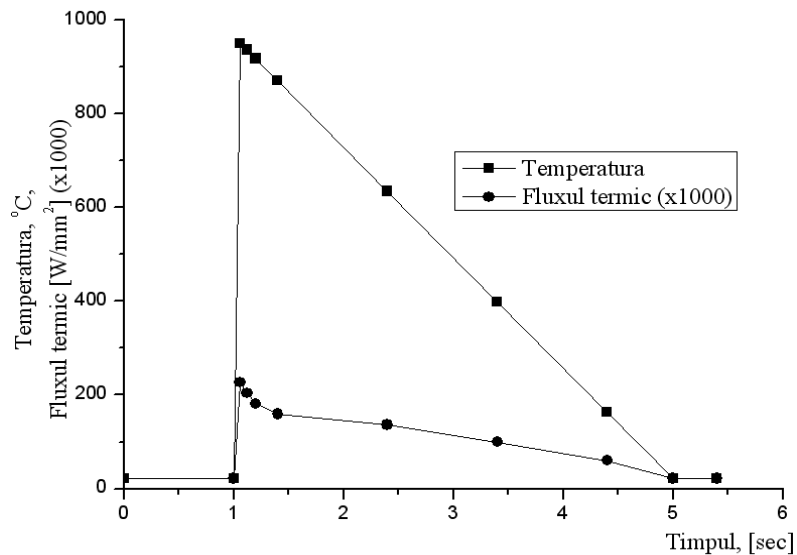


Figura 4.22 Variația temperaturii și a fluxului termic pentru aliajul CuZnAl

Valoarea maximă a temperaturii și a fluxului termic este:

- temperatura de 950°C, și fluxul termic de 0,22671 [W/mm²], se ating la 1,06 s după care scad treptat până la temperatura ambiantă.

Fluxul de temperatură are valoare foarte mică, nulă aproape pentru ambele aliaje.

4.5 Simulare mecanică statică

Simularea mecanică este efectuată în 10 pași, timpul total al simulării fiind de 5,4 secunde (divizarea timpului în pași, vezi tabelul 4.1).

Cunoscând parametrii câmpului termic, se pot aprecia transformările structurale, și tensiunile interne ce intervin, adică calitatea sudurii.

În continuare se prezintă calculul tensiunilor și deformațiilor în fiecare pas, pentru ambele aliaje FeMnSi, CuZnAl.

În figura 4.23 este prezentată partea pe care s-a realizat încăstrarea (ambele aliaje la fel), iar în figura 4.24 observăm că presiunea se aplică electrodului superior.

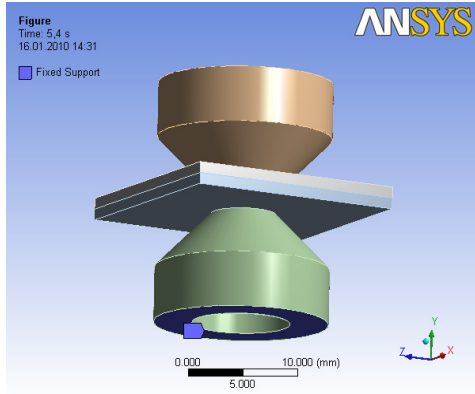


Figura 4.23 Fața încastrată

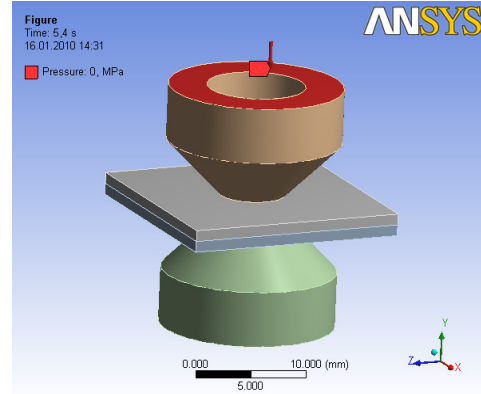


Figura 4.24 Fața unde se aplică presiunea

În tabelul 4.4 este prezentată distribuția presiunii în cele 2 aliaje cu memorie a formei, (FeMnSi și CuZnAl), iar în figura 4.25 este prezentată variația acestuia, sub forma de grafic.

Tabelul 4.4 Distribuția presiunii

Pași	Timp [s]	Presiunea [MPa]	
		FeMnSi	CuZnAl
1	0	0	0
	1		
2	1,06	0,5	0,25
3	1,12		
4	1,2	0	0
5	1,4		
6	1,5		
	2,4		
7	3,		
	3,4		
8	4,4		
9	5		
10	5,4		

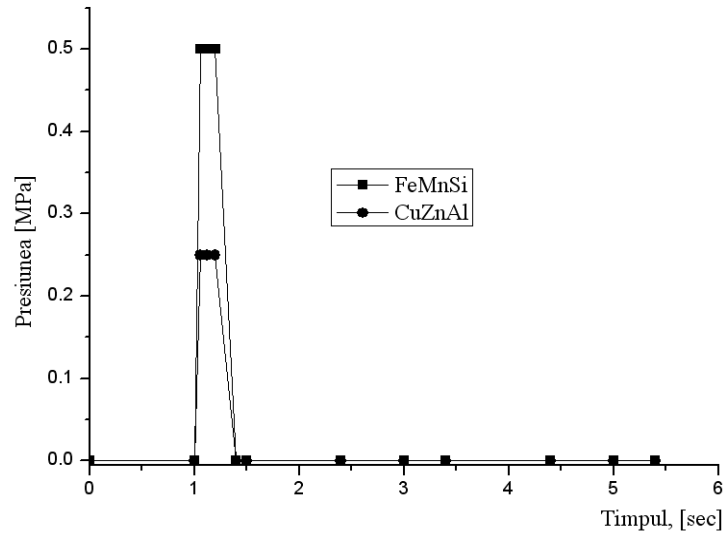


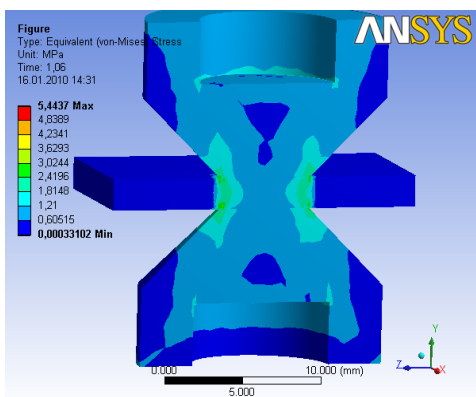
Figura 4.25. Variația în timp a presiunii

Forța de apăsare crește repede cu creșterea timpului de curent, iar după atingerea unui maxim de 0.5MPa în cazul aliajului FeMnSi și de 0,25 MPa pentru aliajul CuZnAl, începe să scadă.

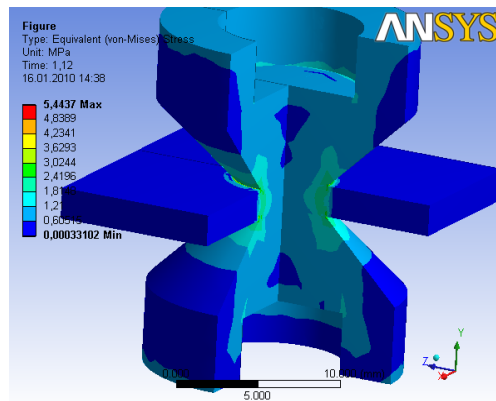
4.5.1 Tensiunea echivalentă

În figurile de mai jos este reprezentată tensiunea echivalentă Von Mises în îmbinarea sudată, sub acțiunea forței de 0,5MPa pentru FeMnSi și 0,25MPa pentru CuZnAl, la toți cei 3 timpi.

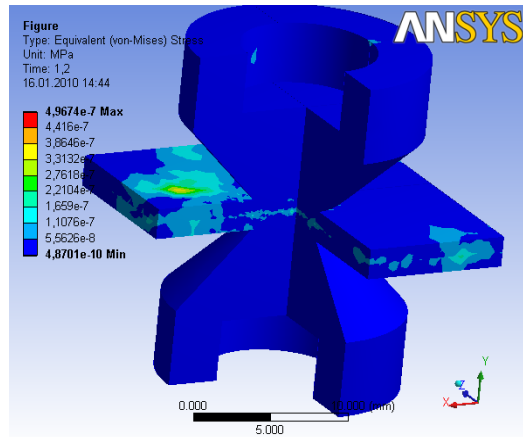
a) Aliajul FeMnSi:



a)



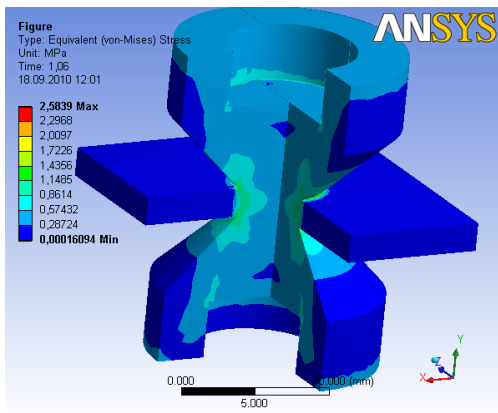
b)



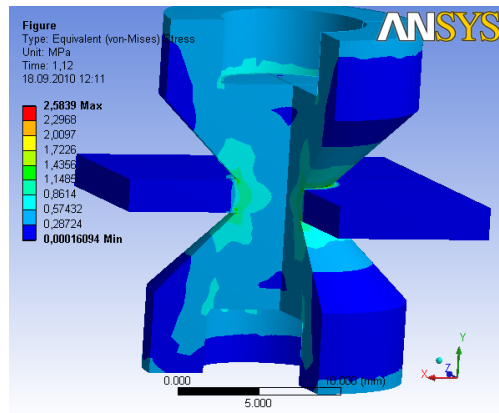
c)

Figura 4.26. Tensiunea totală Von Mises
a) – 1,06; b) – 1,12; c) – 1,2.

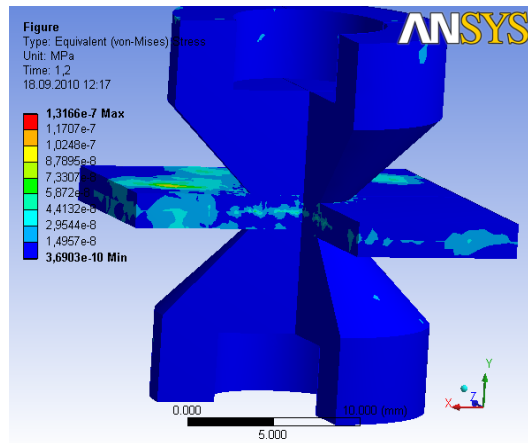
b) Aliajul CuZnAl



a)



b)



c)

Figura 4.27 Tensiunea totală Von Mises
a) - 1,06; b) - 1,12; c) - 1,2

Valorile tensiunii totale Von Mises în centrul piesei sunt:

- pentru FeMnSi - 2,4196 MPa la $t = 1,06$ s și $1,12$ s, iar la $t = 1,2$ s este de $1,659 \cdot 10^{-7}$ MPa,
- pentru CuZnAl - 1,4356 MPa la $t = 1,06$ s și $1,12$ s, iar la $t = 1,2$ s este de $4,4132 \cdot 10^{-8}$ MPa,

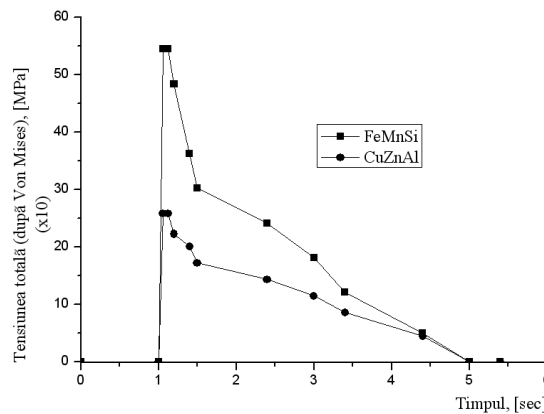
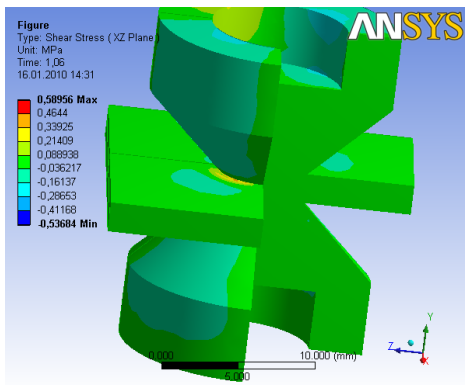


Figura 4.28 Variația în timp a tensiunii totale Von Mises

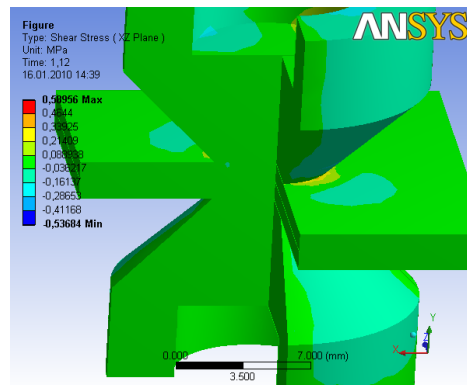
Valorile tensiunii totale sunt foarte mici, au puncte de maxim la $1,06 - 1,2$ s, pentru ambele aliaje, după care scade treptat până ajung la 0 după $5,4$ s.

4.5.2 Tensiunea de forfecare

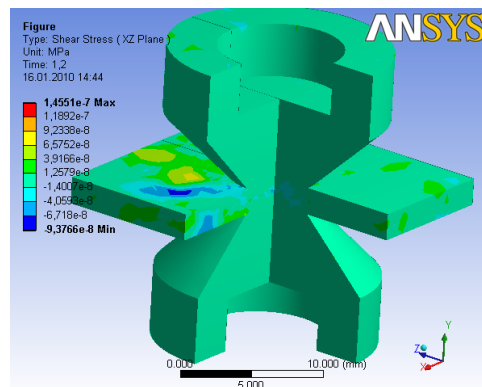
a) Aliajul FeMnSi



a)



b)

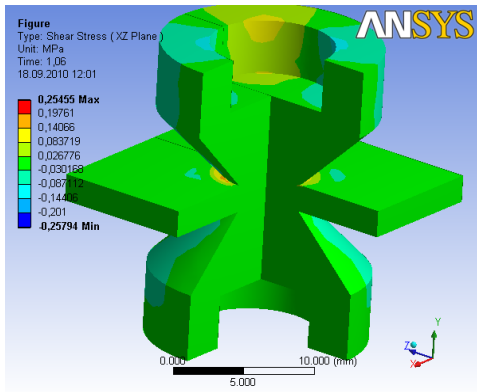


c)

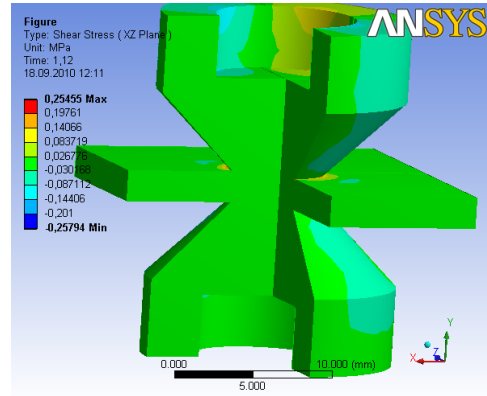
Figura 4.29 Tensiunea de forfecare
a) - 1,06; b) - 1,12; c) - 1,2

Valorile maxime ale tensiunii de forfecare sunt:

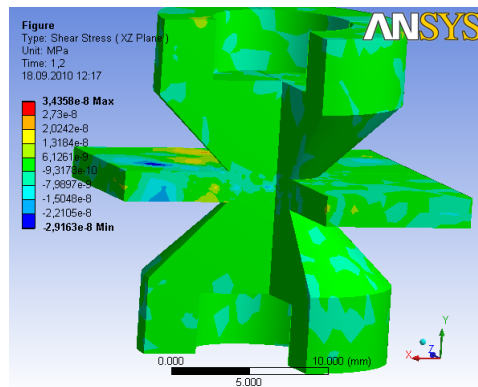
- pentru FeMnSi - 0,589 MPa la $t = 1,06$ s și $1,12$ s, iar la $t = 1,2$ s este de $1,455 \cdot 10^{-7}$ MPa,

b) Aliajul CuZnAl

a)



b)



c)

Figura 4.30 Tensiunea de forfecare
a) - 1,06; b) - 1,12; c) - 1,2

Valorile maxime ale tensiunii de forfecare sunt:

- pentru CuZnAl - 0,254 MPa la $t = 1,06$ s și $1,12$ s, iar la $t = 1,2$ s este de $3,435 \cdot 10^{-8}$ MPa,

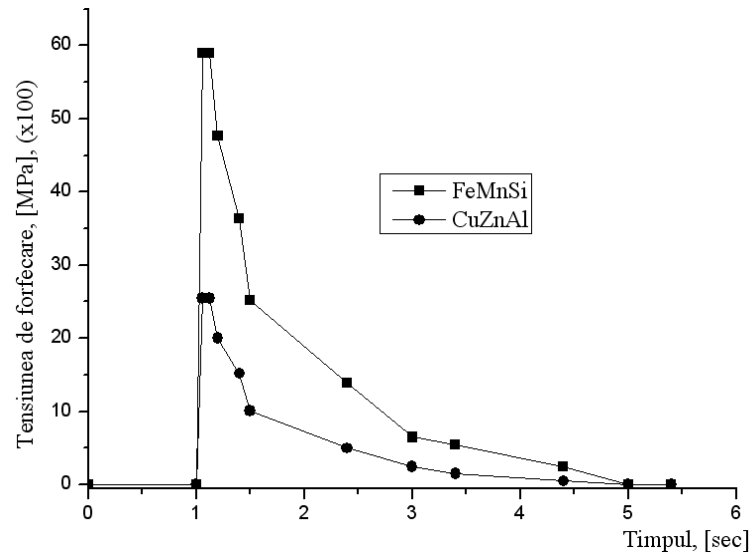


Figura 4.31 Variația în timp a tensiunii de forfecare

Tensiunea de forfecare este neglijabilă, pentru ambele aliaje, un punct de maxim se obține la 1,06 s și 1,12 s, după care scade treptat.

4.5.3 Tensiunea normală

a) Aliajul FeMnSi

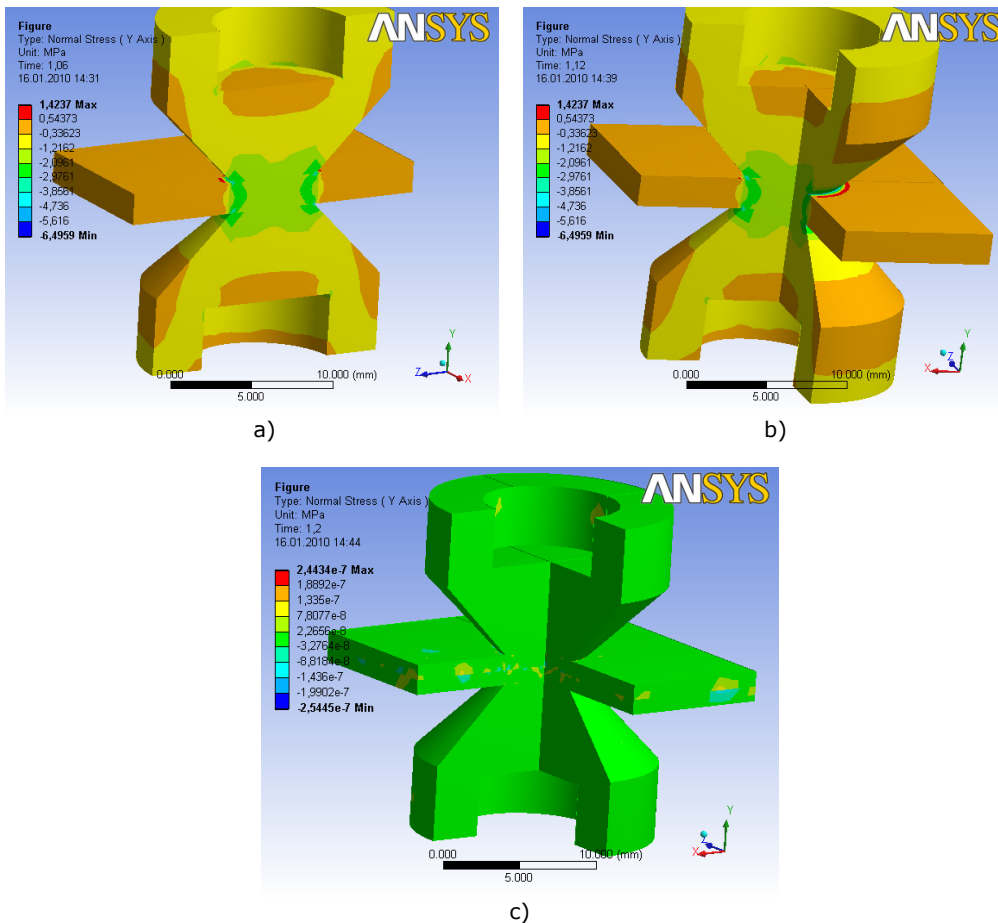
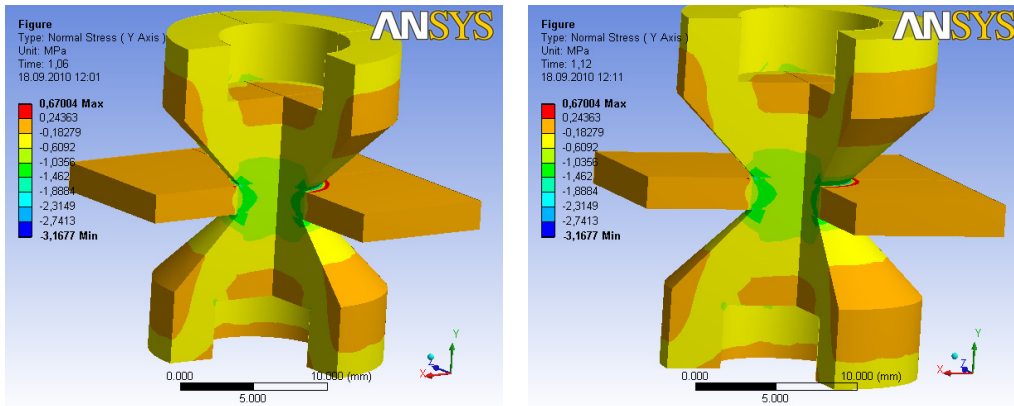


Figura 4.32 Tensiunea normală
a) - 1,06; b) - 1,12; c) - 1,2

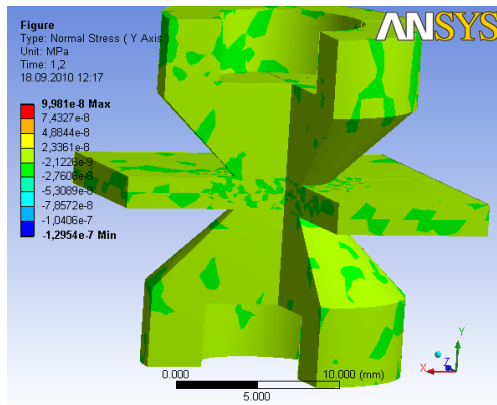
Valoarea maximă a tensiunii normale este:

- la 1,06 s și 1,12 s se obține valoarea maximă a tensiunii normale de 1,4237 MPa (în ZIT).
- iar la 1,2 s tensiunea normala este foarte mică $2,4434 \times 10^{-7}$ MPa, aproape nulă.

b) Aliajul CuZnAl



a) b)



c)

Figura 4.33 Tensiunea normală
a) – 1,06; b) – 1,12; c) – 1,2

Valoarea maximă a tensiunii normale este:

- la $t = 1,06$ s și $1,12$ s se obține valoare maximă a tensiunii normale de $0,67004$ MPa (în ZIT).
- iar la $t = 1,2$ s tensiunea normala este foarte mică $9,981 \times 10^{-8}$ MPa, aproape nulă.

Pentru ambele aliaje se obțin valori ale tensiunii normale foarte mici, aproape inexistente.

La sudarea prin presiune electrică în puncte, câmpul termic este destul de neomogen, astfel ca în timpul răcirii apar tensiuni normale (de întindere).

În figura 4.34 este reprezentată variația tensiunii normale în timp.

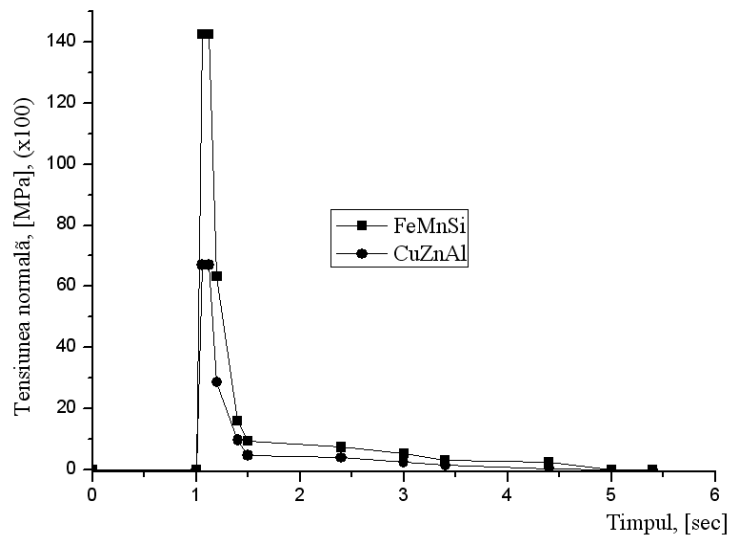


Figura 4.34 Variația în timp a tensiunii normale

Analizând acest grafic se observă că valoarea maximă a tensiunii normale se obține la 1,06 s și 1,12 s, pentru ambele aliaje, după care continuă să scadă ușor.

4.5.4 Deformația totală

a) Aliajul FeMnSi

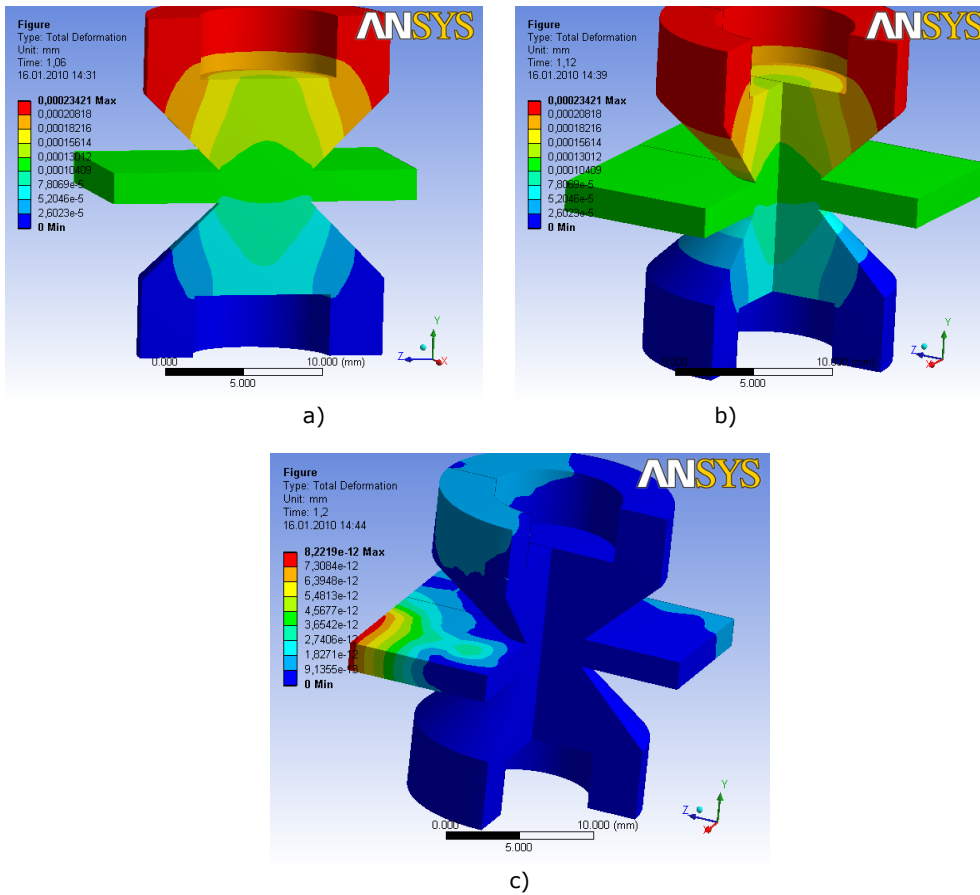
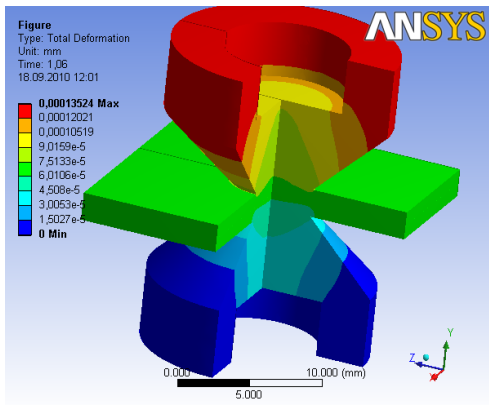


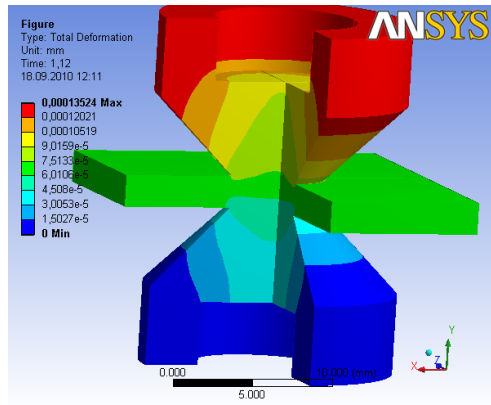
Figura 4.35 Deformația totală
a) - 1,06; b) - 1,12; c) - 1,2

Valoarea maximă a deformației totale este:

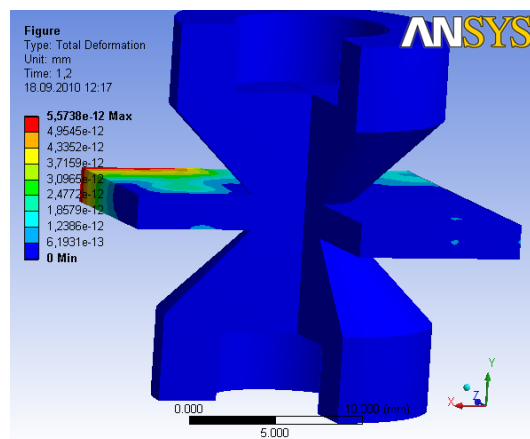
- pentru $t = 1,06$ s și $1,12$ s - deformația maximă este de 0,00023421 mm,
- pentru $t = 1,2$ s - deformația maximă este foarte mică, valoarea ei fiind de $8,2219 \times 10^{-12}$ mm

b) *Aliajul CuZnAl*

a)



b)



c)

Figura 4.36 Deformația totală
a) - 1,06; b) - 1,12; c) - 1,2

Valoarea maximă a deformației totale este:

- la $t = 1,06$ s și $1,12$ s - deformația maximă este de $0,00013524$ mm,
- iar pentru $t = 1,2$ s - deformația maximă este foarte mică valoarea ei fiind de $5,5738 \times 10^{-12}$ mm.

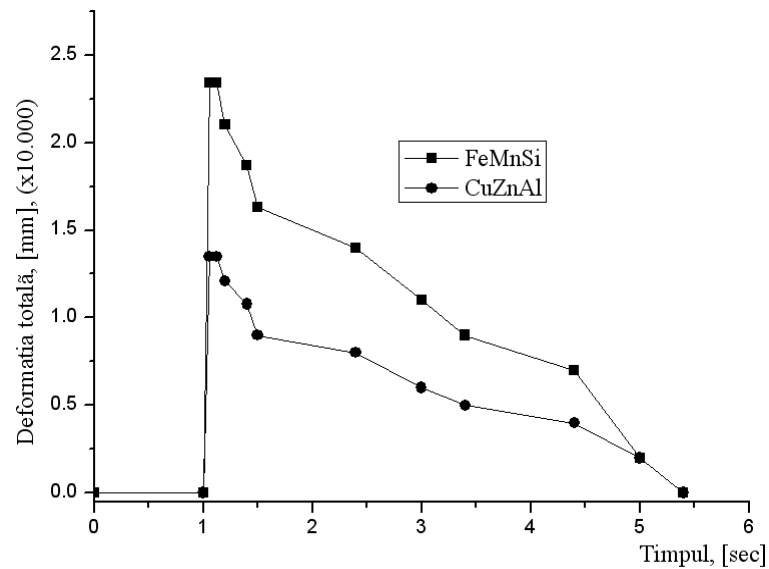


Figura 4.37 Variația în timp a deformației totale

Analizând figurile de mai sus putem spune că deformația totală și variația acesteia este mică, aproape neglijabilă.

Deformația totală apare la piesele de sudat doar la 1,2 s, pentru ambele aliaje dar este distribuită în suprafața piesei, nicidecum în vârful electrozilor.

4.5.5 Deformația plastică echivalentă (după Von Mises)

a) Aliajul FeMnSi

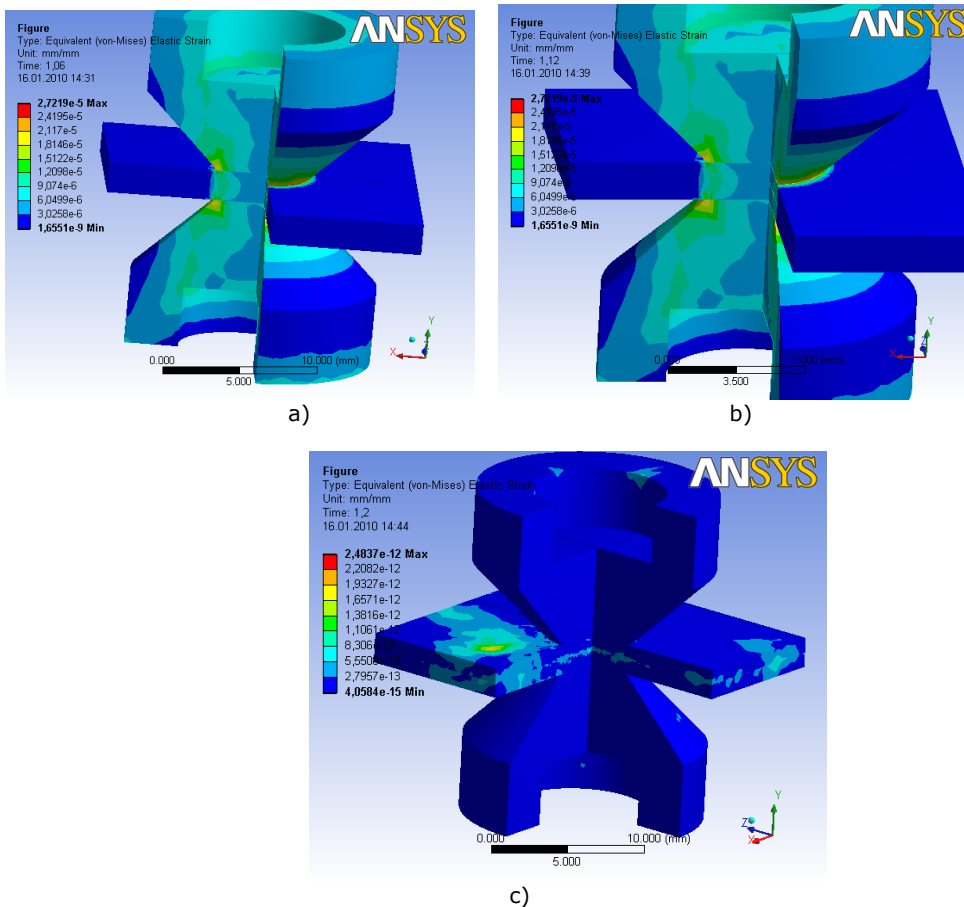
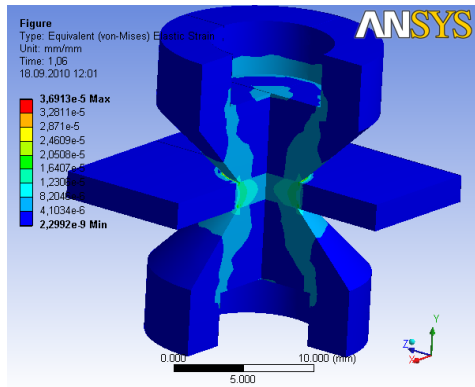


Figura 4.38 Deformația plastică echivalentă
a) – 1,06; b) – 1,12; c) – 1,2

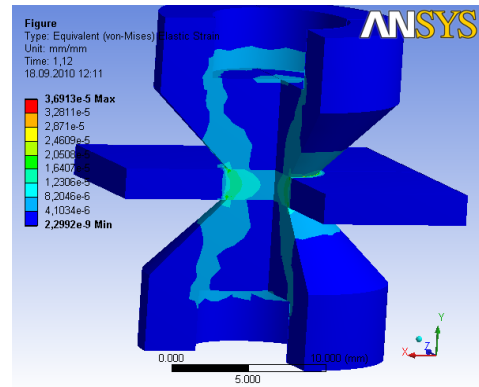
Valoarea maximă a deformației plastice echivalente

- la $t = 1,06$ s și $1,12$ s – deformația maximă este de $2,7219 \times 10^{-5}$ mm/mm,
- iar la $t = 1,2$ s – deformația maximă este foarte mică valoarea ei fiind de $2,4837 \times 10^{-12}$ mm/mm.

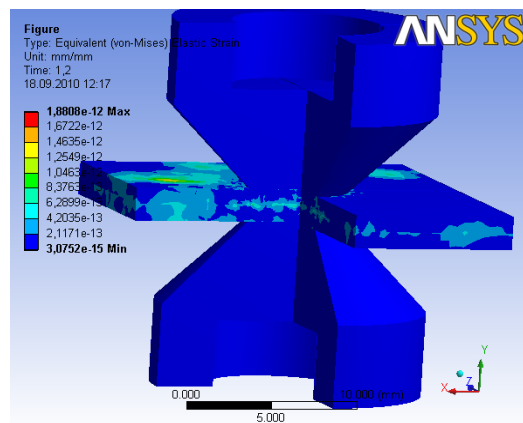
b) *Aliajul CuZnAl*



a)



b)



c)

Figura 4.39 Deformația plastică echivalenta
a) – 1,06; b) – 1,12; c) – 1,2

Valoarea maximă a deformației plastice echivalente este:

- la $t = 1,06$ s și $1,12$ s – deformația maximă este de $3,6913 \times 10^{-5}$ mm/mm,
- iar la $t = 1,2$ s – deformația maximă este foarte mică valoarea ei fiind de $1,8808 \times 10^{-12}$ mm/mm

Deformația plastică totală, (după Von Mises) este la fel ca și deformația totală, foarte mică, aproape nulă, pentru ambele aliaje.

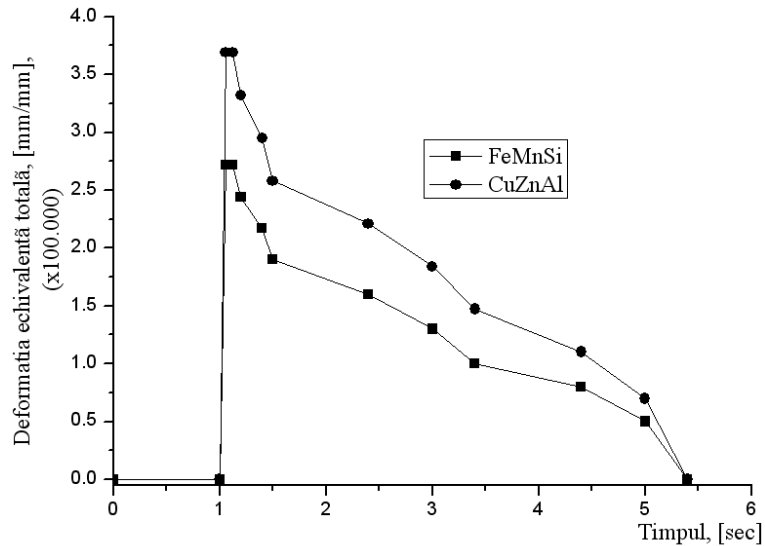


Figura 4.40 Variația în timp a deformației plastice totale

Așa cum era de așteptat, 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.

În continuare se evidențiază urma lăsată de electrod pe suprafețele de sudat. Din analiza figurilor 4.41 (a...c) observăm că deformația plastică totală (după Von Mises), este chiar în vârful electrozilor (figurile a și b), respectiv este distribuită pe întreaga suprafață a piesei de sudat (figura c).

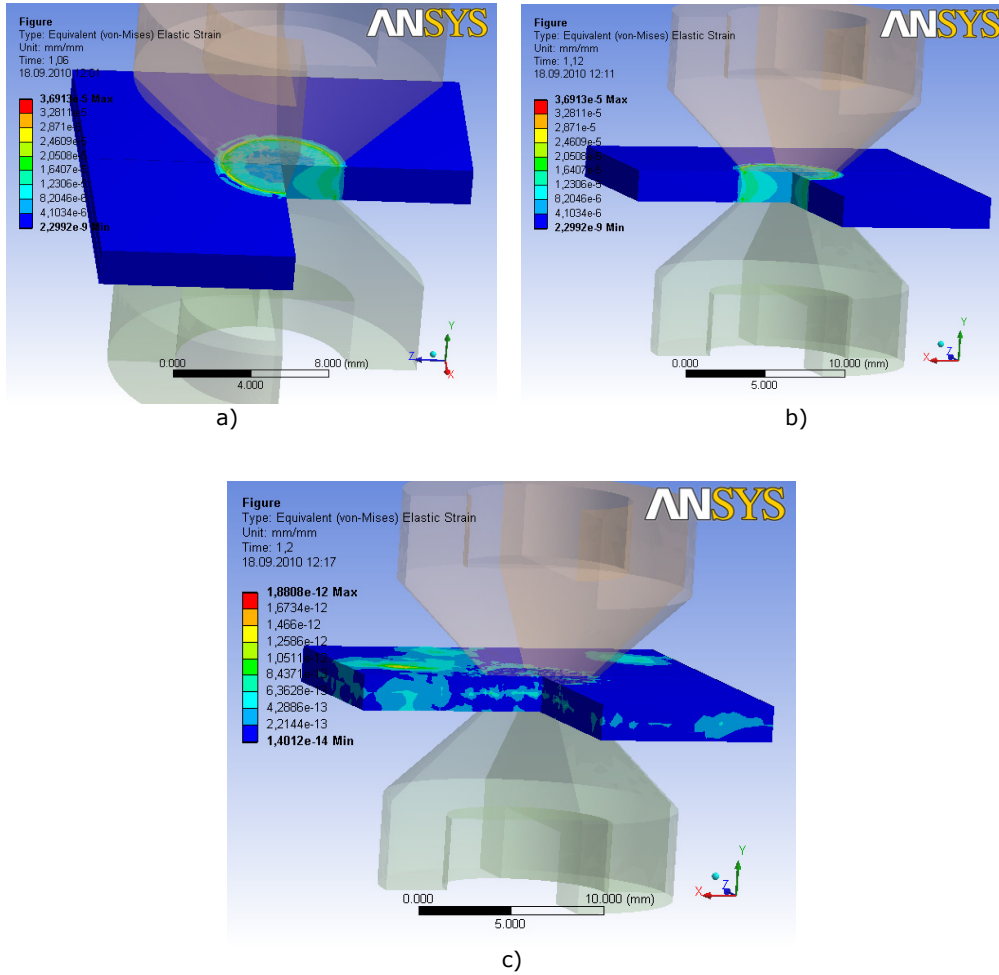


Figura 4.41 Distribuția deformației plastice totale

4.6 Concluzii

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.

Stabilirea prin calcul a corelației dintre forța electrodului și nivelul deformațiilor atinse pe interfața dintre componentele de sudat, respectiv dintre acestea și electrozi a permis găsirea condițiilor optime de contact pentru trecerea curentului electric.

Mărirea suprafețelor de contact, determinate de repartitia 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.

Pe baza calculelor efectuate au rezultat următoarele elemente de interes:

Variația temperaturii

- pentru aliajul FeMnSi - în timp de 5 s, temperatura vârfului nucleului topit scade de la 1540 °C, la temperatura ambiantă 22 °C.
- pentru aliajul CuZnAl – în timp de 5 s, temperatura vârfului nucleului topit scade de la 950 °C la temperatura ambiantă 22 °C.

Variația în timp a transferului de căldură

- de la 41W la 1,06 s, la 4,88W la 4 s – pentru aliajul FeMnSi,
- de la 17,21W la 1,06 s, la 2,621W la 4 s – pentru aliajul CuZnAl.

Variația temperaturii și a fluxului termic

Valoarea maximă a temperaturii și a fluxului termic este:

- temperatura de 1540°C, și fluxul termic de 0,36612 [W/mm²], se atinge la 1,06s după care scade treptat până la temperatura ambiantă.
- temperatura de 950°C, și fluxul termic de 0,22671 [W/mm²], se atinge la 1,06s după care scade treptat până la temperatura ambiantă.

Fluxul de temperatură are valoare foarte mică, apropiată de zero pentru ambele aliaje.

Variația în timp a presiunii

Forța de apăsare crește repede cu creșterea timpului de curent iar după atingerea unui maxim de 0.5MPa în cazul aliajului FeMnSi, și de 0,25 MPa pentru aliajul CuZnAl, începe să scadă.

Valorile tensiunii totale Von Mises în centrul piesei sunt

- pentru FeMnSi - 2,4196 MPa pentru 1,06 s și 1,12 s, iar pentru 1,2 s este de $1,659 \cdot 10^{-7}$ MPa,

- pentru CuZnAl - 1,4356 MPa pentru 1,06 s și 1,12 s, iar pentru 1,2 s este de $4,4132 \cdot 10^{-8}$ MPa,

Valorile tensiunii totale sunt foarte mici, au puncte de maxim la 1,06 – 1,2 s, pentru ambele aliaje, după care scad treptat până ajung la 0 la 5,4 s.

Valorile maxime ale tensiunii de forfecare sunt

- pentru FeMnSi – 0,589 MPa pentru 1,06 s și 1,12 s, iar pentru 1,2 s este de $1,455 \cdot 10^{-7}$ MPa,
- pentru CuZnAl – 0,254 MPa pentru 1,06 s și 1,12 s, iar pentru 1,2 s este de $3,435 \cdot 10^{-8}$ MPa,

Tensiunea de forfecare este foarte mică, inexistentă, pentru ambele aliaje, un punct de maxim se obține la 1,06 s și 1,12 s, pentru ambele aliaje după care scade treptat.

Valorile maxime ale tensiunii normale

FeMnSi

- la 1,06 s și 1,12 s se obține valoare maximă a tensiunii normale de 1,4237 MPa (în ZIT).
- iar la 1,2 s tensiunea normala este foarte mică $2,4434 \times 10^{-7}$, aproape nulă.

CuZnAl

- la 1,06 s și 1,12 s se obține valoare maximă a tensiunii normale de 0,67004 MPa (în ZIT).
- iar la 1,2 s tensiunea normala este foarte mică $9,981 \times 10^{-8}$, aproape nulă. Pentru ambele aliaje se obțin valori ale tensiunii normale foarte mici aproape inexistente.

Analizând graficul se observă că valoarea maximă a tensiunii normale se obține la 1,06 sec și 1,12 s, pentru ambele aliaje, după care continuă să scadă ușor.

Valorile maxime ale deformației totale

FeMnSi

- pentru 1,06 s și 1,12 s – deformația maximă este de 0,00023421 mm,
- iar pentru 1,2 s – deformația maximă este foarte mică valoarea ei fiind de $8,2219 \times 10^{-12}$ mm

CuZnAl

- pentru 1,06 s și 1,12 s – deformația maximă este de 0,00013524 mm,
- iar pentru 1,2 s – deformația maximă este foarte mică valoarea ei fiind de $5,5738 \times 10^{-12}$ mm.

Analizând figurile de mai sus putem spune că deformația totală și variația acesteia este mică, aproape nulă.

Deformația totală apare la piesele de sudat doar la 1,2 s, pentru ambele aliaje dar este distribuită în suprafața piesei, nicidecum în vârful electrozilor, pentru ambele aliaje.

*Valorile maxime ale deformației plastice echivalente***FeMnSi**

- pentru 1,06 s și 1,12 s – deformația maximă este de $2,7219 \times 10^{-5}$ mm/mm,
- iar pentru 1,2 s – deformația maximă este foarte mică valoarea ei fiind de $2,4837 \times 10^{-12}$ mm/mm

CuZnAl

- pentru 1,06 s și 1,12 s – deformația maximă este de $3,6913 \times 10^{-5}$ mm/mm,
- iar pentru 1,2 s – deformația maximă este foarte mică valoarea ei fiind de $1,8008 \times 10^{-12}$ mm/mm.

Deformația plastică totală, (după Von Mises) este la fel ca și deformația totală, foarte mică, aproape nulă, pentru ambele aliaje.

Așa cum era de așteptat, variația în timp a deformației plastice totale, demonstrează că aliajul CuZnAl are o deformație echivalentă mai mare decât aliajul FeMnSi.

CONCLUZII SI CONTRIBUTII ORIGINALE

Lucrarea de doctorat "Cercetări asupra procesului de sudare prin presiune a aliajelor cu memoria formei" se înscrie în tendința actuală a cercetărilor din domeniul Științei materialelor, de a găsi noi soluții care să permită îmbinarea materialelor inteligente fără o alterare a caracteristicilor funcționale.

Principalele concluzii și contribuții originale ale lucrării pot fi sintetizate astfel:

1. Stabilirea prin experiment a **parametrilor optimi ai procesului** de sudare prin presiune în puncte a aliajelor FeMnSi și CuZnAl, 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 FeMnSi 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 CuZnAl, 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 FeMnSi, 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 la 950 °C la temperatura ambiantă, 22°C ;
- forța de apăsare creștere 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 CuZnAl, începe sa scadă;
- deformația maximă pentru aliajul FeMnSi este de $2,7219 \times 10^{-5} \text{mm/mm}$ și apare după un timp de 1,06s și 1,12s, iar pentru aliajul CuZnAl 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.

LISTA LUCRARILOR PUBLICATE

1. D. Dehelean, O. Oancă, Cr. Toma, **CI. DOROHOI**, V. Budau, C.M. Craciunescu - Advanced Materials Welding using a Hybrid Ultrasonic-Electric Resistance Technique, Journal of Optics and Advanced Materials JOAM 2010, ISS 9, vol. 9, pp. 238 – 244, ISSN – 145-4164, (revistă **ISI**).
2. I.MITELEA, **CI. DOROHOI**, C.M. CRACIUNESCU - Microstructure of Cu-Zn-Al shape memory alloys joined by electrical stored – energy welding., PTM 2010, Solid-State Phenomens Vols.172 -174 (2011), pp. 208 – 214, Switzerland (revistă **ISI**).
3. **CI. DOROHOI**, Ion Mitelea, Corneliu M. Crăciunescu - Research on the quality of Cu-Zn-Al shape memory alloys joined by electric resistance point – welding, ModTech International Conference - New face of TMCR Modern Technologies, Quality and Innovation - New face of TMCR 25-27 May 2011, Vadul lui Voda-Chisinau, Republic of Moldova, pp. 353 – 356 (**ISIProceedings**).
4. Ion Mitelea, **CI. DOROHOI** – Factors influencing the welding current in the shape memory FeMnSi alloys welding, using the capacitors stored energy welding machines – Sudura 4 – 2011, ISSN 1453 – 0384, pp. 15 – 23 (revistă **BDI**).
5. M. POPESCU, C. MARTA, I. MITELEA, A. MAGDA, **CI. DOROHOI** - General Problem When Joining Shape Memory Alloys ANNALS of the ORADEA UNIVERSITY. Fascicle of Management and Technological Engineering, Volume VIII (XVIII), 2009, pp. 1357 – 1363, ISSN: 1583 – 0691, (revistă **B +**).
6. I.MITELEA, D.LEUȘTEANU, R.ROȘU, **CI. DOROHOI** - The Characteristics of the Manganese Austenitic Steel Layers Deposited through Self – Shielded Flux – Cored Arc Welding SCIENTIFIC BULLETIN OF THE „POLITEHNICA” UNIVERSITY OF TIMISOARA, ROMANIA ISSN 1224 – 6077; Fasc.1, 2008, pp. 76 – 85.

7. I.MITELEA, D.LEUȘTEANU, R.ROȘU, **CI. DOROHOI** - Layer – Substratum Interaction On Surface Coatings With Functional Layers SCIENTIFIC BULLETIN OF THE „POLITEHNICA” UNIVERSITY OF TIMISOARA, ROMANIA ISSN 1224 – 6077; Fasc.1, 2008, pp. 68 – 75.
8. **CI. DOROHOI**, I.MITELEA, C.M. CRACIUNESCU - The process of loading and unloading capacitors stored energy welding on Fe-Mn-Si shape memory alloys, SCIENTIFIC BULLETIN OF THE „POLITEHNICA” UNIVERSITY OF TIMISOARA, ROMANIA ISSN 1224 – 6077; Fasc.S1, 2009, pp. 19 - 24.
9. **Dorohoi Ci.**, Mitelea I., Crăciunescu C.M., - Process parameters on the point resistance welding Fe-Mn-Si alloys with shape memory effect – Scientific Bulletin Of The „Politehnica” University Of Timisoara, Romania ISSN 1224 – 6077; Vol 55 (69) Special ISSUE S1, 2010, pp. 39 - 44.
10. **Claudia – Mariana DOROHOI**, Ion Mitelea - Calculation algorithm stress and deformation to the points pressure welding alloys CuZnAl shape memory effect - Scientific Bulletin Of The „Politehnica” University Of Timisoara, Romania – acceptată pentru publicare.
11. **Claudia – Mariana DOROHOI**, Ion Mitelea - The modeling welding pressure in points process of the alloys FeMnSi with shape memory effect - Scientific Bulletin Of The „Politehnica” University Of Timisoara, Romania – acceptată pentru publicare.

BIBLIOGRAFIE

1. Adachi, K., Perkins, J. and Wayman, C.M. - Type II twins in selfaccommodating martensite plate variants in a Cu-Zn-Al shape memory alloy, *Acta metall.*, 34, 1986, pp. 2471-2485
2. Adiguzel O. - Smart materials and the influence of atom sizes on martensite microstructures in copper-based shape memory alloys, *Journal of Materials Processing Technology* 185 (2007) pp. 120-124
3. Amengual A., Garcias F., Marco F. Segui C. and Torra V. - Acoustic emission of the interface motion in the martensitic transformation of Cu-Zn-Al shape memory alloy, *Acta metall.*, 36, 1988, pp. 2329-2334
4. Bhattacharya, K., James, R.D. and Swart, P.J. - Relaxation in shapememory alloys-Part I. Mechanical model, *Acta mater.*, 45, 1997, pp. 4547- 4560
5. Bliznuk V.V., Gavriljuk V.G., Kopitsa G.P., Grigoriev S.V., Runov V.V.,- Fluctuations of chemical composition of austenite and their consequence on shape memory effect in Fe-Mn-(Si, Cr, Ni, C, N) alloys, *Acta Materialia* 52 (2004) pp. 4791 - 4799
6. Boarnă Cl., ș.a.: *Procedee neconvenționale de sudare*, Editura Facla, Timișoara 1980.
7. Boarna, C.; Dehelean, D. and Arjoca, I.: *Procedee neconventionale de sudare*. Timisoara, Editura Facla, 1980, pp. 7-35.
8. Budău V., Crăciunescu C.M.- *Studiul Materialelor*, Ghid individual pentru lucrări de laborator, Ed. Mirton, 1998.
9. Budău V., Oancă O., Crăciunescu C.M. - Macro and Microscopic Aspects Observed on Ultrasonic Welding of Shape Memory Alloys - *Annals of the Oradea University. Fascicle of Management and Technological Engineering*, Volume VII (XVII), 2008, pp.1244 - 1248.
10. Bujoreanu L.G., Dia V., Stanciu V., Susan M, and Baciu C. - Study of the tensile constrained recovery behavior of a Fe-Mn-Si shape memory alloy, *THE EUROPEAN PHYSICAL JOURNAL SPECIAL TOPICS* 158, pp. 15 - 20 (2008)
11. Bujoreanu L.Gh., Sacarescu G., Simionescu M., s.a.- *Materiale Nemetalice cu Memoria Formei, Structura - Proprietăți - Aplicații*
12. Bujoreanu Leandru-Gheorghe - *MATERIALE INTELIGENTE* - Editura Junimea Iași 2002
13. Bujoreanu, L.G. și Stanciu, S. - *Materiale cu memoria formei. Metode practice de analiză*, Editura CERMI, Iași, 1998, ISBN 973-9378- 28-5
14. Bujoreanu, L.G., Craus, M.L., Stanciu, S. și Dia, V. - *Studiul unui AMF experimental de tip Cu-Zn-Al. Analiza metalografică și difractometrică a efectelor produse de tratamentul termic primar (I)*, *Metalurgia*, 48, 1996, ISSN 0461-9579, nr. 8-9, pp. 84-91.

- 15.** Bujoreanu, L.G., Dia, V. și Mărginean S. – Tehnologie și utilaje de obținere a unor aliaje cu memoria formei. Vol.I, Editura Științifică "Fundatia Metalurgia Română", București, 1998, ISBN 973-98314-2-7
- 16.** Bujoreanu, L.G., Dia, V. și Mărginean S. – Tehnologie și utilaje de obținere a unor aliaje cu memoria formei. Vol.I, Editura Științifică "Fundatia Metalurgia Română", București, 1998, ISBN 973-98314-2-7
- 17.** Bujoreanu, L.G., Dia, V., Dragulanescu, Elena și Rosescu, G. – Tehnologie și utilaje de obținere a unor aliaje cu memoria formei. Vol.II, Editura Științifică "Fundatia Metalurgia Română", București, 1999, ISBN 973-98314-8-6
- 18.** Bujoreanu, L.G., Dima, A. and Stanciu, S., Moldoveanu, V., Zaharia, L. – Studiul efectelor tratamentelor termice la un aliaj experimental Cu-Zn- Al cu memoria formei: I Variația comportamentului pseudoelastic la tracțiune, Cerc.Metal.Noi Mater., VII, 1999, Nr.1, pp. 57-67
- 19.** Bujoreanu L.G., Roșescu G. și Avram, I.– Studiul Materialelor din Construcția de Mașini, Editura Științifică "Fundatia Metalurgia Română", București, 1998, ISBN 973-98314-5-1
- 20.** Bujoreanu, L.G., Stanciu, S., Craus, M.L. și Dia, V. – Studiul unui AMF experimental de tip Cu-Zn-Al. Analiza metalografică optică, difractometrică și la tracțiune a efectelor produse de tratamentul termic secundar (II), Metalurgia, 49, 1997, nr. 1, pp. 99 - 107.
- 21.** Bulancea, V. Bujoreanu, L.G., Dima, A., Stanciu, S., Moldoveanu, V. și Temneanu, M. – Metodă pentru producerea și educarea activatorilor electrici dintr-un aliaj Cu-Zn-Al cu memoria formei, Cerc.Metal.Noi Mater., V, 1997, Nr. 4, pp. 12 - 24.
- 22.** Caenegem V.N., Duprez L., Verbeke K., Segers D., Houbaert Y. - Stresses related to the shape memory effect in Fe-Mn-Si-based shape memory alloys, Materials Science and Engineering, doi:10.1016/j.msea.2007.02.159.
- 23.** Călugaru G., Bujoreanu, L.G., Stanciu, S., Hopulele, I., Căliman, R., Turcu, O.L. și Apachiței, I. – Memoria formei. Fenomene și aplicații în știința materialelor, Editura „Plumb”, Bacău, 1995, ISBN 973-9150-50-0.
- 24.** Călugaru G., Bujoreanu, L.G., Stanciu, S., Hopulele, I., Căliman, R., Turcu, O.L. și Apachiței, I. – Memoria formei. Fenomene și aplicații în știința materialelor, Editura „Plumb”, Bacău, 1995, ISBN 973-9150-50-0.
- 25.** Călugaru G., Solomon, V., Andrei, E. și Hopulele, Ioana – Aliaje cu memoria formei din pulberi metalice, Editura Tehnică, Chișinău, 1998, ISBN 9975-910-36-X.
- 26.** Casper van der Eijk, Hans Fostervoll, Zuhair K. Sallom and Odd M. Akselsen - Plasma Welding of NiTi to NiTi, Stainless Steel and Hastelloy C276 SINTEF Materials Technology, Richard Birkelands vei 3A, N-7465, Trondheim, Norway - ASM Materials Solutions 2003 Conference, Pittsburgh, Pennsylvania, USA, 13-15 October 2003.

27. Centea O., Miclosi V.: Mașini și aparate pentru sudarea electrica, Editura Tehnica, Bucuresti 1967;
28. Cerjack H. – Mathematical Modeling of Weld Phenomena 4, Mathematical Modeling Series, Cambridge, U.K. 1988.
29. Chakravorty, S. and Wayman, C.M. – Electron microscopy of internally faulted Cu-Zn-Al martensite, Acta metall., 25, 1977, pp. 989 – 1000
30. Cho, H.S., Cho Y., A study of thermal behavior in resistance spot welds, Welding Journal, 67(6) 1989, pp. 236 – 244.
31. Cingolami E. s.a – The two way shape memory effect in Cu-Zn-Al single cristal: Role of dislocations and stabilisation. Acta Metall Mater.Vol 43, No.6, 1995.
32. **Cl. DORHOI**, Ion Mitelea, Corneliu M. Crăciunescu - Research on the quality of Cu-Zn-Al shape memory alloys joined by electric resistance point – welding, ModTech International Conference - New face of TMCR Modern Technologies, Quality and Innovation - New face of TMCR 25-27 May 2011, Vadul lui Voda-Chisinau, Republic of Moldova, pp. 353 – 356 (**ISIProceedings**).
33. Colan H., ș.a.: Studiul metalelor, Editura Didactică și Pedagogică București, 1983.
34. Contardo L., Guenin G. – Trening an two memory effect in Cu-Zn-Al alloy. Acta metall., 38, Pergamon Press, 1990.
35. Crăciunescu C.M. – Micro și Nanoingineria aliajelor cu memorie a formei, Ed. Politehnica, Timișoara 2005, pp. 35 – 55.
36. Crăciunescu C.M. – Teză de doctorat – Cercetări asupra aliajelor de cupru cu efect de memorie a formei, Timișoara 1996, UPTimișoara.
37. Crăciunescu C.M., Ercuta A, Mitelea I., Valeanu M., Teodorescu V.S., Lupu N., and Chiriac H.- Rapidly solidified ferromagnetic shape memory alloys, Eur. Phys. J. Special Topics 158, pp. 161 – 165 (2008) c_EDP Sciences, Springer-Verlag 2008.
38. Crăciunescu, C.M. și Ercuța, A.: The use of electric resistivity measurements for establishing the martensitic transformation parameters in shape memory alloys, BULETINUL ȘTIINȚIFIC AL UNIVERSITĂȚII " POLITEHNICA,, din TIMIȘOARA, 1998, tom 43(57), Seria Mecanică, pp. 265 – 269.
39. Cunningham, B. and Ashbee, K.H.G. – Marmem engines, Acta metall., 25, 1977, pp. 1315-1321.
40. Dehelean D., O. Oancă, Cr. Toma, **DORHOI Cl.**, V. Budau, C.M. Craciunescu - Advanced Materials Welding using a Hybrid Ultrasonic-Electric Resistance Technique, Journal of Optoelectronics and Advanced Materials JOAM 2010 ISSN – 145-4164, pp. 238 – 244.
41. Donner, Petra, Sade, M. and Hornbogen, E. – Shape memory effect in meltspun Fe-Mn-Si shape memory alloys, Progr.Shape Mem.All., (Eucken,S. ed.), DGM - Informationsgesellschaft Verlag, Bochum, 1992, pp. 289-297.

42. Donovan, D.W., Barsch, G.R., Parigborn, R.N. and Finlayson, T.R. – X-ray of the martensite transformation in an indium-thallium alloy, *Acta metall.*, 42, 1994, pp. 1985-1996
43. **DOROHOI CI.**, I.Mitelea, C.M. Craciunescu - The process of loading and unloading capacitors stored energy welding on Fe-Mn-Si shape memory alloys, *Scientific Bulletin Of The „Politehnica” University Of Timisoara, Romania ISSN 1224 – 6077; Fasc.S1, 2009, pp. 19 – 24.*
44. **DOROHOI CI.**, Mitelea I., Crăciunescu C.M., - Process parameters on the point resistance welding Fe-Mn-Si alloys with shape memory effect – *Scientific Bulletin Of The „Politehnica” University Of Timisoara, Romania ISSN 1224 – 6077; Vol 55 (69) Special ISSUE S1, 2010, pp. 39 – 44.*
45. **DOROHOI Claudia - Mariana**, Ion Mitelea - Calculation algorithm stress and deformation to the points pressure welding alloys CuZnAl shape memory effect - *Scientific Bulletin Of The „Politehnica” University Of Timisoara, Romania – acceptată pentru publicare.*
46. **DOROHOI Claudia - Mariana**, Ion Mitelea - The modeling welding pressure in points process of the alloys FeMnSi with shape memory effect - *Scientific Bulletin Of The „Politehnica” University Of Timisoara, Romania – acceptată pentru publicare.*
47. Dubois, B. – *Aciers à mémoire de forme. Espoir ou réalité?*, *Trait.therm.*, 234, 1990, pp. 27-34
48. Duerig, T.W., Zadno, R. – An engineer’s perspective of pseudoelasticity, *Eng.Asp.Shape Mem.All. (Duerig, T.W. et al. eds.) Butterworth-Heinemann, 1990, pp. 369 - 393*
49. Dune D.P., Kennon N.F., *Metal Forum*, 4 (1981), pp 176.
50. Eucken, S. – Shape memory effect in alloy produced by meltspinning, *Progr.Shape Mem.All.*, (Eucken, S. ed.), DGM-Informationsgesellschaft Verlag, Bochum, 1992, pp. 239-275.
51. Feng X.Q., Sun Q.,- Shakedown analysis of shape memory alloy structures, *ScienceDirect International Journal of Plasticity* 23 (2007), pp. 183–206.
52. Feng Z., Babu S.S., Santella M.L., Riemer B.W., Gould J.E. – An incrementally coupled electrical-thermal-mechanical model for resistance spot welding, *5th International Conference on Trend in Welding Research*, Pine Mountain, G.A., 1998.
53. Frémond, M. and Miyazaki, S. – *Shape Memory Alloys. CISM Courses and Lectures*, Springer, Wien-New York, 1996, ISBN 3-211- 82804-4.
54. Fujita H. and Ueda, S. – Stacking faults and f.c.c (γ) \rightarrow h.c.p. (ϵ) transformation in 18/8-type stainless steel, *Acta metall.*, 20, 1972, pp. 759 – 767.
55. Funakubo, H.: *Shape memory alloys*, Gordon and Breach Science Publishers, 1987, New York, pp.23 – 41.

- 56.** Gâdea S. și Petrescu, M. - "7. Transformarea martensitică și bainitică" în *Metalurgie fizică și studiul metalelor*, Vol. III, Editura didactică și pedagogică, București, 1983, pp. 254-303
- 57.** Georgescu, V. and Iordachescu, M.: Shearing Strength of Several Spot Cold Pressure Aluminium Welded Joints. In: *Sudura* (1999) 2 June, pp. 48 - 51.
- 58.** Georgescu, V. *Tehnologii de sudare prin presiune*, Universitatea Galati, 1984.
- 59.** Georgescu, V.; Iordachescu, D. and Mircea, O.: *Tehnica sudarii prin presiune*, Universitatea Galati, 1992, pp. 132 - 145.
- 60.** Gliță Gh., Andreescu F., Machedon T.P.: *Sudarea cu energie înmagazinată descărcare prin transformator*, Editura Lux Libris 1997;
- 61.** Greenwood J.A. - Temperatures in spot welding, *British Welding Journal*, 1961, pp. 316 - 322.
- 62.** Greitman M.J. - Numerical simulation of the resistance spot welding process using spot welder;
- 63.** Guenin G. - Mémoire de forme et alliages cuivreux, *Trait. therm.*, 234, 1990, pp. 21 - 26.
- 64.** Han J.E., Orozco Chen, C.H. - Resistance spot welding: a heat transfer study, *Welding Journal*, 67 (9) 1989, pp. 363 - 371.
- 65.** Henderson J.G. and Bates J.M. - *Metallurgical Dictionary*, Reinhold Publishing Corporation, S.U.A., 1953.
- 66.** Hornbogen E. - Alloys with shape memory-New materials for the technology of the future?, *Progress in Shape Memory Alloys*, (Eucken, S., editor), DGM Informationsgesellschaft Verlag, Bochum, 1992, ISBN 3- 88355-178-3, pp. 3 - 22.
- 67.** Houchen A.F., Page R.E., Yang W.H. - Numerical modeling of resistance spot welding, numerical modeling of manufacturing processes, *ASME Winter Conference*, 1977, pp. 177-129.
- 68.** Hsu Y.T., Wang Y.R., Wu S.K., and Chen C. - Effect of CO2 Laser Welding on the Shape-Memory and Corrosion Characteristics of TiNi Alloys -*Metallurgical and Materials Transactions A* - 576 - Volume 32A, March 2001
- 69.** Hsu Y.T., Wang Y.R., Wu S.K., and Chen C. - Effect of CO2 Laser Welding on the Shape-Memory and Corrosion Characteristics of TiNi Alloys *Metallurgical and Materials Transactions A* - 576 - Volume 32A, March 2001.
- 70.** Humbeeck V., and Stalmans R. - Characteristics of shape memory alloys, *Shape Mem.Mater.*, (Otsuka, K. and Wayman, C.M., eds.), Cambridge University Press, 1998, pp. 149 - 183.
- 71.** Humbeeck V.J. - Les alliages à mémoire de forme: le phénomène, les matériaux et les applications, *Trait.therm.*, 234, 1990, 20.
- 72.** Hume-Rothery W. - Atomic diameters, atomic volumes and solid solubility reactions in alloys, *Acta metall.*, 14, 1966, pp. 17 - 20.

- 73.** Ienciu, M., Chircă D., Moldovan, P., Cristea, Lidia și Cincă, L. - Cercetări experimentale asupra aliajelor cu efect de memorie a formei, *Metalurgia*, 37, 1985, Nr. 10, pp. 533 – 536.
- 74.** Iordachescu M., Georgescu V., - Material deformation in cold pressure welding, THE ANNALS of "DUNAREA DE JOS" UNIVERSITY OF GALATI FASCICLE XII WELDING EQUIPMENT AND TECHNOLOGY ISSN 1221-4639 2001.
- 75.** Iordachescu, M., Georgescu, V. and Constantin, E.: Several Aspects Concerning Cold Pressure Butt And Spot Welds. In: Proc. of She Met 2000, Birmingham, England, UK, 2000, 577 - 86.
- 76.** Iovănaș R. - Sudarea electrică prin presiune, EDITURA SUDURA 2005 John, V. - Testing of Materials, McMillan Education Ltd., London, 1992
- 77.** Kajiwara, S. and Kikuchi, T. - Shape memory effect and related transformation behavior in Fe-Ni-C alloys, *Acta metall.*, 38, 1990, pp. 847 – 855.
- 78.** Khaled M., Mostafa J., De Baerdemaeker N., Van Caenegem N. s.a., - Study of the effect of annealing on defects in Fe-Mn-Si-Cr-Ni-C alloy by slow positron beam, *Applied Surface Science* 255 (2008) pp. 145 – 148.
- 79.** Kumar, S., Bhalla, A.S. and Cross, L.E. - Smart ferroelectrics for acoustic vibration control, *J. Intell. Mater. Syst. and Struct.*, 5- September, 1994, pp. 678 – 682.
- 80.** Li Z., Gong S., Wang M.P., - Macroscopic shape change of Cu₁₃Zn₁₅Al shape memory alloy on successive heating, *Journal of Alloys and Compounds* 452 (2008), pp. 307 – 311.
- 81.** Lieberman D.S., Schmerling M.A. and Karz R.W. - Ferroelastic "memory" and mechanical properties in gold-cadmium, *Shape Memory Effects in Alloys*, (Perkins, J., editor), Plenum Press, New York-London, 1975, ISBN 0-306-30891-6, pp. 203 - 244.
- 82.** Lieberman, D.S., Schmerling, M.A. and Karz, R.W. - Ferroelastic "memory" and mechanical properties in gold-cadmium, *Shape Memory Effects in Alloys*, (Perkins, J., editor), Plenum Press, New York-London, 1975, ISBN 0-306-30891-6, 203-244.
- 83.** Liu H.C. and Liu K.M. - An investigation of martensite transformation in an Fe-30Mn-6Si shape memory alloy, *Scripta metall.mater.*, 34, 1996, No.3, pp. 343 – 347.
- 84.** Liu H.X., Si N.C., Xu G.F., - Influence of process factors on shape memory effect of CuZnAl alloys, *Trans. Nonferrous Met. SOC China* 16(2006), pp. 1402 - 1409.
- 85.** Lovey F.C. and Torra V. - Shape memory in Cu-based alloys: phenomenological behavior at the mesoscale level and interaction of martensite transformation with structural defects in Cu-Zn-Al, *Progress in Materials Science*, 44, 1999, pp.189 – 289.
- 86.** Maki, T. - Ferrous shape memory alloys, *Shape Mem.Mater.*, (Otsuka, K. and Wayman, C.M., eds.), Cambridge University Press, 1998, pp. 117 – 132.

- 87.** McDonald Schetky L. - Shape memory alloy applications in space systems, Eng.Asp.Shape Mem.All. (Duerig, T.W. et al. eds.) Butterworth-Heinemann, 1990, pp. 170- 177.
- 88.** Melton, K.N. - Ni-Ti based shape memory alloys, Eng.Asp.Shape Mem.All. (Duerig, T.W. et al. eds.) Butterworth-Heinemann, 1990, pp. 21 - 35.
- 89.** Mitelea. I, **CI. DORHOI** - Factors influencing the welding current in the shape memory FeMnSi alloys welding, using the capacitors stored energy welding machines - Sudura 4 - 2011, ISSN 1453 - 0384, pp. 15 - 23 (revistă **BDI**).
- 90.** Mitelea I., **CI. DORHOI**, C.M. Craciunescu - Microstructure of Cu-Zn-Al shape memory alloys joined by electrical stored - energy welding., PTM 2010, Solid-Solid Phase Transformations in Inorganic Materials, June 6-11, 2010, Palais des Papes, Avignon, France, ISSN: 1012-0394, Vol: 1281, Issue: 172, pp. 208 - 214.
- 91.** Mitelea I., D.Leuşteanu, R.Roşu, **CI. DORHOI** - Layer - Substratum Interaction On Surface Coatings With Functional Layers, Scientific Bulletin Of The „Politehnica” University Of Timisoara, Romania ISSN 1224 - 6077; Fasc.1, 2008, pp.
- 92.** Mitelea I., D.Leuşteanu, R.Roşu, **CI. DORHOI** - The Characteristics of the Manganese Austenitic Steel Layers Deposited through Self - Shielded Flux - Cored Arc Welding, Scientific Bulletin Of The „Politehnica” University Of Timisoara, Romania ISSN 1224 - 6077; Fasc.1, 2008, pp.
- 93.** Morton A.J. - The γ -phase regions of the Cu-Zn, Ni-Zn and Pd-Zn binary systems, Acta metall., 27, 1979, pp. 863 - 867.
- 94.** Naka M.: Joining of advanced materials, Transaction OF JWRI, 1994, nr.2 pp.122 - 124.
- 95.** Nogueira M.T. şi Ferreira P.M.: Modificări termice şi microstructurale induse de fluaj în aliajele cu memoria formei, METALLURGY AND MATERIALS, 1996, vol.IV, nr.3, pp. 1 - 14.
- 96.** Nogueira M.T.: Monocristais de Ligas de Cabre con Memoria de Forma: Preparacao e caracterizacao metalografica, Encontro Nacional de Sociedade Portuguesa de Materiais, 1995, nr.5, nov., pp. 11 - 18.
- 97.** Nosova G. and Vintaikin, E. - Investigations of nature of two-way shape memory effect in γ -Mn based alloys, Scripta materialia, 40, 1999, No. 3, pp. 347 - 351.
- 98.** Ogata N. - Temperature - adaptive polymers for drug release controls, Sixth Inter. Conf. on Adapt. Struct., (Rogers, C.A. et al., eds.), Technomic, 1996, pp. 54 - 60.
- 99.** Otsuka K., Ohba, T., Tokonami, M. and Wayman, C.M. - New description of long period stacking order structures of β -phase alloys, Scripta metallurgica et materialia, 29, 1993, pp. 1359 - 1364.
- 100.** Otsuka K., Skamoto, H. and Shimizu, K. - Successive stress-induced martensitic transformations and associated transformation pseudoelasticity, Acta metall., 27, 1979, pp. 585-601.

- 101.** Otsuka K., Wayman, C.M., Nakai, K., Sakamoto, H. and Shimizu, K.- Superelasticity effects and stress-induced martensitic transformations in Cu-Al-Ni alloys, *Acta metall.*, 24, 1976, pp. 207 - 226.
- 102.** Owen S. - Shape memory effects and applications: an overview, *Shape Mem. Eff. All.*, (Perkins, J., ed.), Plenum Press, 1975, pp. 305 - 323.
- 103.** Pandey D. and Lele, S. - On the study of the f.c.c - h.c.p. martensitic transformation using a diffraction approach - II. h.c.p. → f.c.c. transformation, *Acta metall.*, 34, 1986, pp. 415 - 424.
- 104.** Pandey D. and Lele, S. - On the study of the f.c.c - h.c.p. martensitic transformation using a diffraction approach - I. f.c.c.→h.c.p. transformation, *Acta metall.*, 34, 1986, pp. 405 - 413.
- 105.** Patoor E., Eberhardt A. et Berveiller M. - Comportement pseudoélastique et effet de mémoire de forme double sens. Application à la torsion du barreau cylindrique, *Traitement thermique*, 234, 1990, ISSN 0041-0950, pp. 43 - 48.
- 106.** Patoor E și Berveiller M.: *Tehnologie des alliages a memoire de forme*, Ed. Hermes, 1994.
- 107.** Patoor E. et Berveiller M. (coordonateurs) - *Tehnologie des alliages à mémoire de forme. Comportement mécanique et mise en oeuvre*, Hermès, Paris, 1994, ISBN 2-86601-426-X, 228.
- 108.** Patoor E., Dimitris C. L., Pavlin B. E., Brinson L.C, Xiujie G.,- Shape memory alloys, Part I: General properties and modeling of single crystals, *Mechanics of Materials* 38 (2006), pp. 391 - 429.
- 109.** Patoor E., Eberhardt A. et Berveiller, M. - Potentiel pseudoélastique et plasticité de transformation martensitique dans les mono et polycristaux métalliques, *Acta metall.*, 35, 1987, pp. 2779 - 2789.
- 110.** Peng H.B., Wen Y.H., Xiong L.R., Li N.- Influence of initial microstructures on effectiveness of training in a FeMnSiCrNi shape memory alloy, *Materials Science and Engineering A* 497, (2008), pp. 61 - 64.
- 111.** Perkins J. and Hodgson D. - The two-way shape memory effect, *Eng.Asp.Shape Mem.All.* (Duerig, T.W. et al. eds.) Butterworth- Heinemann, 1990, pp. 195 - 206.
- 112.** Perkins J., Edwards G.R., Such C.R., Johnson J.M. and Allen R.R.- Thermomechanical characteristics of alloys exhibiting martensitic Superelasticity, *Shape Mem. Eff. All.*, (Perkins, J., ed.), Plenum Press, 1975, pp. 273 - 304.
- 113.** Perța, GH.: *Tehnologii de sudare prin presiune*, Ed. UTT, 1993
- 114.** Pons J. and Cesari E. - Interaction Between γ - Phase Precipitates and Martensite in Cu-Zn-Al Alloys, *Materials Structure*, vol. 6, number 2, (1999)
- 115.** Popescu M. ș.a.: *Materiale avansate*, ISIM - Rezumat, 2001.
- 116.** Popescu M., C. Marta, I. Mitelea, A. Magda, **CI. DORHOI** - General Problem When Joining Shape Memory Alloys, *ANNALS of the ORADEA UNIVERSITY. Fascicle of Management and Technological Engineering*, Volume VIII (XVIII), 2009, pp. 1357 - 1363, ISSN: 1583 - 0691.

- 117.** Popescu M., Miloş L., Marta C.– Îmbinarea materialelor avansate – Aliaje cu memoria formei – Ed. Eurostampa Timișoara 2002.
- 118.** Popescu M., Miloş L.: Sistematizare informații referitoare la particularitățile sudării aliajelor cu memoria formei, Zilele Academice Timișorene, 2001, mai.
- 119.** Popovici V., Negoitescu S., Glita Gh., Echipamente pentru sudare – Indrumator pentru lucrari de laborator, Editura Institut Politehnic Traian Vuia din Timisoara, 1985.
- 120.** Potluri, N.B. ș.a. : Joining of shape memory alloys, *Welding Journal*, 1999, nr.3, pp. 39-42.
- 121.** Qin Z., and Zhang Y., - Mossbauer effect study of antiferromagnetic Fe-Mn-Si alloys , J.C. Baltzer AG, Science Publishers, Received 9 December 1997; revised 5 July 1998, *Hyperfine Interactions* 116 (1998), pp. 225 – 235.
- 122.** Rapaciolli R. and Ahlers M. – The influence of short-range disorder on the martensitic transformation in Cu-Zn and Cu-Zn-Al alloys, *Acta metall.*, 27, 1979, pp. 777 – 784.
- 123.** Reyhani M.M. and McCormick, P.G. – Effect of thermomechanical cycling in an Fe-Mn-Si-Cr-Ni shape memory alloy, *Scripta metall. mater.*, 31, 1994, No.7, pp. 875 – 878.
- 124.** Rios-Jara D. and Guenin G. – On the characterization and origin of the dislocations associated with the two way memory effect in Cu-Zn-Al thermoelastic alloys – I. Quantitative analysis of the dislocations, *Acta metall.*, 35, 1987, pp. 109 – 119.
- 125.** Rios-Jara D. and Guenin G. – On the characterization and origin of the dislocations associated with the two way memory effect in Cu-Zn-Al thermoelastic alloys – I. Quantitative analysis of the dislocations, *Acta metall.*, 35, 1987, pp. 109 – 119.
- 126.** Rong L.J., Ping D.H., Li Y.Y. and Shi C.X. – Improvement of shape memory effect in Fe-Mn-Si alloy by Cr and Ni addition, *Scripta metall.mater.*, 32, 1995, No.12, pp. 1905 – 1909.
- 127.** Rong L.J., Li Y.Y. and Shi C.X. – Improvement of shape memory effect in an Fe-Mn-Si-Cr-Ni alloy, *Scripta metall.mater.*, 34, 1996, No.6, pp. 993 – 998.
- 128.** Saburi T., Wayman C.M., Takata K. and Nenno S. – The shape memory mechanism in 18R martensitic alloys, *Acta metall.*, 28, 1980, pp. 15 – 23.
- 129.** Sade M., Halter K. and Hornbogen E. – Transformation behaviour and one-way shape memory effect in Fe-Mn-Si alloys, *Progr.Shape Mem.All.*, (Eucken, S. ed.), DGM-Informationsgesellschaft Verlag, Bochum, 1992, pp. 191 – 199.
- 130.** Sade M., Halter K. and Hornbogen E. – The effect of thermal cycling on the transformation behaviour of Fe-Mn-Si shape memory alloys, *Progr.Shape Mem.All.*, (Eucken, S. ed.), DGM-Informationsgesellschaft Verlag, Bochum, 1992, pp. 201 – 212.
- 131.** Sato A., Chishima E., Yamaji Y. and Mori T. – Orientation and composition dependencies of shape memory effect in Fe-Mn-Si alloys, *Acta Metallurgica*, 32, 1984, ISSN 0001-6160, pp. 539 – 547.
- 132.** Sato A., Kubo H and Maruyama T.,- Mechanical Properties of Fe-Mn-Si Based SMA and the Application, *Materials Transactions*, Vol. 47, No. 3 (2006) pp. 571 – 579, Special Issue on Shape Memory Alloys and Their Applications 2006 The Japan Institute of Metals
- 133.** Sato A., Soma K. and Mori T. – Hardening due to pre-existing ϵ - martensite in an Fe-30Mn-1Si alloy single crystal, *Acta metall.*, 30, 1982, pp. 1901 – 1907.

- 134.** Sato, A., Chishima, E., Soma, K. and Mori, T. – Shape memory effect in $\gamma \leftrightarrow \epsilon$ transformation in Fe-30Mn-1Si alloy single crystals, *Acta metall.*, 30, 1982, pp. 1177 – 1183.
- 135.** Sawaguchi T., Kikuchi T. and Kajiwara S.- The pseudoelastic behavior of Fe-Mn-Si-based shape memory alloys containing Nb and C, *Smart Materials and Structures* 14 (2005) S317-S322 doi:10.1088/0964-1726/14/5/022.
- 136.** Schroeder T.A. and Wayman C.M. – Martensite-to-martensite transformations in Cu-Zn alloys, *Acta metall.*, 26, 1978, pp. 1745 – 1757.
- 137.** Schumann H. – *Metalurgie fizică (traducere din limba germană)*, Editura Tehnică, București, 1962.
- 138.** Schwartz M. - *Encyclopedia of materials, parts, and finishes* - ISBN 1-56676-661-3, TA418.9.S62 S39, 2002.
- 139.** Shahinpoor M., Bar-Cohen V., Simpson J.O. and Smith J. – Ionic polymer-metal composites (IPMCs) as biomimetic sensors, actuators and artificial muscles-A review, *Smart Mater. Struct.*, 7, 1998, ISSN 0-964- 1726, R15-R30.
- 140.** Shimizu K. and Otsuka K. – Optical and electron microscope observations of transformation and deformation characteristics in Cu-Al-Ni martensite alloys, *Shape Mem. Eff. All.*, (Perkins, J., ed.), Plenum Press, 1975, pp. 59 – 87.
- 141.** Shimizu K., T. Tadaki, *Shape Memory Alloys*, H. Funakudo, Ed., Gordon si Breach Science Publishers, 1987.
- 142.** Sinha A.K. – “6. Martensite”, *Ferrous Physical Metallurgy*, Butterworth, Boston, 1989, ISBN 0-409-90139-3, pp. 227 – 279.
- 143.** Sinha A.K: *Ferrous Physical metallurgy*, Butterworth Publishers, 1989.
- 144.** Stanciu S., Bujoreanu L.G.; Dia I.V. – Cercetări experimentale privind elaborarea și comportamentul de memoria formei ale unei alame aliate, Simpozionul științific EHNOMUS, Ediția a-VIII-a, Universitatea „Ștefan cel Mare”, Suceava, Volumul „Ingineria materialelor și tehnologii neconvenționale”, 1995, pp. 85 – 91.
- 145.** Sun X. - Effect of projection height on projection collapse and nugget formation – A finite element study, *Welding Journal*, 80 (8) 2001, pp. 211 – 216.
- 146.** Sun X. – Modeling of projection welding processes using coupled finite element analyses, *Welding Journal*, 79 (9) 2000, pp. 244 – 251.
- 147.** Sun X., Dong P., - Analysis of aluminum resistance spot welding processes using coupled finite element procedures, *Welding Journal*, 79 (8) 2000, pp. 215 – 221.
- 148.** Tsai C.L., Jammal O.A., Papritan J.C., Dickinson D.W. – modeling of resistance spot welding nugget growth, *Welding Journal*, 71 (2) 1992, pp. 47 – 54.
- 149.** Tsuzaki, K., Natsume, Y., Tomota, Y. and Maki, T. – Effect of solution hardening on the shape memory effect of Fe-Mn based alloys, *Scripta metall.mater.*, 33, 1995, No.7, 1087-1092
- 150.** Vatanoy, S. and Heheman, R.F. – Martensitic transformations in β phase alloys, *Shape Mem. Eff. All.*, (Perkins, J., ed.), Plenum Press, 1975, pp. 115 – 145.
- 151.** Verbeken K. , Van Caenegem N., Raabe D., - Identification of ϵ martensite in a Fe-based shape memory alloy by means of EBSD, *ScienceDirect Micron* 40 (2009), pp. 151 – 156.
- 152.** Wan J., Chen S.,- Martensitic transformation and shape memory effect in Fe-Mn-Si based alloys, *ScienceDirect Current Opinion in Solid State and Materials Science* 9 (2005), pp. 303 – 312.
- 153.** Wayman, C.M. – Deformation, mechanisms and other characteristics of shape memory alloys, *Shape Mem. Eff. All.*, (Perkins, J., ed.), Plenum Press, 1975, pp. 1 - 27.

- 154.** Wayman, C.M. and Duerig, T.W. – An introduction to martensite and shape memory, *Engineering Aspects of Shape Memory Alloys*, (Duerig, T.W., Melton, K.N., Stöckel, D. and Wayman, C.M., editors), Butterworth-Heinemann, London-Boston-Singapore-Sydney-Toronto-Wellington, 1990, ISBN 0-750-61009-3, pp. 3 - 20.
- 155.** Wei Tong, Hong Tao, Xiquan Jiang, Nian Zhang, Manuel P. Marya, Louis G. Hector, Jr., and Xiaohong Q. Gayden - Deformation and Fracture of Miniature Tensile Bars with Resistance-Spot-Weld Microstructures - *Metallurgical and Materials Transactions A- 2656—Volume 36A*, October 2005.
- 156.** Wen Y., Li N. and Tu M. - Effect of quenching temperature on recovery stress of Fe-18Mn-5Si-8Cr-4Ni alloy, *Scripta materialia* 44 (2001), pp. 1113 - 1116.
- 157.** Wen Y.H., Li N., Xiong L.R. - Composition design principles for Fe-Mn-Si-Cr-Ni based alloys with better shape memory effect and higher recovery stress, *Materials Science and Engineering A* 407 (2005), pp. 31 - 35.
- 158.** Wnag, G.: *Weldability of NITINOL*, Ed. Welding Institute, 1995
- 159.** Wu, M.H. – Cu-based shape memory alloys, *Eng.Asp.Shape Mem.All.* (Duerig, T.W. et al. eds.) Butterworth-Heinemann, 1990, pp. 69 - 88.
- 160.** Xu, H. and Müller, I. – Three different ways to influence the hysteresis in shape memory alloys, *Adv.Mater.Proc.*, (Exner, H. and Schumacher, V., eds.), Informationsgesellschaft Verlag, 1990, pp. 1363 - 1368.
- 161.** XXX Applications of aluminum matrix composites [J], *Key Engineering Materials*, 1995.
- 162.** XXX http://www.unitekmiyachi.com/Resources_Node_View.asp?id=601.
- 163.** XXX <http://www.memorymetale.de>
- 164.** XXX. <http://www.amtbe.com> Advanced Materials and Technologies, Use of Shape Memory Alloys –Actuators: Applications, 2001.
- 165.** XXX. <http://www.sma-inc.com/SMAnadSE.html> Shape Memory Applications Inc., Introduction to Shape Memory and Superelasticity, 2001.
- 166.** XXX. <http://www.smainc.com/twoway.html>, Shape Memory Applications Inc., Two-Way Memory, 2001.
- 167.** Yinong L. and McCormick, P.G. – Factors influencing the development of two-way shape memory in NiTi, *Acta metall.*, 38, 1990, pp. 1321 - 1326.
- 168.** Zhang Y. and Hornbogen E. –Effects of plastic deformation of β -CuZnAl shape memory alloys in martensitic transformation cycles $\beta \rightarrow \alpha$, *Progr.Shape Mem.All.*, (Eucken, S. ed.), DGM-Informationgesellschaft Verlag, Bochum, 1992, pp. 141 - 154.
- 169.** Zhao C., - Improvement of Shape Memory Effect in Fe-Mn-Si-Cr-Ni Alloys , *METALLURGICAL AND MATERIALS TRANSACTIONS - VOLUME 30A*, OCTOBER 1999—2599.
- 170.** Zhu W.J., Chen W.Y., and Hsu T.Y.(Xu Zuyao) – Group theory and crystallography of the martensitic transformation in a Cu-26.71Zn-4.15Al shape memory alloy, *Acta metall.*, 33, 1985, pp. 2075-2082
- 171.** Zhu X , Zhang Y. - Effect of α -martensite on the electrochemical corrosion behaviour of anFe-Mn-Si shape memory alloy in aqueous solutions, *JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE LETTERS* 16 (1997), pp. 1516 - 1517.