

Particularitățile transformărilor structurale în îmbinari sudate din aliaje deformabile de aluminiu, durificabile prin îmbătrânire

pentru obținerea titlului științific de doctor la Universitatea Politehnica Timișoara

în domeniul de doctorat Ingineria materialelor

autor ing. Ciprian Pavel LUCIAN

conducător științific Prof.univ.dr.ing. Ion MITELEA

Cap. 1 Stadiul actual al cercetărilor privind obținerea îmbinărilor sudate din aliaje de aluminiu

1.2. Microstructura și proprietățile aliajelor de aluminiu

Principalele elemente de aliere care intră în compoziția aliajelor comerciale cu baza de Al sunt: magneziu (Mg), siliciu (Si), mangan (Mn), zinc (Zn) și cupru (Cu).

Conform specificațiilor internaționale [32], aliajele se disting prin numere formate din patru cifre, prima cifră caracterizează grupa sau seria de care aparține aliajul:

- 1xxx (Al99,99 ... Al99,5),
- 2xxx (AlCu),
- 3xxx (AlMn),
- 4xxx (AlSi),
- 5xxx (AlMg (Mn)),
- 6xxx (AlMgSi)
- 7xxx (AlZnMg (Cu)),
- 8xxx (altele, de exemplu, AlFe, AlLi).

Toate aliajele de aluminiu pot fi clasificate în următoarele trei grupe principale:

- aliaje deformabile, destinate fabricării unor semifabricate și piese finite prin procedee de laminare, presare, forjare, ambutisare, etc. La rândul lor, acestea se împart în aliaje durificabile prin tratament termic și nedurificabile prin tratament termic;
- aliaje turnate în piese;
- aliaje obținute prin metalurgia pulberilor.

IOSUD - Universitatea Politehnica Timișoara Școala Doctorală de Studii Inginerești



Principala diferență între aliajele nedurificabile și cele durificabile prin tratament termic rezidă în mecanismele de durificare prin deformare la rece, respectiv prin călire pentru punere in soluție urmată de îmbătrânire naturală sau artificială care sunt responsabile de creșterea caracteristicilor de rezistență mecanică.

1.3. Mecanismele de consolidare a aliajelor deformabile, nedurificabile prin tratament termic

Această grupă de materiale include aluminiul pur și tipurile de aliaje Al-Mg, Al-Mn, Al-Mg-Mn și Al-Fe. La acestea acționează mecanismele de durificare prin deformare la rece și prin formare de soluții solide.

Durificarea prin soluții solide presupune încorporarea atomilor elementelor de aliere în rețeaua cristalină a aluminiului. Până la un anumit conținut de atomi străini, acest efect poate fi semnificativ. Incorporarea atomilor de aliere împiedică procesele de alunecare în rețeaua cristalină, având ca rezultat o creștere a valorilor rezistentei mecanice.

Pentru refacerea proprietăților mecanice se aplică de regulă tratamentul termic de recoacere pentru recristalizare. Temperatura de încălzire se situează peste cca. 350 °C (tab.1.2).Durata de menținere nu trebuie să fie prea lungă deoarece provoacă o creștere a granulației. La aliajele din clasa 5000 (Al-Mg și Al-Mg-Mn) cu peste 3% Mg se au în vedere condiții speciale de răcire pentru a nu fi deteriorată comportarea la coroziune intercristalină.

1.4. Mecanismele de consolidare a aliajelor deformabile, durificabile prin tratament termic

Durificarea ia naștere prin combinarea de regulă a două sau trei elemente de aliere cu aluminiu. Aici sunt incluse aliajele din seria 2xxx, 6xxx și 7xxx (Al-Cu-Mg, Al-Mg-Si și Al-Zn-Mg(Cu). Călirea pentru punere in soluție trebuie să aibă în vedere următoarele premize:

- O variație continuă a solubilității elementului de aliere în rețeaua cristalină a aluminiului, cu scăderea temperaturii în stare solidă;
- Formarea de precipitate fin dispersate în rețeaua metalică.



Fig.1.5 Ciclograma tratamentului termic de încălzire pentru punere in soluție urmată de îmbatranire [30]



1.5. Modificări structurale la sudarea prin topire. Elemente de dificultate

Deși temperatura de topire a aluminiului este relativ scăzută, căldura necesară pentru sudarea prin topire a aluminiului, are aproximativ aceeași mărime ca și la sudarea oțelului. Motivul pentru aceasta este conductivitatea termică ridicată a materialului. Efectul căldurii de sudare se manifestă prin apariția unor modificări structurale nedorite si prin deformații ale componentelor sudate. Una din dificultățile apărute la utilizarea structurilor sudate din aceste aliaje este reducerea generală a proprietăților mecanice ale zonelor îmbinării sudate în comparație cu materialul de bază. Acest fapt se datorează rezistenței mecanice mai reduse a cusăturii sudate și deteriorării structurii inițiale a ZIT sub acțiunea ciclurilor termice de sudare.

De asemenea, efectele căldurii de sudare asupra fenomenelor de precipitare și a fisurării prin licuație, care sunt responsabile de înrăutățirea proprietăților mecanice ale îmbinărilor sudate sunt analizate incomplet [41].



Fig.1.7 Zonele microstructurale ale unei îmbinari sudate prin topire [83]

1.6. Tratamente termice anterioare, concomitente și ulterioare sudării

Pentru secțiunile transversale mai mari de material, poate fi necesară preîncălzirea componentelor ce urmează a fi sudate. Temperaturile de preîncălzire nu ar trebui să depășească limita de 200 ° C. Acest tratament concomitent cu operația de sudare se aplică tuturor categoriilor de aliaje cu baza de aluminiu. Într-o construcție sudată iau naștere în mod inevitabil tensiuni reziduale. Nivelul acestora este influențat semnificativ de geometria construcției, de procedeul de sudare și de secvența de realizare a sudurii.

Aplicarea post - sudare a tratamentului termic de recoacere pentru detensionare se va face într-o măsură foarte limitată. În plus, întregul ansamblu sudat trebuie să fie introdus în



cuptor, iar parametrii de tratament nu trebuie să schimbe starea structurală a materialului. De regulă, temperatura de recoacere are valori in intervalul 250 - 350 °C.

În general, trebuie avut in vedere faptul că prin recoacere de detensionare se pot provoca deformații mai mari ale componentelor. Construcțiile metalice sudate din EN AW-7020 T6 (DIN 1725: AlZn4,5Mn F35 / F34), pot fi introduse în exploatare numai dupa finalizarea procesului de îmbătrânire naturală.

1.7. Probleme de incompatibilitate la realizarea îmbinărilor sudate eterogene

1.7.1. Generalități

Îmbinarea materialelor disimilare prin tehnici care să asigure o continuitate metalică are la bază fructificarea unei combinații favorabile de proprietăți ca de exemplu:

- bune proprietați mecanice ale unui material și o masă specifică redusă a celuilalt material;
- bune proprietăți mecanice ale unui material și o bună stabilitate la coroziune a celui deal doilea material;
- bune proprietăți mecanice ale unui material și bune proprietăți electrice ale celuilalt material.

1.8. Îmbinări sudate din materiale disimilare, aliaje de Al – oțeluri

Dificultățile care apar la sudarea materialelor disimilare sunt datorate diferențelor de proprietăți termice, mecanice și structurale. Cu toate acestea, există o tendință crescătoare în ceea ce privește utilizarea îmbinărilor eterogene în industriile gigantice care includ construcțiile navale, vehiculele militare, industria aerospațială și industria automobilelor. Utilizarea materialelor metalice cu masa specifică redusă în locul celor mai grele permite reducerea consumului de combustibil si chiar a costurilor de producție.

O serie de lucrări de cercetare și-au propus găsirea unor procese de sudare a acestor aliaje disimilare, dar problema pierderii caracteristicilor de rezistență mecanică a zonei sudate datorată formării de faze intermetalice fragile nu a fost rezolvată [47] [2] [11] [78] [67]. Urmare a diferentelor existente între proprietățile termice, coeficienții de dilatație, capacitatea și conductivitatea termică, rețelele cristaline, temperaturile de topire (660 °C pentru aluminiu si 1500 °C pentru oțel) și a solubilității aproape de zero în stare solidă a fierului în aluminiu, ce provoacă deformații și apar porozități și fisuri care conduc la reducerea proprietăților mecanice ale îmbinarilor sudate.



1.9. Îmbinări sudate MIG și WIG

Sudarea WIG a unui aliaj de aluminiu (5A06 AlMg) cu un oțel inoxidabil austenitic a fost realizată utilizând un material de adaos cu baza de aluminiu și un flux necoroziv (fig.1.10). Rezultatele au indicat formarea de faze intermetalice fragile cu grosime de $5 - 35 \mu m$ [36] cum sunt : $\tau 5$ -Al_{7.2} Fe₂Si, η-Fe₂Al₅ și FeSi₂. Rezistenta la rupere a fost de 140 MPa. Ruperea s-a produs în metalul depus la colțul zonei de îmbinare. Formarea acestor faze poate fi prezisă prin diagramele ternare de fază (fig. 1.11) și dacă s-a ales calea corectă, nucleația acestor tipuri de faze poate fi prevenită.



Fig.1.10 a) Sudarea WIG aliaj de Al-oțel inoxidabil; b) fisuri pe interfață [36][67]

1.10. Îmbinări sudate cu fascicul laser și de electroni

Un oțel cu conținut redus în carbon a fost sudat cu un aliaj de aluminiu (5754) în modul de sudare gaură de cheie cu configurație de suprapunere, folosind tehnica laser [48].

Pentru reducerea formării de faze intermetalice în timpul procesului de sudare, s-a studiat efectul puterii laserului, a duratei pulsului și a factorului de suprapunere. Cu cresterea acestor trei parametrii cantitatea de compuși intermetalici din zona sudată a fost mărită, în timp ce scăderea acestor parametrii principali a condus la apariția de fisuri in sudură (fig.1.13).





Fig.1.13 Imaginea SEM a sudurii cu fisuri si compusi intermetalici [48]

1.11. Obiectivele tezei de doctorat

Îmbinarea materialelor de aceeași natură sau de natură diferită rămâne o problemă de actualitate întrucât ea nu poate fi realizată întotdeauna cu ajutorul tehnicilor obișnuite cum sunt: sudarea manuală cu arcul electric, sudarea MIG, sudarea WIG, etc.Aplicarea sudării MIG/MAG în curent pulsat sau a sudo-brazării cu fascicul laser poate conduce la rezolvarea problemelor de incompatibilitate între aliajele de aluminiu de aceeași natură sau între acestea și oțeluri.

De aceea, în cadrul cercetărilor efectuate, un prim obiectiv îl constituie realizarea unor îmbinări sudate omogene care prin tratament termic ulterior sudării să posede caracteristici de rezistență mecanică cât mai apropiate de cele ale metalului de bază.

Al doilea obiectiv important vizează studierea procesului de sudo-brazare cu fascicul laser a unor aliaje deformabile din seria 6xxx (AlMgSi) cu oțeluri slab aliate galvanizate.

Prin modificarea compoziției chimice a băii de sudură se încearcă limitarea formării de faze intermetalice fragile între fier și aluminiu, iar mediul de lucru al procesului de sudare va evita oxidarea rapidă a aluminiului.

Un ultim obiectiv propus în cadrul lucrării îl constituie sudarea prin frecare cu element activ rotitor a aliajelor deformabile de aluminiu cu oțelurile inoxidabile austenitice.



Cap.2 Cercetări asupra procesului de sudare MIG în curent pulsat a aliajelor deformabile, durificabile prin îmbătrânire

2.2. Materialul examinat și procedura de lucru

Aliajul de aluminiu folosit în experimentări, marca 6082 - T6, (AlSi1MgMn conform EN 573) a fost livrat sub formă de table având grosimea de 5 mm, tratate termic prin călire pentru punere în soluție, 535 ± 5 °C/ 25 min. / apă, urmată de îmbătrânire artificială, 175 ± 10 °C / 8 h / aer.

Compoziția chimică nominală a tablelor de aliaj folosite pentru realizarea unor îmbinări cap la cap pătrunse este: Si = 1.18 %, Fe = 0.39 %, Cu = 0.065 %, Mn = 0.70 %, Mg = 1.32 %, Cr = 0.10 %, Ni = 0.015 %, Zn = 0.044 %, Ti = 0.011 %, Ga = 0.01 %, V = 0.023 %, Al = Rest.

Ca material de adaos a fost selectată sârma electrod AlSi 5 (Alloy 4043) conform ISO 18273 și EN 573 – 3 având diametrul de 1,2 mm, care are următoarele prescripții de compoziție chimică: Si = 4.5 - 6.0 %, Fe ≤ 0.8 %, Cu ≤ 0.30 %, Mn ≤ 0.05 %, Mg ≤ 0.05 %, Zn ≤ 0.10 %, Ti ≤ 0.20 %, Be ≤ 0.0003 %, Al = Rest.

Gazul de protecție a fost Argon 4.8 (puritate \geq 99.998 %), Linde, cu un debit Q = 14 – 15 l/min.Sudarea s-a făcut în poziție orizontală, poziția PA/SR EN ISO 6943, sensul de sudare fiind spre stânga, iar înclinarea sârmei electrod, de 85°. Pregătirea rostului și poziționarea componentelor este prezentată în figura 2.1.



Fig.2.1 Geometria îmbinării sudate cap la cap



Au fost executate îmbinări sudate într-o singură trecere cu următorii parametri tehnologici de sudare:

- viteza de avans a sârmei, 6.2 m/min.;
- curentul mediu de sudare, ≈ 130 A;
- tensiunea arcului electric, 23 V ($\Delta Ua = 0$)
- curentul de puls, 220 A;
- timpul de puls, 2ms;
- curentul de bază, 64 A;
- frecvența pulsurilor, 210 Hz;
- panta de crestere a curentului (slope time), 9;
- coeficienți de autoreglare, $k_a = 36 \%$; $k_i = 0 \%$;
- viteza de sudare, 25 cm/min.



Fig.2.2 Standul experimental de sudare



2.3. Macrografia îmbinărilor sudate

Pentru examinarea structurii de ansamblu, respectiv evidențierea eterogenităților apărute în îmbinările sudate, au fost prelevate și pregătite probe cu fețe transversale (perpendicular pe axa longitudinală a sudurii), în conformitate cu tehnicile standard în vigoare.

Aspectul suprafeței exterioare a sudurii este arătat în fig.2.7, iar imaginea macrografică a unei secțiuni transversale printr-o îmbinare sudată este prezentată în fig. 2.8.



Fig.2.7 Imaginea macroscopică a suprafeței exterioare a cordonului de sudură



Fig.2.8 Macrografia zonelor îmbinării sudate



2.4. Micrografia îmbinărilor sudate

Figurile 2.9...2.11 redau câteva imagini microstructurale ale zonelor caracteristice din îmbinările realizate la parametrii de regim stabiliți prin încercări experimentale. Reactivul chimic folosit are următoarea compoziție chimică: 1 ml HF 40 % + 1,5 ml HCl concentrat + 2,5 ml HNO3 concentrat + 95 % H_2O_2 .



Fig.2.9 x 100 Microstructura cusăturii sudate



Fig.2.10 x100 Microstructura interfeței sudură - metal de bază





Fig.2.11 x100 Microstructura metalului de bază

2.5. Încercări de tracțiune statică

Nr. probă	Proveniență	Rm, N/mm ²	A5, %	Locul ruperii
1	Metal de bază, MB	329	18,5	-
2	MB	327	14,5	-
3	MB	328	16,0	-
4	Îmbinare sudată, ÎS	200	9,6	ZIT
5	ÎS	202	9,8	ZIT
6	ÎS	201	9,8	ZIT
7	ÎS	204	10,2	Sudură
8	ÎS	200	9,6	ZIT

Tab.2.1 Valorile unor caracteristici de tracțiune statică

2.6. Încercări de microduritate

Întrucât duritatea este caracteristica mecanică cea mai sensibilă modificărilor structurale intervenite în cursul procesului de sudare, din îmbinările realizate au fost prelevate probe cu fețe transversale care au fost supuse unor asemenea încercări. Pe baza rezultatelor obținute a fost construit graficul din fig.2.12.



Fig.2.12 Curba gradient de duritate pe secțiunea transversală a îmbinării sudate

2.1. Investigații EDX

Analizele de dispersie în energie a razelor X au vizat determinarea influenței procesului de sudare asupra eventualelor modificări de compoziție chimică intervenite în cusătura sudată.

În figurile 2.13 si 2.14 se exemplifică câteva imagini microstructurale ale cusăturii sudate și ale metalului de bază, obținute la microscopul electronic cu baleiaj precum și spectrele de dispersie în energie a razelor X împreuna cu compoziția chimică locală a celor doua zone specifice îmbinării sudate (sudură+ metal de bază).





versitatea

IOSUD - Universitatea Politehnica Timișoara Școala Doctorală de Studii Inginerești



(d)

Fig. 2.13 Imagini SEM (a), (b), spectrul de dispersie (c) si compozitia chimica locala (d) a cusăturii sudate

2.9. Concluzii

Pentru condițiile experimentale utilizate, rezistența la rupere a îmbinărilor sudate scade cu cca. 39 % iar alungirea la rupere cu cca. 40 % în comparație cu valorile nominale specifice metalului de bază.În zona influențată termic, la o distanță de cca. 2 mm față de axa îmbinării apare o înmuiere pronunțată a materialului (duritatea HV se micșorează cu cca. 45 %), ca urmare a fenomenului de supraîmbătrânire indus de ciclul termic de sudare.

Proprietățile mecanice ale îmbinărilor sudate MIG din aliajul de aluminiu, EN AW 6082, pot fi refăcute prin tratamentul termic ulterior sudării de călire pentru punere în soluție urmată de îmbătrânire artificială.

Jniversitatea

Politehnica



Cap.3 Cercetări asupra procesului de sudo-brazare laser a aliajelor de aluminiu cu oțeluri slab aliate galvanizate

3.2 Metodica de cercetare.Rezultate experimentale

Oțelul DX51D + Z100MA laminat la cald și galvanizat termic, este unul dintre materialele de bază folosite pentru a realiza sudo-brazarea. Grosimea stratului de protecție din zinc este de 7 μ m. Tabla din aliaj de aluminiu este din seria 6082 - T6. Compozițiile chimice ale acestor materiale de baza sunt rezumate în tab.3.2.

Material	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Ti [%]	Fe [%]	Mg [%]	Cr [%]	Cu [%]	A1 [%]
DX51D+	0,12	0,34	1,01	0,09	0,028	0,21	Rest	-	-	-	-
Z100MA											
6082–T6	-	1,18	0,71	-	-	0,01	0,39	0,82	0,10	0,06	Rest

Tab. 3.2 Compoziția chimică a celor două metale de bază

Ca material de adaos a fost selectată sârma AlSi12 conform DIN 1732, respectiv ER4047 conform AWS A5.10, având diametrul ϕ 1 mm. Compoziția chimică și temperatura de topire a acestei sârme este prezentată în tab.3.3.

Tab.	3.3	Prescripții d	e compoziție	chimică și	temperatura	de topire a	materialului de adaos
------	-----	---------------	--------------	------------	-------------	-------------	-----------------------

Material	Si [%]	Fe[%]	Cu[%]	Mn[%]	M[%]	Zn[%]	Ti[%]	Temperatura de topire, °C
AlSi 12	11-13	<0,60	<0,30	<0,15	<0,10	<0,20	<0,15	573 - 585

Gazul de protecție folosit a fost 100% argon, la un debit de 10 1/min.



Fig. 3.6 Geometria probelor pentru sudo-brazate cu laser





Fig. 3.8 Dispozitiv de poziționare și fixare a probelor pentru sudo-brazare



Fig.3.13 Aspectul exterior al sudurii

IOSUD - Universitatea Politehnica Timișoara Școala Doctorală de Studii Inginerești



Aliaj aluminiu / oțel galvanizat	Puterea, [W]	Viteza de sudo- brazare, [mm/min.]	Unghiul de rotație a piesei [grade]	Viteza de avans AlSi12, [mm/min.]
Set probe 1	1600	2600	363	2700
Set probe 2	1700	2400	363	2900
Set probe 3	1600	2600	363	2600
Set probe 4 suprafață -				
verso	1700+1200	2400+3000	363	2900+1200
Set probe 5 suprafață -				
verso	1600+1300	2600+3000	363	2600+3000

Tab.3.4 Parametrii regimului de sudo-brazare



(c)

Fig.3.14 Aspectul îmbinării sudo-brazate



Fig.3.15 Imaginea macrografică a unei secțiuni transversale prin îmbinarea sudo-brazată



Se remarcă efectul benefic al acoperirii cu zinc a tablei din oțel asupra condițiilor de umectare asigurând o bună legătură între sudură și suprafața tablei galvanizate. Prezența stratului de zinc (element cu temperatura de topire de 419 °C) pe suprafața oțelului favorizează dizolvarea aluminei (Al₂O₃) superficiale și astfel topirea aliajului de aluminiu devine posibilă făra utilizarea unui flux decapant.





(a)

Fig.3.16 Imaginea microscopică a îmbinării sudo-brazate: (a) zona de legătură dintre sudură și suprafața tablei galvanizate; (b) interfața sudura–oțel galvanizat



3.3. Investigații EDX

Prin topirea unei anumite proporții din metalul de bază, aliaj de Al și amestecarea sa cu materialul de adaos, se produce o modificare a compoziției chimice a zonei topite. In fig.3.17...3.19 sunt redate imaginile de dispersie în energie a razelor X și rezultatele analizelor chimice în zonele îmbinării sudo-brazate.



(a)

	Series	unn. C [wt.%]	nor. C [wt.%]	Atom C [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
Manganese	K series	1.66	1.56	1.59	0.07
Iron	K series	104.40	98.27	98.09	2.66
Silicon	K series	0.17	0.16	0.32	0.04
	Total	106.24	100.00	100.00	

ſ	h)
ſ	U)







	Series	unn. C [wt.%]	nor. C [wt.%]	Atom C [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
Silicon	K series	1.29	1.21	1.16	0.09
Aluminium	K series	103.10	96.89	97.04	5.19
Manganese	K series	0.56	0.52	0.26	0.04
Magnesium	K series	1.47	1.38	1.54	0.11
	Total	106.42	100.00	100.00	

(a)

(b)

Fig. 3.18 Spectrul EDX (a) si compoziția chimică a componentei din aliaj de Al (b)









Fig. 3.19 Imaginea macrografică (a) și variația liniară a principalelor elemente chimice pe interfața dintre cordonul de sudo-brazare și oțelul galvanizat



3.4. Concluzii

Dificultățile întâmpinate la îmbinarea prin sudare a materialelor disimilare, cum sunt aliajele de aluminiu și oțelurile, se datorează diferențelor de proprietăți fizice ale acestora (temperaturi de topire, conductivități termice, coeficienti de dilatație).Obținerea îmbinării sudo-brazate are loc prin topirea materialului de baza din aliajul de aluminiu, 6082 T6 și amestecarea cu materialul de adaos, AlSi12, iar în momentul solidificării ia naștere cusătura sudată între cele doua aliaje; totodată, în urma umectării prin capilaritate a componentei din oțel de catre lichid se formează o legatură brazată, astfel că în final se obține un cordon de sudo-brazare.

Pentru evitarea topirii componentei din oțel se impune ca fasciculul laser să fie poziționat pe componenta din aliaj de aluminiu la o distanță de 0.2 mm față de axa rostului de sudare. Aplicarea sudo-brazării cu fascicul laser, caracterizată de o energie liniara înaltă și de o răcire cu viteză mare, limitează grosimea stratului de compuși intermetalici fragili la 10 - 12 µm care pot induce fisuri in sudura si o reducere a caracteristicilor de rezistență mecanică.

Cap.4 Cercetări experimentale asupra procesului de sudare prin frecare cu element activ rotitor



4.6. Programul experimental





(b)

Fig. 4.8 Mașină de sudare prin frecare cu element activ rotitor : a – imagine de ansamblu; b - detaliu sistem de îmbinare

Tab. 4.1 Parametrii regimului de sudare

Nr. crt.	Cuplu	Grosime materiale, s [mm]		Viteză de sudare	Turație sculă	Material sculă de	
	materiale	sus	jos	v [mm/min]	n [rot/min]	sudare	
1	Al 6082 – AISI 304	5	5	26 mm/min.	400	WC	

4.7.1. Examinări metalografice

Micrografiile optice sunt prezentate în fig. 4.10...4.13.Metalul de bază din aliaj de Al conține grăunți alungiți în direcția de deformare și particule fine de compuși intermetalici (fig.4.10).





Fig.4.10 Micrografia SEM a aliajului de aluminiu







(b)

Fig.4.11 Imaginea structurală a unei secțiuni prin îmbinarea sudată : a – microscopie optică; b- microscopie SEM



Fig.12 Microstructura SEM a nucleului de sudură





Fig.4.13 Imaginea SEM a ZITM din aliajul de aluminiu

Între ZITM și metalul de bază din aliaj de aluminiu neafectat de pe partea de retragere apare o zonă influențată termic, ZIT, caracterizată de temperaturi din ce în ce mai mici în care se manifestă ușoare fenomene de supraîmbătrânire.

Metalul de bază din oțel inoxidabil prezintă o microstructură constituită din graunți de austenită cu o mică proporție de ferită δ și de carburi complexe Cr₂₃C₆ (fig.4.14). Microstructura ZIT a oțelului inoxidabil din partea de avans este aproape similară cu cea a cea a metalului de bază, neafectat termomecanic (fig.4.15). În zona influențată termomecanic a oțelului inoxidabil se observă prezența unei anumite proporții de fază σ (fig.4.16, 4.17).



Fig. 4.14 Microstructura metalului de bază din oțel inoxidabil





Fig. 4.15 Microstructura ZIT a oțelului inoxidabil



(a)





(b)

Fig.4.16 Microstructura oțelului inoxidabil în zona influențată termomecanic: a –x 500; b – x 1000







(b)

Fig. 4.17 Microstructura oțelului inoxidabil în zona interfeței cu nucleul de sudură: a - x200; b - x1000

4.8. Concluzii

Tehnica FSW este oportună pentru îmbinarea aliajelor deformabile de aluminiu cu oțeluri inoxidabile austenitice având un conținut scăzut în carbon.Microstructura îmbinărilor FSW dintre cele două materiale disimilare conține mai multe zone caracteristice determinate de nivelul temperaturii dezvoltate, de gradul de deformare atins și de timpul scurs între temperatura de vârf și pragul termic de recristalizare.

Cap.5 Concluzii finale și contribuții originale.Direcții viitoare de cercetare

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

- 1. Stabilirea prin experiment a **parametrilor optimi ai procesului** de sudare MIG în curent pulsat, care să asigure formarea unor îmbinări fără defecte de continuitate de tipul fisurilor, retasurilor de contracție, incluziunilor de zgură și porozităților.
- 2. Reliefarea **particularităților procesului** de cristalizare primara și secundară a băii de metal topit.



- **3. Modificările structurale** intervenite în sudură și în ZIT (graunți mari, amestecuri mecanice eutectice ușor fuzibile fenomenul de supraîmbătrânire) se manifestă printr-o reducere a caracteristicilor mecanice ale îmbinărilor sudate.
- 4. Investigațiile micrografice coroborate cu analizele EDX și cu cele de difracție a razelor X fundamentează știintific efectul benefic al tratamentului termic ulterior sudării asupra refacerii microstructurii și a îmbunătățirii proprietăților mecanice ale îmbinării sudate.
- 5. Îmbinarea prin sudare a aliajelor de aluminiu cu oțelurile galvanizate întampină o serie de dificultăți care se datorează diferențelor de proprietăți fizice ale acestora (temperaturi de topire, conductivități termice, coeficienți de dilatație). Aplicarea sudo-brazării cu fascicul laser, caracterizată de o energie liniară înaltă și de o răcire cu viteză mare, permite ocolirea acestor dificultăți autorizând o îmbinare a celor două materiale fără a trece oțelul în stare lichidă.
- 6. Parametrii optimi ai procesului de sudo-brazare a aliajului de aluminiu Al 6082 T6 cu un oțel C-Mn galvanizat utilizând ca material de adaos o sârmă din aliaj de aluminiu, AlSi12, asigură o bună continuitate a cordonului de sudură, o bună umectare a tablei din oțel galvanizat și o pătrundere a sudurii pe întreaga secțiune a tablei galvanizate fără scurgeri de material la rădăcină.
- 7. Examinarea la microscopul optic și electronic cu baleiaj a secțiunilor transversale prin îmbinările sudo-brazate laser a pus în evidență o fuziune corespunzatoare între materialul de adaos și materialul de bază din aliajul de aluminiu, obținerea unei grosimi suficiente a cordonului de sudo-brazare, o limitare la $10 - 12 \mu m$ a grosimii stratului de compuși intermetalici fragili, Fe_xAl_y, și lipsa defectelor de continuitate care pot constitui amorse de rupere.
- 8. Observațiile microscopice asupra zonei de reacție dintre atomii de Fe si de Al, au arătat efectul benefic al acoperirii cu zinc a tablei din oțel asupra condițiilor de umectare, asigurând o bună legătură între sudură și suprafața tablei galvanizate. Prezența stratului de zinc favorizează topirea aliajului de aluminiu și acționează ca o barieră chimică întârziind reacția dintre aluminiu și oțel și limitând fluxul de căldură transmis oțelului și implicit temperatura zonei pe care se depune aluminiu lichid. Utilizarea ca material de adaos a aliajului AlSi12 cu o compoziție chimică apropiată de cea eutectica favorizează topirea eutecticului și implicit o reducere a aportului de energie.
- **9.** Spectrele de **dispersie în energie a razelor X**, alături de rezultatele analizelor chimice cantitative în microvolume de material, au demonstrat că pe secțiunea transversală a îmbinărilor sudate apar variații în limite restrânse ale concentrațiilor în elemente de aliere determinate esențial de particularitățile procesului de sudo-brazare cu fascicul laser.
- **10.** Tehnica de sudare prin frecare cu element activ rotitor, FSW, poate fi aplicată cu succes pentru îmbinarea aliajelor deformabile de aluminiu cu oțeluri inoxidabile austenitice.
- 11. Microstructura îmbinării sudate este divizată în mai multe subzone caracteristice, duritatea nucleului de sudură prezintă valori variabile datorate prezenței particulelor fine sau grosiere de oțel inoxidabil dispersate în acesta. Valoarea durității în partea de retragere scade brusc către nucleul de sudură, de la nivelul zonei afectate termomecanic din oțelul inoxidabil la partea de avans a sudurii. În schimb, în partea de avans



(partea din aliaj Al 6082-T6), valoarea durității scade ușor în zona influențată termomecanic.

Bibliografie

[2] A. Mathieua, S. Pontevicci['], J. Vialab, E. Cicala, S. Matti, D. Grevey, Laser brazing of a steel/aluminum assembly with hot filler wire (88% Al, 12% Si),*Materials Science and Engineering A* 435-436 (2006) 19-28.

[11] F. Haidara, M.-C. Record, B. Duployer, D. Mangelinck, Phase formation in Al-Fe thinfilmsystems, *Intermetallics* 23 (2012) 143-147.

[30] I. Mitelea, E. Lugscheider, W. Tillmann: Stiinta materialelor in constructia de masini. Editura Sudura, 1999

[32] ISO 209-1:2007, *Aluminium and Aluminium Alloys-Chemical Composition*, January 01, 2007, International Organization for standardization.

[36] J. L. Song, S. B. Lin, C. L. Yang, G. C. Ma, H. Liu, Spreading behavior and microstructurecharacteristics of dissimilar metals TIG welding-brazing of aluminum alloy to stainless steel, *Materials Science and Engineering A* 509 (2009) 31-40.

[37] Kluken, A. O., Bjoerneklett, B.: A study of mechanical properties for aluminium GMA weldments, Welding Journal, 76(2), (1997), pp. 39 – 44.

[41] L. Agudo, D. Eyidi, C. H. Schmaranzer, E. Arenholz, N. Jank, J. Bruckner, A. R. Pyzalla, Intermetallic FexAly-phases in a steel/Al-alloy fusion weld, *Journal of Materials Science* 42(2007) 4205-4214.

[47] M. Dehghani, A. Amadeh, S.A.A. Akbari Mousavi, Investigations on the effects of friction stir welding parameters on intermetallic and defect formation in joining aluminum alloy to mild steel, *Materials and Design* 49 (2013) 433-441.

[48] M. J. Torkamany, S. Tahamtan, J. Sabbaghzadeh, Dissimilar welding of carbon steel to 5754 aluminum alloy by Nd: YAG pulsed laser, *Materials and Design* 31 (2010) 458-465.

[67] S.B. Lin, J.L. Song, C.L. Yang, C.L. Fan, D.W. Zhang, Brazability of dissimilar metals tungsten inert gas butt welding-brazing between aluminum alloy and stainless steel with Al-Cu filler metal, *Materials and Design* 31 (2010) 2637-2642.

[78] V. T. Witusiewicz, A. A. Bondar, U. Hecht, and T. Y. Velikanova, Phase equilibria in binary and ternary systems with chemical and magnetic ordering, *Journal of Phase Equilibria and Diffusion* (2011) 32:329-349.

[83] Warmebehandlung von Aluminiumlegierungen ISBN 978-3-937171-19-7| GDA-07-09 | 1.000 | 09-2007 – pag.03-21 – (Bild 1..7; Tabelle2,3a).