

Universitatea POLITEHNICA din București Școala Doctorală de Inginerie Industrială și Robotică

Universitatea din Pitești

Școala Doctorală Interdisciplinară

Ing. BOŞNEAG F. Ana (GOGORICI)

TEZĂ DE DOCTORAT *Rezumat*

Contribuții la studiul și dezvoltarea procesului și sistemului de sudare prin frecare cu element activ rotitor a unor structuri din aliaje de aluminiu diferite

Conducători științifici, Prof. univ. dr. ing. Marian GHEORGHE Prof. univ. dr. ing. Eduard Laurențiu NIȚU

Cuprins

	R	Т
Cuvinte-cheie	2	-
Cuvânt înainte	3	5
Introducere	4	6
Legendă	-	7
Partea I. Stadiul actual al cercetării – dezvoltării și aplicațiilor industriale ale sudării prin frecare		
cu element activ rotitor		
Capitolul 1. Procedee de sudare prin frecare cu element activ rotitor	5	9
1.1. Introducere privind procedeul de sudare prin frecare cu element activ rotitor	5	9
1.2. Avantaje și limitări ale procedeului de sudare prin frecare cu element activ rotitor	-	10
1.3. Principiul de lucru și parametrii de proces ai procedeului de sudare FSW	5	11
1.4. Tipuri de procedee de sudare FSW	6	13
1.5. Categorii de materiale sudate prin procedeul FSW	6	14
1.6. Elemente active de sudare FSW	7	18
1.7. Utilaje pentru sudarea FSW	7	20
1.8. Aplicații industriale ale FSW	8	21
Capitolul 2. Caracteristici ale îmbinărilor sudate prin frecare cu element activ rotitor	9	25
2.1. Categorii de caracteristici ale îmbinărilor sudate și procedee de evaluare	9	25
2.2. Macrostructura si microstructura îmbinărilor sudate	9	25
2.3. Defecte ale îmbinărilor sudate si legătura dintre aparitia acestora si parametrii procesului	10	33
2.4. Proprietăti mecanice ale îmbinărilor sudate	11	35
Capitolul 3. Cercetări privind modelarea și simularea numerică a procedeului de sudare prin		
frecare cu element activ rotitor	12	39
3.1. Etapele generale ale modelării și simulării numerice	12	39
3.2. Definirea geometriei piesei și a elementului activ rotitor	-	42
3.3. Definirea comportamentului materialelor (ecuației constitutive)	-	42
3.4. Modelarea transferului termic	-	43
3.5. Definirea contactului dintre suprafețe	-	44
3.6. Stabilirea condițiilor la limită	-	45
3.7. Discretizarea modelului numeric	-	46
3.8. Metode de validare a modelelor numerice ale procedeului FSW	14	48
3.9. Rezultate ale simulării procedeului FSW a unor structuri din materiale diferite	15	52
<i>Capitolul 4</i> . Concluzii privind stadiul actual al cercetării – dezvoltării si aplicatiilor industriale	10	-
ale sudării prin frecare cu element activ rotitor	16	55
Partea a II - a. Contributii la cercetarea teoretico – experimentală și modelarea numerică a procesului și		
sistemului de sudare prin frecare cu element activ rotitor a unor structuri din aliaje de aluminiu diferite		
Capitolul 5 Directive objective principal si metodologia de cercetare – dezvoltare privind procesul si		
sistemul de sudare prin frecare cu element activ rotitor a unor structuri din aliaie de aluminiu diferite	21	59
5.1. Directii de cercetare – dezvoltare	21	59
5.2. Objectivul principal al activității de cercetare – dezvoltare	21	59
5.3. Metodologia de cercetare – dezvoltare	-	59
<i>Capitolul 6.</i> Elemente ale sistemului de cercetare experimentală pentru sudarea prin frecare cu		
element activ rotitor a unor structuri din aliaje de aluminiu diferite	23	67
6.1. Caracteristici ale materialelor plăcilor componente ale structurii de sudat	-	67
6.2. Standul experimental și caracteristicile de proces măsurate în timp real	23	68
6.3. Elementul activ rotitor de sudare	24	71

UPIT	*Rezumat*	structuri din aliaje de aluminiu diferite	GOGOR	ICI)	
6.4. Defini	rea și realizare	a pieselor de sudat	2	4	71
6.5. Defini	rea și prelevar	ea epruvetelor pentru caracterizarea structurilor sudate	2	4	73
6.6. Codifi	carea experien	țelor și a epruvetelor			75
6.7. Pregăt	irea epruvetelo)r	2	5	76
6.8. Măsur	area rugozități	i cordonului de sudură	2	6	78
6.9. Analiz	a macroscopic	ă și microscopică	2	6	79
6.10. Măsu	irarea microdu	rității	2	6	79
6.11. Încer	rcările la tracț	iune	2	6	81
Capitolul 7	Rezultate ale c	ercetării teoretico – experimentale preliminare privind procesul și sistemu	l de		
sudare prin	frecare cu elem	ent activ rotitor a unor structuri din aliaje de aluminiu diferite	2	7	83
7.1. Tempe	eratura de proc	es	2	7	83
7.2. Forța a	axială de proce	S	2	8	86
7.3. Rugoz	itatea cordonu	lui de sudură	2	9	91
7.4. Macro	structura struc	turii sudate	3	0	93
7.5. Micros	structura cordo	onului de sudură	3	2	104
7.6. Micro	duritatea cordo	onului de sudură	3	3	109
Capitolul 8	. Rezultate ale c	ercetării teoretico – experimentale avansate privind procesul și sistemul de	•		
sudare prin	frecare cu elem	ent activ rotitor a unor structuri din aliaje de aluminiu diferite	3	5	119
8.1. Progra	imul experiment	ntal avansat	3	5	119
8.2. Tempe	eratura de proc	es și forța axială de proces	3	5	119
8.3. Rugoz	itatea cordonu	lui de sudură	3	7	123
8.4. Macro	structura îmbii	nărilor sudate	3	7	124
8.5. Micros	structura cordo	onului de sudură	3	8	129
8.6. Micro	duritatea cordo	onului de sudură	3	9	130
8.7. Încerc	area la tracțiun	e a structurii sudate	4	0	134
8.8. Studiu	de caz privinc	l analiza structurilor sudate prin încercare la tracțiune și corelare digit	ală		
a imaginil	or		4	3	142
Capitolul 9	9. Modelarea n	umerică a procesului de sudare prin frecare cu element activ rotitor a	1	1	147
unor struct	uri din aliaje d	e aluminiu diferite	4	4	147
9.1. Consti	uirea modelulu	ui numeric	4	4	147
9.2. Valida	rea modelului	numeric	4	5	151
Capitolul 1	0. Concluzii fin	ale și contribuții principale la dezvoltarea și modelarea numerică a procesu	ılui		
și sistemulu	ii de sudare cu e	element activ rotitor a unor structuri din aliaje de aluminiu diferite	4	7	157

Contribuții la studiul și dezvoltarea procesului și sistemului

de sudare prin frecare cu element activ rotitor a unor

BOŞNEAG F. Ana

51

161

Teză de

doctorat

UPB,

Cuvinte - cheie

Bibliografie selectivă

sudare prin frecare cu element activ rotitor, aliaj de aluminiu, temperatura de proces, forța axială de proces, rugozitate, macrostructură, microstructură, microduritate, rezistență la tracțiune, corelare digitală a imaginilor, modelare numerică.

Cuvânt înainte

Studiul și dezvoltarea procesului și sistemului de sudare prin frecare cu element activ rotitor, FSW, a unor structuri din aliaje de aluminiu diferite, AA2024, AA6061 și AA7075, utilizate în industria aeronautică, în vederea determinării condițiilor care să conducă la realizarea unor proprietăți superioare ale acestora, reprezintă *motivația* și *direcția* studiilor de doctorat, finalizate prin prezenta teză de doctorat.

Programul de doctorat a constat în pregătirea, prezentarea și susținerea examenelor și a rapoartelor științifice, aprofundarea studiului, propunerea și dezvoltarea unei metodologii de cercetare, efectuarea de cercetări teoretico – experimentale pentru determinarea și analiza relațiilor de dependență dintre parametri tehnologici și caracteristicile structurilor sudate FSW, dezvoltarea unui model numeric specific, realizarea și publicarea de lucrări științifice, precum și elaborarea prezentei teze de doctorat privind contribuțiile la studiul și dezvoltarea procesului și sistemului de sudare prin frecare cu element activ rotitor a unor structuri din aliaje de aluminiu diferite.

Adresez profunde mulțumiri domnului Prof.univ.dr.ing. Marian GHEORGHE și domnului Prof.univ.dr.ing. Eduard Laurențiu NIȚU, pentru îndrumarea științifică și coordonarea întregii activități de parcurgere a programului de doctorat, sprijinul, deplina încredere și disponibilitatea totală acordate în această perioadă.

Adresez sincere mulțumiri domnului ing. Radu COJOCARU și domnului ing. Cristi CIUCĂ din cadrul "Institutului Național de Cercetare - Dezvoltare în Sudură și Încercări de Materiale" - ISIM Timișoara, pentru sprijinul acordat la realizarea îmbinărilor sudate.

Exprim mulțumiri domnului Conf.univ.dr.ing. Claudiu BĂDULESCU din cadrul ENSTA Bretagne, sub a cărui îndrumare domnii ing. Ovidiu CRĂCĂNEL, Conf.univ.dr.ing. Jan GRIGORE și dr.fiz. Denis NEGREA au contribuit la determinarea unor proprietăți mecanice ale îmbinării.

Adresez sincere mulțumiri doamnei Conf.univ.dr.ing. Daniela Monica IORDACHE pentru sprijinul și disponibilitatea acordate în această perioadă în vederea realizării și validării modelului numeric.

Exprim sincere mulțumiri domnilor Prof.univ.dr.ing. Tom SAVU și Prof.univ.dr.ing. Nicolae IONESCU - de la Universitatea POLITEHNICA din București, Conf.univ.dr.ing. Alin Daniel RIZEA - de la Universitatea din Pitești, Dr.ing. CSP 1 Diana Mura BADEA - de la Institutul Național de Cercetare - Dezvoltare pentru Mecatronică și Tehnica Măsurării - București, pentru comentariile și recomandările adresate în cadrul Comisiei de evaluare și susținere publică a tezei de doctorat.

Sunt recunoscătoare familiei mele, actualilor colegi din cadrul companiei în care îmi desfășor activitatea și colegului meu de doctorat ing. Adrian Marius CONSTANTIN, pentru suportul moral și înțelegerea manifestată pe toată perioada studiilor de doctorat.

Activitățile în cadrul studiilor doctorale s-au desfășurat la Universitatea POLITEHNICA din București și Universitatea din Pitești, conform Contractului de colaborare doctorală încheiat între cele două instituții. De asemenea, o parte dintre activitățile privind elaborarea prezentei teze de doctorat au beneficiat de sprijinul Programului Operațional Sectorial pentru Dezvoltarea Resurselor Umane (POSDRU), finanțat de către Fondul Social European și Guvernul României, prin contractul nr. POSDRU/187/1.5/ S/155536.

Boșneag F. Ana (Gogorící)

Introducere

În contextul actual al tendinței de înlocuire sau îmbunătățire a procedeelor clasice, minimizare a costurilor și utilizare a materialelor cu proprietăți superioare, un rol important îl constituie extinderea cercetărilor către zona de îmbinare a materialelor diferite prin utilizarea procedeului de sudare prin frecare cu element activ rotitor (FSW).

Activitatea de cercetare – dezvoltare din cadrul programului de doctorat se concentrează pe aprofundarea cunoașterii și aplicarea procedeului de sudare prin frecare cu element activ rotitor la îmbinarea a trei aliaje diferite de aluminiu.

* * *

În prima parte a tezei de doctorat, pe baza analizei stadiului actual al cercetării – dezvoltării, se prezintă date relevante privind procesele și sistemele de sudare prin frecare cu element activ rotitor - generalități, avantaje, limitări, principiul de lucru, parametri de proces, tipuri de procedee, categorii de materiale sudate, elemente active de sudare, utilaje de sudare, aplicații industriale, categorii de caracteristici ale structurilor sudate și procedee de evaluare, macrostructura, microstructura și defecte, microduritatea, rezistența și ductilitatea îmbinărilor sudate, modelarea numerică și simularea procedeului FSW, concluzii.

În partea a doua a tezei de doctorat, pe baza datelor și concluziilor desprinse din analiza stadiului actual, se avansează direcții de cercetare – dezvoltare privind procesele și sistemele de sudare prin frecare cu element activ rotitor a structurilor din materiale diferite și se determină ca obiectiv principal de cercetare – dezvoltare în cadrul doctoratului: dezvoltarea procesului și sistemului de sudare prin frecare cu element activ rotitor a unor structuri din aliaje de aluminiu diferite, prin cercetare teoretico – experimentală și modelare numerică.

În continuare, metodologia de cercetare – dezvoltare este concepută ca sistem de referință pentru acțiunile de realizare a obiectivului principal al activității de doctorat și a unor dezvoltări viitoare. Se efectuează cercetări teoretico – experimentale preliminare și avansate, complexe și de volum ridicat. Acestea au condus la realizarea a patru tipuri diferite de structură sudată în condiții tehnologice de sudare diverse, cu măsurarea temperaturii și a forței axiale de proces, prelevarea de epruvete, analiza unor caracteristici ale structurii sudate și zonelor învecinate – rugozitate, macrostructură, microstructură, microduritate, rezistență la tracțiune și alungire relativă la rupere, reprezentarea relațiilor de dependență specifice și evidențierea unor corelații reprezentative. De asemenea, s-a realizat un model numeric valid pentru simularea îmbinării FSW a trei aliaje de aluminiu diferite.

În ultima parte a tezei de doctorat, se prezintă concluziile generale și contribuțiile principale aduse de teza de doctorat la realizarea obiectivului principal al activității doctorale de cercetare – dezvoltare, importanța științifică a tezei de doctorat, importanța practică a tezei de doctorat, precum și perspective ale dezvoltării proceselor FSW privind determinarea condițiilor optime de sudare și a caracteristicilor structurii sudate pentru diverse materiale, geometrii, volume de producție etc.

Partea I.

Stadiul actual al cercetării – dezvoltării și aplicațiilor industriale ale sudării prin frecare cu element activ rotitor

Capitolul 1. Procedee de sudare prin frecare cu element activ rotitor

1.1. Introducere privind procedeul de sudare prin frecare cu element activ rotitor

Sudarea prin frecare cu element activ rotitor, FSW, este un procedeu de sudare în stare solidă, inventat de către Thomas și colaboratorii săi, în anul 1991 la Institutul de Sudură, The Welding Institute "TWI", din Cambridge, Marea Britanie (FSW: Friction Stir Welding) [T06]. Înainte de a fi făcut popular de către TWI, principiul procedeului de sudare în stare solidă a fost atestat prima dată în anul 1956 în Uniunea Sovietică. Această tehnologie a fost utilizată inițial pentru sudarea aliajelor de aluminiu din clasele clasificate drept aliaje nesudabile prin utilizarea tehnicilor clasice de sudare [M12]. Acest procedeu este considerat una dintre cele mai semnificative realizări în domeniul sudării din ultima perioadă [K06].

1.3. Principiul de lucru și parametrii de proces ai procedeului de sudare FSW

În zona îmbinării sudate, materialele pot prezenta fie stare plastică, fie stare topită, astfel încât să existe o continuitate în structura materialului pieselor îmbinate. Procedeul de sudare în stare solidă este considerat a fi cel mai vechi procedeu de sudare, încă de la descoperirea fierului, prin sudarea la focul de forjă și baterea cu ciocanul a barelor de fier încălzite la roșu. Printre procedeele de sudare prin presiune în stare solidă și fără topirea materialului de bază se numără și sudarea prin frecare cu element activ rotitor (Friction Stir Welding – FSW), ca o variantă de sudare fără topirea materialului de bază dezvoltată din punct de vedere dinamic [M04].

Procedeele de sudare standard nu sunt potrivite pentru a suda materiale diferite [K06].

Principiul de lucru al FSW poate fi definit astfel: un element activ cilindric, cu o miscare de rotație și una de translatie pătrunde în material, în zona rostului de sudură, se deplasează de-a lungul acestuia și iese din material la capătul cordonului de sudură (Fig. 1.3.1). Atunci când umărul elementului activ atinge suprafata materialelor de sudat o cantitate importantă de căldură generată de frecare este degajată în zona de contact. Creșterea temperaturii plasticizează materialul, care rămâne totuși în stare solidă, la aproximativ 70 - 90 % din temperatura de topire. Efectul combinat al generate temperaturii și al presiunii exercitate de către elementul activ permite materialului să fie amestecat mecanic [K09].





Calitatea cordonului de sudură realizat depinde, în primul rând, de parametrii de proces reglați pentru realizarea procesului. Parametrii de proces corespunzători FSW sunt: turația elementului activ de lucru [rpm], care influențează direct proporțional creșterea temperaturii în zona cordonului de sudură, viteza de avans [mm/min] și unghiul de înclinare al elementului activ [M09]. Unghiul de înclinare al elementului activ are rolul de a împinge materialul care urmează să fie prelucrat sub umărul acestuia, pentru a conduce la efectul de forjare treptată, realizată în material, în timpul procesului. În același timp, înclinarea elementului activ previne curgerea materialului spre lateral, respectiv, asigură închiderea sudurii pe partea din spate a pinului [B02].

Turația elementului activ este unul din cei mai importanți parametri de intrare ai procesului, deoarece aceasta generează și controlează gradul de amestecare și omogenizare a materialelor de sudat, prin deplasarea materialului din fața pinului în spatele acestuia. O valoare mare a turației generează o creștere a temperaturii datorită forței de frecare mai mare și amestecării materialelor de bază [C03].

O altă caracteristică importantă a procedeului FSW este adâncimea de pătrundere a pinului elementului activ în materialele de sudat, care se consideră direct responsabilă de realizarea calității sudurii. Dacă adâncimea de pătrundere este mai mică decât cea optimă, umărul elementului activ nu intră în contact cu suprafața materialelor de prelucrat sau, dacă valoarea este mai mare decât cea optimă, se creează o urmă foarte proeminentă a umărului elementului activ de-a lungul cordonului de sudură [C03]. La determinarea adâncimii de pătrundere, se are în vedere ca lungimea pinului să fie mai mică decât grosimea pieselor de îmbinat, iar diametrul acestuia să fie puțin mai mare decât grosimea plăcilor de bază [P05].

1.4. Tipuri de procedee de sudare FSW

UPB.

UPIT

Exemple de tehnologii care utilizează frecarea cu element activ rotitor pot fi considerate următoarele:

- sudarea prin frecare cu element activ rotitor, sudarea în puncte prin frecare cu element activ rotitor sau sudarea hibrid prin frecare cu element activ rotitor (Fig. 1.4.1);
- prelucrarea prin frecare cu element activ rotitor
- realizarea de canale prin frecare cu element activ rotitor;
- ștanțarea și deformarea prin frecare cu element activ rotitor;
- realizarea de forme neconvenționale prin utilizarea procedeului de frecare cu element activ rotitor;

• microformarea prin frecare cu element activ rotitor [A08].



Fig. 1.4.1. FSW hibrid [S12]

O ramură importantă a procedeului de sudare prin frecare cu element activ rotitor este reprezentată de procedeul hibrid de sudare prin frecare cu element activ rotitor (HFSW), dezvoltat pentru îmbinarea materialelor cu punct de topire ridicat [C01]. Acest procedeu este o combinație între FSW și un alt procedeu de sudare tradițională, cu FSW ca proces dominant, iar cu al doilea proces – secundar, cu scopul de a preîncălzi piesele [C01]. Până acum, FSW a fost combinat cu: YAG laser, TIG arc [C13, C14, C15] și plasma arc, însă cea mai comună pereche hibrid este: FSW combinat cu laser, numit generic procedeu de sudare prin frecare cu element activ rotitor asistat laser (LAFSW) (Fig. 1.4.1) [B08].

1.5. Categorii de materiale sudate prin procedeul FSW

Procedeele de sudare prin frecare cu element activ rotitor, FSW, au fost dezvoltate inițial pentru a suda plăci din aliaje de aluminiu, materiale mai puțin dure și ușor maleabile [B05]. Cu timpul, datorită eficienței procedeului, studiile s-au extins către îmbinarea de materiale ca: materialele polimerice [K10], materiale metalice – alamă, cupru [C12, C13, C14], magneziu, titan, oțel [L02] și materiale compozite cu matrice metalică din aluminiu, cupru și titan, iar armătura ceramică din particule ca Al₂O₃ (aluminium oxide), SiC (silicon carbide), Si₃N₄ (silicon nitride) și B₄C (boron carbide) [B09, M06]. Materialele polimerice sudate cu acest procedeu sunt materialele de polipropilenă [K10] și materiale compozite cu matrice polimerică de polipropilenă armată cu 30 % fibră de sticlă [C18].

Prin utilizarea procedeului FSW, se pot suda materiale similare, de aceeași natură sau diferite, plăci din materiale diferite, cu proprietăți diferite. În cazul unor metale diferite, sudarea prin topire convențională este dificil de realizat din cauza diferențelor mari ale proprietăților fizice, cum ar fi conductivitatea termică, punctul de topire, expansiunea termică, care generează distorsiuni mari, apariția tensiunilor reziduale și nereguli în caracteristicile metalurgice ale cordonului de sudură, cu zone de îmbinare casante [B03, M07]. Procedeul de sudare prin frecare cu element activ rotitor (FSW) se dovedește a fi alternativa optimă, deoarece elimină atingerea punctelor de topire ale celor două materiale diferite. Această funcție suplimentară a FSW reprezintă un avantaj net superior față de alte procedee de îmbinare.

1.6. Elemente active de sudare FSW

Elementul activ de sudare utilizat la realizarea îmbinărilor prin FSW joacă trei roluri principale:

- de a încălzi piesele de prelucrat;
- de a agita, amesteca și deplasa materialul plastifiat în urma încălzirii;
- de a controla și restricționa deplasarea materialului în zona umărului acestuia [A08].

La elementul activ de sudare FSW se disting două părți importante: umărul, care intră în contact cu materialul de sudat, și pinul, care pătrunde în materialul de sudat.

Umărul elementului activ are rolul de a produce căldură la suprafața zonelor de sudat și în imediata apropiere a acestora, prin frecarea cu materialele de sudat. Astfel, diametrul umărului este una din caracteristicile de bază la definirea geometriei elementului activ. Un diametru mai mare al umărului elementului activ conduduce la creșterea forței de presare și, implicit, a temperaturii din timpul procesului, cu o influență pozitivă asupra proprietăților mecanice ale îmbinării [P10, S17]. O altă caracteristică importantă o reprezintă forma de referință a suprafeței principale a umărului, care poate fi: plată, concavă (forma standard de umăr) și convexă.

Pinul elementului activ produce deformarea materialului și îl încălzește în interiorul cordonului de sudură, prin deplasarea materialului din fața elementului activ în spatele acestuia. La fel ca umărul elementului activ, și pinul acestuia poate avea diferite forme, respectiv: cilindric neted, cilindric filetat, cilindric canelat, cilindric aplatizat, conic neted, conic filetat, cu vârf convex și alte combinații.

Materialul elementului activ este foarte important, deoarece elementul activ lucrează în condiții dificile. Caracteristicile așteptate de la materialul acestuia sunt: rezistență și stabilitate la temperaturi înalte, rezistență la uzură, rezistență la rupere, coeficient ridicat de dilatare termică și prelucrabilitate [A08]. Materialul elementului activ se alege în funcție de caracteristicile materialului/ materialelor de îmbinat [M04]. La alegerea elementului activ pentru sudarea materialelor diferite se au în vedere proprietățile materialului cu cel mai ridicat coeficient termic.

1.7. Utilaje pentru sudarea FSW

Sudarea FSW se poate realiza pe utilaje de tip mașină de frezat sau mașină de sudare FSW. Utilajele de tip mașină de sudare FSW prezintă avantaje privind manipularea, poziționarea, prinderea semifabricatelor și controlul procesului în timpul realizării acestuia.

O nouă direcție către care se îndreaptă tehnologia în acest domeniu o reprezintă sudarea robotizată. Aceasta prezintă numeroase avantaje, cum ar fi flexibilitate în sensul realizării de suduri complexe după direcții diferite/ compuse. Un dezavantaj al sudării robotizate îl reprezintă stabilitatea scăzută în raport cu acțiunea forțelor de prelucrare de valori ridicate.

1.8. Aplicații industriale ale FSW

Indicatori ai dezvoltării FSW în aplicații industriale

Procedeul de sudare prin frecare cu element activ rotitor, FSW, reprezintă, în prezent, procedeul cu una din cele mai rapide ascensiuni, într-o continuă dezvoltare, iar aria de utilizare crește de la an la an. Licențele și brevetele FSW au fost îndreptate către următoarele sectoare de dezvoltare: mai mult de 50 % către zona de transporturi (industria auto, feroviară, aeronautică, aerospațială și navală), iar restul către alte zone ca prelucrarea metalelor, cercetare și dezvoltare, electronică, dezvoltarea de mașini și echipamente etc. [M01].

Aplicații ale sudării FSW în industria aeronautică

Aplicabilitatea procedeului de sudare FSW în industria aeronautică pentru îmbinarea aliajelor de aluminiu ale aeronavelor este ușor de intuit datorită faptului că fuzelajul unui avion este construit 20 – 50 % din aliaj de aluminiu [T02]. De asemenea, aplicabilitatea procedeului FSW în industria aeronautică este cercetată de mai bine de 30 de ani. Cele mai comune aliaje de aluminiu utilizate în industria aeronautică sunt AA6061, AA2024 și, uneori, AA7075. În prezent, există aplicabilitate și pentru lungimi mari de cordoane, la rezervoare mari de combustibil și alte recipiente pentru vehicule de lansare spațială.

Prima companie care a decis să înlocuiască nituirea cu FSW, la realizarea aeronavei Eclipse 500 (Fig. 1.8.5), este Eclipse Aviation Corporation. Prin utilizarea sudării FSW a fuzelajului și aripilor de la Eclipse 500 s-au realizat următoarele performanțe: numărul de nituri a scăzut cu 60 – 70 % [J02], timp economisit datorită realizării procesului într-un singur pas (în loc de găurire și nituire), greutatea



Fig. 1.8.5. Aplicații ale FSW în industria aeronautică [J02]

produsului final a fost semnificativ redusă, iar riscurile alocate procedeelor clasice de asamblare au fost eliminate [M12].

Aplicații ale sudării FSW în industria de automobile

Industria auto urmărește reducerea greutății și creșterea rezistenței vehiculelor de serie, deziderat ce poate fi atins prin utilizarea unor aliaje din serii diferite de aluminiu și a procedeului de sudare prin frecare cu element activ rotitor, FSW.

Procedeul de sudare FSW este aplicat în industria auto, în producția de serie de către Mazda Motor, la realizarea capotei și a ușii portbagajului modelului sportiv Mazda RX-8, la realizarea ușilor din spate ale modelului Mazda MX-5, la realizarea suspensiilor și la asamblarea capacelor pentru mânerele ușilor la anumite modele de Ford [J02].

Alte aplicații industriale ale sudării FSW

În ultimul deceniu, procedeul de sudare FSW a fost explorat de mai multe industrii, cum ar fi industria aerospațială, auto, maritimă, armament, nucleară etc. Prima companie care a utilizat acest procedeu în industria de masă a fost compania norvegiană "Marine Aluminium" [J02]. Sudarea FSW a fost deja aplicată cu succes la îmbinări din cadrul rezervoarelor, structurilor maritime, panourilor de tren, ramelor de aer și autovehiculelor [K06].

Capitolul 2. Caracteristici ale îmbinărilor sudate prin frecare cu element activ rotitor

2.1. Categorii de caracteristici ale îmbinărilor sudate și procedee de evaluare

Caracterisiticile îmbinărilor sudate prin procedeul FSW se referă, după caz, la: macrostructură, microstructură, starea de precipitare, textură, tensiuni remanente, defecte, microduritate, rezistență la tracțiune etc. privind cordonul de sudură, zone adiacente cordonului de sudură, structura sudată.

2.2. Macrostructura și microstructura îmbinărilor sudate

Macrostructura îmbinărilor sudate

Macrostructural, cordonul de sudură și zonele adiacente acestuia sunt: WZ, TMAZ, HAZ, BM, [B16] după cum urmează (Fig. 2.2.1).

1. WZ (weld zone) este zona de sudură, care este afectată atât termic, cât și mecanic de către pinul și umărul elementului activ rotitor.

2. TMAZ (thermo mechanically affected zone) este zona afectată termic și mecanic, care este apropiată de nucleul cordonului de sudură și în care materialul este deformat plastic și afectat termic de către căldura degajată în timpul procesului.

3. HAZ (heat affected zone) este zona afectată termic, care este suficient de aproape de cordonul de sudură pentru ca ciclul termic din momentul realizării procesului să îi modifice microstructura, dar să nu o deformeze plastic.

4. BM (base material) este materialul de bază, respectiv, partea din material neafectată termic și mecanic.





Analiza macrostructurală evidențiază defectele din cordonul de sudură, zonele influențate termic, metalul de bază și forma zonei de sudură. La procedeul FSW, forma secțiunii cordonului de sudură și distribuția celor patru zone caracteristice sunt foarte importante, cu privire la eficiența regimului de lucru, corectitudinea elementului activ ales și proprietățile îmbinării.

Microstructura îmbinărilor sudate

Analiza evoluției microstructurii îmbinărilor FSW poate fi complicată deoarece în zona cordonului de sudură se produce o deformare plastică și o recristalizare dinamică a materialelor utilizate. La analiza microstructurii îmbinării FSW din punct de vedere al celor patru zone macrostructurale, s-a constatat o rafinare a grăunților pe măsura micșorării distanței față de nucleul cordonului de sudură.

Aliajele de aluminiu AA6061 (partea de retragere) și AA2024 (partea de avans) au fost sudate FSW cu un pin cilindric filetat. Din punct de vedere microstructural, în zona celor două materiale de bază nu au fost identificate schimbări semnificative, cu toate că procedeul implică o cantitate considerabilă de energie și căldură degajate în timpul realizării procesului. Zona afectată termic (HAZ) este considerabil influențată de ciclul termic aferent acestui procedeu, diferențele dintre aceasta și materialul de bază sunt majore (Fig. 2.2.8: b și f). Zona afectată termic și mecanic (TMAZ) prezintă o creștere considerabilă a limitelor grăunților datorată deformării plastice din timpul procesului și mai puțin factorului termic (Fig. 2.2.8: c și e). În nucleu (WZ), materialele de bază au suferit o deformare plastică majoră în urma căreia au rezultat grăunți fini echiaxiali (Fig. 2.2.8: d). Forma și dimensiunile grăunților din nucleu conduc la îmbunătățirea considerabilă a rezistenței mecanice a cordonului de sudură [S01].



Fig. 2.2.8. Microstructura diferitelor zona ale cordonului FSW dintre AA6061 și AA2024: a) material de bază AA2024; b) HAZ pentru AA2024; c) TMAZ pentru AA2024; d) WZ; e) TMAZ pentru AA6061; f) HAZ pentru AA6061; g) material de bază AA6061 [S01]

Textura îmbinărilor sudate

Teză de

doctorat

Rezumat

UPB.

UPIT

Din punct de vedere al aspectului vizual al cordonului de sudură FSW pe suprafața superioară, cea care intră în contact cu umărul elementului activ, sunt prezente urme semicirculare, de forma "foilor de ceapă" (Fig. 2.2.15). Suprafața opusă zonei de contact direct cu elementul activ nu prezintă modificări evidente după realizarea cordonului de sudură.

Tensiunile remanente în îmbinările sudate

Raportat la geometria cordonului de sudură, cele mai mari tensiuni reziduale apar longitudinal, paralel cu direcția de sudare, în zona TMAZ, pe partea de avans a elementului activ [C09, R03]. Tensiunea reziduală transversală nu prezintă dependență în raport cu procesul de sudare [C01].

S-a constatat că tensiunile reziduale prezente în îmbinările sudate prin FSW au de obicei o distribuție în formă de "M" și că tensiunile longitudinale sunt mai mari decât cele transversale. Deși această distribuție este



Fig. 2.2.15. Aspectul vizual al cordonului de sudură FSW [M15]



Distanță față de finiă înculană a cordonalul [finit]

Fig. 2.2.19. Distribuția tensiunilor reziduale în cordonul de sudură FSW [C09]

aproape simetrică, tensiunile sunt de obicei ușor mai ridicate pe partea de avans a elementului activ [B16, C09] (Fig. 2.2.19).

2.3. Defecte ale îmbinărilor sudate și legătura dintre apariția acestora și parametrii procesului

Procedeul FSW este asociat cu apariția defectelor diferite față de defectele înregistrate la realizarea procedeelor de sudare clasice. Parametrii de intrare ai FSW, cum ar fi: turația, viteza de avans, caracteristicile elementului activ (forma și dimensiunile), pot conduce la apariția defectelor în cazul în care nu sunt stabiliți corespunzător. Pinul de sudare joacă un rol foarte important în realizarea calității cordonului de sudură. Un rol la fel de important îl joacă adâncimea de pătrundere a elementului activ în timpul realizării procesului [K06, N01]. Combinația acestor caracteristici poate conduce la producerea de căldură excesivă, de căldură insuficientă, mixare insuficientă sau excesivă și presiune insuficientă a umărului asupra cordonului realizat.

Defectele întâlnite la realizarea procedeului FSW pot fi de aspect sau vizibile: cordon zimțat sau formă de solzi (Fig. 2.3.1), bavuri excesive (Fig. 2.3.2), fisură de-a lungul cordonului de sudură, intermitentă sau continuă (Fig. 2.3.3) sau cordon neuniform (Fig. 2.3.4) [B01].

UPB,	doctorat	Partea I. Stadiul actual al ce industriale ale sudării prin	Partea I. Stadiul actual al cercetării – dezvoltării și aplicațiilor		
UPIT	*Rezumat*		industriale ale sudării prin frecare cu element activ rotitor		
GHANNE	Welding Direction		Partea de avans	19 12	

Lengthermal Vete Fig. 2.3.1. Solzi/





Fig. 2.3.2. Bavuri excesive [B01]



Fig. 2.3.3. Fisură de-a lungul cordonului de sudură [B01]



Fig. 2.3.4. Cordon neuniform [B01]

A doua categorie de defecte o reprezintă defectele în macrostructura cordonului de sudură. Aceste defecte nu pot fi identificate cu ochiul liber, ci prin analiză macroscopică pentru atestarea lor. Ca și defectele de suprafață, acestea pot fi de diverse forme: defecte de tip tunel sau "gaură de vierme" (cele mai des întâlnite defecte de tip macrostructural) (Fig. 2.3.5), defecte de tip nucleu prabușit (Fig. 2.3.9), defecte datorate lipsei de pătrundere (Fig. 2.3.10) și defecte de tip legătură incompletă (*kissing bond*) (Fig. 2.3.11).



Fig. 2.3.5. Defect de tip tunel sau "gaură de vierme" [B01]



Fig. 2.3.9. Nucleul prăbușit [B01]



Fig. 2.3.10. Pătrundere insuficientă [K05]



Fig. 2.3.11. Defectul de tip legătură incompletă (*kissing bond*) [K06]

De ansamblu, prevenirea defectelor poate fi realizată prin îmbunătățirea aportului de căldură introdus în zona de sudare și controlul acesteia pe parcursul realizării procesului.

2.4. Proprietăți mecanice ale îmbinărilor sudate

Microduritatea îmbinărilor sudate

Din analiza distribuției microdurităților pentru trei cordoane de sudură realizate cu elemente active diferite, s-au identificat diferențe majore între rezultatele realizate cu un pin cilindric neted și, respectiv, cu un pin cilindric filetat, respectiv, microduritățile sunt mai ridicate în cordonul realizat cu pinul filetat [K12].

Microduritatea cordonului de sudură realizat între AA7003 și AA6060, cu un pin cilindric filetat, turația de 1000 rpm și viteza de avans de 40 mm/min, este măsurată în secțiunea transversală, pe



Fig. 2.4.3. Microduritatea sudurii FSW pentru AA7003 și AA6060 [D10]

mijlocul cordonului de sudură (Fig. 2.4.3). Distribuția asimetrică a microdurității cordonului de sudură se datorează valorilor foarte diferite ale microdurităților celor două materiale de bază.

Microduritatea cordonului de sudură este influențată atât de parametrii de proces, cât și de forma pinului elementului activ utilizat. Pentru experimentele în care se sudează două aliaje diferite de aluminiu, cu diferențe mari ale microdurităților materialelor de bază, microduritatea cordonului de sudură poate fi infuențată negativ de către materialul cu microduritatea cea mai mică. În WZ și TMAZ unde materialele sunt mixate mecanic este clar că valoarea microdurității va fi mai mică decât microduritatea unuia din materialele de bază.

Rezistența și ductilitatea îmbinărilor sudate

Rezistența la tracțiune a eșantioanelor sudate FSW reprezintă aproximativ 68 - 73 % din rezistența materialelor de bază. S-a demonstrat că rezistența la tracțiune are tendința de scădere după îmbinarea FSW, față de materialul de bază [K12].

O influență semnificativă asupra proprietăților îmbinării, implicit asupra rezistenței la tracțiune în îmbinările sudate, o are geometria elementului activ. La fel ca valorile microdurității, s-a demonstrat că cele mai bune rezultate au fost realizate pentru îmbinările sudate cu element activ cu pin cilindric filetat [K12].

Prin aplicarea metodei de optimizare a parametrilor Taguchi L16, pentru caracterizarea îmbinării FSW a două aliaje diferite de aluminiu, AA5454 și AA7075, s-a urmărit optimizarea parametrilor de intrare pentru îmbunătățirea proprietăților mecanice ale cordonului de sudură - rezistența la tracțiune și ductilitatea. Parametrii optimi și condițiile de proces determinate pentru realizarea cordonului de sudură cu cea mai ridicată valoare a UTS sunt: turația de 1225 rpm, viteza de avans egală cu 21 mm/min, profilul conic al pinului, AA5454 pe partea avans, unghiul de înclinare al elementului activ rotitor de 2° și adâncimea de pătrundere de 0,1 mm. Eficiența maximă a îmbinării rezultate, comparativ cu rezistența metalului mai moale utilizat la realizarea cordonului, este de 85,3 % [E01].

Pentru a realiza cele mai mari valori ale ductilității, parametrii optimi determinați sunt: turația de 1225 rpm, viteza de avans egală cu 21 mm/min, profilul cilindric al pinului, AA5454 pe partea avans, unghiul de înclinare al elementului activ rotitor de 1,5° și adâncimea de pătrundere egală cu 0,1 mm [E01].

Capitolul 3. Cercetări privind modelarea și simularea numerică a procedeului de sudare prin frecare cu element activ rotitor

3.1. Etapele generale ale modelării și simulării numerice

Modelarea și simularea procedeului FSW reprezintă o mare provocare pentru orice cercetător din cauza complexității procesului și deformărilor mari care apar în timpul sudării. Unul din avantajele simulării este că se pot determina rezultate privind efectul parametrilor de proces asupra calității sudurii, fără a realiza fizic îmbinarea și fără a consuma resurse materiale și energie [P07]. Prin simulare numerică a procedeului de sudare FSW se pot vizualiza și analiza fluxul de material, domeniul de temperatură, tensiunile, deformațiile și defectele rezultate, iar acestea pot fi realizate cu o mai mare ușurință decât prin metodele experimentale [D07].

Pentru realizarea unui instrument care să permită evaluarea comportamentului structural al unei îmbinări este necesară definirea unui model numeric detaliat și complet parametrizat, prin metoda elementului finit. Un nivel ridicat al preciziei modelului elementului finit este de asemenea necesar și este des utilizat pentru evaluare prin comparare cu datele experimentale [F01]. La construirea modelului numeric trebuie să se țină cont de mai multe elemente, cum ar fi: geometria pieselor și a elementului activ, comportamentul materialului în timpul procesului, tipul de contact dintre suprafețele de frecare și legea de frecare, condițiile limită și parametrii de proces, discretizarea pieselor și a instrumentelor de sudare. În modelarea procesului este esențial să se păstreze obiectivele modelului și, în același timp, este important să se adopte un nivel corespunzător de complexitate. În acest sens ambele metode analitice și numerice au un rol de jucat [M09].

La realizarea modelării numerice se pot adopta două tipuri de tehnici de modelare a proceselor: dinamica fluidelor (simularea fluxului de materiale și distribuția temperaturii) și mecanica solidelor (simularea distribuției temperaturii, tensiunilor și deformațiilor) [D07]. Pentru realizarea modelului numeric aferent procesului de sudare prin frecare cu element activ rotitor este necesară parcurgerea următorilor pași [C10]:

1. Definirea geometriei piesei și a elementului activ de sudare;

2. Definirea comportamentului materialului (elasto-plastic sau elasto-vâscoplastic) printr-o lege de comportament;

- 3. Definirea proprietăților elastice și a transferului de căldură;
- 4. Definirea tipului de contact dintre suprafețe și a legii de frecare;
- 5. Stabilirea condițiilor la limită și a parametrilor procesului;
- 6. Discretizarea elementului activ de lucru și a pieselor.

O caracteristică extrem de importantă de care trebuie să se țină cont la realizarea modelului numeric o reprezintă geometria elementului activ și a pieselor de sudat. La realizarea de modele 2D sau 3D, inclusiv modelarea procesului FSW, trebuie să se țină cont de forma, dimensiunile și locația în sistemul de lucru, atât pentru piesele ce urmează a fi sudate, cât și pentru elementul activ rotitor. Este necesar ca acestea să corespundă cu realitatea pentru determinarea unui rezultat cât mai relevant.

Pe lângă aspectul dimensional, o altă caracteristică importantă a modelării este legea de comportament a materialelor. În majoritatea studiilor, modelul matematic constitutiv pentru a defini materialul în simularea numerică este Johnson-Cook, în general comportamentul materialelor este vâsco-plastic (rel. 3.1.1 și rel. 3.1.2) [J03].

unde:

$$\overline{\sigma} = [A + B \cdot (\overline{\varepsilon}^{pl})^n] \left[1 + C \cdot \ln \left(\frac{\dot{\overline{\varepsilon}}_{pl}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] (1 - \hat{T}^m) [\text{GPa}] \qquad \hat{T} = \begin{cases} 0, \ pentru - T < T_{ref} \\ T - T_{ref} \\ T_{solid} - T_{ref} \\ 1, \ pentru - T > T_{solid} \end{cases} \text{(3.1.2)}$$

 ε^{-pl} reprezintă deformația plastică efectivă;

 $\dot{\overline{\varepsilon}}_{pl}$ – viteza efectivă de deformare;

 $\dot{\varepsilon}_0$ – viteza de deformare normală (de regulă egală cu 1 s⁻¹);

– exponent ce ia în considerare ecruisarea materialului;

m – exponent ce ia în considerare topirea materialului;

 T_{ref} – reprezintă temperatura la care se determină parametrii A, B și n;

T_{solid} – temperatura de solidificare a materialului;

A, B, C – constantele materialului;

п

iar primul factor reprezintă ecruisarea materialului, al doilea factor – influența vitezei de deformare, iar al treilea factor – efectul temperaturii.

Legea de contact este aplicată pentru a descrie forțele de forfecare între suprafața elementului activ rotitor și piesa de prelucrat. În cele mai multe studii, legea de contact aplicată este legea Coulomb, deoarece prin intermediul acesteia s-au realizat cele mai bune rezultate. Această lege estimează mișcarea reciprocă între două segmente, respectiv un contact de forfecare (indiferent dacă elementele se lipesc sau alunecă) (rel. 3.1.3) [D07, N03].

$$\tau = \mu \cdot \sigma_n \quad (3.1.3)$$

unde: τ reprezintă tensiunea tangențială; μ – coeficientul de frecare; σ_n – tensiunea pe direcție normală la suprafață.

Ecuațiile unei probleme termomecanice pot fi scrise în două formulări clasice diferite: Lagrangiană și Euleriană. În reprezentarea Lagrangiană rețeaua (discretizarea) este atașată de puncte ale materialelor (numite noduri), în timp ce în reprezentarea Euleriană rețeaua este atașată de puncte spațiale. În consecință, în timpul fluxului de materiale, în reprezentarea Lagrangiană se mișcă nodurile rețelei și urmează puncte materiale, în timp ce în reprezentarea Euleriană rețeaua este fixă [L06].

UDD	Teză de	Partag I Stadiul actual al carcatării dazvoltării și anlicațiilor	BOSNEAGE Ana
UDIT	doctorat	in dustriale ale sudării min frazere su alement activ retiter	COCODICI)
UPII	*Rezumat*	industriale ale sudarii prin frecare cu element activ rotitor	(GOGORICI)

Față de aceste două formulări standard s-au dezvoltat metodele: CEL (Coupled Eulerian-Lagrangian) și ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian). În modelele bazate pe curgerea elementelor Lagrangian, nodurile și particulele de material devin extrem de distorsionate, iar rezultatele își pierd din precizie. Pentru a evita o deformare majoră, se utilizează modelul adaptiv de rediscretizare ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian) [A04], ca și cea mai viabilă metodă pentru modelarea proceselor care implică grad mare de deformare plastică [M05]. În plus față de ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian), CEL (Coupled Eulerian-Lagrangian) are o serie de avantaje, inclusiv estimarea distribuției materialului și posibilele goluri sau defecte din cordonul de sudură [P07].

Generarea de căldură și dispersia acesteia sunt puncte de care trebuie să se țină cont la realizarea unui model numeric FSW, pentru rezultate cât mai apropiate de realitate. Căldura este generată prin: contactul dintre materialul de lucru și umărul elementului activ, contactul dintre pinul elementului activ și materialul de sudat, mișcarea de rotație realizată de către elementul activ în material și prin deformarea plastică a materialului. Căldura este disipată în piesa de lucru în funcție de coeficientul de conductivitate termică al materialului de lucru. Pierderile de căldură au loc prin: elementul activ, partea superioară a piesei de lucru, prin suprafața inferioară a piesei de sudat care intră în contact cu masa mașinii și bridele de prindere pe masa utilajului, precum și prin intermediul unor pierderi de căldură convective, în atmosfera înconjurătoare (acestea sunt considerate neglijabile) [D07].

3.8. Metode de validare a modelelor numerice ale procedeului FSW

Validarea modelului numeric al procedeului FSW prin analiza distribuției temperaturii în cordonul de sudură și a evoluției sale în timp

Cea mai accesibilă metodă de validare a unui model numeric o reprezintă compararea distribuției câmpului de temperatură în cordonul de sudură realizat prin simulare și evoluția sa în timp, raportat la valorile înregistrate experimental. Deși temperaturile din proces sunt mai mici decât punctele de topire ale materialelor de sudare, acestea sunt suficient de mari pentru a provoca transformări de fază. De obicei, la realizarea experimentelor, temperatura se măsoară prin intermediul termocuplelor [N03] sau al camerei termografice [B07, C16, E02].

Pentu validarea unui alt model numeric s-au utilizat valorile temperaturilor înregistrate prin intermediul a două termocuple de tip K poziționate la o adâncime de 1,5 mm în material și dispuse la 8 mm, respectiv, 33 mm, față de începutul cordonului de sudură. Parametrii de proces au fost: turația 1000 rpm și viteza de avans 60 mm/min. Temperatura rezultată la simularea modelului numeric este în concordanță cu cea experimentală, diferența maximă dintre acestea este de 5 °C (Fig. 3.8.2). Și acest model se consideră a fi validat [R01].













Temperatura maximă atinsă în timpul realizării procedeului FSW este localizată în zona planului median al cordonului de sudură, datorită rotației și contactului dintre pinul și umărul elementului activ cu materialele de sudat (Fig. 3.8.3 și 3.8.4) [J01]. Se subliniază că utilizarea unei camere termografice sau a unor termocuple poate induce erori de măsurare atribuite zonei în care se fac înregistrările; camera termografică și termocuplele nu pot avea o vedere directă sau un contact direct asupra interfeței element activ rotitor – piesă.

Profilul temperaturii, atât în secțiune longitudinală, cât și transversală, are formă de "V", datorită diametrului umărului elementului activ care este mai mare în comparație cu pinul acestuia, fapt ce conduce la generarea de căldură pe o suprafață mai mare în zona superioară a cordonului fața de zona inferioară. Un alt factor care determină forma distribuției temperaturii este transferul termic de căldură dintre plăcile de sudat și masa mașinii, care este mult mai ridicat decât transferul de căldură dintre partea superioară a pieselor de sudat și atmosferă (Fig. 3.8.4) [J01].

Validarea modelului numeric prin compararea distribuției temperaturilor este dintre cele mai accesibile metode, atât din punct de vedere al realizări experiențelor, cât și din punct de vedere al simulării.

Validarea modelului numeric al procedeului FSW prin analiza formei cordonului de sudură

Un model numeric construit care respectă condițiile de intrare ale procesului pe care îl simulează va fi capabil să prezică forma cordonului de sudură și posibilele defecte pentru orice set de parametri. Modelul numeric al procedeului FSW pentru îmbinarea cap la cap a două aliaje similare AA2024, realizat în modulul software ABAQUS/ Explicit, utilizează metoda CEL (Coupled Eulerian-Lagrangian) și legile de comportament Johnson-Cook și Coulomb, a fost validat prin compararea prezenței defectelor și forma bavurilor rezultate prin simulare cu cele prezente pe epruvetele realizate experimental (Fig. 3.8.9 – 3.8.11). Dimensiunile acestor defecte nu sunt identice, însă apariția acestora din cauza parametrilor de intrare nepotriviți poate fi evidențiată prin intermediul simulării numerice. Acest lucru permie optimizarea parametrilor și reducerea costurilor cu experimentele prin alegerea corespunzătoare a parametrilor de intrare [S03].



Fig. 3.8.9. Defect de tip canal: realizat experimental și simulat [S03]



Fig. 3.8.10. Defect de tip tunel: experimental și simulat [S03]



Fig. 3.8.11. Defect de tip bavură: experimental și simulat [S03]

3.9. Rezultate ale simulării procedeului FSW a unor structuri din materiale diferite

În literatura de specialitate studiată s-a regăsit un număr mic de lucrări ce prezintă modelarea numerică a procedeului FSW pentru materiale diferite. Numărul mic de lucrări poate fi justificat de dificultatea artibuirii caracteristicilor mai multor materiale în sistemul de lucru.

Una din puținele lucrări ce prezintă pașii de realizare ai simulării îmbinării prin FSW a două materiale diferite are la bază două aliaje diferite de aluminiu: AA5083 și AA6061 [A04]. Modelarea numerică a fost realizată în soft-ul ABAQUS, prin utilizarea metodei CEL (Coupled Eulerian-Lagrangian). Viteza de sudare este definită ca intrare în limita domeniului Eulerian; acesta are o dimensiune considerată a fi de patru ori mai mare decât diametrul umărului elementului activ, o formă cubică și este împărțit în trei zone: gol (de 1 mm înălțime), piesa 1 și piesa 2.

Elementul activ rotitor de lucru este proiectat a fi rigid Lagrangian, iar interacțiunea dintre acesta și piesele de lucru este realizată cu legea de frecare Couloumb, cu un contact explicit. Comportamentul materialelor în domeniul plastic este definit cu legea Johnson-Cook. Faza de sudare este simulată ca și deformarea volumică. Fluxul de material simulează avansarea elementului activ de-a lungul zonei de îmbinare [A04]. Parametrii de intrare sunt: viteza de pătrundere 100 mm/min, turația 900 rpm, viteza de avans 50 mm/min și unghiul de înclinare 2º.

Domeniul Eulerian este format din 82800 elemente de discretizare cu câte 8 noduri, fiecare element are câte 4 grade de libertate pentru fiecare nod (EC3D8RT) [A04].

Validarea modelului numeric s-a realizat prin compararea temperaturilor determinate prin simulare cu cele experimentale [A04]. Temperaturile s-au măsurat la 10 mm față de planul median al cordonului de sudură, pe ambele materiale, atât pe partea de avans, cât și pe cea de retragere. Între valorile obsinute prin simulare și cele măsurate se constată o diferentă de 8 - 15 %, diferență dată în mare parte de imprecizia sistemului de măsurare și înregistrare a temperaturii (Fig. 3.9.2).



Fig. 3.9.2. Istoricul temperaturilor, la 10 mm față de planul median al cordonului de sudură, pe partea de avans [A04]

Simularea numerică poate înlocui cu succes partea experimentală, prin prisma costurilor și resurselor alocate pentru efectuarea studiilor experimentale. Însă și simularea are un dezavantaj, respectiv timpul foarte mare de procesare a datelor pentru determinarea unor rezultate corecte.

Capitolul 4. Concluzii privind stadiul actual al cercetării – dezvoltării și aplicațiilor industriale ale sudării prin frecare cu element activ rotitor

Din analiza stadiului actual al cercetării – dezvoltării și al aplicațiilor industriale privind sudarea prin frecare cu element activ rotitor, se desprind concluzii importante, după cum urmează.

• Procedeul de sudare prin frecare cu element activ rotitor (FSW) este considerat ca una din cele mai semnificative realizări în domeniul sudurii din ultima perioadă. Acesta a fost inventat în anul 1991 în Marea Britanie la Institutul de Sudură (TWI) (v. § 1.1). Inițial a fost dezvoltat pentru sudarea plăcilor din aliaje de aluminiu, iar cu timpul studiile s-au extins către sudarea de materiale ca materiale polimerice, materiale metalice – alamă, cupru, magneziu, titan, oțel – și materiale compozite cu matrice metalică din aluminiu, cupru și titan, iar armătura ceramică din particule ca Al₂O₃, SiC, Si₃N₄ și B₄C (v. § 1.5.1).

• Principiul de lucru al procedeului FSW este simplu: un element activ rotitor, cu o mișcare de rotație și una de translație pătrunde în material, în zona rostului de sudură, se deplasează de-a lungul acestuia și se retrage din material la capătul cordonului de sudură. Parametrii tehnologici ai procesului sunt: turația elementului activ [rpm], viteza de avans [mm/min] și unghiul de înclinare al elementului activ (v. § 1.3).

• Cele mai multe studii realizate până în prezent s-au dezvoltat pentru sudarea aliajelor de aluminiu din toate cele opt grupe, cu axare pe aliajele imposibil de sudat prin intermediul procedeelor clasice. Multitudinea de studii existente prezintă combinații variate de câte două aliaje de aluminiu, atât identice cât și diferite, poziționate cap la cap sau suprapus, pentru o gamă variată de parametri de intrare și elemente active. Până în prezent, niciun studiu din cele analizate nu a avut ca punct central utilizarea procedeului FSW pentru îmbinarea a trei aliaje de aluminiu diferite (v. § 1.5.2).

• Elementul activ rotitor utilizat pentru realizarea FSW joacă trei roluri principale: încălzește piesele de prelucrat, amestecă materialul plastifiat în urma încălzirii, controlează și restricționează deplasarea materialului prelucrat în zona superioară, prin intermediul umărului acestuia. Caracteristicile importante ale elementului activ de lucru sunt forma, dimensiunile și proprietățile materialului din care acesta este realizat (v. § 1.6).

• Brevetele și licențele privind procedeul FSW au fost orientate către următoarele sectoare de dezvoltare: industria auto, industria aeronautică și aerospațială, industria feroviară, industria navală, prelucrarea metalelor, cercetare și dezvoltare și altele. Țările care utilizează acest procedeu pe scară industrială sunt: Marea Britanie (țara în care procedeul a fost inventat), USA, Canada, Japonia și China (v. § 1.8.1).

• Părțile active ale elementului rotitor sunt: umărul acestuia, care intră în contact cu materialul de sudat, și pinul, care pătrunde în materialul de sudat. Dimensiunea și forma umărului elementului activ influențează distribuția temperaturii și a materialelor la suprafața cordonului de sudură, iar pinul elementului activ produce deformarea materialului și încălzirea acestuia în interiorul cordonului de sudură, precum și deplasarea materialului din fața elementului activ în spatele acestuia. Formele și dimensiunile elementului activ sunt variate, însă pentru sudarea aliajelor de aluminiu cele mai bune rezultate au fost realizate de element activ rotitor cu pin cilindric sau conic filetat și umăr concav (v. § 1.6).

• Utilizarea FSW în industria aeronautică este cu cea mai mare răspândire din două considerente: acest procedeu este puternic cercetat și exploatat pentru sudarea aliajelor diferite de aluminiu, iar fuzelajul unui avion este format din 20 – 50 % aliaje de aluminiu care, în prezent, sunt îmbinate prin nituire. Cele mai comune aliaje utilizate în industria aeronautică sunt: AA6061, AA2024 și AA7075. Nu toate din cele trei pot fi sudate prin procedee clasice, însă toate pot fi sudate FSW (v. § 1.8.2).

• În prezent, procedeul FSW se utilizează în industria aeronautică pentru realizarea: fuzelajelor, rezervoarelor de combustibil criogenic pentru vehicule spațiale, rezervoare de combustibil de aviație, rezervoare pentru aeronave militare, rachete militare și științifice (v. § 1.8.2).

• Industria auto urmărește reducerea greutății și creșterea rezistenței vehiculelor de serie, ceea ce se poate realiza prin îmbinarea unor aliaje din serii diferite de aluminiu prin procedeul de sudare FSW. În prezent, acest procedeu este utilizat în producția de serie de către Mazda Motor, la realizarea capotei și a ușii portbagajului pentru modelul sportiv Mazda RX-8, la realizarea ușilor din spate pentru modelul Mazda MX-5, la realizarea suspensiilor și la asamblarea capacelor pentru mânerele ușilor la anumite modele de Ford. De asemenea, FSW se află în curs de evaluare pentru următoarele aplicații potențiale la nivel industrial: realizarea motorului și șasiului, realizarea jantelor din aluminiu, realizarea tubulaturii, realizarea organelor de camioane, macarale pentru camioane, realizarea macaralelor mobile, realizarea spațiului personalizat din rulote, realizarea anumitor componente ale autobuzelor și vehiculelor de transport public, realizarea benelor etc. (v. § 1.8.3).

• Alte zone, în care procedeul FSW a pătruns, sunt industria navală și maritimă pentru următoarele aplicații: panouri pentru punți, pereți și pardoseli, extrudate din aluminiu, secțiuni de bărci, suprastructuri, platforme de aterizare elicoptere, catarge și brațe, de exemplu pentru veliere, instalații frigorifice; în industria feroviară se utilizează la: materialul rulant de cale ferată, vagoane de metrou, tramvaie, cisterne feroviare și vagoane de marfă, organisme de containere; industria electrotehnică arată creșterea interesului în aplicații precum: carcase motor electric, conectori electrici, încapsularea electronicelor. FSW poate fi, de asemenea, luat în considerare pentru: panouri de refrigerare, echipamente de gătit și bucătării, rezervoare de gaz și butelii de gaz, conectarea de bobine de cupru sau aluminiu, mobilier, poduri din aluminiu, panouri de fațadă realizate din aluminiu, cupru sau titan, rame de ferestre, conducte din aluminiu etc. (v. § 1.8.4).

• Nivelul de calitate al cordoanelor de sudură realizate prin procedeul FSW poate fi controlat vizual, dimensional sau prin încercări, iar indicatorii de calitate ai acestor cordoane de sudură sunt: microstructura îmbinărilor sudate, starea de precipitare în cordonul de sudură, textura îmbinărilor sudate, tensiunile remanente din cordonul de sudură, lipsa defectelor în interiorul cordonului de sudură, microduritatea, rezistența la tracțiune și ductilitatea (v. § 2.1).

UPB.

UPIT

• Din punct de vedere macrostructural, cordonul de sudură FSW este împărțit în 4 zone distincte: materialul de bază aflat la cea mai mare distanță față de planul median al cordonului de sudură (BM), zona afectată termic influențată de ciclul termic din momentul realizării procesului (HAZ), zona afectată termic și mecanic în care materialul este deformat plastic de către elementul activ și afectată termic de către căldura degajată în timpul procesului (TMAZ) și zona de sudură, reprezentată de zona în care pătrunde pinul elementului activ de lucru (WZ) (v. § 2.2.1).

• Modul de amestecare a materialelor și macrostructura îmbinării sunt influențate de forma și dimensiunea elementului activ, valorile parametrilor tehnologici ai procesului și poziția materialelor de îmbinat unul în raport cu celălalt. Astfel, volumul materialului mixat crește invers proporțional cu viteza de avans, iar nucleul cordonului de sudură este dominat de materialul plasat pe partea de avans a elementului activ, astfel că este indicată plasarea materialului mai moale pe partea de retragere a elementului activ. Forma secțiunii cordonului de sudură este preponderent orientat către zona de retragere a elementului activ. Forma secțiunii cordonului de sudură și modul de distribuție a celor patru zone caracteristice pot genera informații cu privire la eficiența regimului de lucru, corectitudinea elementului activ ales și proprietățile mecanice ale îmbinării (v. § 2.2.1).

• Microstructura îmbinării FSW este direct dependentă de forma și distribuția celor patru zone macrostructurale ale cordonului de sudură. S-a constatat o rafinare a grăunților pe măsura micșorării distanței față de nucleul cordonului de sudură, grăunți ce prezintă o deformare plastică majoră, formați preponderent din aliajul poziționat pe partea de avans a elementului activ. Forma și dimensiunile grăunților din WZ îmbunătățesc considerabil proprietățile mecanice ale cordonului de sudură (v. § 2.2.2).

• Procedeul de sudare FSW schimbă în mod semnificativ microstructura îmbinării, în ceea ce privește dimensiunea granulației și orientarea stratului de precipitate (acestea pot fi în întregime sau parțial redizolvate în timpul procesului). Precipitatele prezente în diferite zone ale cordonului de sudură depind în mod evident de compoziția inițială a materialelor de bază, de fluxul de căldură determinat de condițiile de sudare și de poziția acestora în secțiunea cordonului de sudură. Densitatea precipitatelor este mai mare în zona HAZ decât în WZ sau TMAZ, deoarece materialul din această zonă este expus numai la temperatură înaltă, fără a fi afectat mecanic, astfel că dizolvarea precipitatelor este insuficientă (v. § 2.2.3).

• Tensiunile remanente aferente procedeului FSW pot fi de două feluri: transversale (perpendicular pe direcția de sudare) și longitudinale (paralele pe direcția de sudare). Acestea sunt influențate de parametrii tehnologici și s-a demonstrat că tensiunile longitudinale cresc odată cu creșterea vitezei de avans. Cele mai mari tensiuni reziduale apar longitudinal, pe partea de avans a elementului activ rotitor și au o influență puternică asupra proprietăților mecanice ale îmbinării (v. § 2.2.5).

• Defectele apărute în cordonul de sudură FSW sunt diferite față de defectele înregistrate la realizarea procedeelor clasice. Acestea pot fi de aspect: cordon zimțat, formă de solzi, bavuri, fisură de-a lungul cordonului de sudură, cordon neuniform sau defecte în macrostructura cordonului de sudură: defecte de tip tunel sau "gaură de vierme", defecte de tip nucleu prăbușit, defecte datorate pătrunderii insuficiente (*lack of penetration*) și defecte de tip legătură incompletă (*kissing bond*). La realizarea procesului FSW parametrii tehnologici pot conduce la apariția defectelor în cazul în care nu sunt aleși corespunzător. Un alt factor de apariție a defectelor îl reprezintă contrastul proprietăților materialelor în cazul îmbinării materialelor diferite. Prevenirea defectelor poate fi realizată prin îmbunătățirea aportului de căldură introdus în zona de sudare și controlul acestuia pe parcursul realizării procedeului (v. § 2.3).

• Valorile microdurităților din îmbinarea FSW dau un indiciu cu privire la schimbarea de fază și dimensiunea granulației în secțiunea cordonului de sudură, care poate crește în zonele cu particule mai fine distribuite omogen, respectiv, în zona nucleului de sudură. Microduritatea cordonului de sudură este influențată atât de parametrii tehnologici, respectiv, crește direct proporțional cu viteza de avans, de forma elementului activ utilizat, cât și de valorile microdurității materialelor de bază. Pentru experimentele în care se sudează două aliaje diferite de aluminiu cu diferențe mari ale microdurităților materialelor de bază, microduritatea finală a cordonului de sudură poate fi influențată negativ de către materialul cu microduritatea cea mai mică (v. § 2.4.1).

• S-a demonstrat că rezistența la tracțiune a îmbinării FSW are tendința de scădere la aproximativ 70 % din valoarea materialului de bază. Conform studiilor, s-a demonstrat că valoarea rezistenței mecanice crește direct proporțional cu viteza de avans, iar din punct de vedere al elementului activ utilizat cele mai bune rezultate au fost realizate pentru cel cu pinul cilindric filetat (v. § 2.4.2).

• Simularea numerică reprezintă un instrument puternic pentru înțelegerea fenomenelor care acționează în timpul procesului de sudare FSW. Realizarea unui model numeric corespunzător procesului FSW reprezintă o mare provocare pentru orice cercetător din cauza complexității acestuia și a faptului că principiul de lucru al procedeului conduce la deformări mari care apar în timpul îmbinării. Prin simulare numerică se pot vizualiza și analiza fluxul de material, domeniul de temperatură, tensiunile și deformațiile implicate, iar acestea pot fi realizate cu o mai mare ușurință decât prin metodele experimentale. În cele mai multe cazuri studiate, la simulare se evaluează câmpul de temperatură (v. § 3.1).

• Etapele de realizare a unui model numeric corespunzător procesului de sudare prin frecare cu element activ rotitor sunt următorii: definirea geometriei piesei și a elementului activ de sudare, definirea comportamentului materialului (elasto-plastic sau elasto-vâscoplastic) printr-o lege de comportament, definirea proprietăților elastice și fizice și a transferului de căldură, definirea tipului de contact dintre suprafețe și a legii de frecare, stabilirea condițiilor la limită și a parametrilor procesului, discretizarea elementului activ rotitor și a pieselor de sudat (v. § 3.1).

• La realizarea modelului numeric corespunzător procesului FSW, trebuie să se ia în considerare forma, dimensiunile și locația în sistemul de lucru, atât pentru piesele ce urmează a fi sudate, cât și pentru elementul activ. Este necesar ca acestea să corespundă realității pentru realizarea unui rezultat cât mai relevant (v. § 3.2).

• În cele mai multe studii, legea de comportament a materialelor pentru definirea modelului matematic constructiv utilizat în simularea numerică este Johnson-Cook, deoarece, în general, comportamentul este vâsco-plastic (v. § 3.3), iar legea de contact aplicată pentru a descrie forțele de forfecare între suprafața elementului activ și piesa de prelucrat este definită de legea Coulomb, deoarece estimează mișcarea reciprocă între două segmente, indiferent dacă se lipesc sau alunecă (v. § 3.5). Metoda care oferă cele mai multe avantaje la definirea comportamentului termomecanic al materialelor și prezintă un grad ridicat de utilizare pentru realizarea de modele numerice aferente procedeului FSW este metoda CEL (Coupled Eulerian-Lagrangian). Pe baza acestei metode, se pot estima distribuțiile materialului și posibilele goluri/ defecte din cordonul de sudură (v. § 3.1).

• Dimensiunea elementelor de discretizare are o infuență puternică asupra calității rezultatelor înregistrate de către modelul numeric realizat. O rețea formată din elemente de dimensiuni mari nu poate da rezultate suficient de precise, pe când o rețea formată din elemente mai mici poate fi foarte costisitoare din punct de vedere al timpului de simulare. Varianta de compromis utilizată este reprezentată de partiționarea plăcilor de îmbinat și realizarea elementelor de discretizare cu dimensiuni variate în funcție de poziția lor în sistemul de lucru (v. § 3.7).

UDR	Teză de	Partag I Stadiul actual al carcatòrii dazvoltòrii si aplicatiilar	BOSNEAGE Ana
UDIT	doctorat	in dustriale ale sudžiji min frazena su alement activ ratitar	COCODICI)
UPII	*Rezumat*	industriale ale sudarii prin frecare cu element activ rottor	(GOGORICI)

• Un alt pas important în realizarea unui model numeric îl reprezintă validarea acestuia. Validarea constă în compararea datelor de ieșire ale simulării cu datele studiului experimental, ambele realizate în condiții identice. Pentru validarea modelului numeric pot fi utilizate diferite criterii, cum ar fi: distribuția temperaturii în cordonul de sudură și evoluția sa în timp (metodă utilizată cu cea mai mare frecvență), distribuția tensiunilor reziduale, forța axială și cuplul aplicat elementului activ în timpl procesului, forma cordonului de sudură, microduritatea măsurată în diferite zone și evoluția acesteia (v. § 3.8).

• Se remarcă numărul relativ mic de lucrări ce prezintă modelarea numerică a procedeului FSW pentru materiale diferite, urmare și a dificultății atribuirii caracteristicilor mai multor materiale în sistemul de lucru (v. § 3.9).

Partea a II - a.

Contribuții la cercetarea teoretico – experimentală și modelarea numerică a procesului și sistemului de sudare prin frecare cu element activ rotitor a unor structuri din aliaje de aluminiu diferite

Capitolul 5. Direcțiile, obiectivul principal și metodologia de cercetare – dezvoltare privind procesul și sistemul de sudare prin frecare cu element activ rotitor a unor structuri din aliaje de aluminiu diferite

5.1. Direcții de cercetare - dezvoltare

Pe baza celor desprinse din analiza stadiului actual, se apreciază a fi de actualitate următoarele direcții de cercetare – dezvoltare privind procesele și sistemele de sudare prin frecare cu element activ rotitor a structurilor din materiale diferite:

• creșterea gamei de materiale industriale diferite îmbinate prin procedee de sudare prin frecare cu element activ rotitor;

• diversificarea structurilor îmbinate prin utilizarea procedeelor de sudare prin frecare cu element activ rotitor, prin creșterea complexității acestora;

• dezvoltarea cunoașterii privind fenomenele care au loc în timpul procesului de sudare prin frecare cu element activ rotitor, cu stabilirea influenței pe care o au diferiți parametri asupra desfășurării procesului și caracteristicilor structurii sudate;

• dezvoltarea modelelor numerice pentru simularea proceselor de sudare FSW, prin utilizarea de diferite tehnici, care să permită optimizarea procesului de sudare.

5.2. Obiectivul principal al activității de cercetare - dezvoltare

Pe baza datelor și concluziilor desprinse din analiza stadiului actual, precum și a direcțiilor de cercetare – dezvoltare privind procesele și sistemele de sudare prin frecare cu element activ rotitor, se determină ca obiectiv principal al activității de doctorat: dezvoltarea procesului și sistemului de sudare prin frecare cu element activ rotitor a unor structuri din aliaje de aluminiu diferite, prin cercetare teoretico – experimentală și modelare numerică.

Structurile din aliaje de aluminiu diferite sunt produse din trei plăci suprapuse, la care materialele sunt dintre aliajele de aluminiu AA2024, AA6061 și AA7075, care au proprietăți chimice și mecanice diferite și sunt frecvent utilizate în industria aeronautică, la construcția de aeronave.

Planificarea experimentelor

La planificarea experimentelor trebuie să se realizeze următoarele: stabilirea limitelor, numărului, valorilor și combinațiilor de valori ale variabilelor independente [U01].

În legătură cu *poziția plăcilor componente în cadrul structurii de sudat*, în cercetările preliminare s-au investigat trei din cele șase poziționări posibile, respectiv (Tabel 5.3.3): AA2024 – AA6061 – AA7075, AA6061 – AA7075 – AA2024 și AA7075 – AA2024 – AA6061. În cadrul cercetărilor avansate s-a utilizat numai poziționarea AA7075 în partea superioară, AA2024 în partea de mijloc și AA6061 în partea de jos a structurii, deoarece pentru această poziționare a plăcilor au fost determinate, în cercetările preliminare, caracteristici corespunzătoare ale structurii sudate.

Pentru realizarea planului experimental aferent cercetărilor preliminare, s-a aplicat, pentru fiecare poziționare a plăcilor de aliaj de aluminiu, câte un plan factorial complet cu două niveluri și două repetări la centru, respectiv, cu un număr total de șase experiențe pentru fiecare poziționare a plăcilor de aliaj de aluminiu (Tabel 5.3.3).

						p	
				Var	iabile	Va	riabile
Cod				indep	endente	independente	
structură	Poziția plăcilor	Nr.	Cod	nor	mate	na	turale
sudată	componente ale structurii sudate	exp.	exp.	Turatia	Viteza	Turația,	Viteza de
Sudata				n n	de	n	avans, w
				11	avans, w	[rpm]	[mm/min]
		1	1.1	-1	-1	600	70
	AA2024	2	1.2	1	-1	1400	70
Structura		3	1.3	-1	1	600	170
1		4	1.4	1	1	1400	170
	AA7075 AA6061	5	1.5	0	0	1000	120
			1.6	0	0	1000	120
	AA6061	7	2.1	-1	-1	600	70
		8	2.2	1	-1	1400	70
Structura		9	2.3	-1	1	600	170
2		10	2.4	1	1	1400	170
	AA2024 AA7075	11	2.5	0	0	1000	120
		12	2.6	0	0	1000	120
		13	3.1	-1	-1	600	70
Structura	AA7075	14	3.2	1	-1	1400	70
		15	3.3	-1	1	600	170
3		16	3.4	1	1	1400	170
	AA6061 AA2024	17	3.5	0	0	1000	120
		18	3.6	0	0	1000	120

În mod similar, la realizarea planului experimental aferent cercetărilor avansate s-a aplicat un plan factorial complet cu două niveluri și cu câte două repetări la centru (Tabel 5.3.4).

	Tuber 5.5.1. Trainfibured experimentation available						
				Vari	abile	Var	riabile
Cod				indepe	endente	independente	
cou	Poziția plăcilor	Nr.	Cod	nor	nate	naturale	
sudotă	componente ale structurii sudate	exp.	exp.	Turatia	Viteza	Turația,	Viteza de
sudata				Turația,	de	n	avans, w
				11	avans, w	[rpm]	[mm/min]
		19	4.1	-1	-1	650	60
	AA7075 AA6061 AA2024	20	4.2	1	-1	1100	60
Structura 4		21	4.3	-1	1	650	100
		22	4.4	1	1	1100	100
		23	4.5	0	0	845	80
		24	4.6	0	0	845	80

Т	abel 5.	3.4.	Planificarea	exp	erimentulu	i avansat

Tabel 5.3.3 Planificarea experimentelor preliminare

Planificarea dezvoltării modelului numeric

Pentru modelarea numerică a procesului FSW se va utiliza modulul software ABAQUS 6.13/ Explicit deoarece, pe de o parte, acesta este disponibil în cadrul Laboratorului Fabricație de la Universitatea din Pitești și, pe de altă parte, acesta este unul frecvent utilizat pentru simularea prin metoda elementelor finite a proceselor FSW [B07].

Tehnica pentru realizarea modelului numeric se adoptă a fi CEL (Coupled Eulerian-Lagrangian), deoarece poate estima deformările mari, distribuția materialului și posibilele goluri sau alte defecte generate de-a lungul cordonului de sudură în timpul procesului FSW (v. § 3.1). Astfel, modelul numeric va avea caracteristicile geometrice ale elementului activ rotitor și proprietățile celor trei materiale, iar poziționarea plăcilor din aliaj de aluminiu în structura de îmbinat va fi identică cu poziția din cercetările experimentale. Valorile parametrilor tehnologici vor fi cele pentru care, în cadrul cercetărilor experimentale, s-a realizat un cordon de sudură fără defecte și cu proprietăți mecanice corespunzătoare.

Capitolul 6. Elemente ale sistemului de cercetare experimentală pentru sudarea prin frecare cu element activ rotitor a unor structuri din aliaje de aluminiu diferite

6.2. Standul experimental și caracteristicile de proces măsurate în timp real

<u>Standul experimental</u> este format din mașina de sudare FSW 4-10, dispozitivul de orientare și fixare a pieselor de sudat, elementul activ rotitor de sudare, dispozitivul de prindere a elementului activ rotitor de sudare și sistemul de achiziție, monitorizare și înregistrare a datelor generate în timpul procesului de sudare (Fig. 6.2.1) [B07, B10, B11, B12, G06].





1a – Motorul și axul utilajului de sudare FSW 4-10;

- 1b Panoul de comandă al utilajului FSW 4-10;
- 2a, b Dispozitiv de prindere (a) a elementului activ rotitor de sudare (b);
 - 3 Dispozitiv de fixare și orientare a pieselor de sudat;
- 4a, b Camera termografică cu infraroșu FLIR A40M (a) și manipulatorul pentru fixarea și reglarea camerei în poziția de lucru (b);
 - 4c Captor de forță cu traductor de forță de tip AM (0 20 kN);
 - 5 Laptop utilizat la achiziția datelor.

Fig. 6.2.1. Standul experimental: a) vedere frontală; b) vedere laterală

Dispozitivul de orientare și fixare a pieselor de sudat, proiectat și realizat pentru a facilita orientarea și fixarea rapidă a pieselor de sudat.

Procedeul de sudare FSW este monitorizat permanent pe parcursul realizării cordonului de sudură. Caracteristicile de proces înregistrate în timpul procesului de sudare sunt: temperatura de proces, din zona îmbinării, și forța axială de proces, respectiv, forța exercitată asupra elementului activ rotitor de sudare după direcția axei de rotație.

<u>Temperatura de proces</u> se măsoară cu o cameră termografică în infraroșu FLIR A40M. Camera termografică este poziționată în sistemul de lucru (Fig. 6.2.4) [B06, B07, B11, B12] și reglată astfel încât să măsoare și să înregistreze temperatura imediat în spatele elementului activ rotitor, pe mijlocul cordonului de sudură.

<u>Forța axială de proces</u> a fost măsurată cu un captor cu traductor de forță de compresiune WIKA, model F1211, cu plaja de lucru 0 - 20 kN și eroarea relativă de la liniaritate ± 0.3 % F_{nom}, poziționat pe axul principal al utilajului de sudare FSW (Fig. 6.2.7) [B11].



Fig. 6.2.4. Poziția camerei termografice în cadrul standului experimental



Fig. 6.2.7. Poziția captorului de forță în cadrul standului experimental

	Teză de	Partea a II-a. Contribuții la cercetarea teoretico – experimentală și	DOSNEACE And
UPD, UDIT	doctorat	modelarea numerică a procesului și sistemului de sudare prin frecare	COCODICI)
UPII	*Rezumat*	cu element activ rotitor a unor structuri din aliaje de aluminiu diferite	(OOOOKICI)

6.3. Elementul activ rotitor de sudare

Geometria elementului activ rotitor de sudare are o importanță majoră în realizarea procesului FSW. Aceasta trebuie aleasă astfel încât în timpul realizării procesului elementul activ să fie eficient din punct de vedere termic, respectiv, să producă suficientă căldură și să conducă la realizarea unui amestec cât mai eficace între materialele de îmbinat. De asemenea, materialul din care este realizat trebuie să prezinte duritate ridicată și rezistență la temperaturi mari, astfel încât să aibă o durabilitate cât mai mare (Fig. 6.3.1).





6.4. Definirea și realizarea pieselor de sudat

Toate experimentele s-au realizat utilizând piese prelevate dintr-un singur lot de material, pentru fiecare aliaj în parte. Piesele utilizate la realizarea experimentelor preliminare sunt identice pentru toate cele trei aliaje, având cotele de 250 x 140 x 2 mm. Pentru experimentul avansat s-a decis creșterea cotei de 140 mm la 200 mm. La realizarea pieselor de îmbinat s-a ținut seama de direcția de laminare a plăcilor, astfel încât aceasta să fie paralelă cu direcția cordonului de sudură.

Se menționează că debitarea plăcilor, conform schemelor de croire, s-a realizat la ghilotină pentru a evita deformații termice.

6.5. Definirea și prelevarea epruvetelor pentru caracterizarea structurilor sudate

La realizarea schemei de poziționare a epruvetelor, în cadrul fiecărei structuri sudate, s-au avut în vedere următoarele condiții:

• prima epruvetă să fie la o distanță de minim 50 mm față de punctul de început al cordonului de sudură, deoarece zona de început este relativ instabilă;

• epruvetele specifice unei anumite analize să fie în număr de 2 - 3, din zone diferite ale structurii sudate/ cordonului de sudură, pentru a evalua repetabilitatea caracteristicilor;

• fiecare epruvetă, definită transversal pe cordonul de sudură, să includă median o parte din cordonul de sudură.







Fig. 6.5.2. Caracteristici ale epruvetelor definite în cadrul fiecărei structuri sudate avansate

Forma și dimensiunile epruvetelor au fost definite, inițial, în conformitate cu elemente din standardele specifice sau/și din lucrările de specialitate studiate [S18, S19] (v. și § 2.2 și 2.4), după cum se prezintă în Fig. 6.5.1. În cadrul cercetărilor preliminare, la pregătirea sistemului de încercare la tracțiune s-a constatat că sunt necesare elemente speciale complexe pentru orientarea și fixarea epruvetelor specifice.

Forma și dimensiunile structurilor sudate avansate sunt după cum se prezintă în Tabelul 5.3.4, iar forma, unele dimensiuni, poziția și numărul epruvetelor definite și utilizate din cadrul fiecărei structuri sudate avansate sunt după cum se prezintă în Fig. 6.5.2 [C17, G06].

Debitarea epruvetelor din plăcile îmbinate s-a realizat pe o mașină de tăiere cu jet de apă cu comandă numerică, pentru a nu afecta proprietățile cordonului de sudură.

6.7. Pregătirea epruvetelor

Pregătirea epruvetelor specifice pentru analizele macroscopică, microscopică și microduritate

Șlefuirea epruvetelor s-a realizat cu hârtie metalografică acoperită cu particule de carbură de siliciu, de 5 granulații diferite, utilizate descrescător până la atingerea unui rezultat satisfăcător (de la P320 până la P3000). Hârtia metalografică utilizată este standardizată conform scării FEPA (Federation of European Producers of Abrasives), scară utilizată preponderent în Europa.



Fig. 6.7.2. Mașină de șlefuit cu două platane Minitech 263

După șlefuire, a urmat operația de lustruire, pentru a realiza suprafețe plane, cu luciu. Lustruirea s-a realizat pe aceeași mașină Minitech 263 (Fig. 6.7.2), iar hârtia metalografică a fost înlocuită cu piele de căprioară și agent de lustruire de tip alumină (Al₂O₃) cu grad de finețe 3.

După șlefuire și lustruire s-a realizat atacul chimic, cu scopul principal de a evidenția constituenți structurali ai celor trei aliaje pentru analiza macrostructurală și microstructurală a cordonului de sudură. Reactivul utilizat a fost acidul fluorhidric (HF), aplicat prin tamponare timp de 15 – 20 de secunde, după care epruveta s-a spălat sub jet de apă până când aceasta și-a pierdut luciul și a devenit mată.

Pregătirea epruvetelor specifice pentru încercarea la tracțiune

Epruvetele pentru încercarea la tracțiune în cadrul cercetărilor avansate, de tip *halteră*, în număr de patru la fiecare structură sudată, după prelevare (v. § 6.5 și Fig. 6.7.4), au fost prelucrate prin frezare pe ambele părți, respectiv, la o lățime a zonei calibrate de 15 mm (Fig. 6.7.5), astfel încât forma și dimensiunile sunt în conformitate cu prevederile SR EN ISO 6892-1 [S18].









Epruvetele pentru încercările de tracțiune la care s-a utilizat și metoda corelării digitale a imaginilor, DIC, (Digital Image Correlation) [C17, S20] au necesitat pregătiri suplimentare, respectiv: șlefuirea suprafețelor de interes cu hârtie abrazivă de granulație medie; curățarea cu acetonă a suprafețelor de interes; delimitarea suprafețelor de interes cu bandă adezivă; vopsirea suprafețelor de interes în alb, cu vopsea mată pentru a nu influența calitatea imaginilor; stropirea suprafețelor de interes cu o vopsea neagră pentru a crea *puncte pistrui* (prin contrast); dezlipirea benzii adezive fără a deteriora suprafețele codată.

	Teză de	Partea a II-a. Contribuții la cercetarea teoretico – experimentală și	DOSNEACE A
UFD,	doctorat	modelarea numerică a procesului și sistemului de sudare prin frecare	COCODICI)
UPII	*Rezumat*	cu element activ rotitor a unor structuri din aliaje de aluminiu diferite	(GOGORIC.

6.8. Măsurarea rugozității cordonului de sudură

Pentru măsurarea rugozității cordonului de sudură s-a utilizat un rugozimetru digital, portabil, de tip MAHR PS-10 (Fig. 6.8.1). Epruvetele pentru măsurarea rugozității cordonului de sudură au fost definite, prelevate - din trei zone specifice - și pregătite după cum se prezintă în § 6.5, § 6.6 și § 6.7.1. Practic, de pe fiecare epruvetă/ zonă s-au înregistrat câte trei valori ale rugozității

6.9. Analizele macroscopică și microscopică

Analiza macroscopică s-a realizat prin intermediul unui microscop metalografic de tip OPTIKA ITALY (Fig. 6.9.1), iar analiza microscopică – cu un microscop metalografic adaptat pentru examinarea metalelor, cu capacitate de mărire de până la 500x, de tipul OLYMPUS BX51M (Fig. 6.9.2).

6.10. Măsurarea microdurității

Pentru evaluarea și analiza microdurității s-a utilizat metoda Vickers [V03]. Determinările s-au realizat pe un microdurimetru de tip INNOVATEST FALCON 500 (Fig. 6.10.1).

Valorile microdurității Vickers s-au determinat în secțiune transversală, cu o sarcină de 2,94 N (300 gf) și o durată de penetrare de 10 secunde. Profilul de microduritate este determinat prin măsurători realizate în 33 de puncte dispuse pe trei filiații separate, aferente fiecărei piese din structura sudată. Fiecare filiație cuprinde câte 11 puncte poziționate la distanța de 1 mm între ele și simetric față de planul median al cordonului de sudură.

6.11. Încercările la tracțiune

Încercările la tracțiune s-au realizat în cadrul ENSTA Bretagne, pe o mașină hidraulică, de tipul INSTRON 1342, cu o capacitate de 100 kN (Fig. 6.11.1) [C17, G06]. Pentru programarea datelor de intrare și a activităților de lucru, precum și pentru înregistrarea datelor de ieșire sa utilizat soft-ul WaveMatrix (Instron).

Pentru determinarea câmpului de deformații și deformații relative (alungiri și alungiri relative), s-a aplicat metoda Corelării Digitale a Imaginilor, DIC (Digital Image Correlation) [S20], care este o metodă de măsurare optică fără contact (Fig. 6.11.2).



Fig. 6.11.1. Maşină pentru încercarea la tracțiune/ compresiune INSTRON 1342



Fig. 6.11.2. Sistem de lucru pentru încercare la tracțiune și corelare digitală a imaginilor, DIC (Digital Image Correlation)



Fig. 6.8.1. Rugozimetru tip MAHR PS-10



Fig. 6.9.1. Microscop metalografic OPTIKA ITALY

Ana

Fig. 6.9.2. Microscop metalografic OLYMPUS BX51M

Fig. 6.10.1. Microdurimetru INNOVATEST FALCON 500

Capitolul 7. Rezultate ale cercetării teoretico – experimentale preliminare privind procesul și sistemul de sudare prin frecare cu element activ rotitor a unor structuri din aliaje de aluminiu diferite

Rezultate ale cercetării teoretico – experimentale preliminare privind procesul și sistemul de sudare prin frecare cu element activ rotitor a unor structuri din aliaje de aluminiu diferite, care includ și elemente publicate ale autorului [B06, B10, B11, B12], se prezintă în cele ce urmează, grupate pe mărimile analizate în timpul cercetării.

7.1. Temperatura de proces

Temperatura de proces este o caracteristică importantă a procesului de sudare FSW (v. § 5.3.1). Temperatura din zona de sudare s-a măsurat în timpul procesului de lucru – etapa de pătrundere și etapa de sudare de-a lungul cordonului de sudură, după cum se prezintă în subcapitolul 6.2.

Pe baza caracteristicilor evoluției temperaturii de proces, se poate determina temperatura de proces medie din zona/ etapa de sudare, T_{med} (Tabelul 7.1.1 și Fig. 7.1.6).

1 4001	raber 7.1.1. Valori ale temperaturn de proces medir un zona/ etapa de sudare								
Fyn	Parametrii t	tehnologici	T _{med} [°C]						
tip	n [rpm]	w [mm/min]	Structura 1	Structura 2	Structura 3				
1	600	70	397	455	506				
2	1400	70	465	505	543				
3	600	170	362	441	520				
4	1400	170	371	494	550				
5	1000	120	345	468	524				
6	1000	120	419	481	539				

Tabel 7.1.1. Valori ale temperaturii de proces medii din zona/ etapa de sudare

Analiza evoluției temperaturii și a temperaturii medii (Tabel 7.1.1 și Fig. 7.1.6) din timpul procesului de sudare evidențiază o serie de dependențe. Se subliniază cele ce urmează.

• Temperatura de proces este influențată direct de către structura îmbinată, prin caracteristicile aliajului de aluminiu poziționat în partea superioară a structurii, respectiv, la aceleași valori ale parametrilor tehnologici n și w: structura 1, la care în partea superioară este poziționat aliajul cu temperatura de topire minimă, AA2024, generează temperaturi de proces minime; structura 2, la care în partea superioară este poziționat aliajul cu temperatura de topire medie, AA6061, generează temperaturi de proces medii; structura 3, la care în partea superioară este poziționat aliajul cu temperatura de topire maximă, AA7075, generează temperaturi de proces maxime [B10];

Fig. 7.1.6. Temperatura de proces medie din zona/ etapa de sudare, T_{med}, în funcție de n și w

	Teză de	Partea a II-a. Contribuții la cercetarea teoretico – experimentală și	POSNEAGE And
UFD, UDIT	doctorat	modelarea numerică a procesului și sistemului de sudare prin frecare	COCODICI)
UPII	*Rezumat*	cu element activ rotitor a unor structuri din aliaje de aluminiu diferite	(GOGORICI)

• Turația influențează direct proporțional temperatura de proces (Tabel 7.1.1 și Fig. 7.1.6) [B06, B11, B12];

• Viteza de avans are o influență mică asupra temperaturii de proces, în corelație și cu proprietățile aliajului poziționat în partea superioară a structurii analizate. Astfel, pentru structura 1 – AA2024 în partea superioară și structura 2 – AA6061 în partea superioară, creșterea vitezei de avans generează o scădere a temperaturii medii din zona/ etapa de sudare, iar pentru structura 3 – AA7075 în partea superioară, creșterea vitezei de avans generează o creștere foarte mică a temperaturii medii din zona/ etapa de sudare, în creșterea cu etapa de sudare (Tabel 7.1.1 și Fig. 7.1.6).

7.2. Forța axială de proces

Forța axială de proces, respectiv, forța exercitată asupra elementului activ rotitor în procesul de sudare după direcția axei de rotație, este o caracteristică importantă a procesului de sudare FSW (v. § 5.3.1). Forța axială de proces s-a măsurat în timpul procesului de lucru – etapa de pătrundere și etapa de sudare de-a lungul cordonului de sudură, după cum se prezintă în subcapitolul 6.2.

Pe baza caracteristicilor evoluției forței axiale de proces, se pot asocia următoarele mărimi:

F_{a max-p} – valoarea maximă a forței axiale caracteristice etapei de pătrundere;

Fa max-s - valoarea maximă a forței axiale caracteristice etapei de sudare;

F_{a med-s} – valoarea medie a forței axiale caracteristice zonei stabilizate de sudare;

d_s – distanța longitudinală, față de punctul de început al cordonului de sudură, până la stabilizarea forței axiale/ procesului.

Valorile acestor mărimi, pentru cele 18 experiențe ale programului de cercetare preliminară, sunt prezentate în Tabel 7.2.1 și, după caz, în Fig. 7.2.6 – 7.2.9.

	Parametrii		F _{a max-p} [kN]		F _{a max-s} [kN]		F _{a med-s} [kN]		d _s [mm]					
Exp. tip	teh	tehnologici		Structura		Structura		Structura		Structura				
	n [rpm]	w [mm/min]	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	600	70	14	16	12,3	14	9,1	12	12,5	8,9	11,5	41	53	53
2	1400	70	11,6	8	11	12,8	8,2	10,5	9,5	7,3	9,9	41	30	25
3	600	170	14,6	16	14,7	11,8	12	15,8	11,2	10,9	15,2	-	157	100
4	1400	170	11,7	11,6	12,5	10,8	12,1	11,7	10,2	10,7	11,4	120	-	10
5	1000	120	11,8	10	12	11,8	9,3	11	11	9,2	10,7	28	18	78
6	1000	120	14,3	11	13	13	10,8	13,8	12,4	9,9	13,2	38	38	88

Tabel 7.2.1. Valori ale mărimilor specifice asociate forței axiale de proces

Fig. 7.2.6. Forța de proces maximă din etapa de pătrundere, Fa max-p, în funcție de n și w

Analiza datelor de mai sus evidențiază o serie de dependențe. Se subliniază cele ce urmează.

• Turația influențează invers proporțional forța axială de proces, respectiv, forțele axiale maxime și medii din zona de sudare (Tabel 7.2.1, Fig. 7.2.6 – 7.2.8) [B11, B12];

• Viteza de avans influențează direct proporțional valorile forțelor axiale de proces [B11]. Excepție o constituie structura 1 la care, în etapa de sudare, forța axială prezintă o scădere pentru o anumită combinație de parametri tehnologici (Tabel 7.2.1, Fig. 7.2.6 – 7.2.8). Scăderea forței axiale poate fi favorizată de gradul de maleabilizare a materialului poziționat în zona superioară a cordonului de sudură;

• Distanța d_s este influențată de perioada de menținere a elementului activ rotitor în etapa de pătrundere în material și de viteza de avans. Menținerea elementului activ în perioada de pătrundere pentru un timp mai mare conduce la stabilizarea mai rapidă a procesului (Tabel 7.2.1 și Fig. 7.2.9) și, asemănător, scăderea vitezei de avans. Aceste influențe sunt justificate prin aceea că, atât creșterea perioadei de menținere a elementului activ rotitor, cât și scăderea vitezei de avans produc o creștere mai rapidă a temperaturii la începutul procesului, respectiv, stabilizarea mai rapidă a acestuia.

7.3. Rugozitatea cordonului de sudură

Rugozitatea cordonului de sudură, caracteristică importantă a acestuia, s-a măsurat după cum se prezintă în subcapitolul 6.8, respectiv, în trei zone specifice ale structurii sudate, pentru toate cele 18 experiențe preliminare. Dependența valorii medii a rugozității Ra față de poziția epruvetei pe cordonul de sudură și de parametrii tehnologici, pentru fiecare structură îmbinată se prezintă, după caz, în Fig. 7.3.2, 7.3.4 și 7.3.6.

Se constată că rugozitatea măsurată este influențată de natura materialului poziționat în contact cu umărul elementului activ rotitor, de adâncimea de pătrundere a elementului activ în structura de îmbinat și de valorile parametrilor tehnologici n și w. Se subliniază cele ce urmează.

• Impactul major asupra valorilor rugozității este produs de materialul poziționat în partea superioară a structurii sudate, în contact direct cu umărul elementului activ: cele mai mici valori ale rugozității (de max. 2,7 μ m) au fost înregistrate la structura 1, la care aliajul AA2024 a fost poziționat în partea superioară a cordonului de sudură, iar cele mai mari valori ale rugozității (de max. 15 μ m) au fost înregistrate la structura 3, la care aliajul AA7075 a fost poziționat în partea superioară a cordonului de sudură, iar cele mai mari valori ale rugozității (de max. 15 μ m) au fost înregistrate la structura 3, la care aliajul AA7075 a fost poziționat în partea superioară a cordonului de sudură (Fig. 7.3.2, 7.3.4 și 7.3.6);

• Variația valorilor rugozității de-a lungul cordonului de sudură este diferită în funcție de structura analizată, respectiv, de materialul poziționat în partea superioară a cordonului de sudură. Structurile 1 au înregistrat o evoluție stabilă de-a lungul cordoanelor de sudură aferente fiecărei experiențe, respectiv, Ra: $1,2 - 2,7 \mu m$. Structurile 2 au prezentat o evoluție descrescătoare a rugozității de-a lungul cordonului de sudură [B12], respectiv, Ra: $10,5 - 0,8 \mu m$, iar structurile 3 au prezentat o evoluție crescătoare în raport cu evoluția cordonului de sudură, respectiv, Ra: $0,9 - 14,7 \mu m$ (Fig. 7.3.2, 7.3.4 și 7.3.6);

• Influența parametrilor tehnologici n și w asupra rugozității cordonului de sudură s-a analizat pentru zona stabilizată a procesului (zona/ epruveta 3) și se constată că aceasta este în funcție de structura analizată. La structura 1, creșterea celor doi parametri tehnologici conduce la scăderea rugozității Ra pe zona 3. Pentru structurile 2 și 3, evoluția rugozității Ra în funcție de parametrii tehnologici nu este relevantă, dar cu o tendință de scădere odată cu creșterea vitezei de avans.

7.4. Macrostructura structurii sudate

Macrostructura structurii sudate, caracteristică importantă a acesteia, s-a analizat după cum se prezintă în subcapitolul 6.9, respectiv, la câte două epruvete prelevate din structura sudată, pentru fiecare din cele 18 experiențe preliminare. De asemenea, s-a realizat și o analiză vizuală a părții superioare a îmbinării. Imagini ale macrostructurii și părții superioare ale îmbinării la structurile 1, 2 și 3 se prezintă în Fig. 7.4.7, 7.4.9, 7.4.14 și 7.4.16.

Fig. 7.4.7. Macrostructura și aspectul vizual ale structurii 1, exp. 1.6: a) epruveta 1.6.1; b) epruveta 1.6.2; A – partea de avans; R – partea de retragere

UPB,
UPITTeză de
doctorat
*Rezumat*Partea a II-a. Contribuții la cercetarea teoretico – experimentală și
modelarea numerică a procesului și sistemului de sudare prin frecare
cu element activ rotitor a unor structuri din aliaje de aluminiu diferiteBOȘNEAG F. Ana
(GOGORICI)

b)

R

Fig. 7.4.9. Macrostructura și aspectul vizual ale structurii 2, exp. 2.2: a) epruveta 2.2.1;
b) partea superioară a îmbinării; A – partea de avans; R – partea de retragere

Fig. 7.4.14. Macrostructura și aspectul vizual ale structurii 3, exp. 3.1: a) epruveta 3.1.1; b) epruveta 3.1.2; A – partea de avans; R – partea de retragere

b)

A

Fig. 7.4.16. Macrostructura și aspectul vizual ale structurii 3, exp. 3.3: a) epruveta 3.3.1; b) epruveta 3.3.2; A – partea de avans; R – partea de retragere

Analiza macrostructurală a structurilor sudate 1, 2, 3 evidențiază cele ce urmează.

• Structura 3 (AA7075 – AA2024 – AA6061) este acea la care s-au înregistrat cele mai puține defecte. Acest lucru este datorat, pe de o parte poziționării aliajelor AA7075 și AA2024 în contact, în partea superioară, în zona prin care elementul activ de sudare pătrunde în totalitate și, pe de altă parte, compatibilității celor două materiale [B10]. Pentru aliajul poziționat în zona inferioară, elementul activ rotitor pătrunde în proporție de 70 – 80 %, astfel încât, cantitatea de material dislocată și mixată cu celelalte două este mai mică. De asemenea, poziționarea aliajului AA7075 în partea superioară a condus la evitarea apariției defectelor de tip bavură;

• Parametrii tehnologici au influențat diferit caracteristicile macrostructurale ale îmbinărilor sudate:

- la structura 1, cele mai bune rezultate sunt în zona valorilor medii ale celor doi parametri tehnologici, dar atât creșterea vitezei de avans, cât și creșterea turației influențează în mod negativ aspectul macrostructural al cordonului de sudură;
- la structura 2, cele mai bune rezultate sunt la limita superioară a turației și limita inferioară a vitezei de avans; s-a identificat cel mai mare număr de experiențe care generează defecte; o cauză a numărului mare de defecte poate fi alăturarea aliajelor AA6061 și AA7075 în zona superioară a structurii;
- la structura 3, cele mai bune rezultate sunt realizate la valoarea minimă a turației, dar creșterea turației elementului activ rotitor influențează în mod negativ aspectul macrostructural al cordonului de sudură [B11];

	Teză de	Partea a II-a. Contribuții la cercetarea teoretico – experimentală și	POSNEACE And
UFD, UDIT	doctorat	modelarea numerică a procesului și sistemului de sudare prin frecare	COCOPICI)
UPII	*Rezumat*	cu element activ rotitor a unor structuri din aliaje de aluminiu diferite	(GOGORICI)

• Toate experiențele în care s-au utilizat simultan valori maxime ale parametrilor tehnologici, respectiv, n = 1400 rpm și w = 170 mm/min, au condus la structuri cu defecte majore de tip canal, fisură etc.

7.5. Microstructura cordonului de sudură

Microstructura cordonului de sudură, caracteristică importantă a acestuia, s-a analizat după cum se prezintă în subcapitolul 6.9, respectiv, la câte o epruvetă din fiecare structură sudată, prin selectare dintre epruvetele la care s-au înregistrat cele mai puține defecte macrostructurale, pe baza concluziilor desprinse în subcapitolul 7.4 (Fig. 7.5.4 și Fig. 7.5.5).

Fig. 7.5.4. Microstructura epruvetei 3.1.1 (structura 3/ AA7075 – AA2024 – AA6061): a), b), c) și d) fluaj în zona de sudură; e) și f) fluaj în zona afectată termic și mecanic; g), h) și i) defecte în zona îmbinării; A – partea de avans; R – partea de retragere

Fig. 7.5.5. Microstructura epruvetei 3.3.1 (structura 3/ AA7075 – AA2024 – AA6061): a) și b) fluaj în zona de sudură; c), d), e) și f) fluaj în zona afectată termic și mecanic; g) defecte în zona îmbinării; A – partea de avans; R – partea de retragere

Din analiza realizată în legatură cu microstructura îmbinărilor sudate, se pot desprinde următoarele concluzii:

• La structura 3, pentru n și w de valori minime (exp. 3.1), se realizează gradul maxim de mixare a celor trei aliaje, o zonă de sudură bine definită, simetrică atât pe partea de avans cât și pe partea de retragere, cu cea mai mică rată de defecte;

• Toate cele patru epruvete analizate prezintă un fluaj bine evidențiat între cele trei aliaje de aluminiu, cu limite de delimitare dintre materiale, fapt ce confirmă imposibilitatea amestecării acestora la nivel molecular, din cauza temperaturii insuficient de ridicate în timpul procesului;

• Poziția defectelor variază în cordonul de sudură în funcție de structura îmbinată, respectiv, de poziția materialelor de sudat în cadrul acesteia; dacă aliajul AA2024 este poziționat în partea inferioară, defectele apar predominant în zona inferioară, iar când acest aliaj ocupă poziția superioară sau de mijloc, defectele apar în zona superioară a cordonului de sudură.

7.6. Microduritatea cordonului de sudură

Microduritatea cordonului de sudură, caracteristică importantă a						
acestuia, s-a analizat după cum se prezintă în subcapitolul 6.10,						
respectiv, la câte două epruvete din fiecare structură sudată/						
experiență - pentru a evidenția evoluția microdurității de-a						
lungul cordonului de sudură. În aceleași condiții de lucru, pentru						
analize comparative, microduritatea s-a măsurat și în zone						
adiacente cordonului de sudură, precum și la materialele de bază.						

Tabel 7.6.1. Valorile medii ale microdurității materialelor de bază

Material de bază	Media microdurităților [HV 0.3]
AA2024	141,3
AA6061	41,1
AA7075	188.8

Se menționează că în zonele cu defecte ale îmbinării nu au fost efectuate măsurări de microduritate.

Microduritatea materialelor de bază – AA2024, AA6061 și AA7075 – se prezintă în Tabelul 7.6.1.Microduritatea materialelor de bază și evoluția microdurității zonei care cuprinde cordonul de sudură se prezintă în Fig. 7.6.8, 7.6.10, 7.6.14 și 7.6.16.

Fig. 7.6.8. Variația microdurității la: c) epruveta 1.6.1; d) epruveta 1.6.2; A – partea de avans; R – partea de retragere (exp. 1.5 și 1.6: n = 1000 rpm, w = 120 mm/min, structura 1/ AA2024 – AA6061 – AA7075)

Fig. 7.6.10. Variația microdurității la: a) epruveta 2.2.1; b) epruveta 2.2.2; A – partea de avans; R – partea de retragere (exp. 2.2: n = 1400 rpm, w = 70 mm/min, structura 2/ AA6061 – AA7075 – AA2024)

Fig. 7.6.14. Variația microdurității la: a) epruveta 3.1.1; b) epruveta 3.1.2; A – partea de avans; R – partea de retragere (exp. 3.1: n = 600 rpm, w = 70 mm/min, structura 3/ AA7075 – AA2024 – AA6061)

Fig. 7.6.16. Variația microdurității la: a) epruveta 3.3.1; b) epruveta 3.3.2; A – partea de avans; R – partea de retragere (exp. 3.3: n = 600 rpm, w = 170 mm/min, structura 3/ AA7075 – AA2024 – AA6061)

Valorile medii ale microdurităților structurilor sudate analizate sunt după cum se prezintă în Tabelul 7.6.2.

Material/	Valori medii ale microdurității [HV 0.3]					
	Material	Structura 1	Structura 2	Structura 3		
1 maçıc	de bază	(AA2024 - AA6061 - A7075)	(AA6061-AA7075-AA2024)	(AA7075 - AA2024 - A6061)		
AA2024	141,3	102,6	115,9	100		
AA6061	41,1	77,5	72,2	87		
AA7075	188,8	132	106,6	125,3		

Tabel 7.6.2. Valorile medii ale microdurităților structurilor sudate analizate

Cea mai mare omogenitate a valorilor microdurității se constată la structura 3, ceea ce poate fi explicat prin aceea că aceasta prezintă cel mai bun grad de mixare a celor trei materiale și cel mai mic număr de defecte [B10].

Capitolul 8. Rezultate ale cercetării teoretico – experimentale avansate privind procesul și sistemul de sudare prin frecare cu element activ rotitor a unor structuri din aliaje de aluminiu diferite

Rezultate ale cercetării teoretico – experimentale avansate și modelării numerice privind procesul și sistemul de sudare prin frecare cu element activ rotitor a unor structuri din aliaje de aluminiu diferite, care includ și elemente publicate ale autorului [C17, G06], se prezintă în cele ce urmează, grupate pe mărimile analizate în timpul cercetării.

8.1. Programul experimental avansat

Cercetările teoretico – experimentale avansate au la bază elementele de referință metodologice și ale sistemului de cercetare experimentală, precum și elemente desprinse din desfășurarea și analiza rezultatelor principale ale cercetărilor teoretico – experimentale preliminare (v. capitolele 5, 6, 7).

Structura de sudat

Pe baza concluziilor desprinse în urma efectuării cercetărilor teoretico – experimentale preliminare, conform cărora structura 3 (AA7075 – AA2024 – AA6061) prezintă cel mai bun grad de mixare a materialelor, cu efecte favorabile asupra proprietăților structurii, cercetările teoretico – experimentale avansate s-au realizat pe o singură structură, și anume structura 4/ AA7075 – AA2024 – AA6061 (Tabel 5.3.4), în cadrul căreia plăcile/ piesele componente sunt suprapuse total, comparativ cu structura 3, ale cărei piese/ plăci componente – din aceleași materiale și cu aceeași poziționare – sunt suprapuse parțial.

<u>Caracteristicile procesului de sudare</u> sunt temperatura de proces și forța axială de proces.

<u>Caracteristicile structurii sudate</u> analizate sunt: rugozitatea, macrostructura, microstructura, microduritatea, rezistența la tracțiune și alungirea relativă la rupere.

8.2. Temperatura de proces și forța axială de proces

Pe baza caracteristicilor evoluțiilor temperaturii de proces, se poate determina temperatura de proces medie din zona/ etapa de sudare, T_{med} (v. § 7.1), care se prezintă în Tabelul 8.2.1 și Fig. 8.2.6.

Pe baza caracteristicilor evoluției forței axiale de proces, se pot asocia mărimile $F_{a max-p}$, $F_{a max-s}$, $F_{a max-s}$, $F_{a max-s}$, G_{s} (v. § 7.2), care se prezintă în Tabelul 8.2.1 și Fig. 8.2.7 – 8.2.10.

	Teză de	Partea a II-a. Contribuții la cercetarea teoretico – experimentală și	DOSNEACE And
UPD,	doctorat	modelarea numerică a procesului și sistemului de sudare prin frecare	COCODICI)
UPII	*Rezumat*	cu element activ rotitor a unor structuri din aliaje de aluminiu diferite	(GOOOKICI)

Tabel 8.2.1.	Valori ale mărimil	or specifice	asociate temp	eraturii de proces
	din zor	na/ etapa de s	udare și forțe	i axiale de proces

Cod	Parametrii t	T _{med}	F _{a max-p}	F _{a max-s}	Fa med-s	ds	
exp.	n [rpm]	w [mm/min]	[°C]	[kN]	[kN]	[kN]	[mm]
4.1	650	60	460	11,8	11,6	11	43
4.2	1100	60	490	8,9	9,5	8,9	93
4.3	650	100	470	12,3	12,4	12	36
4.4	1100	100	505	10	9,7	9	36
4.5	845	80	475	10,7	12	11,5	48
4.6	845	80	480	10,5	12,2	11,9	55

Structura 4

Exp. 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 și 4.6

Structura 4

Exp. 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 si 4.6

Fig. 8.2.6. Temperatura de proces medie din zona/ etapa de sudare, T_{med} , în funcție de n și w

 $F_{a \text{ max-p}}$, în funcție de n și w

Structura 4

Fig. 8.2.8. Forța de proces maximă din etapa de sudare, F_a max-s, în funcție de n și w

Structura 4

Exp. 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 și 4.6

Fig. 8.2.9. Forta de proces medie din zona de sudare stabilizată, Fa med-s, în funcție de n și w

Fig. 8.2.10. Distanța până la stabilizarea forței axiale, d_s, în funcție de n și w

Analiza datelor evidențiază o serie de dependențe. Se subliniază cele ce urmează.

• Cresterea turatiei elementului activ rotitor conduce la cresterea temperaturii din timpul procesului si, implicit, la scăderea forței axiale de proces (Tabel 8.2.1 și Fig. 8.2.6 - 8.2.9);

• Viteza de avans influențează direct proporțional, într-o măsură mai mică față de turație, temperatura de proces (Tabel 8.2.1 și Fig. 8.2.6). De asemenea, creșterea vitezei de avans conduce la creșterea forței axiale de proces (Tabel 8.2.1 și Fig. 8.2.7 - 8.2.9). Cea mai mare valoare a forței axiale din timpul procesului a fost atinsă la exp. 4.3, unde parametrii tehnologici au fost: turatia de valoare minimă si viteza de avans de valoare maximă:

• Parametrul tehnologic cu cea mai mare pondere asupra caracteristicilor de proces este turația: la o creștere cu 70 % a turației, temperatura din timpul procesului a crescut cu aproximativ 7 %, iar forța axială de proces maximă scade cu 22 %;

• Distanța de stabilizare a procesului, d_s, este dependentă de: parametrii tehnologici, n și w, precum și de perioada de mentinere a elementului activ rotitor în etapa de pătrundere în material. Pentru structura 4, ds crește odată cu creșterea turației n și scade odată cu creșterea vitezei de avans w (Fig. 8.2.10 și Tabel 8.2.1). Se presupune că, cu cât este mai mare perioada de menținere a elementului activ rotitor la sfârșitul etapei de pătrundere fără viteză de avans, cu atât distanța de stabilizare a procesului este mai mică, deoarece se produce o creștere mai rapidă a temperaturii înainte de începutul zonei/ etapei de sudare.

8.3. Rugozitatea cordonului de sudură

Rugozitatea cordonului de sudură s-a măsurat în trei zone specifice fiecărui cordon de sudură, pentru toate cele șase experiențe avansate (v. § 6.8). Dependența valorii medii a rugozității Ra față de poziția epruvetei în cadrul structurii sudate se prezintă, după caz, în Fig. 8.3.2.

Se desprind următoarele concluzii:

 creșterea turației elementului activ rotitor și scăderea vitezei de avans conduc la o ușoară scădere a rugozității; diferența dintre valorile maximă și minimă ale rugozității pe zona 3 analizată este de 1,8 μm;

Fig. 8.3.2. Valorile medii ale rugozității la structura 4

• evoluția valorilor rugozității de-a lungul cordonului de sudură are tendința de stabilizare de-a lungul îmbinării, cu tendință descrescătoare pentru cele mai multe experiențe – 4.2, 4.4, 4.5 și 4.6 (Fig. 8.3.2). Pentru toate cordoanele de sudură, realizate cu diferiți parametri tehnologici, valoarea medie generală a rugozității este de aproximativ 8,5 μm.

8.4. Macrostructura îmbinării sudate

Macrostructura îmbinării sudate s-a analizat în două zone ale fiecărui cordon de sudură (§ 6.9), respectiv, la cele două epruvete de la fiecare din cele șase experiențe avansate, cu mențiunea că epruvetele din structura sudată la exp. 4.3 sunt decalate cu 40 mm către zona de start a îmbinării, din cauză că elementul activ rotitor a cedat în timpul realizării procesului (Fig. 8.4.4).

Fig. 8.4.4. Macrostructura și aspectul vizual ale structurii 4, exp. 4.3: a) epruveta 4.3.1; b) epruveta 4.3.2;
c) partea superioară a îmbinării; A – partea de avans; R – partea de retragere

Analiza macrostructurii îmbinării 4 evidențiază cele ce urmează.

• Defectele de tip bavură lipsesc de la structura 4, ceea ce se poate explica prin poziționarea în partea superioară a structurii a materialului AA7075 (materialul cu duritatea mai mare), în contact direct cu umărul sculei;

• Creșterea vitezei de avans diminuează rata de apariție a defectelor în secțiunea cordoanelor de sudură. Prin compararea macrostructurii îmbinărilor generate la experiențele realizate cu viteza de avans de 60 mm/min cu macrostructura îmbinărilor generate în experiențele realizate cu 100 mm/min (Fig. 8.4.4) se constată o îmbunătățire a aspectului macrostructural și o diminuare a numărului de defecte (Tabel 8.4.1);

• Creșterea turației îmbunătățește forma și aspectul nucleului cordonului de sudură, dar în același timp conduce și la apariția de defecte, preponderent în zona superioară a îmbinării. Experiențele cu turația de 650 rpm conduc la cea mai mică pondere de defecte în secțiunea cordonului de sudură (Fig. 8.4.4), iar experiențele cu turația de 1100 rpm conduc la cea mai mare pondere de defecte în secțiunea cordonului de sudură (Tabel 8.4.1).

UPB, UPIT	Teză de doctorat *Rezumat*	Partea a II-a. Contribuții la cercetarea teoretico – experimentală și modelarea numerică a procesului și sistemului de sudare prin frecare cu element activ rotitor a unor structuri din aliaie de aluminiu diferite	BOŞNEAG F. Ana (GOGORICI)
	Rezumat	cu element activ rotitor a unor structuri din anaje de aluminiu diferite	

	Viteza de avans [mm/min]								
		60	80	100					
Turația [rpm]	650	4.1	-	4.3					
	845	_	4.5 4.6	-					
	1100	4.2	-	4.4					

Tabel. 8.4.1. Imagini macroscopice raportate la valorile turației și vitezei de avans

Din cele prezentate anterior, rezultă că o macrostructură mai bună a îmbinărilor este realizată pentru utilizarea parametrilor tehnologici n și w cu valori de 600 – 650 rpm și, respectiv, de 70 – 100 mm/min.

8.5. Microstructura cordonului de sudură

Microstructura îmbinării 4 s-a analizat la epruveta cu cele mai puține defecte macrostructurale, respectiv, epruveta 4.3.1 - aferentă exp. 4.3/n = 650 rpm și w = 100 mm/min, pe baza concluziilor desprinse din subcapitolele 7.5 și 8.4. Elemente caracteristice ale microstructurii epruvetei 4.3.1 (Fig. 8.5.2) sunt după cum urmează.

• Gradul de mixare a celor trei materiale în zona de sudură este la un nivel mediu, acesta se încadrează între cel realizat la exp. 3.3 (Fig. 7.5.5), n = 600 rpm și w = 170 mm/min, și cel realizat la exp. 3.1 (Fig. 7.5.4), n = 600 rpm și w = 70 mm/min. Se constată că scăderea vitezei de avans, până la o anumită valoare, îmbunătățește gradul de mixare a materialelor în zona de sudură a îmbinării, după care aceasta poate facilita apariția defectelor (Tabel 8.4.1);

• Fluajul dintre cele trei aliaje îmbinate este bine realizat, dar cu evidențierea limitelor dintre materialele diferite. Similar cu structurile 1, 2, 3, analizate anterior (v. subcapitol 7.5) se confirmă imposibilitatea mixării acestora la nivel molecular (Fig. 8.5.2: a, b, c, d, e, f și g). Căldura generată prin frecare determină înmuierea materialelor și, astfel, fluajul lor, dar temperatura din proces este inferioară temperaturilor de topire ale aliajelor sudate, respectiv, nu este posibilă formarea unor etape noi;

• În zona de sudură (WZ) grăunții sunt fini și echiaxiali, datorită recoacerii de recristalizare determinată de temperatura la care ajunge materialul și a gradului mare de deformare plastică (Fig. 8.5.2: a și b). În zona influențată termomecanic (TMAZ), temperatura nu este suficient de puternică încât să producă recristalizare (Fig. 8.5.2: c și d), respectiv, această zonă este caracterizată de grăunți puternic deformați. În zona influențată termic (HAZ) nu sunt modificări mecanice;

• Zona de apariție a defectelor este poziționată pe partea de avans, la limita dintre materialul median (AA2024) și materialul poziționat în partea inferioară (AA6061). Similar cu structurile 1, 2, 3 (v. subcapitol 7.5), se constată o zonă de apariție a defectelor preponderent pe partea de avans a elementului activ rotitor. Distribuția defectelor pe partea de avans poate fi cauzată de forma pinului elementului activ rotitor – cilindric filetat (Fig. 8.5.2, h; Fig. 7.5.5, g; Fig. 7.5.4: g, h și i) și sensul mișcării de rotație a elementului activ rotitor de sudare; prin această combinație, se deplasează materialul din zona inferioară către zona superioară și din zona de avans (A) a elementului activ rotitor către zona de retragere a acestuia (R);

• Dimensiunea celui mai mare por identificat este de aproximativ 216,5 µm, mai mic față de porii identificați la celelalte experiențe, atât pentru structura 4, cât și pentru structura 3.

Fig. 8.5.2. Microstructura epruvetei 4.3.1 (structura 4/ AA7075 – AA2024 – AA6061):
a) şi b) fluaj în zona de sudură; c) şi d) fluaj în zona afectată termic şi mecanic; e), f) şi g) limitele dintre cele trei materiale; h) defecte în zona îmbinării; A – partea de avans; R – partea de retragere

8.6. Microduritatea cordonului de sudură

Microduritatea cordonului de sudură s-a analizat în două zone ale fiecărui cordon de sudură (§ 7.6), respectiv, la cele două epruvete de la fiecare din cele șase experiențe avansate – pentru a evidenția evoluția microdurității de-a lungul cordonului de sudură, cu mențiunea că epruvetele din structura sudată la exp. 4.3 sunt decalate cu 40 mm către zona de start a îmbinării (v. subcapitol 8.4).

Microduritatea materialelor de bază și evoluția microdurității zonei care cuprinde cordonul de sudură se prezintă în Fig. 8.6.4, cu mențiunea că valorile microdurității materialelor de bază sunt cele prezentate în subcapitolul 7.6.

Analiza datelor referitoare la microduritatea structurii 4 evidențiază cele ce urmează.

• Filiațiile de microduritate (F1, F2, F3) au fost complete la epruveta 4.3.1 (Fig. 8.6.4), la care s-au constatat un grad superior de mixare a celor trei materiale și un număr redus de defecte, în condițiile turației elementului activ rotitor de valoare minimă și vitezei de avans de valoare maximă (exp. 4.3/ n = 650 rpm, w = 100 mm/min);

UPB, UPIT	Teză de	Partea a II-a. Contribuții la cercetarea teoretico – experimentală și	DOSNEACE And	
	doctorat	modelarea numerică a procesului și sistemului de sudare prin frecare	(GOGORICI)	
	Rezumat	cu element activ rotitor a unor structuri din aliaje de aluminiu diferite		

• Microduritatea se stabilizează în lungul cordonului de sudură, odată cu îndepărtarea elementului activ rotitor de startul îmbinării, urmare a îmbunătățirii gradului de mixare a materialelor și micșorării numărului de defecte din cordonul de sudură (epruvetele x.x.2 din cadrul fiecărei experiențe);

• Valorile microdurității din filiația realizată pe materialul poziționat în partea superioară a îmbinării (AA7075) sunt mai mici cu aproximativ 21 % decât valorile microdurității materialului de bază AA7075. Această scădere se datorează, în special, temperaturii ridicate înregistrate în această zonă a structurii în timpul procesului și mai puțin mixării mecanice a celor trei materiale, aspect demonstrat de diferențele înregistrate în zona HAZ a cordonului de sudură (poziționată la 5 – 6 mm față de planul median al îmbinării) (Tabel 8.6.1);

• Valorile microdurității din filiația realizată pe materialul poziționat la mijlocul structurii (aliajul AA2024) sunt mai mici cu aproximativ 16 % decât cele ale materialului de bază AA2024. Această scădere se datorează, deopotrivă, creșterii temperaturii din timpul procesului în zona HAZ și mixării mecanice a celor trei aliaje (Tabel 8.6.1);

• Valorile microdurității din filiația realizată pe materialul poziționat în partea inferioară a structurii (aliajul AA6061) sunt mai mari cu aproximativ 19 % decât cele ale materialului de bază AA6061, ca singura filiație care a înregistrat creștere în urma realizării procesului de sudare FSW. Această creștere este datorată, în special, mixării mecanice a celor trei materiale și a unei temperaturi mai scăzute în această zonă în timpul procesului (Tabel 8.6.1).

Cod	Parametrii tehnologici		Tmod	Filiația F1	Filiația F2	Filiația F3
exp	n	W		(AA7075)	(AA2024)	(AA6061)
exp.	[rpm]	[mm/min]	[0]	Microdur	itatea structurii 4	[HV 0.3]
4.1	650	60	460	145,4	115,2	42,1
4.2	1100	60	490	150,6	119,7	59,5
4.3	650	100	470	143,3	113	51,7
4.4	1100	100	505	150,8	125,3	43,6
4.5	845	80	475	150,1	124,1	53,6
4.6	845	80	480	149,3	113,6	42,6
Media valorilor microdurității pentru toate experiențele				148,2	118,5	48,8
Microd	uritate materia	l de bază (v. Tab	188,8	141,3	41,1	
Variația sudate f	a procentuală r față de microdu	nedie a microduri uritatea materialu	- 21 %	- 16 %	+ 19 %	

Tabel 8.6.1. Valori medii ale microdurității în funcție de turație și viteza de avans

8.7. Încercarea la tracțiune a structurii sudate

Încercarea la tracțiune asupra epruvetelor specifice, prelevate din structurile sudate sau din materialele de bază, se efectuează pe baza unor elemente reglementate prin standardul SR EN ISO 6892-1:2010 [S18] sau/și prezentate în tratate de specialitate/ lucrări științifice publicate [R08].

Astfel, pentru a caracteriza comportamentul epruvetelor specifice în perioada încercării la tracțiune, se consideră, după caz, următoarele mărimi:

• aria secțiunii transversale inițiale, S₀, precum și, lungimea inițială dintre două repere asociate părții calibrate a epruvetei, L₀ sau l_0 ;

• timpul, t, ca moment (de timp) sau durată;

• forța de tracțiune, F, precum și forța maximă, F_m , respectiv, valoarea maximă a forței de tracțiune (cea mai mare forță suportată de epruvetă pe parcursul încercării);

• lungimea porțiunii calibrate a epruvetei pe care se măsoară alungirea în orice moment, L sau l, precum și alungirea (extensia) epruvetei, ΔL sau, respectiv, Δl ;

• lungimea de bază a extensometrului, L_e, precum și alungirea sau extensia la rupere, ΔL_f .

Pe baza elementelor de mai sus și a expresiilor de definire, se determină relațiile de dependență și mărimile specifice după cum urmează:

• variația forței de tracțiune, F, în timp, t, precum și forța maximă, F_m , $F = f(t), t \in D_t$ (8.7.1)

 $F_m = \max f(t), t \in D_t$

 $\sigma_v = \sigma(1 + \varepsilon), \ \varepsilon_v = \ln(1 + \varepsilon)$

 $\sigma = \phi(\varepsilon), \varepsilon \in D$

(8.7.2)

(8.7.5)

(8.7.6)

respectiv,

- alungirea epruvetei, ΔL , sau, respectiv, Δl , și anume: $\Delta L = L L_0$, $\Delta l = l l_0$ [mm] (8.7.3)
- tensiunea convențională, σ , și alungirea relativă $\sigma = \frac{F}{S_0}$ [MPa], $\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$ sau $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$ (8.7.4)
- tensiunea reală, σ_v , și alungirea relativă reală, ε_v ,
- tensiunea, σ , în funcție de alungirea relativă, ε ,
- tensiunea reală, σ_v , în funcție de alungirea relativă reală, ε_v , $\sigma_v = \phi_v(\varepsilon_v)$, $\in D_v$, $\varepsilon_v \in D_v$ (8.7.7) respectiv:
- rezistența la tracțiune, R_m , ca tensiunea care corespunde forței $R_m = \frac{F_m}{S_0} [MPa]$ (8.7.8) maxime, F_m , respectiv:
- alungirea/ extensia totală procentuală la rupere, A_t , care, pentru simplificarea exprimării, se va numi, în continuare, alungirea relativă $A_t = \frac{\Delta L_f}{L_e} 100 [\%]$ (8.7.9) la rupere, respectiv:

Se subliniază că, în general, relația ϕ , domeniul de lucru/ definiție D_t etc. depind de o serie de factori, printre care caracteristicile structurale și de legătură ale cuplului cordon de sudură - epruvetă sunt determinante.

În continuare, pentru a evidenția caracteristicile asociate structurilor sudate studiate, corespunzător fiecărui grup de patru epruvete din structura sudată la o experiență: dependențele forță de tracțiune – timp, F - t (rel. 8.7.1), pe același grafic, forțele maxime F_m (rel. 8.7.2) – pe același grafic, poziția epruvetelor în cadrul structurii sudate și, respectiv, imagini captate în timpul încercării la tracțiune, care evidențiază zonele sensibile ale îmbinării care au generat ruperea acesteia, în ordinea ruperii celor trei materiale/ plăci ale structurii sudate [C17, G06].

Fig. 8.7.13. Încercarea la tracțiune a epruvetelor 4.3.1 - 4.3.4: a) dependențele F - t; b) forțele maxime F_m; c) poziția epruvetelor (structura 4/ AA7075 - AA2024 - AA6061, exp. 4.3/n = 650 rpm, w = 100 mm/min)

Din analiza datelor de mai sus, se desprind cele ce urmează.

• În toate încercările realizate, îmbinarea a cedat cu începere din zona defectelor (tunel, pori, nucleu neomogen) din cordonul de sudură, indiferent de poziția acestora – pe partea de avans sau pe partea de retragere a elementului activ rotitor (Fig.8.7.14 – 8.7.16) [G06]. Deoarece aceste defecte sunt localizate preponderent în zona materialului poziționat pe partea superioară a structurii, AA7075 (cu At de valoare minimă), ruperea structurii a început, în majoritatea cazurilor, din zona acestui material. Ruperea structurii a continuat cu ruperea materialului poziționat median, AA2024 (cu At de valoare medie). Ultimul material din structură care a cedat, la toate experiențele, a fost cel poziționat în partea de jos, AA6061 (cu At de valoare maximă);

• Evoluția forței maxime, F_m , a epruvetelor din zona specifică cordonului de sudură nu este similară la toate experiențele realizate: s-a constatat o evoluție descrescătoare a acestei forțe în lungul cordonului de sudură la experiențele 4.1, 4.2 și 4.4 și o evoluție crescătoare la experiențele 4.3, 4.5 și 4.6 (Fig. 8.7.13). Experiențele la care evoluția F_m de-a lungul cordonului de sudură a fost descrescătoare sunt acele experiențe la care se realizează cel mai mare număr de defecte în secțiunea cordonului de sudură. Aceste experiențe au fost realizate cel puțin cu turația de valoare maximă (1000 rpm) sau viteza de avans de valoare minimă (60 mm/min) [C17, G06].

Dependențele F_m medie – n sau/și w, R_m medie – n sau/și w, A_t medie – n sau/și w sunt reprezentate în Fig. 8.7.27, Fig. 8.7.28, respectiv, 8.7.29:

Se evidențiază cele ce urmează.

• Creșterea turației n conduce la scăderea tuturor mărimilor F_m , R_m și A_t , respectiv (Fig. 8.7.27 – Fig. 8.7.29): la experiențele cu cea mai mică valoare a turației (650 rpm) s-au înregistrat cele mai mari valori (Fig. 8.7.13), iar la experiențele cu cea mai mare valoare a turației (1100 rpm) s-au înregistrat cele mai mici valori;

• Creșterea vitezei de avans w conduce la creșterea tuturor mărimilor F_m , R_m și A_t , respectiv (Fig. 8.7.27 – Fig. 8.7.29) [C17]: la experiențele cu cea mai mică valoare a vitezei de avans (60 mm/min) s-au înregistrat valori mai mici, iar la experiențele cu cea mai mare valoare a vitezei de avans (100 mm/min) s-au înregistrat valori mai mari (Fig. 8.7.13);

• Epruvetele cu cele mai bune caracteristici F_m , R_m și A_t sunt epruvetele prelevate din structura sudată la exp. 4.3/ turație minimă și viteză de avans maximă (n = 650 rpm, w = 100 mm/min); proprietățile se îmbunătățesc de-a lungul cordonului de sudură (de la început spre final) [G06] ceea ce este în concordanță cu rezultatele analizei macroscopice, care a evidențiat existența celui mai bun aspect macrostructural și a unui număr minim de defecte (Fig. 8.4.4).

8.8. Studiu de caz privind analiza structurilor sudate prin încercare la tracțiune și corelare digitală a imaginilor

Analiza structurilor sudate prin încercare la tracțiune și corelare digitală a imaginilor, DIC (Digital Image Correlation) permite determinarea caracteristicilor structurilor sudate asociate încercării la tracțiune prezentate în § 8.7, precum și determinarea unor caracteristici de tip dependență tensiune medie reală – alungire relativă medie reală, câmp de deformații, evidențierea acțiunii unor defecte interioare etc.

Astfel, pe baza datelor din timpul încercării la tracțiune a epruvetei 4.3.4 (Fig. 8.7.13), se determină dependențe de tip tensiune medie reală - alungire relativă medie reală, $\overline{\sigma_v}$ - $\overline{\varepsilon_v}$, respectiv,

 $\overline{\sigma_{v}} = f_{v}(\overline{\epsilon_{v}})$

În continuare, în vederea determinării unor caracteristici de tip câmp de deformații, se consideră dependența forță de tracțiune – timp, F – t, asociată epruvetei 4.3.4, t = 0 - 50 s (rel. 8.8.2 și Fig. 8.8.2), respectiv,

$$\mathbf{F} = \mathbf{f}(\mathbf{t}) \ _{4.3.4}, \ \mathbf{t} \in [0; \ 50] \tag{8.8.2}$$

Dependența (rel. 8.8.3) determinată pe baza datelor din timpul încercării la tracțiune a epruvetei 4.3.4 este reprezentată grafic în Fig. 8.8.2 (Fig. 8.7.13, a).

(8.8.1)

Fig. 8.8.2. Dependența forță de tracțiune – timp, F - t, la epruveta 4.3.4; stări (F_i , t_i): 1, 2, ..., 6

De asemenea, se consideră o serie de valori de lucru ale forței de tracțiune F, F_i , din timpul încercării la tracțiune, precum și stările corespunzătoare (F_i , t_i), respectiv:

$$F \in \{ F_i \mid i = \overline{1, 6} \},\$$

$$F_1 = 1 \text{ kN}, F_2 = 2,5 \text{ kN}, F_3 = 5 \text{ kN},\$$

$$F_4 = 7,5 \text{ kN}, F_5 = 8,5 \text{ kN}, F_6 = 10 \text{ kN}$$
(8.8.3)

$$(F_i, t_i) \in f(t)_{4,3,4}, i = 1, 2, ..., 6$$
 (8.8.4)

după cum se prezintă și în Fig. 8.8.2.

Pe baza prelucrării datelor prin corelarea digitală a imaginilor, DIC (Digital Image Correlation), conform rel. 8.8.1 - 8.8.4, s-au determinat câmpurile de deformatii (alungiri relative) pentru zone definite ca parte/ suprafață superioară și parte/ suprafață laterală ale cordonului de sudură/ epruvetei 4.3.4, după cum se prezintă în Fig. 8.8.3 și Tabelul 8.8.1 [C17, G06].

• Părți ale cordonului de sudură/ epruvetei analizate

• Sistem de referință: XYZ

• Dimensiunile zonelor cu puncte – *pistrui:* l₀ = 40 mm, b = 15 mm, e = 6 mm.

UDD	Teză de	Partea a II-a. Contribuții la cercetarea teoretico – experimentală și	BOSNEAGE And
UDIT	doctorat	modelarea numerică a procesului și sistemului de sudare prin frecare	(COCOPICI)
UFII	*Rezumat*	cu element activ rotitor a unor structuri din aliaje de aluminiu diferite	(OOOOKICI)

Tabel 8.8.1. Câmpuri de deformații (alungiri relative), ε_{xx} și ε_{xz} , la epruveta 4.3.4

Analiza acestor câmpuri de deformații evidențiază următoarele:

• Câmpurile de deformații înregistrate pe partea superioară a cordonului de sudură atestă faptul că valorile maxime ale tensiunilor sunt localizate la extremitatea nucleului, zona TMAZ și zona HAZ, dispuse atât pe partea de avans a elementului activ rotitor, cât și pe partea de retragere a acestuia; de asemenea, aceste câmpuri de deformații sunt dispuse longitudinal, de-a lungul cordonului de sudură;

• Din punct de vedere al poziției câmpurilor de deformații în cadrul grosimii structurii sudate, cele mai intense deformații sunt identificate în zona filiației din planul median al îmbinării, respectiv, între materialul poziționat median, AA2024, și materialul poziționat în partea de jos a structurii, AA6061, pe partea de avans a elementului activ rotitor (Fig. 8.5.2).

În raport cu cele prezentate mai sus, se subliniază utilitatea integrării, în încercările de tracțiune, a metodei Corelării Digitale a Imaginilor, DIC (Digital Image Correlation).

Capitolul 9. Modelarea numerică a procesului de sudare prin frecare cu element activ rotitor a unor structuri din aliaje de aluminiu diferite

Rezultate ale modelării numerice privind sudarea prin frecare cu element activ rotitor a unor structuri din aliaje de aluminiu diferite, care includ și elemente publicate ale autorului [B07], se prezintă în cele ce urmează.

9.1. Construirea modelului numeric

Modelul numeric pentru simularea procesului FSW a trei aliaje diferite de aluminiu s-a realizat pentru structura 4/ AA7075 – AA2024 – AA6061 (v. § 5.3.2 și capitol 8), prin metoda CEL (Coupled Eulerian-Lagrangian) și modulul software ABAQUS 6.13/ Explicit (v. § 5.3.3) [B07].

UDD	Teză de	Partea a II-a. Contribuții la cercetarea teoretico – experimentală și	DOSNEACE And
UFD, UDIT	doctorat	modelarea numerică a procesului și sistemului de sudare prin frecare	(GOGORICI)
UPII	*Rezumat*	cu element activ rotitor a unor structuri din aliaje de aluminiu diferite	

La dezvoltarea modelului numeric s-au parcurs etapele specifice: definire a geometriei structurii de sudat și a elementului activ rotitor de sudare; definire a comportamentului celor trei materiale ale structurii de sudat, printr-o lege de comportament; definire a proprietăților elastice și fizice, precum și a transferului de căldură; definire a tipului de contact dintre suprafețele elementelor din sistemul de lucru și a legii de frecare; stabilirea condițiilor la limită și a parametrilor tehnologici; discretizarea modelului.

9.2. Validarea modelului numeric

Validarea modelului numeric s-a realizat prin compararea rezultatelor simulate cu rezultatele înregistrate în timpul procesului, în condiții similare, prin două tehnici diferite, care au la bază compararea temperaturilor (v. § 3.8.1) și, respectiv, compararea aspectului cordonului de sudură (v. § 3.8.4).

Validarea modelului numeric pe baza distribuției temperaturii în cordonul de sudură

La validarea modelului numeric, prin intermediul distribuției temperaturii în cordonul de sudură, respectiv, prin compararea temperaturilor realizate la simulare cu cele înregistrate în timpul procesului, s-au avut în vedere următoarele elemente:

• în timpul procesului de sudare, temperatura a fost măsurată cu o cameră termografică cu infraroșu (v. subcapitol 6.2), cu acces în partea superioară a cordonului de sudură. Deoarece temperaturile atinse în timpul procesului FSW sunt de 70 – 90 % din temperatura de topire a materialelor îmbinate (v. § 1.3), iar materialul poziționat în partea superioară (AA7075) are o temperatură de topire de aproximativ 635 °C, se asteaptă o evolutie a temperaturii pe parcursul procesului de 445 – 572 °C;

• variațiile înregistrate au fost date de faptul că temperatura cea mai ridicată din timpul procesului este întâlnită la interfața dintre elementul activ cu materialele de îmbinat, atât în zona pinului cât și a umărului acestuia, zone care nu sunt accesibile camerei termografice de măsurare a temperaturii.

Pentru analiza temperaturii în modulul software ABAQUS 6.13/ Explicit, a fost utilizată aplicația TEMPMAVG, care interpretează temperatura fiecărui element de discretizare ca o medie ponderată a tuturor valorilor variabile din elementul respectiv.

În etapa de pătrundere a elementului activ în materialele de îmbinat, temperatura simulată a fost analizată ca medie a temperaturilor elementelor de discretizare poziționate în spatele elementului activ, în zona superioară a cordonului de sudură (pentru a reproduce zona înregistrată de camera termografică), la finalul etapei de pătrundere, respectiv, în secunda 4,9 de simulare.

Numărul total de elemente analizate a fost de 57, iar media temperaturilor acestora a avut valoarea de 523 °C. Față de temperatura de 480 °C determinată cu camera termografică la finalul etapei de pătrundere, diferența este de aproximativ 8 % și poate fi explicată prin lipsa, la simularea numerică, a etapei de menținere a elementului activ în materialele de sudat după etapa de pătrundere.

Tabel 9.2.1. Media temperaturilor		
simulate în zona umărului		
elementului activ rotitor		
itia da a lungul	Media	

Poziția de-a lungul cordonului de sudură	temperaturilor simulate [°C]	
5 mm față de start	471	
10 mm față de start	493	
15 mm față de start	532	

Fig. 9.2.4. Variația temperaturii realizate prin simulare numerică

	Teză de	Partea a II-a. Contribuții la cercetarea teoretico – experimentală și	DOSNEAGE And
UFD, UDIT	doctorat	modelarea numerică a procesului și sistemului de sudare prin frecare	GOCOPICI)
UPII	*Rezumat*	cu element activ rotitor a unor structuri din aliaje de aluminiu diferite	(GOGORICI)

Pentru etapa de sudare, evoluția temperaturii a fost determinată în trei zone diferite ale îmbinării, perpendicular pe cordonul de sudură, în partea superioară a acestuia, poziționate la 5 mm, 10 mm și 15 mm față de începutul cordonului de sudură, similar modului de determinare a temperaturii din timpul procesului de sudare. Valorile efective ale temperaturilor simulate pentru toate cele trei zone diferite sunt prezentate în Fig. 9.2.4 și Tabel 9.2.1. Așa cum era de așteptat, în toate cele trei zone, temperatura cea mai mare se află în partea centrală a cordonului de sudură; temperatura crește odată cu apropierea de elementul activ rotitor. Forma curbelor de temperatură este asemănătoare pentru toate cele trei poziții analizate.

Se subliniază că, din punct de vedere al distribuțiilor temperaturilor realizate prin simulare și, respectiv, experimental, nu se evidențiază diferențe mari (Fig. 9.2.5 și Tabel 9.2.2). În ambele etape ale procesului – de pătrundere și respectiv, de sudare – temperaturile medii rezultate prin simulare sunt mai mari decât temperaturile medii experimentale, dar diferențele nu depășesc 8 % (Tabel 9.2.2).

Fig. 9.2.5. Evoluția temperaturii realizate experimental și, respectiv, prin simulare

Tabel 9.2.2. Comparație între temperaturile medii realizate prin simulare și experimental

Etopo	Temperatura medie [°C]		
Ецара	simulată	experimentală	
de pătrundere	523	480	
de sudare	499	475	

Valorile temperaturilor pentru primii 15 mm ai cordonului de sudură (Fig. 9.2.5 și Tabel 9.2.2) rezultate din simularea numerică (a căror medie a fost 499 °C) diferă de cele realizate experimental (a căror medie a fost 475 °C) cu 5,5 % – datorită metodei de măsurare experimentală a temperaturii sau/și ipotezelor la definirea condițiilor de simulare numerică, astfel încât se poate concluziona că modelul numeric este corect [B07].

Validarea modelului numeric pe baza aspectului cordonului de sudură

Această tehnică, deși nu este una din cele mai des întâlnite, poate oferi o direcție cu privire la veridicitatea modelului numeric realizat. Analiza a vizat etapa de pătrundere a elementului activ, etapa de sudare și, respectiv, distribuția defectelor.

În etapa de pătrundere a elementului activ, aspectul suprafeței generate prin simulare este similar aspectului alezajului generat experimental. În etapa de sudare, distribuția materialului maleabilizat la suprafața cordonului de sudură este similară în ambele cazuri (Fig. 9.2.6 și 9.2.7).

Fig. 9.2.6. Aspectul vizual al cordonului de sudură simulat în etapa de pătrundere a elementului activ

Fig. 9.2.7. Aspectul cordonului de sudură realizat experimental în etapa de pătrundere și, respectiv, de retragere a elementului activ

De asemenea, zona de apariție a defectelor este reprezentată de partea de avans a elementului activ în secțiunea cordonului de sudură, atât la simulare cât și în studiul experimental (Fig. 9.2.8 și 9.2.9).

Fig. 9.2.8. Prezența defectelor în secțiunea cordonului de sudură realizat prin simulare

Fig. 9.2.9. Prezența defectelor în secțiunea cordonului de sudură realizat experimental

Deformațiile materialelor apărute în partea de avans a simulării numerice sunt aproximativ similare cu deformațiile apărute în studiul experimental. Diferențele minore sunt date de forma neregulată a cordonului de sudură de-a lungul îmbinării (Fig. 9.2.10 și 9.2.11) [B07].

Fig. 9.2.10. Aspectul cordonului de sudură realizat prin simulare numerică

Fig. 9.2.11. Aspectul vizual al cordonului de sudură realizat experimental

Prin utilizarea a două tehnici diferite de validare, care au la bază compararea temperaturilor și, respectiv, a aspectului cordonului de sudură, modelul numeric realizat a fost validat [B07];

Modelul numeric realizat poate fi îmbunătățit prin utilizarea: unor elemente de discretizare cu dimensiuni mai mici în zona cordonului de sudură și pe adâncimea structurii sudate, a unui element Eulerian care să prezinte o zonă de gol mai generoasă în partea superioară a cordonului de sudură, a unor caracteristici ale celor trei aliaje de aluminiu variabile în funcție de temperatură etc., care, desigur, conduc la creșterea duratei simulării [B07].

Capitolul 10. Concluzii finale și contribuții principale la dezvoltarea și modelarea numerică a procesului și sistemului de sudare cu element activ rotitor a unor structuri din aliaje de aluminiu diferite

(1) Din analiza stadiului actual al cercetării – dezvoltării și al aplicațiilor industriale privind sudarea prin frecare cu element activ rotitor, s-au desprins concluzii importante, care sunt prezentate în capitolul 4.

(2) Pe baza datelor și concluziilor desprinse din analiza stadiului actual al cercetării – dezvoltării și al aplicațiilor industriale, s-au considerat a fi de actualitate direcțiile de cercetare – dezvoltare privind procesele și sistemele de sudare prin frecare cu element activ rotitor a structurilor din materiale diferite după cum se prezintă în § 5.1.

(3) În raport cu stadiul actual și direcțiile de cercetare – dezvoltare privind sudarea prin frecare cu element activ rotitor a structurilor din aliaje de aluminiu, s-a asumat ca obiectiv principal al activității de cercetare – dezvoltare în cadrul doctoratului (v. § 5.2): dezvoltarea procesului și sistemului de sudare prin frecare cu element activ rotitor a unor structuri din aliaje de aluminiu diferite, prin cercetare teoretico – experimentală și modelare numerică.

	Teză de	Partea a II-a. Contribuții la cercetarea teoretico – experimentală și	POSNEACE And
UFD, UDIT	doctorat	modelarea numerică a procesului și sistemului de sudare prin frecare	GOCOPICI)
UPII	*Rezumat*	cu element activ rotitor a unor structuri din aliaje de aluminiu diferite	(GOGORICI)

(4) Concluziile relevante privind activitatea de cercetare și dezvoltare de doctorat pentru atingerea obiectivului său principal, remarcate din cercetările teoretico – experimentale preliminare realizate conform metodologiei de cercetare – dezvoltare (v. § 5.3), sunt după cum urmează.

• Temperatura de proces este influențată direct de caracteristicile aliajului de aluminiu poziționat în partea superioară a structurii sudate, respectiv, cele mai mari temperaturi sunt înregistrate pentru structurile la care aliajul AA7075 este poziționat în partea superioară. Parametrii tehnologici au o influență diferită asupra temperaturii, respectiv: turația influențează direct proporțional temperatura de proces, iar creșterea vitezei de avans determină o creștere nesemnificativă a temperaturii la structura 3 – aliajul AA7075 poziționat în partea superioară, respectiv, scăderea acesteia la structurile 1 și 2 – aliajul AA2024 și, respectiv, aliajul AA6061 poziționat în partea superioară, în funcție de structura analizată (v. § 7.1).

• Forța axială de proces este influențată de către parametrii tehnologici, respectiv: turația influențează invers proporțional, iar viteza de avans – direct proporțional forța axială de proces. Distanța de stabilizare a forței axiale față de punctul de început al cordonului de sudură se micșorează la creșterea perioadei de menținere a elementului activ la sfârșitul etapei de pătrundere, precum și la scăderea vitezei de avans (v. § 7.2).

• Valoarea rugozității este direct influențată de materialul poziționat în partea superioară a structurii sudate. Cele mai mici valori ale rugozității au fost înregistrate pentru structura 1 (AA2024 – poziționat în partea superioară), iar cele mai mari valori ale rugozității au fost înregistrate pentru structura 3 (AA7075 – poziționat în partea superioară). De asemenea, variația valorilor rugozității în funcție de parametrii tehnologici diferă de la o structură la alta, respectiv: la structura 1 creșterea turației și a vitezei de avans conduce la scăderea rugozității, iar la structurile 2 și 3 evoluția rugozității în funcție de parametrii tehnologici este cu o tendință de scădere odată cu creșterea vitezei de avans (v. § 7.3).

• Macrostructura îmbinărilor sudate este influențată, în mare parte, de structura analizată, iar cele mai puține experiențe care au condus la defecte sunt asociate structurii 3 (AA7075 – AA2024 – AA6061). Parametrii tehnologici au influențat diferit caracteristicile macrostructurale, respectiv, la structura 1 - cele mai bune rezultate sunt în zona valorilor medii ale celor doi parametri tehnologici, iar creșterea acestora influențează negativ aspectul macrostructural, la structura 2 - cele mai bune rezultate au fost înregistrate pentru valoarea maximă a turației și valoarea minimă a vitezei de avans, iar la structura 3 - cele mai bune rezultate au fost înregistrate pentru turația de valoare minimă și viteza de avans variabilă (v. § 7.4).

• La nivel microstructural, fluajul dintre cele trei aliaje de aluminiu este bine evidențiat, cu limite de delimitare între materiale, fapt ce confirmă imposibilitatea amestecării acestora la nivel molecular. Cel mai bun amestec al celor trei aliaje și cel mai mic număr de defecte au fost la experiența 3.1, respectiv, la structura 3, cu valorile minime ale parametrilor tehnologici (v. § 7.5).

• Valorile microdurității sunt influențate direct de către macrostructura îmbinării. Cu cât structura sudată prezintă un grad mai mare de mixare a celor trei materiale, cu atât valorile microdurității au o variație mai mare. Variațiile înregistrate de-a lungul filiațiilor celor trei aliaje în cordonul de sudură, în comparație cu valorile microdurităților materialelor de bază, arată că aliajul AA7075 prezintă o scădere semnificativă a valorilor microdurității cauzată, în cea mai mare măsură, de variația termică atinsă în timpul procesului, aliajul AA2024 prezintă o scădere a valorilor microdurității influențată, în egală măsură, atât de către temperatura atinsă în timpul procesului, cât și de gradul de mixare a celor trei aliaje de-a lungul cordonului de sudură, iar aliajul AA6061 prezintă o creștere a valorilor microdurității datorată, în cea mai mare măsură, mixării cu celelalte două aliaje alăturate (v. § 7.6).

(5) Concluziile relevante privind activitatea de cercetare și dezvoltare de doctorat pentru atingerea obiectivului său principal, remarcate din cercetările teoretico – experimentale avansate și simulările numerice realizate conform metodologiei de cercetare – dezvoltare (v. § 5.3), sunt după cum urmează.

 \circ Cercetările teoretico – experimentale avansate s-au realizat pe o singură structură, respectiv, structura 4 – în cadrul căreia plăcile componente sunt suprapuse total, iar materialele – poziționate ca la structura 3 (v. § 8.1).

• Creșterea turației elementului activ rotitor de sudare conduce la creșterea temperaturii de proces și la scăderea forței axiale de proces, iar creșterea vitezei de avans conduce la o creștere nesemnificativă a temperaturii de proces, dar, în același timp, și la o creștere a forței axiale de proces. Distanța de stabilizare a procesului este influențată, în cea mai mare măsură, de către perioada de menținere a elementului activ rotitor la sfârșitul etapei de pătrundere, prin aceea că o perioadă de menținere mai mare produce o creștere mai rapidă a temperaturii (v. § 8.2).

• Rugozitatea cordonului de sudură este influențată de parametrii tehnologici, respectiv: scade la creșterea turației elementului activ rotitor de sudare și la scăderea vitezei de avans. De asemenea, evoluția rugozității de-a lungul cordonului de sudură este stabilă, cu tendință descrescătoare (v. § 8.3).

• Analiza macrostructurală și microstructurală a experiențelor avansate arată că o creștere a turației îmbunătățește forma și aspectul nucleului cordonului de sudură, dar în același timp conduce și la apariția de defecte, iar creșterea vitezei de avans diminuează rata de apariție a defectelor în secțiunea cordonului de sudură.

Experiența 4.3 (turația de 650 rpm și viteza de avans de 100 mm/min) conduce la cel mai mic număr de defecte. De ansamblu, cea mai bună macrostructură a îmbinărilor este realizată pentru parametrii tehnologici n și w de 600 - 650 rpm și, respectiv, 70 - 100 mm/min (v. § 8.4 și 8.5).

• Distribuția și valorile microdurităților în cordonul de sudură sunt influențate direct de macrostructura îmbinării, de gradul de mixare a materialelor, de numărul de defecte din secțiunea cordonului de sudură și de stabilizarea procesului în lungul îmbinării (epruvetele x.x.2). Analiza valorilor microdurităților materialelor sudate în comparație cu microduritățile materialelor de bază arată că la aliajele AA7075 și AA2024 se înregistrează o scădere față de materialele de bază, iar la aliajul AA6061 – o creștere față de materialul de bază (v. § 8.6), similar cu variația înregistrată preliminar (v. § 7.6).

• Proprietățile mecanice - rezistența la tracțiune și alungirea relativă la rupere - ale epruvetelor sudate sunt direct influențate de către parametrii tehnologici ai procesului, respectiv, creșterea turației conduce la scăderea proprietăților mecanice ale îmbinării, iar creșterea vitezei de avans conduce la îmbunătățirea proprietăților mecanice, similar cu rezultatele analizei macrostructurale. Cea mai mare valoare a rezistenței la tracțiune a fost înregistrată la epruvetele cu cel mai bun aspect macrostructural (exp. 4.3), realizat cu turația de valoare minimă (650 rpm) și viteza de avans de valoare maximă (100 mm/min). În comparație cu rezistența la tracțiune a materialelor de bază, valoarea rezultată după sudare este mai mică în cazul aliajelor AA7075 și AA2024, respectiv, mai mare în cazul aliajului AA6061. Alungirea relativă la rupere a tuturor epruvetelor analizate a fost mai mică decât cea a materialelor de bază (v. § 8.7).

 \circ Modelul numeric realizat pe baza metodei CEL simulează experiența 4.3, care a condus la realizarea unei îmbinări cu cele mai bune caracteristici ale structurii sudate. Acest model numeric a fost validat prin comparație, cu rezultatele înregistrate în studiul experimental, a distribuției temperaturilor și a aspectului cordonului de sudură. Din punct de vedere al temperaturilor realizate prin simulare și, respectiv, experimental, diferențele sunt de maximum 8 % – pentru etapa de pătrundere a elementului activ rotitor și de maximum 5,5 % – pentru etapa de sudare; din punct de vedere al aspectului cordonului de sudură, s-au identificat numeroase similitudini. Astfel, s-a considerat că modelul numeric realizat este valid (v. § 9.2).

UDD	Teză de	Partea a II-a. Contribuții la cercetarea teoretico – experimentală și	DOSNEACE And
UFD, UDIT	doctorat	modelarea numerică a procesului și sistemului de sudare prin frecare	COCODICI)
UPII	*Rezumat*	cu element activ rotitor a unor structuri din aliaje de aluminiu diferite	(GOGORICI)

(6) La realizarea obiectivului principal al activității doctorale de cercetare – dezvoltare, prezenta teză de doctorat aduce o serie de contribuții, dintre care cele mai importante sunt după cum urmează.

• Studiul elaborat al stadiului actual al cercetării - dezvoltării și aplicațiilor industriale ale sudării prin frecare cu element activ rotitor.

• Aplicarea procedeului de sudare prin frecare cu element activ rotitor în condiții inovative, respectiv, pentru realizarea unor structuri constituite prin suprapunerea a trei plăci din aliaje de aluminiu diferite utilizate pe scară industrială în industria aeronautică, și anume AA2024, AA6061, AA7075, dintre care AA2024 și AA7075 nu pot fi sudate prin procedee standard.

• Desfășurarea unor cercetări teoretico – experimentale preliminare și avansate complexe și de volum ridicat, respectiv, pregătirea sistemului de cercetare, realizarea a patru tipuri diferite de structură sudată în condiții tehnologice de sudare diverse, cu măsurarea temperaturii de proces și a forței axiale de proces, prelevarea de epruvete, determinarea unor caracteristici ale structurii sudate și zonelor învecinate, reprezentarea relațiilor de dependență specifice, evidențierea unor corelații reprezentative și concluzii.

• Analiza, în cadrul cercetărilor teoretico – experimentale preliminare, la trei tipuri diferite de structură sudată, a temperaturii de proces, forței axiale de proces, precum și a rugozității, macrostructurii, microstructurii și microdurității cordonului de sudură și zonelor învecinate, după caz, cu evidențierea unor corelații reprezentative și concluzii.

• Analiza, în cadrul cercetărilor teoretico – experimentale avansate, la un anumit tip de structură sudată, a temperaturii de proces, forței axiale de proces, precum și a rugozității, macrostructurii, microstructurii, microdurității, rezistenței la tracțiune și alungirii relative la rupere, asociate cordonului de sudură și zonelor învecinate, după caz, cu evidențierea unor corelații reprezentative și concluzii.

• Realizarea unui model numeric valid pentru simularea îmbinării FSW a trei aliaje de aluminiu diferite.

* * *

Prezenta teză de doctorat, prin problematică, modul de abordare și rezultate, dezvoltă condițiile de aprofundare și aplicare a procesului de sudare prin frecare cu element activ rotitor a unor structuri din aliaje de aluminiu diferite, prin cercetări teoretico – experimentale și modelare numerică.

<u>Importanța științifică</u> a prezentei teze de doctorat este susținută de contribuțiile aduse la studiul, cercetarea teoretico – experimentală și modelarea numerică privind procesul și sistemul de sudare prin frecare cu element activ rotitor, FSW, a unor structuri din trei aliaje de aluminiu diferite, AA2024, AA6061 și AA7075, în raport cu elemente metodologice de referință, prin determinarea relațiilor de dependență dintre forța axială de proces și temperatura de proces în funcție de turația elementului activ rotitor, viteza de avans și atribute ale structurii de sudat, dintre acestea și caracteristici ale structurilor sudate - rugozitate, macrostructură, microstructură, microduritate, rezistență la tracțiune, alungire relativă la rupere, precum și a unui model numeric valid pentru simularea procesului și sistemului de sudare obiectiv.

<u>Importanța practică</u> a prezentei teze de doctorat rezidă în aceea că metodologia de cercetare – dezvoltare, modelele și mijloacele de lucru, datele și rezultatele efective ale cercetărilor realizate reprezintă un sistem – suport util studenților, cadrelor didactice, specialiștilor și organizațiilor industriale, după caz.

Problematica proceselor FSW reclamă o activitate de cercetare – dezvoltare continuă de studiu și determinare a condițiilor optime de sudare și a caracteristicilor structurilor sudate pentru diverse materiale, geometrii, volume de producție etc.

Bibliografie selectivă

[A04] Al-Badour F., Nesar M., Abdelrahman S., Abdelaziz B., *Thermo-mechanical finite element model of friction stir welding of dissimilar alloys*, Int. Adv. Manuf. Technol. 72:607-617, 2014.

[A08] Azevedo J., Infante V., Quintino L., Santos J., *Fatigue behaviour of friction stir welded steel joints*, 11th International Fatigue Congress Lisboa 2014.

[B01] Babu A.S., Devanathan C., *An Overview of Friction Stir Welding*, International Journal of Research in Mechanical Engineering & Technology, 3, 2, 2013.

[B02] Batalha G.F., Farias A., Magnabosco R., Delijaicov S., Adamiak M., Dobrzański L.A., *Evaluation of an AlCrN coated FSW tool*, J. of Achievements in Materials and Manufcturing Engineering, Volume 55, Issue 2, Decembrie 2012.

[B03] Bhattacharya T. K., Das H., Pal T.K., *Influence of welding parameters on material flow, mechanical property and intermetallic characterization of friction stir welded AA6063 to HCP copper dissimilar butt joint without offset*, Trans. Nonferrous Met. Soc. China 25, pp. 2833–2846, 2015.

[B05] Boromei I., Ceschini L., Morri A., G. Garagnani L., Friction stir welding of aluminium based composites reinforced with Al_2O_3 particles: effects on microstructure and charpy impact energy, Metallurgical Science and Technology, 24 (1), pp. 12-21, 2006.

[B06] **Bosneag A.**, Constantin M.A., Nitu E., Ciuca C., *Analysis and Correlation of Output Parameters against Input Parameters for Friction Stir Welding of Three Dissimilar Aluminum Alloy*, Advanced Materials Research, Vol. 1146, pp. 38-43, ISSN: 1662-8985, doi:10.4028/ www.scientific.net/ AMR.1146. 38, 2017 [Volum BDI] (susținută: ISCS17 – Structural integrity of welded structures, The 12th International Conference, 09-10 Noiembrie 2017, Timișoara, România).

[B07] **Bosneag A.**, Constantin M. A., Nitu E., Iordache M., Badulescu C., *Numerical simulation of Friction Stir Welding of three dissimilar aluminium alloy*, Materials Science and Engineering, Vol. 564, Article Number 012033, doi:10.1088/1757-899X/564/1/012033, WOS: 000562599900033, 2019 [*Volum ISI*] (susținută: IManEE19 – Innovative Manufacturing Engineering & Energy International Ceonference, The 23rd edition, 22-24 Mai, Pitești, România).

[B08] **Bosneag A.**, Constantin M. A., Nitu E., *Study on Analysis between Friction Stir Welding Process and Hybrid Friction Stir Welding Process*, Annals of the "Constantin Brâncuşi" University of Târgu-Jiu, Engineering Series, Issue 3, pp. 59-65, 2015 *[Revistă BDI]* (susținută: CONFERENG 2015 – Conferință științifică națională cu participare internașională, 13-14 Noiembrie, Universitatea "Constantin Brâncuşi", Târgu-Jiu, România).

[B09] **Bosneag A.**, Constantin M. A., Nitu E., Iordache M., Rizea A., *Friction Stir Welding of Composite Materials with Metallic Matrix: a Brief Review*, Applied Mechanics and Materials, Vol. 809-810, pp. 449-454, doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.809-810.449, 2015 [Volum BDI] (susținută: IManE2015 – Innovative Manufacturing Technology International Conference, The 19th edition, 20-22 Mai, Iași, România).

[B10] **Bosneag A.**, Constantin M.A., Nitu E., Iordache M., *Analysis of the influence of position of welding materials on the FSW seams properties for three dissimilar aluminium alloy*, MATEC Web of Conferences, Vol. 178, Article Number 03003, doi: doi.org/10.1051/matecconf/201817803003, WOS: 000570197900032, 2018 [Volum ISI] (susținută: IManE&E 2018 – Innovative Manufacturing Technology International Conference, The 22nd edition, 31 Mai – 2 Iunie, Chișinău, Republica Moldova).

[B11] **Bosneag A.**, Constantin M.A., Nitu E., Iordache M., *Friction Stir Welding of three dissimilar aluminium alloy: AA2024, AA6061 and AA7075*, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, Vol. 400, 022013, doi: 10.1088/1757-899X/400/2/022013, WOS:000461147400013, 2018 [Volum ISI] (susținută: ModTech 2018 – Modern Manufacturing Technologies in Industrial Engineering, The 6th International Conference, 13-16 Iunie, Constanța, România).

[B12] **Bosneag A.**, Constantin M.A., Nitu E., Iordache M., *Friction Stir Welding of three dissimilar aluminium alloy used in aeronautics industry*, IOP Conference Series - Materials Science and Engineering, Vol. 252, 012041, DOI: 10.1088/1757-899X/252/1/012041, WOS:000419817200041, ISSN: 1757-8981, 2017 [*Volum ISI*] (susținută: CAR 2017 – The International Congress of Automotive and Transport Engineering, 8-10 Noiembrie, Pitești, România).

UDD	Teză de	Contribuții la studiul și dezvoltarea procesului și sistemului	POSNEACE And
UPD,	doctorat	de sudare prin frecare cu element activ rotitor a unor	COCODICI)
UPII	*Rezumat*	structuri din aliaje de aluminiu diferite	(GOGORICI)

[B16] Burek R., Wydrzynski D., Sep J., Wieckowski W., *The effect of tool wear on the quality of lap joints between 7075 T6 aluminum alloy sheet metal created with the FSW method*, Maintenance and Reliability, 20, 1, pp. 100 106, 2018.

[C01] Campanelli S. L., Casalino G., Casavola C., Moramarco V., Analysis and Comparison of Friction Stir Welding and Laser, Assisted Friction Stir Welding of Aluminum Alloy, Materials 2013, Vol. 6, pp. 5923-5941, 2013.

[C03] Casavola C., Cazzato A., Moramarco V., *Residual Stress in Friction Stir Welding and Laser – Assisted Friction Stir Welding by Numerical Simulation and Experiments*, IntechOpen, 2018.

[C09] Commin L., Barrallier L., Masse J. E., *Residual stress evolution analysis in AZ31 friction stir welds using X-RAY and neutron diffraction*, Int. Centre for Diffraction Data, 2009.

[C10] Constantin M. A., **Bosneag A.**, Iordache M., Nitu E., Iacomi D., *Numerical Simulation of Friction Stir Welding of Aluminum Alloys: A Brief Review*, Applied Mechanics and Materials, Vol. 809-810, pp. 467-472, doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.809-810.467, 2015 [*Volum BDI*] (susținută: IManE2015 – Innovative Manufacturing Technology International Conference, The 19th edition, 20-22 Mai, Iași, România).

[C12] Constantin M. A., **Bosneag A.**, Nitu E., Botila L., *Establishing the Dependence of Output Parameters Depending on Local Process Conditions for Friction Stir Welding of Pure Copper Plates*, Advanced Materials Research, ISSN 1662-8985, Vol. 1146, pp. 32-37, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1146.32, 2017 [Volum BDI] (susținută: ISCS17 – Structural integrity of welded structures, The 12th International Conference, 09-10 Noiembrie, Timișoara, România).

[C13] Constantin M. A., **Bosneag A.**, Nitu E., Iordache M., *Comparative study on microhardness between friction stir welding and tungsten inert gas assisted friction stir welding of pure copper*, MATEC Web of Conferences, Vol. 178, Article number 03002, doi: doi.org/10.1051/matecconf/201817803002, WOS: 000570197900031, 2018 [Volum ISI] (susținută: IManE&E 2018 – Innovative Manufacturing Technology International Conference, The 22nd edition, 31 Mai – 2 Iunie, Chișinău, Republica Moldova).

[C14] Constantin M. A., **Bosneag A.**, Nitu E., Iordache M., *Experimental investigations of tungsten inert gas assisted friction stir welding of pure copper plates*, IOP Conference Series - Materials Science and Engineering, Vol. 252, 012038, DOI: 10.1088/1757-899X/252/1/012038, WOS: 000419817200038, ISSN: 1757-8981, 2017 [*Volum ISI*] (susținută: CAR 2017 – The International Congress of Automotive and Transport Engineering, 8-10 Noiembrie, Pitești, România).

[C15] Constantin M. A., **Bosneag A.**, Nitu E., Iordache M., *Orientation of process parameter values of TIG assisted FSW of copper to obtain improved mechanical properties*, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, Vol. 400, 022017, doi: 10.1088/1757-899X/400/2/022017, WOS:000461147400017, 2018 [*Volum ISI*] (susținută: ModTech 2018 – Modern Manufacturing Technologies in Industrial Engineering, The 6th International Conference, 13-16 Iunie, Constanța, România).

[C16] Constantin M. A., Nitu E., Badulescu C., *Numerical simulation of friction stir welding of pure copper plates*, Materials Science and Engineering, Vol. 564, 012031, 2019.

[C17] Cracanel M., **Bosneag A.**, Diakhate M., Badulescu C., Nitu E., Iordache M., Grigore J., *Influence des paramètres du procédé de soudage FSW sur le comportement mécanique de l'assemblage : analyse par émission acoustique et corrélation d'images numériques*, 24ème Congrès Français de Mécanique Brest, pp. 6360-6368, sciencesconf.org:cfm2019:244191, 2019 [Volum BDI] (susținută: CFM19 24ème Congrès Français de Mécanique, 26 - 30 August, Brest, Franța).

[C18] Czigany T., Kiss Z., *Friction stir welding of fiber reinforced polymer composites*, 18th International Conference On Composite Materials, 2011.

[D07] Diogo M.N., Pedro N., *Numerical modeling of friction stir welding process: a literature review*, The Int. J. of Advanced Manufacturing Tech., Vol. 65, pp. 115-126, 2013.

[D10] Dong J., Zhang D., Zhang W., Zhang W., Qiu C., *Microstructure Evolution during Dissimilar Friction Stir Welding of AA7003-T4 and AA6060-T4*, Materials, 11, 342, 2018.

[E01] Elnabi M. M. A., Osman T. A., Mokadem A. E. E., Elshalakany A. B., *Modeling and Optimization of Friction Stir Welding Parameters for Joining Dissimilar Aluminum Alloys*, Advance Journal of Graduate Research, Vol. 4, No. 1, pp. 1-14, 2018.

UPB, UPIT	Teză de doctorat *Rezumat*	Contribuții la studiul și dezvoltarea procesului și sistemului de sudare prin frecare cu element activ rotitor a unor structuri din aliaje de aluminiu diferite	BOŞNEAG F. Ana (GOGORICI)
--------------	----------------------------------	---	------------------------------

[E02] El-Sayed M.M., Shash A.Y., Abd-Rabou M., *Finite element modeling of aluminum alloy AA5083-O friction stir welding process*, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 252, pp. 13-24, 2018.

[F01] Fanelli P., Vivio F., Vullo V., *Experimental and numerical characterization of Friction Stir Spot Welded joints*, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 81 pp. 17–25, 2012.

[G06] Grigore J-C., **Bosneag A**., Badulescu C., *Tensile properties of friction stir welding of three dissimilar aluminium alloys, AA7075, AA2024 and AA6061 versus process parameters,* Materials Science and Engineering, Vol. 564, Articol Number 012034, doi:10.1088/1757-899X/564/1/012034, 2019 [Volum ISI] (susținută: IManEE19 – Innovative Manufacturing Engineering & Energy International Conference, The 23rd edition, 22-24 Mai, Pitești, România).

[J01] Jain R., Pal S.K., Singh S.B., *Finite Element Simulation of Temperature and Strain Distribution during Friction Stir Welding of AA2024 Aluminum Alloy*, J. Inst. Eng. India, Ser. C, Vol. 98, pp. 37–43, 2017.

[J02] Jemal N., *Qualification du domaine de soudabilité en soudage par friction malaxage*, Doctorat ParisTec -THÈSE pour obtenir le grade de docteur délivré par l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Spécialité "Génie Mécanique", le 13 décembre 2011.

[J03] Johnson G.R., Cook W.H., Fracture Characteristics of Three Metals Subjected to Various Strains, Strain Rates, Temperatures and Pressures, Engineering Fracture Mechanics., Vol. 21, pp. 31-48, 1985.

[K02] Kalemba-Rec I., Kopyscianski M., Miara D., Krasnowski K., *Effect of process parameters on mechanical properties of friction stir welded dissimilar 7075-T651 and 5083-H111 aluminum alloys*, Int. J. Adv. Manuf. Technol., Vol. 97, pp. 2767–2779, 2018.

[K05] Khalilabad M.M., Zedan Y., Texier D., Jahazi M., Bocher P., *Effect of tool geometry and welding speed on mechanical properties of dissimilar AA2198-AA2024 FSWed joint*, Journal of Manufacturing Processes, Vol. 34, pp. 86-95, 2018.

[K06] Khan N. Z., Siddiquee A. N., Khan Z. A., Shihab S. K., *Investigations on tunneling and kissing bond defects in FSW joints for dissimilar aluminum alloys*, J. of Alloys and Compounds, Vol. 648, pp. 360-367, 2015.

[K09] Kirk F., Lyne S., Laszlo I. K., A Mesh-Free Solid-Mechannics Approach for Simulating the Friction Stir-Welding Process, INTECH, 2016.

[K10] Kiss Z., Czigany T., Applicability of friction stir welding in polymeric materials, Mechanical Engineering, 51(1), 15–18, 2007.

[K12] Krasnowski K., Hamilton C., Dymek S., *Influence of the tool shape and weld configuration on microstructure and mechanical properties of the Al 6082 alloy FSW joints*, Archives of civil and mechanical engineering 15, pp. 133 – 141, 2015.

[L02] Leitao C. M. A., *Influence of base material plastic properties and process parameters on friction stir weldability*, Universidad de Coimbra, 2013.

[L06] Lorrain O., Analyses expérimentale et numérique du procédé de soudage par friction malaxage FSW, These, Doctorat ParisTech, 2010.

[M01] Magalhaes V.M., Leitao C., Rodrigues D.M., *Friction stir welding industrialisation and research status*, Science and Technology of Welding and Joining, 2017.

[M04] Meilinger A., Török I., *The importance of Friction Stir Welding Tool*, Production Processes and Systems, vol. 6., No. 1, pp. 25-34, 2013.

[M05] Meyghani B., Awang M.B., Emamian S.S., Nor M.K.M., Pedapati S.R., *A Comparison of Different Finite Element Methods in the Thermal Analysis of Friction Stir Welding (FSW)*, MDPI, 7, 450, 2017.

[M06] Minak G., Ceschini L., Boromei I., Ponte M., Fatigue properties of friction stir welded particulate reinforced aluminium matrix composites, Int. J. of Fatigue, Vol. 32, pp. 218–226, 2010.

[M07] Mishra A., Friction Stir Welding Of Dissimilar Metal: A Review, IJRASET, 6, pp. 2321-9653, 2018.

[M09] Mishra R.S., Ma Z.Y., *Friction stir welding and processing*, Materials Science and Engineering, Vol. 50, pp. 1–78, 2005.

[M12] Montadhar A., A Mathematical and Experimental Analysis of Friction Stir Welding of Steel, Collaborating Organization TWI Yorkshire, 2018.

[M15] Mroczka K., Pietras A., *FSW characterization of 6082 aluminium alloys sheets*, Int. Scientific J. published monthly by the World Academy of Materials and Manufacturing Engineering, 40 (2), pp. 104-109, 2009.

[N01] Nakata K., Kim Y.G., Ushio M., Hashimoto T., Jyogan S., Weldability of high strength aluminium alloys by friction stir welding, ISIJ Int. 40, pp. 515-519, 2000.

[N03] Neto D.M., Neto P., *Numerical modeling of friction stir welding process: a literature review*, Int J Adv Manuf Technol, 65:115–126, 2013.

[P05] Pankul G., Arshad N.S., Noor Z.K., Mohd A.H., Zahid A.K., Mustufa H.A., Abdulrahman A., *Investigation of the Effect of Tool Pin Profile on Mechanical and Microstructural Properties of Friction Stir Butt and Scarf Welded Aluminium Alloy 6063*, MDPI Journal Metals, 8, 74, 2018.

[P07] Pashazadeh H., Masoumi A., Teimournezhad J., *Numerical modelling for the hardness evaluation of friction stir welded copper metals*, Materials and Design 49, pp. 913–921, 2013.

[P10] Prakash D., Gurunath S., *Perspective of Friction Stir Welding Tools*, Materials Today: Proceeding, 5, pp. 13166-13176, 2018.

[R01] Rahul J., Surjya K.P., Shiv B.S., *Numerical modeling methodologies for friction stir welding process*, Computational Methods and Production Engineering, Indian Institute of Technology, Kharagpur, India, 2017.

[R03] Robe H., Zedan Y., Chen J., Monajati H., Feulvarch E., Bocher P., *Microstructural and mechanical characterization of a dissimilar friction stir welded butt joint made of AA2024-T3 and AA2198-T3*, Materials Characterization, Vol. 110, pp. 242-251, 2015.

[R08] Radeș M., Rezistența materialelor 1, Editura Printech, 2010.

[S01] Sadeesh P., Venkatesh K. M., Rajkumar V., Avinash P., Arivazhagan N., Devendranath R. K., Narayanan S., *Studies on friction stir welding of AA2024 and AA6061 dissimilar metals*, Procedia Engineering, Vol. 75, pp. 145-149, 2014.

[S03] Sanjeev N.K., Ravikiran B.P., Application of Coupled Eulerian Lagrangian Approach in Finite Element Simulation of Friction Stir Welding, 2015.

[S12] Song K. H., Tsumura T., Nakata K., *Development of Microstructure and Mechanical Properties in Laser-FSW Hybrid Welded Inconel 600*, Materials Transactions. 50(7), pp. 1832-1837, 2009.

[S17] Syafiq W.M., Afendi M., Daud R., Mazlee M.N., Majid M.S.A., Lee Y.S., *Mechanical properties of friction stir welded butt joint of steel/ aluminium alloys: effect of tool geometry*, Journal of Physics, 908, 2017.

[S18] ***, SR EN ISO 6892-1, Materiale metalice, Încercarea la tracțiune, Partea 1: Metoda de încercare la temperatura ambiantă, STANDARD ROMÂN, 2010.

[S19] ***, ASTM E112-96 (2004), Standard Test Methods for Determining Average Grain Size, ASTM International, 2004.

[S20] Szava I., Szava D.T., Galfi P.B., Hoța H., Szava I.R., Popa G., *Rezultate preliminare privind utilizarea metodei corelării digitale a imaginii în studiul implanturilor dentare*, A XVII-a Conferință internațională – multidisciplinară "Profesorul Dorin Pavel – fondatorul hidroenergeticii românești", SEBEȘ, 2017.

[T02] ***, The Boeing Company, http://www.boeing.com/ commercial/ aeromagazine/ articles/ qtr_4_ 06/article_04_2.html (accesat la 09.06.2017).

[T06] Thomas W.M., Nicholas E.D., Needham J.C., Murch M.G., Temple-Smith P., Dawes C.J., *International Patent Application No. PCT/GB92/02203 and GB Patent Application No. 9125978.8 and US Patent Application No. 5,460,317*, December 1991.

[U01] Ungureanu I., Bazele cercetarii experimentale, Editura Universității din Pitești, 2001.

[V03] ***, Vickers hardness tester, https://www.innovatest-europe.com/testing-knowledge/ (accessed on 20.07.2020).