



UNIUNEA EUROPEANĂ



Fondul Social European  
POSDRU 2007-2013



Instrumente Structurale  
2007-2013



OIPOSDRU

MINISTERUL  
EDUCAȚIEI ȘI  
CERCETĂRII  
ȘTIINȚIFICE



Universitatea POLITEHNICA  
din București

# **Universitatea POLITEHNICA din București**

## **Școala Doctorală de Inginerie Industrială și Robotică**

# **Universitatea din Pitești**

## **Școala Doctorală Interdisciplinară**

**Ing. CONSTANTIN G. Marius-Adrian**

# **TEZĂ DE DOCTORAT**

## **\* Rezumat \***

**Contribuții la dezvoltarea proceselor și sistemelor de sudare prin frecare cu element activ rotitor și aport suplimentar de căldură a unor structuri din cupru**

***Conducători științifici,***

**Prof. univ. dr. ing. Marian GHEORGHE**

**Prof. univ. dr. ing. Eduard Laurențiu NIȚU**



## Cuprins

	(Rezumat: R, Teză: T)	R	T
<i>Cuvinte - cheie</i> .....		2	-
<i>Cuvânt înainte</i> .....		3	5
Introducere .....		4	6
Legendă .....		-	7
 <i>Partea I. Stadiul actual al cercetării-dezvoltării proceselor și sistemelor de sudare prin frecare cu element activ rotitor fără sau și cu aport suplimentar de căldură</i>			
<i>Capitolul 1. Procedee de sudare prin frecare cu element activ rotitor fără sau și cu aport suplimentar de căldură</i> .....		5	9
1.1. Sudarea cuprului și a aliajelor sale .....		5	9
1.2. Procedeele de sudare prin frecare cu element activ rotitor .....		5	11
1.3. Avantaje și dezavantaje ale procedeelelor de sudare prin frecare cu element activ rotitor .....		6	14
1.4. Tipuri de procedee de sudare prin frecare cu element activ rotitor .....		7	15
1.5. Tipuri de materiale sudate prin frecare cu element activ rotitor .....		8	20
1.6. Elementul activ rotitor .....		8	22
1.7. Utilaje de sudare prin frecare cu element activ rotitor .....		9	24
1.8. Aplicații industriale ale sudării prin frecare cu element activ rotitor .....		9	25
<i>Capitolul 2. Caracteristici ale structurilor din cupru sudate prin frecare cu element activ rotitor fără sau și cu aport suplimentar de căldură</i> .....		10	27
2.1. Parametrii tehnologici și temperatura din cadrul procesului .....		10	27
2.2. Aspectul vizual al îmbinărilor sudate prin frecare cu element activ rotitor .....		11	29
2.3. Macrostructura sudurilor realizate prin frecare cu element activ rotitor .....		11	30
2.4. Microstructura sudurilor realizate prin frecare cu element activ rotitor .....		12	31
2.5. Microduritatea sudurilor realizate prin frecare cu element activ rotitor .....		12	33
2.6. Rezistența mecanică a sudurilor realizate prin frecare cu element activ rotitor .....		13	34
2.7. Defecte ale îmbinărilor sudate prin frecare cu element activ rotitor .....		13	37
<i>Capitolul 3. Cercetări privind modelarea și simularea numerică a procesului de sudare prin frecare cu element activ rotitor fără sau și cu aport suplimentar de căldură</i> .....		14	41
3.1. Realizarea modelului numeric al procesului de sudare prin frecare cu element activ rotitor ...		14	41
3.2. Realizarea modelului numeric al procesului de sudare prin frecare cu element activ rotitor și aport suplimentar de căldură .....		16	50
3.3. Rezultate ale simulării numerice a procesului de sudare prin frecare cu element activ rotitor și aport suplimentar de căldură .....		16	51
<i>Capitolul 4. Concluzii privind stadiul actual al cercetării-dezvoltării proceselor și sistemelor de sudare prin frecare cu element activ rotitor fără sau și cu aport suplimentar de căldură</i> .....		17	53
 <i>Partea a II - a. Contribuții la dezvoltarea teoretico-experimentală și modelarea numerică a proceselor și sistemelor de sudare prin frecare cu element activ rotitor fără sau și cu aport suplimentar de căldură a unor structuri din Cu-DHP</i>			
<i>Capitolul 5. Direcțiile, obiectivul principal și metodologia de cercetare-dezvoltare a proceselor și sistemelor de sudare prin frecare cu element activ rotitor fără sau și cu aport suplimentar de căldură a unor structuri din Cu-DHP</i> .....		21	57
5.1. Direcții de cercetare-dezvoltare .....		21	57
5.2. Obiectivul principal al activității de cercetare-dezvoltare .....		21	57
5.3. Metodologia de cercetare-dezvoltare .....		21	58
<i>Capitolul 6. Elemente ale sistemului de cercetare experimentală a proceselor de sudare prin frecare cu element activ rotitor fără sau și cu aport suplimentar de căldură a unor structuri din Cu-DHP</i> .....		24	63
6.1. Structura de sudat .....		24	63

UPB, UPIT	Teză de doctorat *Rezumat*	Contribuții la dezvoltarea proceselor și sistemelor de sudare prin frecare cu element activ rotitor și aport suplimentar de căldură a unor structuri din cupru	CONSTANTIN G. Marius-Adrian	
6.2.	Standul experimental și caracteristicile de proces măsurate în timp real .....		24	64
6.3.	Elementul activ rotitor .....		25	67
6.4.	Prelevarea și codificarea epruvetelor .....		25	68
6.5.	Pregătirea epruvetelor .....		26	70
6.6.	Analiza macrostructurală și microstructurală .....		27	72
6.7.	Măsurarea rugozității cordonului de sudură .....		27	72
6.8.	Măsurarea microdurității .....		27	73
6.9.	Încercarea la tracțiune .....		28	74
<i>Capitolul 7. Rezultate ale cercetării teoretico-experimentale preliminare privind procesele de sudare prin frecare cu element activ rotitor fără sau și cu aport suplimentar de căldură a unor structuri din Cu-DHP .....</i>			28	77
7.1.	Date generale privind desfășurarea programului de cercetări teoretico-experimentale preliminare .....		29	77
7.2.	Forța axială de proces și temperatura de proces .....		29	78
7.3.	Suprafețele exterioare, macrostructura și microstructura îmbinărilor sudate .....		30	85
7.4.	Rugozitatea cordonului de sudură .....		32	91
7.5.	Microduritatea îmbinărilor sudate .....		32	92
7.6.	Rezistența la tracțiune și alungirea relativă la rupere .....		33	96
7.7.	Studiu de caz privind prezența și influența unor defecte din structuri sudate .....		34	99
7.8.	Orientarea cercetărilor avansate .....		36	105
<i>Capitolul 8. Rezultate ale cercetării teoretico-experimentale avansate privind procesele de sudare prin frecare cu element activ rotitor fără sau și cu aport suplimentar de căldură a unor structuri din Cu-DHP .....</i>			36	107
8.1.	Date generale privind desfășurarea programului de cercetări teoretico-experimentale avansate .....		36	107
8.2.	Forța axială de proces și temperatura de proces .....		37	107
8.3.	Suprafețele exterioare și macrostructura îmbinărilor sudate .....		38	114
8.4.	Rugozitatea cordonului de sudură .....		38	116
8.5.	Microduritatea îmbinărilor sudate .....		39	118
8.6.	Rezistența la tracțiune și alungirea relativă la rupere .....		40	121
<i>Capitolul 9. Modelarea și simularea numerică a procesului de sudare prin frecare cu element activ rotitor a unor structuri din Cu-DHP .....</i>			41	127
9.1.	Elaborarea modelului numeric .....		41	127
9.2.	Rezultate ale simulării numerice .....		42	130
<i>Capitolul 10. Concluzii finale și contribuții principale la dezvoltarea și modelarea numerică a proceselor și sistemelor de sudare prin frecare cu element activ rotitor fără sau și cu aport suplimentar de căldură a unor structuri din Cu-DHP .....</i>			44	135
Bibliografie .....			48	139

### ***Cuvinte – cheie***

sudare prin frecare cu element activ rotitor,  
cupru,  
temperatură de proces,  
forță axială de proces,  
rugozitate,  
macrostructură,  
microstructură,  
microduritate,  
rezistență la tracțiune,  
modelare numerică.

## ***Cuvânt înainte***

Cercetarea-dezvoltarea proceselor și sistemelor de sudare prin frecare cu element activ rotitor fără sau și cu aport suplimentar de căldură, FSW, respectiv, FSW-TIG, în vederea determinării condițiilor tehnologice de sudare a unor structuri din cupru, 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, realizarea de cercetări experimentale, prelucrarea datelor și analiza relațiilor de dependență, pentru determinarea condițiilor de sudare FSW și FSW-TIG a structurilor obiectiv la niveluri acceptabile ale caracteristicilor acestora și ale productivității, propunerea și dezvoltarea unui model numeric de simulare a proceselor, realizarea și publicarea de lucrări științifice, precum și elaborarea prezentei teze de doctorat privind procesele de sudare prin frecare cu element activ rotitor fără sau și cu aport suplimentar de căldură, FSW, respectiv, FSW-TIG.

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 profunde mulțumiri domnului Conf.dr.ing. Claudiu BĂDULESCU din cadrul ENSTA Bretagne, sub a cărei îndrumare domnișoara Ing. Diana SCIRLOI și domnul Dr.fiz. Denis NEGREA au contribuit la determinarea unor proprietăți mecanice ale îmbinărilor.

Exprim sincere mulțumiri domnilor Prof.univ.dr.ing. Nicolae IONESCU și Prof.univ.dr.ing. Tom SAVU - de la Universitatea POLITEHNICA din București, doamnei Conf.univ.dr.ing. Daniela Monica IORDACHE - de la Universitatea din Pitești și domnului Dr.ing. CSP 1 Gheorghe POPAN - 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 recunoscător familiei mele, colegilor de serviciu și kolegei de doctorat Ing. Ana BOȘNEAG, pentru suportul moral și înțelegerea manifestate pe perioada desfășurării studiilor de doctorat.

Activitățile din 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 (POS DRU), finanțat de către Fondul Social European și Guvernul României, prin contractul nr. POS DRU/187/1.5/ S/155536.

*Marius Adrian CONSTANTIN*

## Introducere

Cuprul și aliajele sale prezintă proprietăți specifice - conductivitate electrică și termică, ductilitate, rezistență mecanică, rezistență la coroziune - și utilizare în diferite aplicații industriale. Însă, aceste materiale sunt dificil de sudat prin topire datorită conductivității termice ridicate și vitezei mărite de oxidare la temperaturi foarte apropiate de cea de topire. În cadrul tehnologiilor de sudare a cuprului și aliajelor sale, se dezvoltă și procedeele de sudare prin frecare cu element activ rotitor fără sau și cu aport suplimentar de căldură, FSW, respectiv, FSW-TIG.

Procedeul de sudare prin frecare cu element activ rotitor, FSW, realizează un proces de sudare în stare solidă ce se bazează pe căldura generată de frecarea și deformarea plastică realizate la interacțiunea dintre un element activ rotitor și piesele de sudat. Procedeul de sudare prin frecare cu element activ rotitor asistat de un echipament TIG (Tungsten Inert Gas) de generare a unui aport suplimentar de căldură în proces, se constituie în procedeul hibrid FSW-TIG.

\* \* \*

În prima parte a prezentei teze de doctorat, pe baza analizei stadiului actual al cercetării-dezvoltării proceselor și sistemelor de sudare prin frecare cu element activ rotitor fără sau și cu aport suplimentar de căldură, se prezintă date relevante - tipuri de procedee, principii și parametri tehnologici, caracteristici ale elementului activ rotitor, caracteristici ale utilajelor tehnologice, aplicații industriale, caracteristici de proces, caracteristici ale structurilor sudate, modelarea și simularea numerică a proceselor, concluzii.

În partea a doua a tezei de doctorat, pe baza datelor și concluziilor desprinse din analiza stadiului actual, se formulează direcțiile și obiectivul principal al activității de cercetare-dezvoltare din cadrul doctoratului - dezvoltarea, prin cercetare teoretico-experimentală și modelare numerică, a proceselor și sistemelor de sudare prin frecare cu element activ rotitor fără sau și cu aport suplimentar de căldură a unor structuri din cupru.

În continuare, se definesc elemente metodologice de referință și, în raport cu acestea, se realizează cercetări teoretico-experimentale preliminare și avansate privind procedeele de sudare prin frecare cu element activ rotitor fără sau și cu aport suplimentar de căldură, FSW, respectiv, FSW-TIG, a unor structuri constituite din două plăci poziționate cap la cap din Cu-DHP, cercetările preliminare - pentru a determina stări și tendințe principale ale caracteristicilor și relațiilor de dependență, iar cercetările avansate - pentru a valida sau determina caracteristici și relații de dependență definitorii, respectiv, condiții de sudare FSW și FSW-TIG a structurilor din Cu-DHP la niveluri acceptabile ale caracteristicilor acestora și ale productivității. În esență: după planificarea și pregătirea tuturor elementelor și a sistemului tehnologic de sudare, la fiecare experiență programată – definită printr-o anumită combinație a valorilor turației elementului activ rotitor, vitezei de avans și intensității sursei TIG – se măsoară forța axială de proces și temperatura de proces, continuu, în perioada de lucru în care realizează structura sudată; se prelucrează datele și se analizează relațiile de dependență dintre mărimile în cauză, după caz; se prelevează și se pregătesc epruvetele planificate; se determină elemente importante de definire a caracteristicilor structurilor sudate - macrostructură, microstructură, microduritate, rugozitate, rezistență la tracțiune, alungire relativă la rupere; se prelucrează datele și se analizează relațiile de dependență dintre mărimile în cauză, după caz; se efectuează o analiză a defectelor din interiorul îmbinărilor sudate, prin încercare la tracțiune și corelare digitală a imaginilor. De asemenea, se realizează un model numeric tridimensional cuplat termomecanic al procesului FSW, prin care se simulează procesul FSW, cu determinarea distribuției temperaturii de proces în concordanță cu rezultatele experimentale, se studiază și se arată că, pentru reducerea duratei simulării numerice, scalarea masei este eficientă și acceptabilă ca precizie.

Se prezintă concluziile finale și contribuțiile principale aduse de prezenta teză de doctorat la dezvoltarea și modelarea numerică a proceselor și sistemelor de sudare prin frecare cu element activ rotitor fără sau și cu aport suplimentar de căldură a unor structuri din Cu-DHP, importanța științifică și practică a tezei de doctorat, precum și perspective – dezvoltare continuă și analitică privind caracteristicile tehnico-economice, modelarea și simularea, implementarea industrială, la niveluri superioare ale indicatorilor de evaluare.

## ***Partea I.***

**Stadiul actual al cercetării-dezvoltării  
proceselor și sistemelor de sudare prin  
frecare cu element activ rotitor fără  
sau și cu aport suplimentar de căldură**

## **Capitolul 1. Procedee de sudare prin frecare cu element activ rotitor fără sau și cu aport suplimentar de căldură**

### **1.1. Sudarea cuprului și a aliajelor sale**

Cuprul și aliajele pe bază de cupru oferă combinații unice de conductivitate electrică și termică, rezistență mecanică, formabilitate și rezistență la coroziune și sunt utilizate într-o gamă largă de aplicații ingineresti. Alte atribute valoroase ale acestor materiale includ culoarea, rezistența la scântei și comportamentul nonmagnetic. Diferite tipuri de aliaje de cupru sunt utilizate în industrie, dintre care cel mai des întâlnite sunt: alama, bronzul, alama roșie, aliajele cupru-nichel, aliajele argint-nichel și aliajele cupru-beriliu.

În industrie, îmbinarea cuprului și a aliajelor pe bază de cupru se realizează în mod obișnuit prin diferite procedee de sudare prin topire, procedee de îmbinare prin lipire și procedee de sudare în stare solidă. Principalii factori care afectează sudabilitatea cuprului și a aliajelor sale prin procedee de sudare prin topire, sunt reprezentați de [B06]:

- Efectul conductivității termice, care impune utilizarea unor intensități ridicate ale surselor de căldură pentru a obține topirea localizată în cuprul pur și în aliajele sale.
- Poziția de sudare preponderent utilizată este cea orizontală având în vedere natura extrem de fluidă a acestor materiale, poziționarea verticală sau suprapunerea pieselor fiind folosite foarte rar.
- Coeficientul ridicat de dilatare termică determină o majorare a eforturilor de contracție în timpul solidificării aliajelor de cupru, ce produce fisurarea la cald.
- Prezența porozităților cauzată de vaporizarea elementelor de aliere cu temperatură de topire scăzută.
- Necesitatea utilizării unui gaz protector impusă de tendința acestor materiale de a absorbi gaze din aer, ce cauzează formarea de pori și fisuri.
- Curățarea și protejarea suprafețelor pentru evitarea formării de oxizi.
- Prezența unor elemente de aliere ce sunt atât volatile, cât și toxice.

Brazarea și cositorirea cuprului sunt tehnici preferate uneori pentru a evita problemele ce pot fi asociate proceselor de sudare prin topire, însă rezistența mecanică a acestor îmbinări este în mod obișnuit inferioară rezistenței îmbinărilor obținute prin alte procedee de sudare [M12].

O altă modalitate de a evita problemele asociate proceselor de sudare prin topire este reprezentată de utilizarea sudării în stare solidă. Un procedeu de sudare prin frecare, ce este pretabil acestui tip de materiale, este procedeul de sudare prin frecare cu element activ rotitor, FSW [M13, N02]. Acest procedeu este capabil să producă în cuprul pur suduri groase, cu proprietăți mecanice superioare sudurilor prin topire, în mod fiabil și reproductibil [M12, S05].

### **1.2. Procedeul de sudare prin frecare cu element activ rotitor**

Sudarea prin frecare cu element activ rotitor, FSW (Friction Stir Welding), este un procedeu de sudare în stare solidă, inventat de către Thomas și colaboratorii săi, în anul 1991 [T02]. Această tehnologie a fost utilizată inițial pentru sudarea aliajelor de aluminiu din grupele clasificate drept nesudabile prin utilizarea tehnicilor convenționale de sudare prin topire, dar cu timpul s-a îndreptat și asupra altor materiale precum cupru, magneziu, titan, oțel, materiale polimerice sau compozite [B07, B14, L02, M11].

Sudarea prin frecare cu element activ rotitor (FSW) este un procedeu de îmbinare în stare solidă care se bazează pe căldura generată de frecarea și deformarea plastică realizate de către o sculă de



sudare neconsumabilă, denumită element activ, la interacțiunea cu piesele de îmbinat. Elementul activ ce execută o mișcare de rotație în jurul axei proprii, pătrunde transversal în piesele de îmbinat, după care se execută o mișcare de translație pe direcția liniei de îmbinare. Materialul plasticizat este transferat în spatele acestuia, formând astfel îmbinarea sudată (Fig. 1.2.1) [D06, J06, L02].

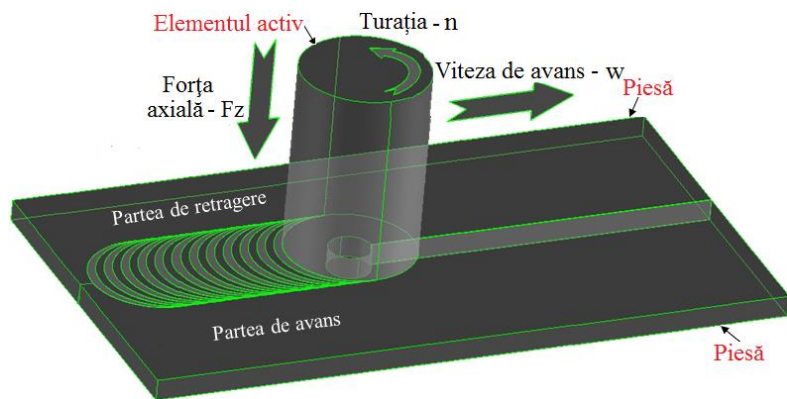


Fig. 1.2.1. Prezentare schematică a procedurii de sudare FSW

Procesul de sudare FSW este constituit din patru etape, și anume: pătrundere, menținere, sudare efectivă, retragere [C06, F01, L02]. Cordonul de sudură FSW nu este simetric în raport cu linia de îmbinare, această asimetrie fiind datorată cinematicii procesului [G03]. Astfel, conform ISO/DIS 25239-3, o îmbinare FSW este constituită din două părți, o parte de avans și o parte de retragere.

Parametrii tehnologici caracteristici procedurii FSW sunt legați de poziționarea elementului activ și de mișcările pe care acesta le execută în timpul procesului de sudare, respectiv: turația elementului activ [rot/min] -  $n$ , viteza de avans a acestuia [mm/min] -  $w$ , forța axială aplicată [kN] -  $F_z$  și unghiul de înclinare a elementului activ [°] -  $\alpha$  (Fig. 2.2.1).

### 1.3. Avantaje și dezavantaje ale procedurii de sudare prin frecare cu element activ rotitor

Datorită naturii sale solide procedurii de sudare prin frecare cu element activ rotitor, FSW, prezintă numeroase avantaje comparativ cu procedeele convenționale de sudare prin topire, cum sunt:

1. Capabilitatea acestuia de a suda aliaje ale unor materiale care sunt nesudabile sau greu de sudat utilizând tehnicile de sudare prin topire, cât și aliaje ale unor materiale diferite [D04, K03, K07];
2. Elimină problemele asociate procedurilor de sudare prin topire, deoarece acest procedeu se realizează fără topirea materialului [A04, B05, H04];
3. Dat fiind faptul că acest procedeu se realizează la temperaturi mai scăzute, pierderile de căldură cauzate de ridicata difuzivitate termică a cuprului sunt reduse [K02];
4. Îmbinările sudate prin FSW prezintă o microstructură mai fină și, prin urmare, proprietăți mecanice îmbunătățite [A05, B05, J05, S05];
5. Poate fi realizat pe direcție orizontală, verticală sau circulară, atât în poziționări cap la cap, cât și în poziționări suprapuse, deoarece nu prezintă baie de material topit [A05, D04, O02];
6. Este un procedeu de sudare simplu, fără consumabile sau materiale de adaos [D04];
7. Este prezentat ca și "tehnologie verde" datorită eficienței energetice și protecției mediului [A04, A05, G04, N05, O02];
8. Nu necesită o pregătire specială a pieselor înainte de realizarea procesului [J05, O02];
9. Nu depinde de aptitudinile operatorului [A04, M12, O02, S05];
10. Este un procedeu ușor de automatizat, având o bună repetabilitate [B05].

Procesul FSW prezintă și unele dezavantaje, precum:

1. Mașina de sudare este masivă și scumpă;
2. Prezintă viteze mici de sudare și o uzură ridicată a elementului activ la îmbinarea materialelor cu temperatură de topire ridicată [C03];
3. Pinul elementului activ lasă o amprență la finalul cordonului de sudură;
4. Piese de îmbinat necesită o bună orientare și fixare [D04, F01, J05];
5. Nu pot fi îmbinate elemente înguste sau de mici dimensiuni [O02].

#### 1.4. Tipuri de procedee de sudare prin frecare cu element activ rotitor

Datorită eficienței demonstrate și a caracterului inovator al acestei tehnici de sudare, au fost inițiate mai multe cercetări ce sunt orientate în două direcții:

- pe studiul procedeelor clasice de sudare FSW, atât a unor piese realizate din același material, cât și a unor piese realizate din materiale diferite, în diferite variante de poziționare a acestora;
- pe studiul procedeelor hibrid de sudare FSW (HFSW), în care se realizează o asociere a procedeei FSW cu alte procedee de sudare, procedeul FSW fiind procedeul dominant.

##### Procedee clasice de sudare prin frecare cu element activ rotitor

După cinematica utilizată în timpul procesului, se disting două tipuri de procedee:

- *sudarea liniară (FSW - Friction Stir Welding)*;
- *sudarea în puncte (FSSW - Friction Stir Spot Welding)*.

*Sudarea FSW liniară* constă, după cum a fost prezentat și anterior, în asamblarea nedemontabilă a două piese, prin realizarea unui cordon de sudură liniar (Fig. 1.2.1).

*Sudarea FSW în puncte (FSSW)* este un procedeu similar sudării prin frecare cu element activ rotitor (FSW), cu excepția faptului că elementul activ nu mai realizează mișcarea de avans pe direcția cordonului de sudură.

##### Procedee hibrid de sudare prin frecare cu element activ rotitor

Procedeele hibrid de sudare prin frecare cu element activ rotitor, HFSW, prezintă combinații între procedeul FSW și un alt procedeu de sudare prin topire, în care procedeul FSW este procedeul dominant, iar celălalt procedeu este utilizat în scopul generării unei cantități suplimentare de căldură la nivelul pieselor de sudat. Procedeele HFSW sunt dezvoltate, în principal, pentru îmbinarea materialelor cu punct de topire ridicat, incluzând cuprul, oțelurile, oțelurile inoxidabile, nichelul și titanul [B13, C03], precum și îmbinarea materialelor diferite, prin creșterea temperaturii materialului cu punct de topire mai ridicat, în vederea egalizării plasticităților acestora [Y01].

Este menționat faptul că pentru materialele cu punct de topire ridicat, îmbinate prin FSW, precum oțelul, titanul și molibdenul, sunt identificate probleme în ceea ce privește efortul ridicat înregistrat asupra elementului activ și asupra sistemului tehnologic, care conduc la uzura și afectarea rigidității acestor elemente [F04].

Din literatura de specialitate studiată, rezultă că au fost analizate și dezvoltate mai multe tipuri de procedee HFSW, în care aportul termic suplimentar este generat de următoarele tehnici de sudare:

- cu fascicul laser, LAFSW (Laser Assisted Friction Stir Welding),
- cu electrod de tungsten în gaz inert, FSW-TIG (Tungsten Inert Gas assisted Friction Stir Welding),
- cu arc de plasmă, P-FSW (Plasma assisted Friction Stir Welding),
- prin rezistență electrică, EAFSW (Electrically Assisted Friction Stir Welding).

Spre exemplu, principiul de lucru al procedeei FSW-TIG este similar cu cel al procedeei FSW, singura diferență constă în faptul că elementul activ rotitor este precedat pe direcția de sudare de pistolul de sudare TIG (Fig. 1.4.6).

Sinclair și colaboratorii au raportat că aportul suplimentar de căldură realizat de sursa TIG conduce la o reducere semnificativă a forței axiale, de 43 %, pentru o gamă largă de parametri de sudare. De asemenea, a fost observată și o creștere a curgerii materialului în cordonul de sudură, rezultând o îmbinare sudată mai lată, ce definește sudurile mai rezistente [S13].

Bang și colaboratorii [B03] au utilizat, de asemenea, procedeul FSW asistat TIG, pentru a îmbina Al cu un aliaj din Ti. Aceștia au raportat că alungirea și rezistența îmbinării cresc semnificativ în comparație cu sudurile FSW clasice. Această tehnică a fost utilizată atât pentru a prelungi durata de viață a elementului activ, cât și pentru a îmbunătăți eficiența îmbinării materialelor metalice cu temperatură de topire ridicată.

Pe lângă parametrii tehnologici specifici procedeului FSW, aplicarea aportului suplimentar de căldură generat de sursa TIG

implică reglarea următorilor parametri [S11]: distanța [mm] dintre arcul electric TIG și elementul activ rotitor, intensitatea,  $I$  [A], a curentului sursei TIG și tensiunea,  $U$  [V].

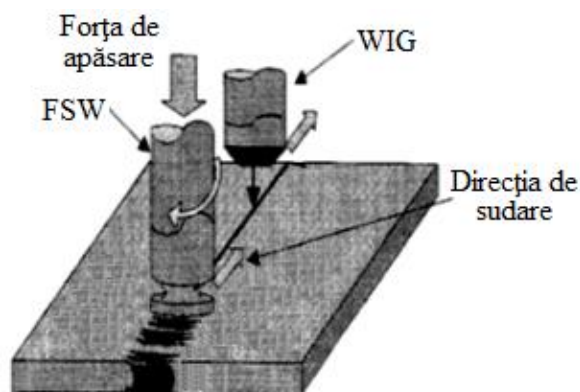


Fig. 1.4.6. Reprezentarea schematică a procedeului FSW asistat TIG [D05]

### 1.5. Tipuri de materiale sudate prin frecare cu element activ rotitor

Ținând cont de faptul că procedeul FSW a fost dezvoltat pentru a fi utilizat la sudarea pieselor din aliaje de aluminiu, este ușor de înțeles de ce, până în prezent, majoritatea lucrărilor publicate la nivel mondial fac referire la îmbinarea acestor aliaje, fie că ne referim la îmbinarea unor materiale de același tip (Fig. 1.5.1), fie la îmbinarea unor materiale diferite (Fig. 1.5.2).

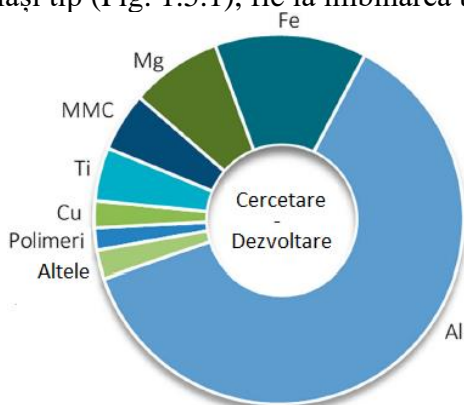


Fig. 1.5.1. Materiale similare sudate FSW [M01]

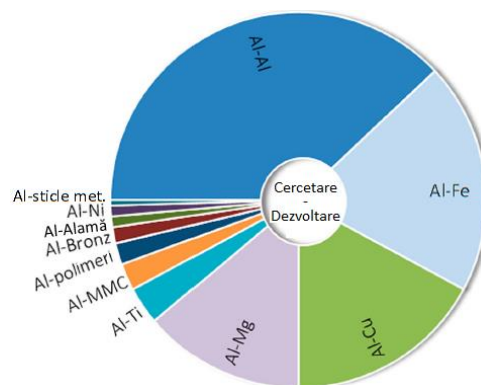


Fig. 1.5.2. Materiale diferite sudate FSW [M01]

### 1.6. Elementul activ rotitor

Elementul activ rotitor (Fig. 1.6.1) este relativ simplu din punct de vedere constructiv și îndeplinește trei funcții principale în procesul de sudare FSW [Z08]: produce încălzirea pieselor de sudat, prin frecare și deformare plastică, amestecă materialele pentru a forma cordonul de sudură și concentrează fluxul de material sub umăr și în jurul pinului.

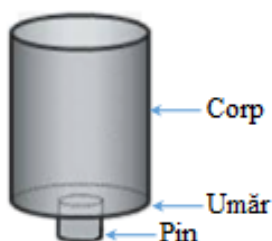


Fig. 1.6.1. Prezentarea schematică a elementului activ



Fig. 1.6.3. Tipuri de canale pe suprafața activă a umărului elementului activ [G02]

În definierea geometriei elementului activ este de principal interes dimensionarea celor mai importante două părți ale acestuia (umărul și pinul).

**Umărul** elementului activ are rolul de a asigura aportul termic necesar realizării îmbinării ce este datorat frecării acestuia cu suprafața pieselor de îmbinat [D01] și de a reține materialul amestecat de pin sub acesta, asigurând astfel compactitatea îmbinării [B01]. Astfel, forma constructivă a acestuia poate fi plată, concavă sau convexă, iar pe suprafața activă a umărului pot fi prelucrate diverse tipuri de canale, striatii, caneluri, care au rolul de a mări capacitatea umărului de a deforma materialele pieselor de îmbinat, dirijându-le apoi spre pin (Fig. 1.6.3) [M06].

**Pinul** elementului activ are rolul de a asigura aportul termic necesar realizării îmbinării, care este datorat deformărilor plastice realizate de acesta, și de a amesteca și transfera materialul pieselor de sudat din fața elementului activ în spatele acestuia. În general sunt folosite două forme exterioare ale pinului elementului activ, cilindrică (Fig. 1.6.1) și conică (Fig. 1.6.3), pe care pot fi, de asemenea, prelucrate diverse caneluri, filete și aplatizări [Z03].

La sudarea FSW a cuprului a fost, în general, utilizat umărul concav sau plat în combinație cu un pin cilindric sau conic, neted sau filetat. Lungimea pinului elementului activ a fost, în general, raportată la o valoare cu 0,2 mm mai mică decât grosimea pieselor de sudat. Diametrul pinului este ales, în cele mai multe cazuri, puțin mai mare decât grosimea pieselor de sudat [G04], în timp ce diametrul umărului este de 3 - 4 ori mai mare decât acesta.

**Materialul elementului activ** trebuie să reziste la solicitările mecanice și termice care au loc în timpul sudării FSW, având următoarele caracteristici de bază: rezistență mecanică la temperatura ambiantă și la temperaturi ridicate, stabilitate chimică la temperaturi ridicate, lipsă de reactivitate față de materialele sudate, rezistență la uzură, coeficient mic de dilatare termică și o bună prelucrabilitate. O împărțire a celor mai cunoscute materiale utilizate pentru construcția elementului activ în funcție de materialul pieselor de sudat, este prezentată în varianta extinsă a acestei lucrări.

Geometriile și materialele elementelor active utilizate în cadrul proceselor HFSW sunt identice cu cele utilizate în procesul FSW [C12, M05, S11, Y01].

## 1.7. Utilaje de sudare prin frecare cu element activ rotitor

Utilajele de sudare FSW pot fi mașini de frezat, mașini speciale pentru sudare FSW sau roboți poliarticulați pentru sudare FSW, fiecare dintre acestea având avantajele și dezavantajele lor.

## 1.8. Aplicații industriale ale sudării prin frecare cu element activ rotitor

Principalele domenii industriale în care sunt utilizate procedeele de sudare FSW sunt domeniul transporturilor, domeniul prelucrării metalelor, în cercetare și dezvoltare și electronică [M01].

Numeroase potențiale aplicații ale acestor tehnologii au fost identificate pentru îmbinarea cuprului și aliajelor pe bază de cupru, însă puține dintre acestea au fost evaluate [M11]. Cercetările disponibile în domeniul FSW s-au concentrat pe fabricarea recipientelor din cupru fără oxigen (Cu-OF), pentru retenția de deșuri nucleare, fabricarea plăcilor de susținere din cupru utilizate în procese de depunere prin pulverizare și pe alte restrânse aplicații, în care cercetarea îmbinării FSW a aliajelor de cupru a fost până în prezent puțin documentată [N01, O01].

Subiecte de cercetare înrudite cu un important potențial de aplicabilitate fac referire la îmbinarea materialelor diferite de tipul aliaje de Al cu aliaje de Cu [N01].

## **Capitolul 2. Caracteristici ale structurilor din cupru sudate prin frecare cu element activ rotitor fără sau și cu aport suplimentar de căldură**

Cercetările științifice privind îmbinările sudate prin procedeele FSW și HFSW vizează, după caz, analiza uneia sau a mai multor caracteristici ale acestor tipuri de îmbinări, relațiile de interdependență dintre acestea sau dependența acestora în funcție de tipul materialelor sudate, tipul procedurii utilizat sau în funcție de parametri tehnologici. Având în vedere tematica abordată în cadrul acestei lucrări, în subcapitolele următoare vor fi prezentate cu precădere caracteristici ale îmbinărilor FSW și HFSW ale cuprului și ale aliajelor sale.

### **2.1. Parametri tehnologici și temperatura din cadrul procesului**

Turația elementului activ este cel mai important parametru tehnologic al procesului FSW, dat fiind faptul că aceasta este direct responsabilă de generarea temperaturii necesare realizării procesului și de controlul, amestecarea, omogenizarea și transferul materialelor îmbinate din fața pinului în spatele acestuia [S05]. Intervalul recomandat pentru turația elementului activ, la îmbinarea FSW a cuprului, este cuprins între 800 - 1200 rot/min [M13].

Viteza de avans a elementului activ prezintă, de asemenea, importante implicații în generarea temperaturilor necesare realizării procesului și în amestecarea, omogenizarea și transferul materialelor îmbinate, deoarece prin intermediul acestui parametru este stabilită durata de menținere a elementului activ antrenat în mișcare de rotație pe o anumită lungime a îmbinării. În general, vitezele de avans identificate în literatura de specialitate au fost cuprinse între 25 și 250 mm/min [S12, S17].

Aplicarea forței axiale urmărește menținerea umărului elementului activ în contact cu suprafața pieselor de îmbinat pentru a asigura aportul termic datorat frecării [M12] și pentru a reține materialul amestecat sub umărul elementului activ, asigurând astfel compactitatea îmbinării [B01].

Unghiul de înclinare a elementului activ ajută la obținerea unei forțe de apăsare mai mari. Pentru îmbinarea FSW a cuprului, unghiul de înclinare a elementului activ este de 1 - 3° [H07, X01].

Cel mai important parametru tehnologic specific procedurilor HFSW este reprezentat de intensitatea aportului suplimentar de căldură, care trebuie reglată astfel încât temperatura atinsă în cadrul procesului să nu depășească 70 - 80 % din temperatura de topire a materialului de sudat [S11].

Un alt parametru tehnologic specific procedurilor HFSW este reprezentat de distanța dintre punctul de aplicare al sursei suplimentare de căldură și elementul activ rotitor. Pentru acest parametru au fost utilizate valori ce indică poziționarea sursei suplimentare de căldură în imediata apropiere a elementului activ (13 mm [Y01], 25 mm [M05], 40 mm [C02], 43 - 44 mm [C12]).

Recomandările identificate în literatura de specialitate în ceea ce privește temperatura necesară realizării unei îmbinări FSW a cuprului sunt diferite; în unele lucrări a fost estimat că temperaturile maxime înregistrate în cadrul procesului trebuie să se situeze în intervalul  $(0,7 - 0,95) * T_{top}$  [M12, P03, S05]. În alte lucrări este menționat faptul că, pentru a obține bune proprietăți mecanice la îmbinarea cuprului utilizând procedeul FSW, este recomandat ca temperatura înregistrată în cadrul procesului să fie cuprinsă în intervalul  $(0,4 - 0,5) * T_{top}$  [H07].

## 2.2. Aspectul vizual al îmbinărilor sudate prin frecare cu element activ rotitor

Aspectul vizual al cordoanelor de sudură FSW și HFSW prezintă o succesiune de urme circulare specifice acestor tipuri de îmbinări, ce sunt datorate contactului dintre umărul elementului activ și materialul de sudat (Fig. 2.2.1). Tot pe fața îmbinării, la finalul cordonului de sudură, în punctul în care are loc etapa de retragere a elementului activ, pinul acestuia lasă o gaură de dimensiuni similare dimensiunilor sale (Fig. 2.2.1).

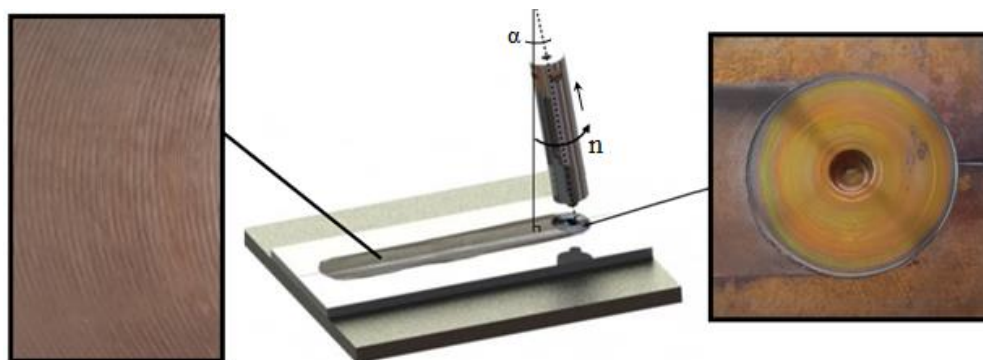


Fig. 2.2.1. Aspectul îmbinărilor FSW și HFSW ale cuprului [adaptată după L02]

## 2.3. Macrostructura sudurilor realizate prin frecare cu element activ rotitor

Îmbinările FSW sunt caracterizate de o macrostructură heterogenă a cordonului de sudură. Studiile procesului FSW prezintă în unanimitate numărul și denumirea zonelor macroscopice care formează îmbinarea FSW (Fig. 2.3.1 - 2.3.2). Pe baza caracterizării microstructurale a mărimii și orientării grăunților și a precipitațiilor, au fost identificate proprietăți ale acestor zone [J06, L04, M08]:

**Nucleul** (NZ - Nugget Zone) este zona aflată în centrul îmbinării, în care se înregistrează cea mai ridicată temperatură și cea mai severă deformare plastică în timpul procesului, fenomene care determină recristalizarea dinamică a acestei zone.

**Zona afectată termo-mecanic** (TMAZ - Thermo-Mechanically Affected Zone) este zona ce înprejmuiește nucleul. În TMAZ, deformările și temperaturile înregistrate sunt mai mici decât cele înregistrate în nucleul sudurii, rezultând doar o recristalizare parțială.

**Zona afectată termic** (HAZ - Heat Affected Zone) este zona ce înprejmuiește TMAZ, în care deformarea plastică înregistrată nu este notabilă, dar ce prezintă totuși schimbări ale proprietăților materialului sudat datorate temperaturilor la care acesta este supus în cadrul procesului.

**Materialul de bază** (BM - Base Material) este partea asamblării care nu a fost supusă niciunei deformării mecanice. Încălzirea acestei zone nu este importantă, iar materialul își păstrează microstructura și proprietățile mecanice inițiale.

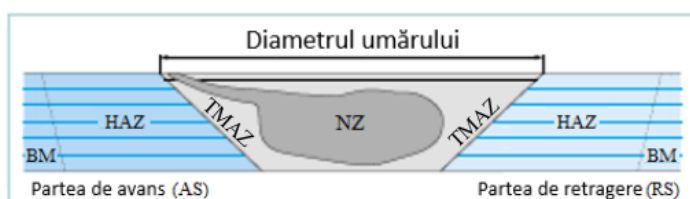


Fig. 2.3.1. Zonile macrostructurale specifice îmbinărilor FSW [J06, M08]



Fig. 2.3.2. Macrostructura tipică a unei îmbinări FSW a cuprului [L04]

Cunoscând faptul că procedeele HFSW sunt derivate din procedeul FSW, aspectul microscopic al acestor îmbinări este similar cu cel al îmbinărilor FSW [L02].

## 2.4. Microstructura sudurilor realizate prin frecare cu element activ rotitor

Aspectul microstructural al nucleului unor îmbinări FSW realizate la diferite turații ale elementului activ este prezentat în Fig. 2.4.1.a-c. Mărimea grăunților este determinată predominant de doi factori, gradul de deformare și temperatura înregistrată în timpul procesului [L04, M13]. Creșterea gradului de deformare în timpul îmbinării FSW determină o reducere a mărimii grăunților recristalizați, conform principiului general al recristalizării [H06]. Pe când, creșterea temperaturii maxime înregistrate în cadrul procesului FSW conduce la o remarcabilă creștere a grăunților.

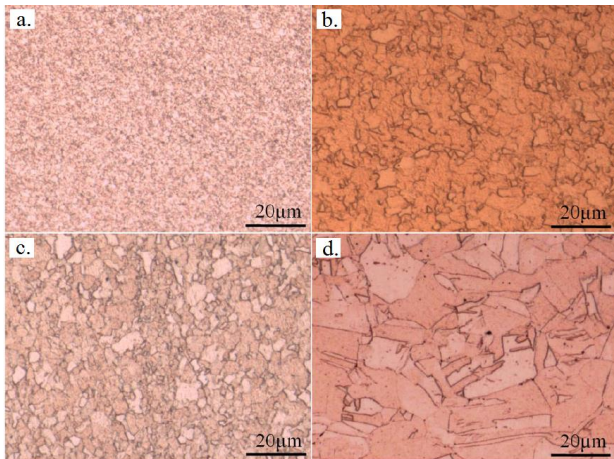


Fig. 2.4.1. Microstructura nucleului realizată cu turația de: (a) 300 rot/min, (b) 600 rot/min, (c) 800 rot/min, (d) BM [L04]

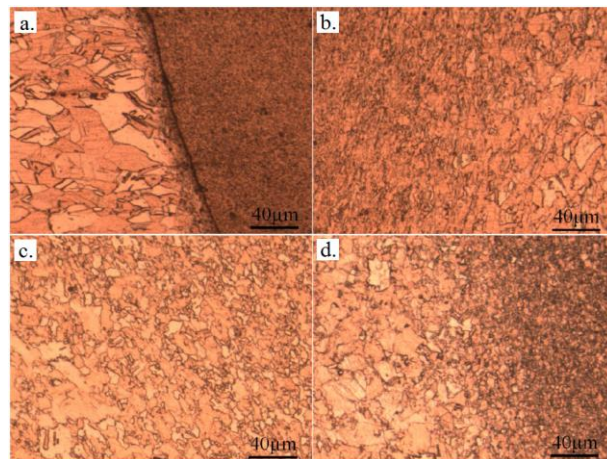


Fig. 2.4.2. Microstructura TMAZ realizată cu turația de: (a) 300 rot/min pe AS, (b) 300 rot/min pe RS, (c) 600 rot/min pe AS, (d) 800 rot/min pe AS [L04]

Microstructura TMAZ a aceluiași îmbinări este prezentată în Fig. 2.4.2. Când turația elementului activ este scăzută, TMAZ este destul de restrânsă și există o graniță bine conturată între TMAZ și nucleu (Fig. 2.4.2.a). Pe măsură ce turația elementului activ crește, TMAZ devine mai extinsă și granița dintre aceste două zone dispăre, iar mărimea grăunților din TMAZ crește (Fig. 2.4.2.c-d). Grăunții din HAZ sunt într-o oarecare măsură mai mari decât grăunții materialului de bază.

Odată cu trecerea de la procesul FSW către procesul HFSW s-a observat faptul că mărimea grăunților crește datorită aplicării aportului suplimentar de căldură [L04, M13].

## 2.5. Microdurețea sudurilor realizate prin frecare cu element activ rotitor

Microdurețea îmbinărilor FSW ale aliajelor de cupru este influențată de două mecanisme concurențiale: recoacerea de înmuiere și rafinarea grăunților [S05]. În sudarea FSW aportul termic crește odată cu creșterea turației elementului activ și/sau reducerea vitezei de avans. Această creștere conduce la o recoacere de înmuiere și, astfel, la obținerea unei durități mai scăzute. Scăderea aportului termic înregistrat conduce la obținerea unei granulații mai fine și, în consecință, la o duritate a sudurilor egală sau chiar mai mare decât cea a materialului de bază, Fig. 2.5.1 [S06, X01].

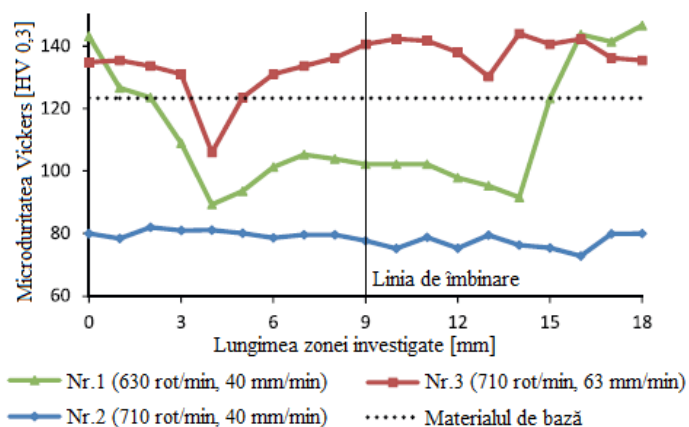


Fig. 2.5.1. Evoluția microdureității pe direcție transversală în îmbinările FSW ale cuprului [P03]

După cum a fost menționat și anterior, odată cu trecerea de la procesul FSW către procesul HFSW, mărimea grăunților crește datorită creșterii temperaturilor înregistrate în cadrul procesului, iar această creștere a grăunților conduce la o scădere a microdunității sudurilor realizate [M13].

## 2.6. Rezistența mecanică a sudurilor realizate prin frecare cu element activ rotitor

Îmbinările FSW ale aliajelor de cupru prezintă rezistențe la tracțiune comparabile cu cele ale materialelor de bază. Rezistența la tracțiune a îmbinărilor FSW ale cuprului pur este ușor mai mică decât cea a materialului de bază, atingând valori de până la aproximativ 87 % din rezistența mecanică a acestuia [A06, L01], însă ușor mai mare decât cea a îmbinărilor EBW [O01].

Rezistența la tracțiune și alungirea specifică ale unor îmbinări FSW ale cuprului pur realizate la diferite turații ale elementului activ, cu o viteză de avans constantă de 100 mm/min sunt prezentate în Fig. 2.6.1. Se poate observa că rezistența la tracțiune și alungirea specifică au aceleași tendințe de variație. Când turația elementului activ variază într-un interval de valori scăzute, atât rezistența la tracțiune, cât și alungirea specifică cresc odată cu creșterea turației elementului activ, iar atunci când valoarea turației elementului activ crește peste acest interval, atât rezistența la tracțiune, cât și alungirea specifică scad.

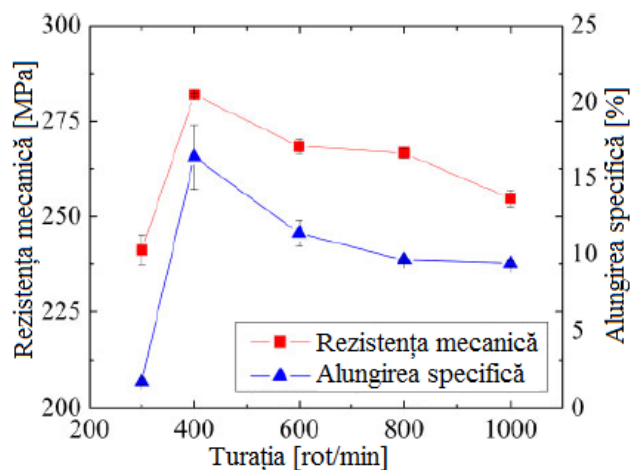


Fig. 2.6.1. Variația proprietăților la tracțiune în funcție de turația elementului activ [L04]

În cazul aliajelor de aluminiu, trecerea de la procesul FSW către procesul HFSW nu produce modificări semnificative asupra rezistenței mecanice a îmbinărilor realizate [C03]. În schimb, în cazul aliajelor de cupru s-a raportat că odată cu creșterea aportului de căldură, dimensiunile grăunților cresc și rezistența mecanică a îmbinărilor scade [M13].

## 2.7. Defecte ale îmbinărilor sudate prin frecare cu element activ rotitor

Defectele întâlnite în sudurile FSW pot fi de două tipuri: defecte de aspect sau vizibile și defecte din interiorul cordoanelor de sudură. Savolainen [S05] a realizat o reprezentare schematică a aspectului și localizării defectelor de sudare ale îmbinărilor FSW ale cuprului (Fig. 2.7.1).

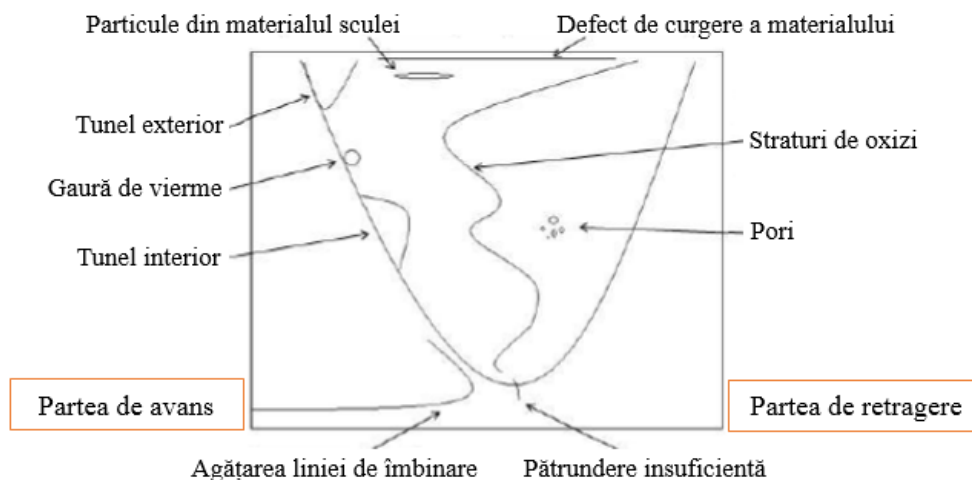


Fig. 2.7.1. Reprezentare schematică a localizării defectelor îmbinărilor FSW ale cuprului [S05]



## **Capitolul 3. Cercetări privind modelarea și simularea numerică a procesului de sudare prin frecare cu element activ rotitor fără sau și cu aport suplimentar de căldură**

### **3.1. Realizarea modelului numeric al procesului de sudare prin frecare cu element activ rotitor**

Datorită eficienței demonstrate și a caracterului inovator al procedurii FSW, au fost inițiate mai multe acțiuni în vederea optimizării sale. Una dintre aceste acțiuni este reprezentată de modelarea și simularea numerică a acestui procedeu. Simularea numerică ajută la o mai bună înțelegere și observare a influenței parametrilor de intrare asupra fenomenelor din proces și îmbinărilor realizate.

Datorită importanțelor deformații înregistrate în cadrul procesului și modificării proprietăților materialelor de sudat în funcție de temperatură, dezvoltarea unei simulări numerice valide reprezintă o sarcină dificilă. Din această cauză în literatura de specialitate au fost abordate mai multe metode pentru simularea numerică a acestui procedeu, dintre care cele mai importante sunt: metoda Lagrange, metoda Euler, metoda ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian) și metoda CEL (Coupled Eulerian-Lagrangian).

Indiferent de metoda utilizată, pentru dezvoltarea unui astfel de model numeric, trebuie efectuate următoarele activități: definirea geometriei elementelor constitutive și asamblarea acestora, definirea proprietăților materialului și a ecuațiilor constitutive, definirea tipului de contact dintre suprafețe, stabilirea condițiilor la limită, discretizarea elementelor constitutive și validarea modelului numeric. Astfel, în secțiunile următoare vor fi prezentate succint aceste activități.

#### Definirea geometriei elementelor constitutive și asamblarea acestora

Definirea geometriei elementelor constitutive este realizată, în general, pornind de la forma și dimensiunile elementelor utilizate experimental, prin definirea corespunzătoare a acestora în funcție de metoda utilizată și de rezultatele urmărite în simulare (Fig. 3.2.1).

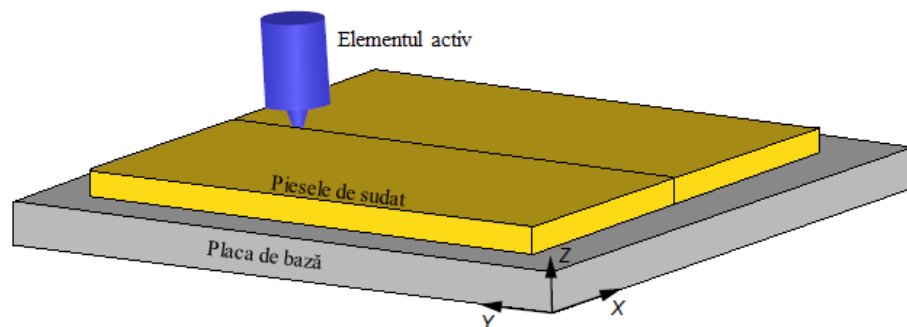


Fig. 3.2.1. Ansamblul elementelor constitutive ale unei îmbinări FSW/ HFSW [J04]

#### Definirea proprietăților materialului și a ecuațiilor constitutive

În timpul procesului FSW, materialul de sudat este supus unor variații largi ale temperaturilor și deformațiilor înregistrate, ce conduc la modificări ale comportamentului acestuia. Astfel, pentru dezvoltarea unui model numeric este necesară utilizarea unei ecuații constitutive care să definească comportamentul materialului pe tot parcursul procesului. În literatura de specialitate s-au raportat mai multe ecuații constitutive, printre care se pot enumera Johnson-Cook, Sheppard-Wright și Norton-Hoff. Dintre acestea, ecuația constitutivă cel mai des utilizată este Johnson-Cook, care definește comportamentul plastic al materialelor de sudat pe baza relației dintre efortul de curgere  $\sigma$ , viteza de deformare plastică  $\varepsilon$  și temperatura înregistrată  $T$ .

### Definirea tipului de contact dintre suprafețe

Interacțiunile din modelul numeric sunt definite pentru a imita fenomenele fizice. Acestea sunt definite între diferite elemente constitutive pentru a permite transferul de căldură și de forțe între acestea. Astfel, pot exista două tipuri de interacțiuni: mecanice și termice.

**Interacțiunile mecanice.** Algoritm de contact 'Penalty contact' este cel mai des utilizat algoritm pentru condiții de contact neliniare. Pentru determinarea efortului tangențial pe suprafața de contact dintre elementul activ și piesele de sudat au fost utilizate mai multe legi, cum ar fi: legea Coulomb [A03, A10, L03], legea Coulomb modificată [G07, L03, Z04], legea Norton [A10, L08] și legea de frecare prin forfecare (shear friction law) [A09, B15, J03]. Deoarece cu ajutorul legii lui Coulomb s-au obținut cele mai bune rezultate, aceasta este cea mai utilizată.

**Interacțiunile termice.** În FSW, frecarea și deformarea plastică contribuie la generarea căldurii necesare realizării procesului. Un anumit procent din totalul de căldură generată este transferat către elementul activ și placa de bază prin conducție și către mediul ambiant prin convecție și radiație (Fig. 3.2.2). Cantitatea rămasă în interiorul pieselor de sudat ridică temperatura acestora [J04].

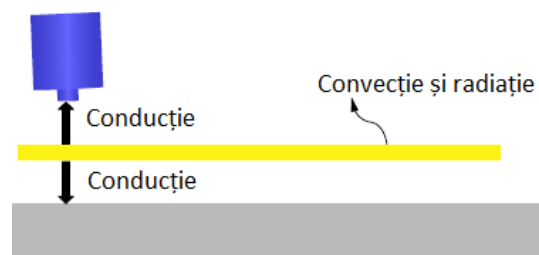


Fig. 3.2.2. Transferul termic realizat fizic între elemente și mediul ambiant [J04]

Încălzirea datorată frecării este încorporată în calculul efortului tangențial de frecare definit pe suprafața de contact (despre care s-a discutat în secțiunea anterioară). Încălzirea datorată deformării plastice depinde de nivelul de deformare și este direct legată de legea de comportament a materialelor de sudat [L08].

Cantitatea de căldură transferată de la piese către elementul activ ( $Q_{wt}$ ), cea transferată de la piese către placa de bază ( $Q_{wb}$ ) și cea transferată de la piese către mediul ambiant ( $Q_{wa}$ ) sunt calculate în structura modelelor numerice prin intermediul unor coeficienți de transfer termic convectiv, care sunt definiți astfel încât transferul termic convectiv rezultat între aceste elemente să fie echivalent cu transferul termic convectiv/ conductiv realizat fizic între ele (Fig. 3.2.2).

### Stabilirea condițiilor la limită

Piesele de sudat pot fi constrânse în diverse variante pentru a reproduce condițiile experimentale. Una dintre variante este încastrarea fețelor laterale, pentru a elimina orice mișcare a acestora. Elementului activ îi sunt impuse mișcări de rotație și de translație în funcție de fiecare etapă a procesului. Așadar, acesta prezintă o mișcare de rotație în jurul axei Z și o mișcare de translație pe axa Z pentru etapa de pătrundere, sau pe axa Y pentru etapa de sudare efectivă.

### Discretizarea elementelor constitutive

Discretizarea unui element constitutiv reprezintă împărțirea acestuia într-un anumit număr de elemente finite, în vederea analizării ulterioare a fiecărui element în parte [J04]. În această etapă a dezvoltării modelelor numerice sunt evidențiate mai clar caracteristicile specifice fiecărei metode în parte (Lagrange, Euler, ALE, CEL), caracteristici ce sunt prezentate în varianta extinsă a acestei lucrări și ce țin în mare parte de mișcarea nodurilor discretizării și a punctelor materiale.

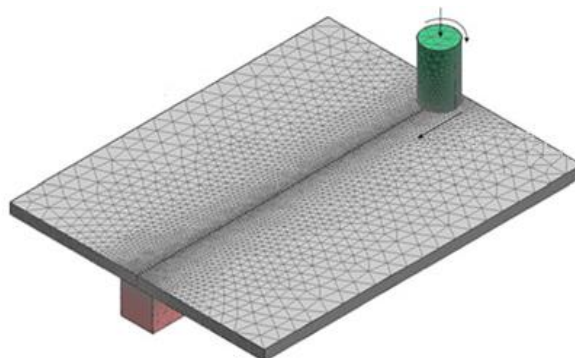


Fig. 3.2.5. Discretizarea pieselor de sudat și a elementului activ [H01]

Indiferent de metoda aleasă, discretizarea pieselor de sudat în zona liniei de îmbinare este mai fină decât în celelalte zone ale acestora (Fig. 3.2.5), însă tipul elementelor finite trebuie să fie ales în concordanță cu metoda de modelare numerică utilizată.

### Validarea modelului numeric al procesului de sudare prin frecare cu element activ rotitor (FSW)

În vederea validării modelului numeric sunt comparate valorile înregistrate în cadrul simulării numerice cu cele determinate experimental, pentru diferite caracteristici ale îmbinărilor sudate. Astfel, validarea modelelor se realizează utilizând cel puțin una dintre următoarele metode:

- analiza distribuției temperaturii în cordonul de sudură, dar și evoluția acesteia în timp [A10, B08, D03, G05, G06, J02, L03, L08, M04, P05, S01, Z07],
- analiza forței axiale [A10, K02, M04] și a momentului la care este supus elementul activ [T04],
- analiza distribuției tensiunilor remanente [A11, G06],
- analiza microdurităților măsurate în diferite zone [P02].

### **3.2. Realizarea modelului numeric al procesului de sudare prin frecare cu element activ rotitor și aport suplimentar de căldură**

În lucrările identificate este raportat faptul că modelarea numerică a procesului HFSW este realizată pornind de la modelul numeric validat al procesului FSW, care este ulterior modificat pentru a include și aportul suplimentar de căldură, caracteristic proceselor HFSW [D02]. Astfel, în vederea realizării unui model numeric valid al procesului HFSW, trebuie realizate activitățile anterior menționate, ce sunt specifice dezvoltării modelului numeric al procesului FSW, la care se adaugă această nouă activitate reprezentată de modelarea aportului suplimentar de căldură.

Astfel, pentru a realiza modelarea numerică a procesului HFSW, modelul numeric validat al procesului FSW este modificat pentru a include și aportul suplimentar de căldură [D02, S11, Y01]. Spre exemplu, aportul suplimentar de căldură datorat unei surse laser este modelat ca un flux de căldură circular pe suprafața superioară a pieselor de sudat, înaintea elementului activ, ce este calculat cu ajutorul ecuației lui Gauss. Acest flux de căldură este definit pe o anumită zonă și variază în funcție de coordonatele spațiale și de timp, similar fluxului de căldură generat în cadrul procesului FSW.

### **3.3. Rezultate ale simulării numerice a procesului de sudare prin frecare cu element activ rotitor și aport suplimentar de căldură**

Daftardar [D02] a dezvoltat, în softul Fluent, un model numeric pentru îmbinarea FSW asistată laser a unui aliaj de aluminiu. Acesta a avut la bază un model numeric validat al procesului FSW, căruia i-a fost atribuit și aportul suplimentar de căldură generat de fasciculul laser. Pentru a compara procesul FSW cu procesul HFSW, temperatura maximă înregistrată în cadrul acestora, într-un punct arbitrar ales, a fost păstrată constantă pentru ambele procese la o valoare de 400 °C. Pentru a realiza acest lucru au fost aduse modificări asupra parametrilor tehnologici ai procesului HFSW, astfel încât căldura generată de elementul activ să fie diminuată. Din această analiză comparativă se observă că temperatura din fața elementului activ în cadrul procesului FSW, după 60 de secunde, este de 183 °C, iar în cadrul procesului HFSW este de 345 °C (Fig. 3.3.1). Asta înseamnă că amestecarea, în cadrul HFSW, are loc într-o zonă mai moale decât în convenționalul FSW, datorită aportului suplimentar de căldură (uzură mai mică, viteze de avans mai mari).

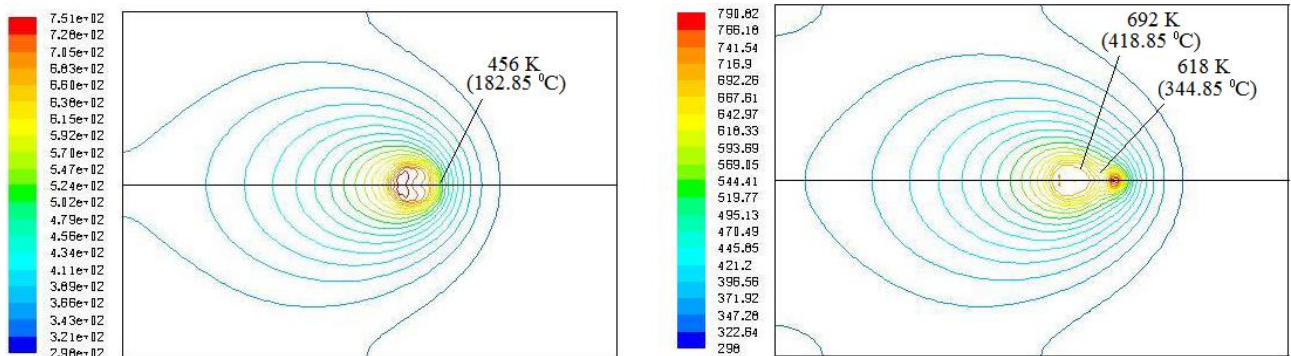


Fig. 3.3.1. Contururile temperaturilor rezultate în cadrul proceselor FSW și HFSW (asistat laser) după 60 s [D02]

Scutelnicu și colaboratorii [S11] au dezvoltat, în softul MSC Marc, un model numeric cu element finit, care simulează sudarea FSW asistată TIG a cuprului, pentru a previziona distribuția temperaturii și temperatura maximă înregistrată în cadrul procesului. Și acest model a avut la bază un model numeric validat al procesului FSW, ambele modele numerice fiind validate utilizând metoda termografiei în infraroșu. Rezultatele obținute din aceste simulări numerice fiind similare celor raportate de Daftardar [D02].

#### **Capitolul 4. Concluzii privind stadiul actual al cercetării-dezvoltării proceselor și sistemelor de sudare prin frecare cu element activ rotitor fără sau și cu aport suplimentar de căldură**

Din analiza stadiului actual al cercetării-dezvoltării procesului de sudare prin frecare cu element activ rotitor și aport suplimentar de căldură, se desprind concluzii importante, după cum urmează.

- Cuprul și aliajele pe bază de cupru oferă combinații unice de conductivitate electrică și termică, rezistență mecanică, formabilitate și rezistență la coroziune și sunt utilizate într-o gamă largă de aplicații ingineresti (v. § 1.1).
- Îmbinarea elementelor din cupru sau aliaje pe bază de cupru se realizează în mod obișnuit prin diferite procedee de sudare prin topire, procedee de îmbinare prin lipire și procedee de sudare în stare solidă. Însă sudabilitatea cuprului și a aliajelor sale prin procedee de sudare prin topire este afectată de anumiți factori. Procedeele de sudare prin lipire și de sudare în stare solidă evită aceste probleme asociate proceselor de sudare prin topire, însă dintre acestea doar procedeele de sudare în stare solidă pot realiza îmbinări cu rezistențe mecanice similare îmbinărilor prin topire (v. § 1.1).
- Sudarea prin frecare cu element activ rotitor (FSW) este un procedeu de îmbinare în stare solidă care se bazează pe căldura generată de frecarea și deformarea plastică realizate de către o sculă de sudare neconsumabilă, denumită element activ, la interacțiunea cu piesele de îmbinat. Acesta se realizează în patru etape: etapa de pătrundere, etapa de menținere, etapa de sudare efectivă și etapa de retragere. Parametrii de proces caracteristici acestui procedeu sunt legați de poziționarea elementului activ în timpul procesului de sudare și de mișcările pe care acesta le execută: unghiul de înclinare, turația, viteza de avans, forța axială de proces (v. § 1.2).
- Datorită naturii sale solide, procedeul FSW prezintă numeroase avantaje comparativ cu procedeele convenționale de sudare prin topire, cum ar fi: capacitatea de a suda aliaje ale unor materiale care

sunt în mare parte nesudabile sau greu de sudat utilizând procedee de sudare prin topire, capacitatea de a suda materiale diferite, generarea unor microstructuri mai fine și, prin urmare, a unor proprietăți mecanice îmbunătățite și eliminarea dezavantajelor asociate procedeelor de sudare prin topire (nu necesită materiale de adaos, gaz protector, îndepărtarea oxizilor, permite sudarea în orice poziție și reduce pierderile mari de căldură înregistrate la sudarea materialelor cu difuzivitate termică ridicată) (v. § 1.3).

- Procesul FSW prezintă și unele dezavantaje, precum: mașina de sudare este masivă și scumpă, prezintă viteze mici de sudare și o uzură ridicată a elementului activ la îmbinarea materialelor cu temperatură de topire ridicată, pinul elementului activ lasă o amprentă la finalul cordonului de sudură și nu pot fi îmbinate piese înguste sau de mici dimensiuni (v. § 1.3).
- Datorită eficienței demonstrate și a caracterului inovator al acestei tehnici de sudare, au fost inițiate mai multe cercetări orientate în două direcții: pe studiul procedeelor clasice de sudare FSW și pe studiul procedeelor hibrid de sudare FSW (HFSW). Procedeul HFSW prezintă combinații între procedeul FSW și un alt procedeu de sudare prin topire, în care procedeul FSW este procedeul dominant, iar celălalt procedeu este utilizat în scopul aplicării locale a unei cantități suplimentare de căldură la nivelul pieselor de sudat, imediat înaintea zonei de sudare FSW (v. § 1.4).
- Materialele cel mai des îmbinate utilizând procedeul FSW sunt aliajele de aluminiu, urmate de cele de fier, magneziu, materialele compozite cu matrice metalică, aliajele de titan și de cupru. Cele mai întâlnite combinații de materiale diferite care au fost îmbinate utilizând procedeul FSW sunt combinațiile Al-Al, urmate de combinațiile Al-Fe, Al-Cu și Al-Mg. Procedeul HFSW sunt utilizate, în principal, pentru îmbinarea materialelor cu temperaturi de topire ridicate și pentru îmbinarea materialelor diferite, unde procedeul FSW clasic prezintă unele limitări (v. § 1.5).
- Elementul activ este relativ simplu din punct de vedere constructiv și îndeplinește trei funcții principale în procesul de sudare FSW: produce încălzirea pieselor de sudat prin frecare și deformare plastică, amestecă materialele acestora pentru a forma cordonul de sudură și concentrează fluxul de material în jurul pinului și sub umărul său. Geometria și dimensiunile umărului și pinului elementului activ variază în funcție de grosimea și de materialul pieselor de sudat și influențează considerabil calitatea îmbinărilor realizate. Materialul acestuia trebuie să prezinte următoarele caracteristici de bază: rezistență mecanică și stabilitate chimică la temperaturi ridicate, lipsă de reactivitate față de materialele sudate, rezistență la uzură, coeficient mic de dilatare termică și o bună prelucrabilitate. Geometriile și materialele elementelor active utilizate în cadrul proceselor HFSW sunt identice cu cele utilizate în procesul FSW (v. § 1.6).
- Echipamentele de sudare FSW sunt clasificate în trei categorii, fiecare cu avantajele și dezavantajele sale, respectiv: mașini de frezat, mașini speciale pentru sudarea FSW și roboți poliarticulați pentru sudarea FSW (v. § 1.7).
- Procedeul de sudare FSW sunt utilizate în diferite industrii pentru fabricația de componente, în special din aliaje de aluminiu. Numeroase aplicații sunt identificate pentru îmbinarea cuprului și aliajelor pe bază de cupru, însă puține dintre acestea au fost și realizate. Astfel, cercetările s-au concentrat pe fabricarea unor recipiente din cupru fără oxigen pentru retenția deșeurilor nucleare, plăci de susținere din cupru utilizate în procese de depunere prin pulverizare, suporturi din cupru de răcire cu apă și pe alte restrânse aplicații (v. § 1.8).
- Intervalul recomandat pentru turația elementului activ, la îmbinarea FSW a cuprului, este de 800 - 1200 rot/min, iar pentru viteza de avans de 25 - 250 mm/min. Forța axială urmărește menținerea

umărului elementului activ în contact cu suprafața superioară a pieselor de îmbinat. Creșterea turației elementului activ, a forței axiale aplicate acestuia sau scăderea vitezei sale de avans determină o creștere a temperaturilor înregistrate în cadrul procesului (v. § 2.1).

- Aportul termic necesar realizării unei îmbinări FSW a cuprului este mult mai mare decât cel necesar realizării unei îmbinări FSW a altui material, datorită difuzivității termice mari a aliajelor de cupru și în mod special a cuprului pur. Acest inconvenient poate fi depășit prin efectuarea îmbinărilor FSW la viteze de avans mai mici și/ sau la turații mai mari. Așadar, îmbinarea FSW a aliajelor de cupru este limitată la o gamă restrânsă de parametri tehnologici, din cauza temperaturii de topire relativ ridicată și a difuzivității termice crescute ale acestor materiale. Astfel că, introducerea unei surse suplimentare de căldură în cadrul procesului este benefică în ceea ce privește creșterea vitezei de avans și, implicit, a productivității procesului. Acest lucru face ca utilizarea procedeelor HFSW să fie pretabilă acestei categorii de materiale (v. § 2.1).

- Recomandările identificate în literatura de specialitate în ceea ce privește temperatura necesară realizării unei îmbinări FSW a cuprului sunt diferite. În timp ce în unele lucrări este recomandat ca temperaturile generate în cadrul procesului să fie de 0,7 - 0,95 din temperatura de topire a materialului de bază, în alte lucrări este recomandat ca acestea să fie de 0,4 - 0,5 din temperatura de topire a materialului de bază (v. § 2.1).

- Aspectul vizual al cordoanelor de sudură FSW și HFSW a evidențiat o succesiune de urme circulare datorate contactului dintre umărul elementului activ și materialul pieselor de sudat, iar la finalul acestora o gaură de dimensiuni similare dimensiunilor pinului elementului activ, lăsată de acesta la retragerea din materialul pieselor de sudat (v. § 2.2).

- Procedecele FSW și HFSW generează importante modificări ale caracteristicilor macrostructurale și microstructurale ale materialelor de sudat, atât în zona cordonului de sudură, cât și în zonele învecinate acestuia, ce conduc la constituirea a patru zone macrostructurale specifice acestor tipuri de îmbinări: nucleul îmbinării (NZ), zona afectată termo-mecanic (TMAZ), zona afectată termic (HAZ), materialul de bază (BM) (v. § 2.3).

- Nucleul îmbinărilor FSW ale cuprului prezintă grăunți mici echiaxiali. TMAZ nu se distinge la fel de clar ca în cazul îmbinărilor FSW ale aluminiului, deoarece nu prezintă grăunți alungiți sau roțiți în zona adiacentă nucleului, așa că în anumite condiții existența sa este dificil de evidențiat. HAZ prezintă aceeași structură a granulației ca materialul de bază. Aportul termic și gradul de deformare joacă un rol important în determinarea mărimii grăunților, ce poate depăși mărimea grăunților materialului de bază dacă temperaturile generate în cadrul procesului sunt prea mari (v. § 2.4).

- Creșterea temperaturii conduce la o recoacere de înmuiere și, astfel, la obținerea unei durități mai scăzute. Scăderea aportului termic conduce la obținerea unei granulații mai fine și, în consecință, la o duritate a sudurilor egală sau chiar mai mare decât cea a materialului de bază. Odată cu trecerea de la procesul FSW către procesul HFSW, mărimea grăunților crește datorită creșterii aportului termic, iar această creștere conduce la o scădere a durității îmbinărilor aliajelor de cupru (v. § 2.5).

- Modificările de natură microscopică produse de procesul FSW generează și modificări ale comportamentului mecanic local și global al cordonului de sudură. Valorile rezistențelor la tracțiune ale îmbinărilor FSW și HFSW ale cuprului prezintă același mod de variație ca și valorile microdurităților (v. § 2.6).

- Defectele întâlnite în îmbinările FSW ale aliajelor de cupru pot fi de două tipuri: defecte de aspect și defecte din interiorul cordoanelor de sudură. Cercetările au arătat că defectele apărute în

îmbinările FSW ale cuprului sunt cauzate preponderent de alegerea necorespunzătoare a elementului activ și a parametrilor de proces, care pot conduce la producerea unei excesive sau insuficiente cantități de căldură, amestecări sau forțe de apăsare (v. § 2.7).

- Datorită caracteristicilor problematice ale procedurii FSW, reprezentate în principal de importanțele deformații înregistrate în cadrul procesului și de modificările proprietăților materialelor de sudat în funcție de temperatură, dezvoltarea unei simulări numerice valide reprezintă o sarcină dificilă. Astfel că, în literatura de specialitate au fost abordate mai multe metode pentru simularea numerică a acestui procedeu, dintre care cele mai importante sunt: metoda Lagrange, metoda Euler, metoda ALE și metoda CEL. Indiferent de metoda utilizată, pentru dezvoltarea unui astfel de model numeric, trebuie efectuate următoarele activități: definirea geometriei elementelor constitutive și asamblarea acestora, definirea proprietăților materialului și a ecuațiilor constitutive, definirea tipului de contact dintre suprafețe, stabilirea condițiilor la limită, discretizarea elementelor constitutive și validarea modelului numeric (v. § 3.1).
- Definirea geometriei elementelor constitutive este realizată pornind de la forma și dimensiunile elementelor utilizate experimental (v. § 3.1.1).
- În timpul procesului FSW materialul de sudat este supus unor variații largi ale temperaturilor și deformațiilor înregistrate, ce conduc la modificări ale comportamentului acestuia. Astfel că, pentru dezvoltarea unui model numeric este necesară utilizarea unei ecuații constitutive (adesea Johnson-Cook) care să definească comportamentul materialului pe tot parcursul procesului (v. § 3.1.2).
- Interacțiunile din modelul numeric sunt definite pentru a imita fenomenele fizice. Acestea sunt definite între diferite elemente constitutive pentru a permite transferul de căldură și de forțe între acestea. Astfel, pot exista două tipuri de interacțiuni: mecanice și termice (v. § 3.1.3).
- Piese de sudat sunt constrânse pentru a reproduce fixarea acestora, în timp ce elementului activ îi sunt impuse mișcări de rotație și de translație în funcție de fiecare etapă a procesului (v. § 3.1.4).
- Discretizarea unui element constitutiv reprezintă împărțirea acestuia într-un anumit număr de elemente finite distincte, în vederea analizării ulterioare a fiecărui element în parte. În această etapă a dezvoltării modelelor numerice sunt evidențiate mai clar caracteristicile specifice fiecărei metode în parte. Formulările Euler și Lagrange sunt cele două metode clasice pentru definirea mișcării în mecanica continuă, iar formulările ALE și CEL sunt combinații ale metodelor clasice ce sunt utilizate în vederea depășirii dezavantajelor lor individuale (v. § 3.1.5).
- Validarea modelului numeric FSW se realizează prin compararea valorilor calculate de acesta cu valorile determinate experimental, pentru diferite caracteristici ale îmbinărilor sudate (v. § 3.1.6).
- Pentru realizarea unui model numeric valid al procesului HFSW, trebuie realizate toate activitățile specifice dezvoltării unui model numeric al procesului FSW, plus modelarea aportului suplimentar de căldură. Aportul suplimentar de căldură este modelat ca un flux circular de căldură, ce este aplicat înaintea elementului activ și ce prezintă o distribuție Gaussiană în materialul pieselor de sudat (v. § 3.2).
- Din analiza rezultatelor obținute cu ajutorul modelării numerice a proceselor HFSW reiese că amestecarea materialului are loc într-o zonă mai moale decât în convenționalul FSW, că efortul exercitat asupra elementului activ este diminuat și implicit gradul său de uzură este redus. Aceste constatări indică posibilitatea obținerii unor productivități mai ridicate prin utilizarea acestui procedeu (v. § 3.3).

## ***Partea a II-a.***

**Contribuții la dezvoltarea teoretico-  
experimentală și modelarea numerică a  
proceselor și sistemelor de sudare prin  
frecare cu element activ rotitor fără  
sau și cu aport suplimentar de căldură  
a unor structuri din Cu-DHP**



## **Capitolul 5. Direcțiile, obiectivul principal și metodologia de cercetare-dezvoltare a proceselor și sistemelor de sudare prin frecare cu element activ rotitor fără sau și cu aport suplimentar de căldură a unor structuri din Cu-DHP**

### **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 fără sau și cu aport suplimentar de căldură, FSW, respectiv, HFSW:

- dezvoltarea cunoașterii fenomenelor care au loc în cadrul proceselor și sistemelor de sudare prin frecare cu element activ rotitor fără sau și cu aport suplimentar de căldură, și corespunzător, a relațiilor dintre caracteristicile proceselor de sudare, sistemelor de sudare și ale structurilor sudate;
- dezvoltarea caracteristicilor tehnologice ale procedeelor FSW și HFSW, în vederea extinderii utilizării industriale;
- dezvoltarea modelelor numerice pentru simularea proceselor de sudare FSW și HFSW, în vederea reducerii costurilor de analiză și implementare industrială.

### **5.2. Obiectivul principal al activității de cercetare-dezvoltare**

Având în vedere datele și concluziile desprinse din analiza stadiului actual, precum și direcțiile de cercetare-dezvoltare privind procedeul de sudare HFSW, se determină ca obiectiv principal al activității de cercetare-dezvoltare în cadrul doctoratului: **dezvoltarea, prin cercetare teoretico-experimentală și modelare numerică, a proceselor și sistemelor de sudare prin frecare cu element activ rotitor fără sau și cu aport suplimentar de căldură a unor structuri din cupru.**

### **5.3. Metodologia de cercetare-dezvoltare**

Metodologia de cercetare-dezvoltare este concepută ca sistem de referință pentru acțiunile care vor fi întreprinse în vederea îndeplinirii obiectivului principal al activității avansate de doctorat și constă în realizarea următoarelor activități ce definesc conținutul capitolelor următoare ale prezentei teze de doctorat:

- (1) Realizarea unor cercetări teoretico-experimentale preliminare privind procesul FSW și procesul FSW-TIG, în vederea stabilirii influenței pe care o au unii parametri tehnologici ai acestor procedee asupra unor caracteristici de proces și asupra unor caracteristici ale îmbinărilor rezultate.
- (2) Realizarea unor cercetări teoretico-experimentale avansate care au ca scop validarea celor mai favorabile condiții tehnologice rezultate din cercetarea teoretico-experimentală preliminară a procesului FSW și extrapolarea acestor condiții la nivelul procesului hibrid FSW-TIG.
- (3) Dezvoltarea, validarea și exploatarea unui model numeric tridimensional cuplat termomecanic al procesului FSW, pentru sudarea cap la cap a două plăci de cupru pur, și extinderea acestuia pentru procesul hibrid FSW-TIG.

## Modelarea proceselor FSW și FSW-TIG în vederea realizării cercetărilor teoretico-experimentale

Reprezentările schematice ale celor două procedee de sudare utilizate în cadrul cercetărilor, cea a procedurii FSW, respectiv cea a procedurii FSW-TIG, sunt prezentate în Fig. 5.3.1 - 5.3.2.

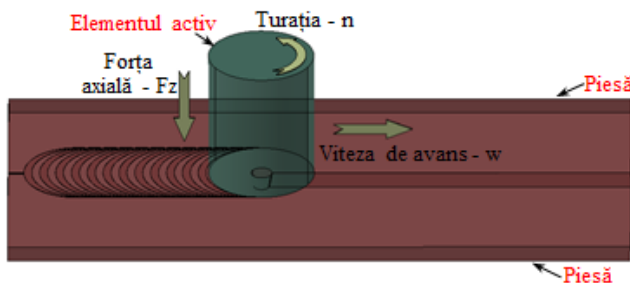


Fig. 5.3.1. Schemă a procedurii FSW

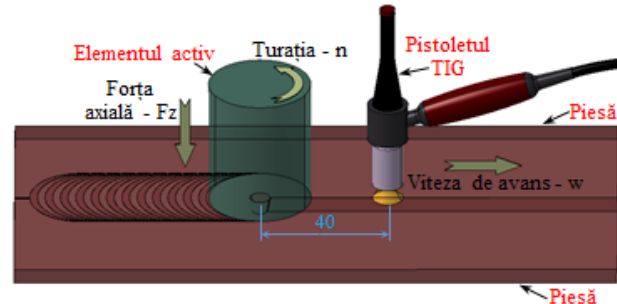


Fig. 5.3.2. Schemă a procedurii FSW-TIG

La cercetarea-dezvoltarea proceselor de sudare FSW și FSW-TIG se vor utiliza modele analitico-empirice, pornind de la un model de tip intrare-ieșire al acestor procese (Fig. 5.3.3).

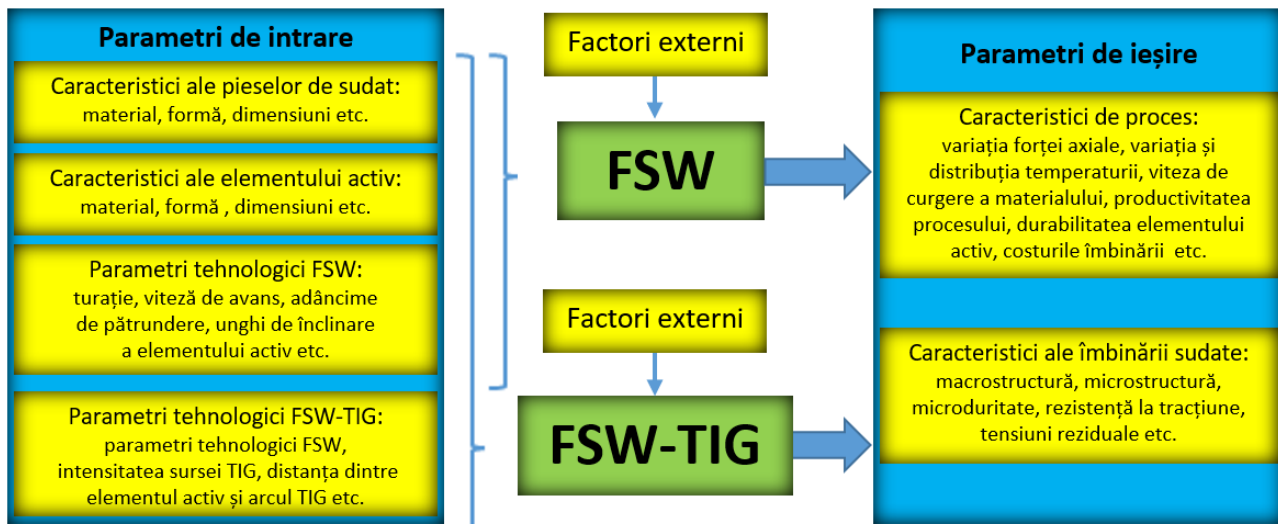


Fig. 5.3.3. Schema modelării proceselor FSW și FSW-TIG

Pentru limitarea numărului de experiențe, dintre parametrii de intrare ai proceselor FSW și FSW-TIG se vor varia doar următorii parametri tehnologici, considerați a avea o influență semnificativă asupra procesului și caracteristicilor îmbinării sudate, respectiv:

FSW		- turația elementului activ, $n$ ,	FSW-TIG		- turația elementului activ, $n$ ,
		- viteza de avans, $w$ ,			- viteza de avans, $w$ ,
					- intensitatea sursei TIG, $I$ .

Procesele de sudare FSW și FSW-TIG sunt caracterizate prin:

- temperatura de proces,  $T$ ,
- forța axială de proces,  $F_z$ .

### Planificarea experimentelor

Cercetarea experimentală a proceselor FSW și FSW-TIG s-a realizat pe baza a două planuri experimentale: un plan preliminar – bazat pe datele identificate în literatura de specialitate și unul avansat – bazat pe datele rezultate din cel preliminar.

Planul experimental preliminar utilizat pentru analiza procesului FSW este format dintr-un plan factorial complet cu două niveluri, plus încă 2 experiențe (exp. 1.2 și 1.4) realizate la valoarea centrală a turației, variind viteza de avans, ce sunt utile la analiza comparativă a celor două

procedee (Fig. 5.3.4). Planul experimental preliminar utilizat pentru analiza procesului FSW-TIG este format dintr-un plan factorial complet cu două niveluri, cu un singur parametru tehnologic variat: viteza de avans (Fig. 5.3.4).

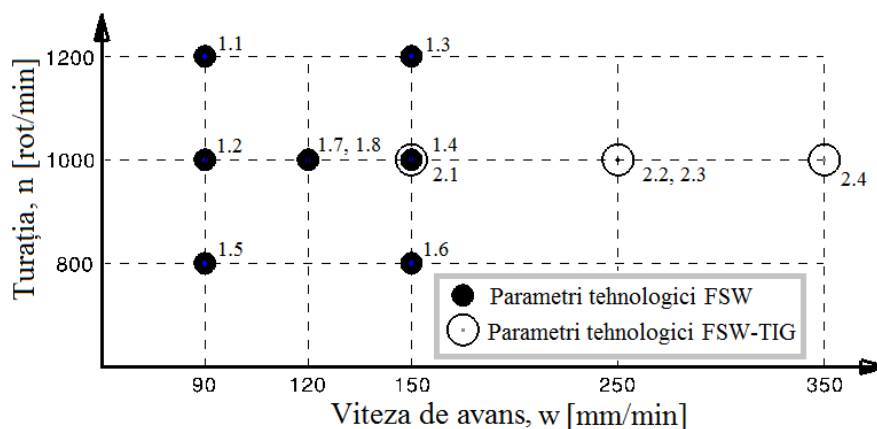


Fig. 5.3.4. Combinațiile de valori ale parametrilor tehnologici în planurile experimentale preliminare

Planurile experimentale avansate ale proceselor FSW și FSW-TIG (Tabel 5.3.4 - 5.3.5) sunt realizate după analizarea caracteristicilor îmbinărilor preliminare, având în vedere dependențele identificate. Justificările alegerii acestor noi combinații ale parametrilor tehnologici sunt detaliate în capitolul ce prezintă analiza caracteristicilor acestor îmbinări (v. § 8.1).

Tabel 5.3.4. Planul experimental avansat asociat procesului FSW

Cod exp.	Turația, n [rot/min]	Viteza de avans, w [mm/min]
1.9	800	90
1.10	800	120
1.11	800	120
1.12	800	150

Tabel 5.3.5. Planul experimental avansat asociat procesului FSW-TIG

Cod exp.	Turația, n [rot/min]	Viteza de avans, w [mm/min]	Intensitatea sursei TIG, I [A]
2.5	800	350	100
2.6	800	350	
2.7	800	250	
2.8	800	250	
2.9	1000	350	80
2.10	1000	250	

### Planificarea dezvoltării modelelor numerice

Pentru simularea numerică a procesului FSW-TIG se va utiliza softul ABAQUS 6.13/Explicit. Metoda utilizată pentru realizarea modelului numeric este metoda CEL (Coupled Eulerian-Lagrangian). Aceasta a fost aleasă datorită capacităților sale de gestionare a unor deformații mari și posibilității de urmărire a fluxului de material, care îi permit să anticipeze formarea defectelor volumice la nivelul îmbinărilor sudate.

Modelarea numerică a procesului FSW-TIG respectă metodologia de cercetare-dezvoltare prin modelare numerică prezentată în literatura de specialitate (v. § 3.2).

## Capitolul 6. Elemente ale sistemului de cercetare experimentală a proceselor de sudare prin frecare cu element activ rotitor fără sau și cu aport suplimentar de căldură a unor structuri din Cu-DHP

### 6.1. Structura de sudat

Piesele de sudat prin procedeele FSW și FSW-TIG sunt poziționate cap la cap și au forma și dimensiunile indicate în Fig. 6.1.1.

Materialul din care sunt realizate piesele de sudat prin procedeele FSW și FSW-TIG este Cu-DHP (phosphorus - deoxidized copper), un aliaj dezoxidat al cuprului cu o cantitate reziduală, dar limitată, de fosfor (99,9 % cupru și între 0,015 - 0,04 % fosfor). Cu-DHP este utilizat pentru producția de radiatoare, elemente pentru aparate de aer condiționat și frigifere, rezervoare, schimbătoare de căldură etc.

Pentru realizarea experiențelor s-au achiziționat table de Cu-DHP cu dimensiuni de 2000 x 1000 x 3 mm, obținute prin laminare la rece. Toate piesele de sudat s-au debitat din aceste foi de tablă cu un fierăstrău automat cu bandă, astfel încât latura pe care se realizează îmbinarea să fie paralelă cu direcția de laminare (Fig. 6.1.1).

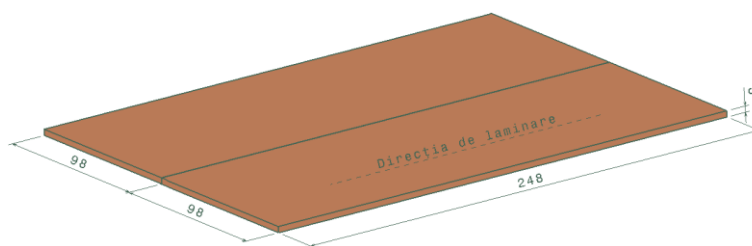


Fig. 6.1.1. Piesele de sudat prin procedeele FSW și FSW-TIG

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

Standul experimental are în componență o mașină specializată de sudare FSW, un echipament TIG de încălzire suplimentară, elementul activ rotitor, un dispozitiv de orientare și fixare a pieselor de îmbinat și diverse sisteme de achiziționare, înregistrare și monitorizare a datelor (Fig. 6.2.1).

Experiențele s-au efectuat pe mașina de sudare FSW, de tipul FSW-4-10, din dotarea ISIM Timișoara.

Echipamentul TIG utilizat la realizarea experiențelor este de tipul Kemppi MASTERTIG 2500 AC/DC și este constituit din: unitatea de încălzire, butelia de gaz protector, pistolul port-electrod și cabluri.

Dispozitivul de orientare și fixare a pieselor (Fig. 6.2.4) a fost proiectat și realizat special pentru aceste experiențe, pentru a asigura o orientare precisă și rapidă a pieselor de îmbinat.

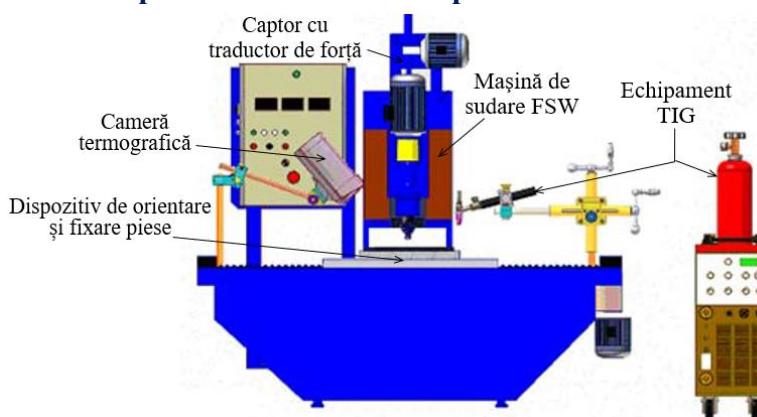


Fig. 6.2.1. Standul experimental [R03]

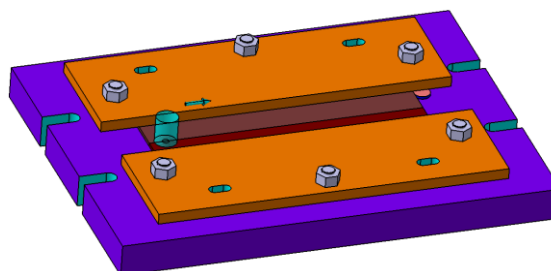


Fig. 6.2.4. Dispozitivul de orientare și fixare a pieselor de sudat

Monitorizarea procesului de sudare se realizează prin înregistrarea și analizarea valorilor temperaturii și forței axiale pe întreg parcursul procesului. Temperatura de proces s-a măsurat utilizând metoda termografiei în infraroșu, cu o cameră termografică cu infraroșu de tipul FLIR A40M. Forța axială de proces a fost măsurată cu ajutorul unui dispozitiv mecanic montat pe axul principal al mașinii de sudat, ce include un captor cu traductor de forță de compresiune WIKA.

### 6.3. Elementul activ rotitor

Elementul activ rotitor utilizat prezintă o structură clasică monobloc, cu umăr plat și pin conic neted. Forma și dimensiunile acestuia sunt prezentate în Fig. 6.3.1 și sunt în concordanță cu recomandările identificate în literatura de specialitate (v. § 1.6).

Acesta este realizat din oțel aliat de scule, **P20+S** (40 CrMnMoS 86), pretratată, cu o rezistență ridicată la solicitări mecanice și foarte bune proprietăți de prelucrabilitate prin așchiere.

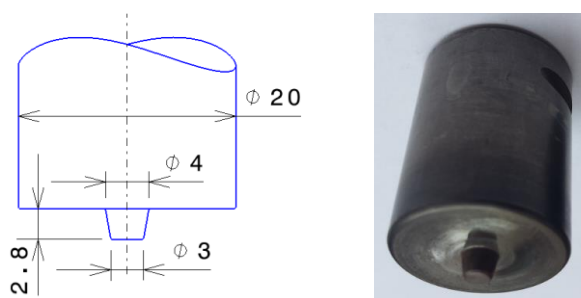


Fig. 6.3.1. Forma și dimensiunile elementului activ

### 6.4. Prelevarea și codificarea epruvetelor

Din structurile sudate în cercetările preliminare au fost extrase câte trei epruvete pentru determinarea rugozității îmbinărilor, două epruvete pentru analiza macrostructurală, microstructurală și pentru determinarea microdurității îmbinărilor și trei epruvete pentru încercarea la tracțiune (Fig. 6.4.1).

Din structurile sudate în cercetările avansate au fost extrase o epruvetă pentru analiza macrostructurală, microstructurală și pentru determinarea microdurității îmbinărilor și trei epruvete pentru încercarea la tracțiune și măsurarea rugozității. Față de cercetările preliminare s-a renunțat la prelevarea unor epruvete, ca urmare a concluziilor desprinse în urma realizării experiențelor preliminare și analizării epruvetelor specifice (Fig. 6.4.2).

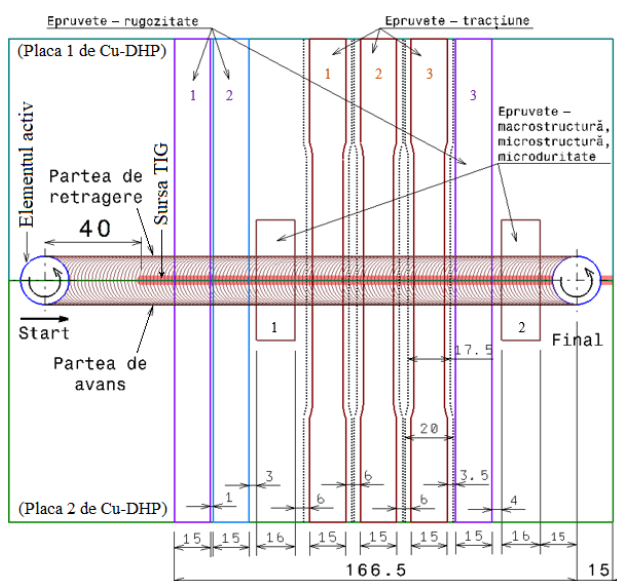


Fig. 6.4.1. Poziția epruvetelor utilizate pentru caracterizarea structurilor sudate în cadrul cercetărilor preliminare

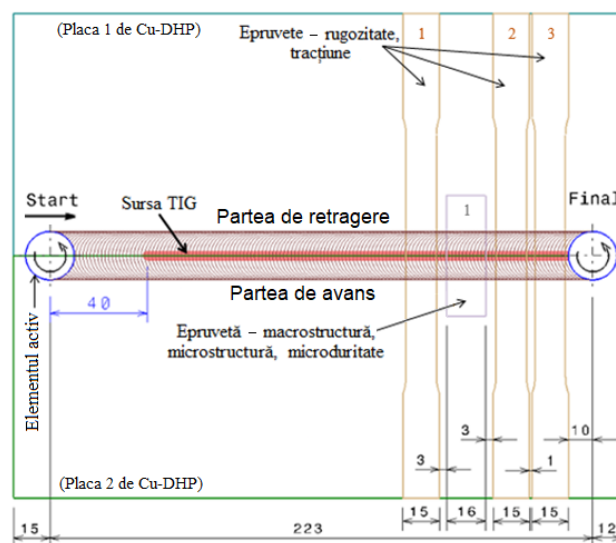


Fig. 6.4.2. Poziția epruvetelor utilizate pentru caracterizarea structurilor sudate în cadrul cercetărilor avansate

Toate epruvetele prelevate au fost debitate cu jet de apă. După prelevare epruvetele au fost inscripționate prin gravare mecanică, conform codificării prezentată în Fig. 6.4.3.

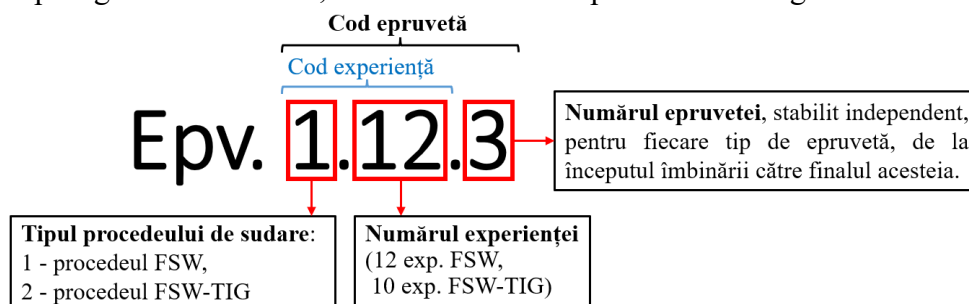


Fig. 6.4.3. Codificarea epruvetelor prelevate din structurile sudate

## 6.5. Pregătirea epruvetelor

Epruvetele utilizate pentru determinarea rezistenței la tracțiune (Fig. 6.5.2) sunt de tip *halteră* și au fost realizate având în vedere dimensiunile recomandate în standardul pentru încercări la tracțiune **SR EN ISO 6892-1**. Astfel, pregătirea epruvetelor pentru încercarea la tracțiune a impus realizarea unor prelucrări suplimentare prin frezare, după debitarea cu jet de apă, pentru a se putea asigura caracteristicile dimensionale impuse de acest standard.

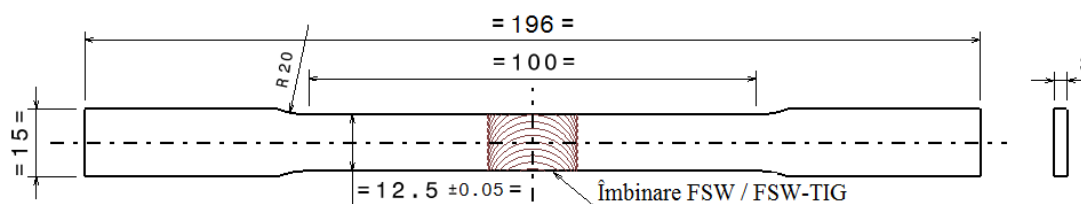


Fig. 6.5.2. Forma și dimensiunile epruvetelor utilizate pentru determinarea rezistenței la tracțiune

În vederea determinării comportamentului mecanic local al acestor îmbinări (pe fiecare zonă caracteristică a acestora), care este sumar abordat în literatura de specialitate (v. § 2.6), pentru unele dintre epruvetele încercate la tracțiune s-a utilizat și metoda Corelării Digitale a Imaginilor (DIC - Digital Image Correlation). În principiu, această metodă se bazează pe utilizarea imaginilor înregistrate simultan de două camere video, care asemănător ochiului uman, oferă o imagine spațială a obiectului analizat, permițând astfel monitorizarea câmpurilor de deplasări și de deformații pe diferite zone ale epruvetelor în timpul încercării la tracțiune.

Utilizarea acestei metode impune realizarea unei codificări aleatorii (a unor pistrii) pe zonele analizate ale epruvetelor încercate la tracțiune (Fig. 6.5.3).



Fig. 6.5.3. Localizarea zonelor investigate prin corelare de imagini

Epruvetele pentru analiza macrostructurală, microstructurală și pentru determinarea microdurității au necesitat operații suplimentare de șlefuire și lustruire. Șlefuirea acestor epruvete s-a realizat mecanic, cu hârtie metalografică, sub jet continuu de apă, pentru ca proba să nu se încălzească peste temperatura corporală, utilizând mașina de șlefuit cu două platane, Minitech 263. Pentru a îmbunătăți ergonomia și productivitatea șlefuirii acestor epruvete de mici dimensiuni a fost realizat un dispozitiv de orientare și fixare a epruvetelor, cu ajutorul căruia pot fi șlefuite simultan 2 sau mai multe epruvete (Fig. 6.5.5).

Lustruirea s-a realizat pe aceeași mașină ca și șlefuirea, hârtia metalografică fiind înlocuită cu pielea de căprioară, iar ca agent de lustruire s-a utilizat alumina ( $Al_2O_3$ ).

Pe aceleași epruvete utilizate la analiza macrostructurală, microstructurală și la determinarea microdurității, pentru care s-a realizat șlefuirea și lustruirea mecanică, s-a realizat și atacul chimic, cu o soluție de acid azotic ( $\text{HNO}_3$ ) în concentrație de 65 %, pentru a pune în evidență caracteristicile macrostructurale și microstructurale ale îmbinărilor.

## 6.6. Analiza macrostructurală și microstructurală

Analiza macrostructurală și microstructurală a îmbinărilor s-a realizat cu ajutorul unor microscopie optice cu o capacitate de mărire de până la 500 de ori.

Forma și dimensiunile epruvetelor (Fig. 6.6.1) au fost adoptate având în vedere datele identificate în literatura de specialitate [G01] și recomandările specialiștilor din centrul de cercetare în care s-au realizat experiențele (ISIM Timișoara).

## 6.7. Măsurarea rugozității cordonului de sudură

Pentru măsurarea rugozității s-a utilizat un rugozimetru portabil digital, de tipul MAHR PS-10. Rugozitatea îmbinărilor FSW este influențată în mare parte de deformările caracteristice proceselor de sudare FSW realizate de umărul elementului activ pe suprafața pieselor (efectul de “foi de ceapă”). Având în vedere acest aspect, măsurarea rugozității s-a realizat în trei zone ale epruvetei, pe direcție paralelă cu direcția de sudare, așa cum este indicat în Fig. 6.7.1.

## 6.8. Măsurarea microdurității

Determinarea microdurității Vickers s-a realizat cu ajutorul unui dispozitiv electronic de măsurare a microdurității de tip InnovaTest Falcon 500 [V02].

Valorile microdurităților Vickers ale îmbinărilor sudate au fost determinate în secțiune transversală, sub o sarcină de 0,3 kgf (2,94 N) și o durată de penetrare de 10 s. Profilul microdurității îmbinărilor sudate s-a obținut prin realizarea succesivă de măsurători în 20 puncte, poziționate la o distanță de 1 mm unul față de celălalt, la jumătatea grosimii pieselor sudate (Fig. 6.8.2).

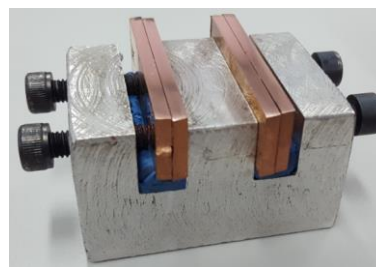


Fig. 6.5.5. Dispozitiv de orientare și fixare a epruvetelor

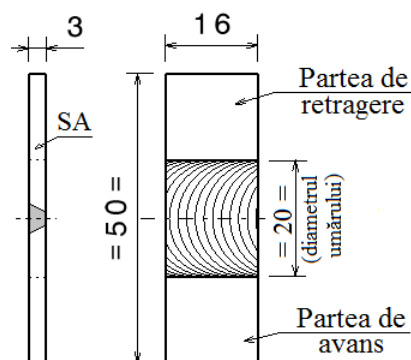


Fig. 6.5.4. Forma și dimensiunile epruvetelor pentru analiza macrostructurii, analiza microstructurii și măsurarea microdurității

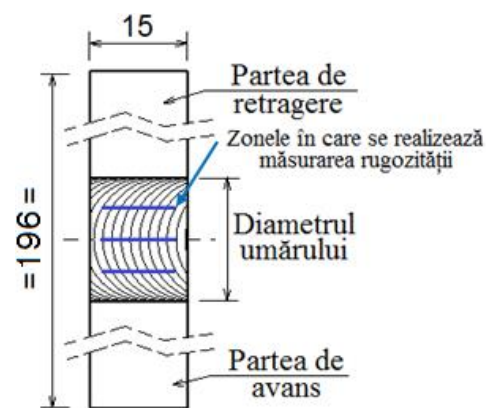


Fig. 6.7.1. Zonele epruvetelor în care se măsoară rugozitatea cordonului de sudură

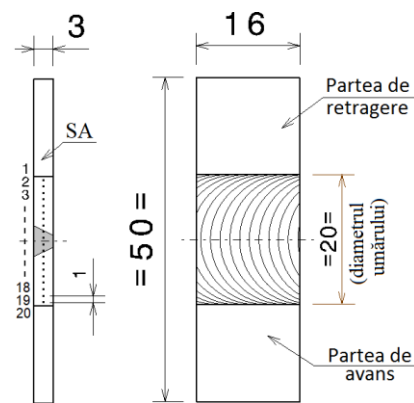


Fig. 6.8.2. Poziția punctelor pentru măsurarea microdurității

## 6.9. Încercarea la tracțiune

Încercările la tracțiune au fost efectuate în cadrul ENSTA Bretagne, pe o mașină hidraulică de încercare la tracțiune de tipul INSTRON 1342 (Fig. 6.9.2), conform standardului SR EN ISO 6892-1.

Fiecare epruvetă (Fig. 6.5.2) a fost alungită în lungul axei sale principale cu o viteză constantă de 8 mm/min, până la rupere. În timpul încercării au fost măsurate sarcina (forța) suportată de către epruvetă și deformația (alungirea) ei. Aceste date au fost utilizate în vederea determinării rezistenței la tracțiune,  $R_m$ , și alungirii relative la rupere a îmbinărilor,  $A_t$ , conform următoarelor relații:

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \text{ [MPa]} \qquad A_t = \frac{\Delta L_f}{L_e} 100 \text{ [%]}$$

unde:  $F_m$  este forța maximă suportată de epruvetă,  $S_0$  - aria secțiunii transversale inițiale a părții calibrate a epruvetei,  $\Delta L_f$  - alungirea/ extensia la rupere, iar  $L_e$  - lungimea de bază a extensometrului.

Cunoscând structura eterogenă a acestor îmbinări și faptul că determinarea tensiunilor și deformațiilor locale, pe fiecare zonă a îmbinării, este sumar abordată în literatura de specialitate (v. § 2.6), în cadrul acestor cercetări unele epruvete au fost încercate la tracțiune utilizând metoda Corelării Digitale a Imaginilor.

Determinarea câmpurilor de alungire și alungire relativă și stabilirea modului de evoluție al acestora pe cele două fețe perpendiculare ale epruvetelor (frontală și laterală - pregătite conform descrierii prezentate în § 6.5) au fost realizate prin utilizarea a două camere CCD simultan, sincronizate cu mașina de încercare la tracțiune (Fig. 6.9.2).

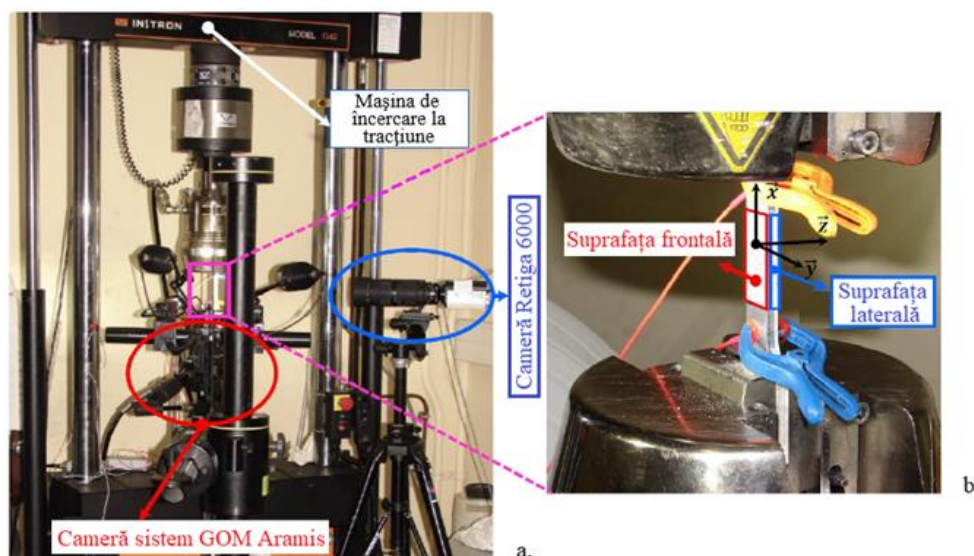


Fig. 6.9.2. Sistem de lucru pentru încercare la tracțiune și corelare digitală a imaginilor: (a) vedere de ansamblu, (b) detaliu al zonei punctelor pistrii de pe suprafețele analizate ale epruvetei (v. și Fig. 6.5.3)

## Capitolul 7. Rezultate ale cercetării teoretico-experimentale preliminare privind procesele de sudare prin frecare cu element activ rotitor fără sau și cu aport suplimentar de căldură a unor structuri din Cu-DHP

Rezultate ale cercetării teoretico-experimentale preliminare privind sudarea prin frecare cu element activ rotitor și aport suplimentar de căldură a unor structuri din cupru, care includ și elemente publicate ale autorului [C15, C16, C17, C18, N03, S10], se prezintă în cele ce urmează.



## 7.1. Date generale privind desfășurarea programului de cercetări teoretico-experimentale preliminare

În cadrul planului experimental preliminar au fost realizate experiențele prezentate în Tabelele 5.3.2 - 5.3.3, pentru sudarea cap la cap a Cu-DHP utilizând procedeul FSW, respectiv FSW-TIG. Dintre aceste experiențe două au eșuat (2.1 și 2.2), deoarece structurile îmbinate nu au putut fi desprinse de pe masa mașinii de sudat FSW fără ruperea îmbinării.

Codificarea, pregătirea și caracterizarea epruvetelor prelevate din structurile sudate (Fig. 7.1.1) s-a realizat conform metodelor și mijloacelor de prelevare, codificare, pregătire și caracterizare stabilite anterior (v. § 6.1 - 6.8).



Fig. 7.1.1. Exemplificare de structură sudată și a epruvetelor prelevate din aceasta, în cadrul cercetărilor preliminare (exp. 1.1)

## 7.2. Forța axială de proces și temperatura de proces

Evoluția temperaturii și cea a forței axiale s-au reprezentat pe aceeași diagramă, suprapuse peste schema de prelevare a epruvetelor din structura sudată (Fig. 7.2.3). Acest mod de reprezentare a permis evidențierea condițiilor locale de proces în care a fost realizată îmbinarea, respectiv, condițiile asociate zonelor din care au fost prelevate epruvetele, precum și evidențierea momentului în care forța axială devine aproximativ constantă pe parcursul experienței (momentul de la care procesul devine stabil).

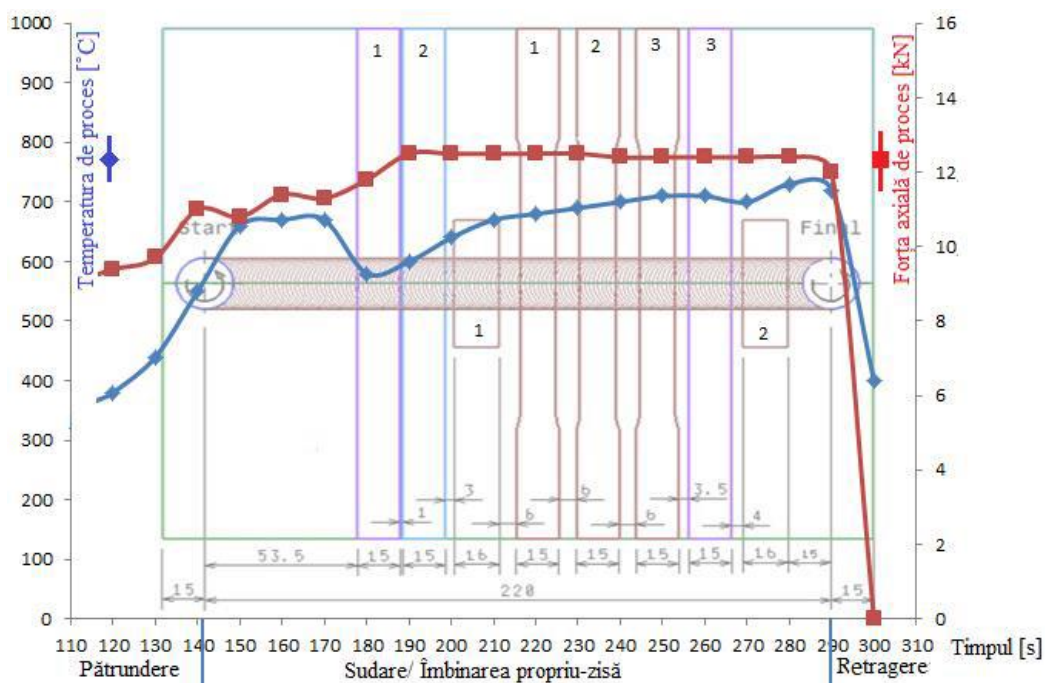


Fig. 7.2.3. Temperatura de proces, forța axială de proces (a) și aspectul îmbinării sudate (b) la sudarea FSW - exp. 1.1 ( $n = 1200$  rot/min,  $w = 90$  mm/min)

Analiza evoluțiilor temperaturii și ale forței axiale din diagramele de tipul celei prezentate în Fig. 7.2.3 scoate în evidență o serie de dependențe. Se subliniază cele ce urmează.

- Temperatura cea mai mare este regăsită, așa cum era de așteptat, în cadrul experiențelor realizate utilizând procedeul hibrid FSW-TIG (Tabel 7.6.1).
- Temperatura generată în procesele FSW și FSW-TIG crește odată cu creșterea turației elementului activ, a forței axiale de proces și/sau cu reducerea vitezei de avans.
- Forța axială de proces prezintă un rol foarte important în realizarea fără defecte a îmbinărilor FSW. Din Fig. 7.2.3 se observă, comparând evoluția forței axiale cu aspectul îmbinării sudate, că defectele de tip canal și de tip pătrundere insuficientă nu sunt eliminate decât după creșterea forței axiale.

### 7.3. Suprafețele exterioare, macrostructura și microstructura îmbinărilor sudate

Suprafața superioară a cordoanelor de sudură FSW și FSW-TIG prezintă o succesiune de urme circulare specifice acestor tipuri de îmbinări, datorate contactului dintre umărul elementului activ și materialul de sudat (Fig. 7.3.1).

**Inspecția vizuală** a îmbinărilor a scos în evidență, pentru unele eșantioane, existența pe fața cordoanelor de sudură a unora dintre defectele prezentate în literatura de specialitate, precum defecte de tip canal, pătrundere insuficientă și bavură excesivă (Fig. 7.3.1).

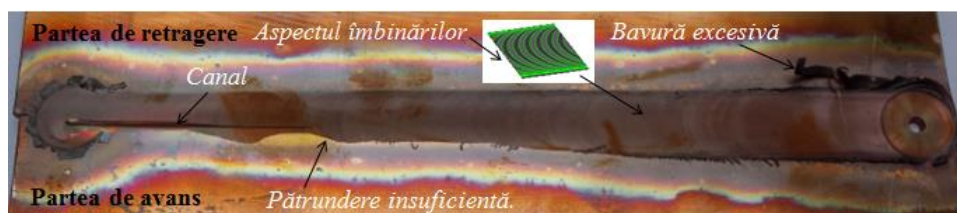


Fig. 7.3.1. Aspectul și defectele de suprafață ale îmbinărilor FSW și FSW-TIG

Defectul de tip canal apare, în special, în prima parte a îmbinării și este cauzat de lipsa de consolidare a materialului pe partea de avans (Fig. 7.2.3). Pentru experiențele realizate, acest defect a fost în cea mai mare parte eliminat în cea de-a doua jumătate a îmbinării, prin creșterea progresivă a forței axiale de proces.

Defectul de tip pătrundere insuficientă apare, de obicei, în prima parte a îmbinării și reprezintă, de asemenea, o consecință a aplicării unei forțe axiale insuficiente (Fig. 7.3.1). Acest defect este caracterizat de diminuarea lățimii urmelor circulare specifice îmbinărilor FSW la dimensiuni mai mici decât diametrul umărului elementului activ.

Defectul de tip bavură excesivă (Fig. 7.2.3, 7.3.1) este cauzat de realizarea îmbinării în condiții de lucru prea calde. Analizând temperaturile de proces ale îmbinărilor care prezintă bavuri excesive, observăm faptul că acestea au cele mai ridicate valori medii înregistrate în cadrul cercetărilor preliminare, valori ce depășesc  $650\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Tabel 7.6.1).

**Analiza macroscopică** a fost realizată în secțiunea transversală a îmbinării, după cum se prezintă în § 6.6, pe epruvetele dedicate acestei analize (Fig. 6.4.1), pregătite după cum se prezintă în § 6.5. Zona investigată macroscopic cuprinde întreaga grosime a plăcilor sudate și o lățime de aproximativ 5 mm din cordonul de sudură, dispusă simetric față de linia de îmbinare (Fig. 7.3.2). Imagini reprezentative cu macrostructura unei îmbinări FSW și a unei îmbinări FSW-TIG sunt prezentate în Tabelele 7.3.1, 7.3.2. Aceste imagini prezintă o mărire de 15x a situației reale.

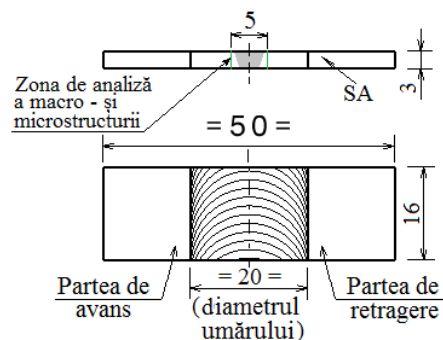
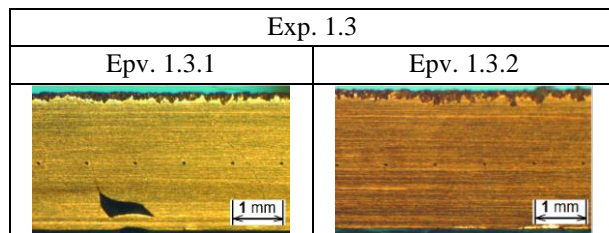


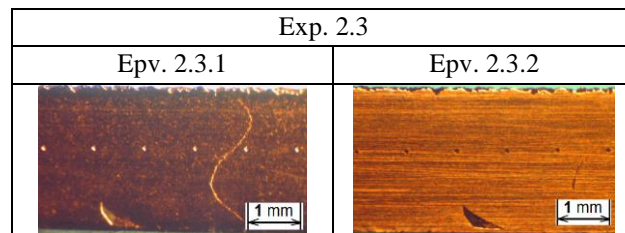
Fig. 7.3.2. Zona de analiză a macro - și microstructurii

Analiza macrostructurală scoate în evidență existența unor defecte în interiorul cordoanelor de sudură, precum defecte de tip tunel sau de tip legătură incompletă (kissing bond) (v. § 2.7).

Tabel 7.3.1. Macrostructura îmbinărilor FSW



Tabel 7.3.2. Macrostructura îmbinărilor FSW-TIG



Comparând macrostructurile celor două epruvete prelevate din aceeași structură îmbinată, s-a constatat faptul că epruvetele prelevate de la finalul îmbinării nu mai prezintă defectele identificate pe epruvetele prelevate din prima parte a îmbinărilor sau că acestea sunt diminuate (Tabel 7.3.1). Acest fapt justifică prelevarea cât mai multor epruvete din cea de-a doua parte a îmbinărilor.

**Analiza microstructurii** a fost realizată pe aceleași două epruvete pe care s-a realizat și analiza macrostructurală a acestor structuri (Fig. 6.4.1), pregătite după cum se prezintă în § 6.5.

Examinarea microscopică a sudurilor obținute prin procedeul FSW convențional (exp. 1.5 și 1.6), în legătură cu zonele caracteristice unei îmbinări FSW, evidențiază următoarele aspecte (Fig. 7.3.4).

- Materialul de bază (BM) are o structură compusă din grăunți poliedrici.
- Nucleul (NZ) prezintă grăunți de dimensiuni reduse, puternic deformați și cu granițe difuze comparativ cu cei ai BM. Această structură a grăunților este o consecință a nivelului ridicat al deformațiilor plastice înregistrate în această zonă, care au redus efectul fluxului termic.
- Zona afectată termo-mecanic (TMAZ) prezintă grăunți mai puțin deformați, cu granițe clare și de dimensiuni mai mari decât cei regăsiți în NZ, dar mai mici decât cei ai BM.
- În zona afectată termic (HAZ), grăunții sunt mai mari decât cei ai BM, deoarece această zonă nu mai este supusă deformațiilor mecanice, ci numai fluxului termic ce are drept consecință creșterea dimensiunii grăunților [C15, L04].

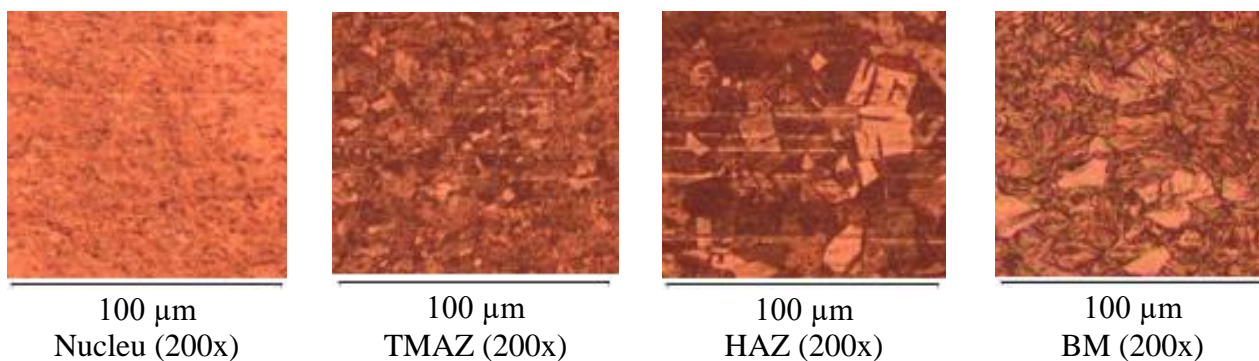


Fig. 7.3.4. Microstructura structurilor sudate FSW 1.5 și 1.6

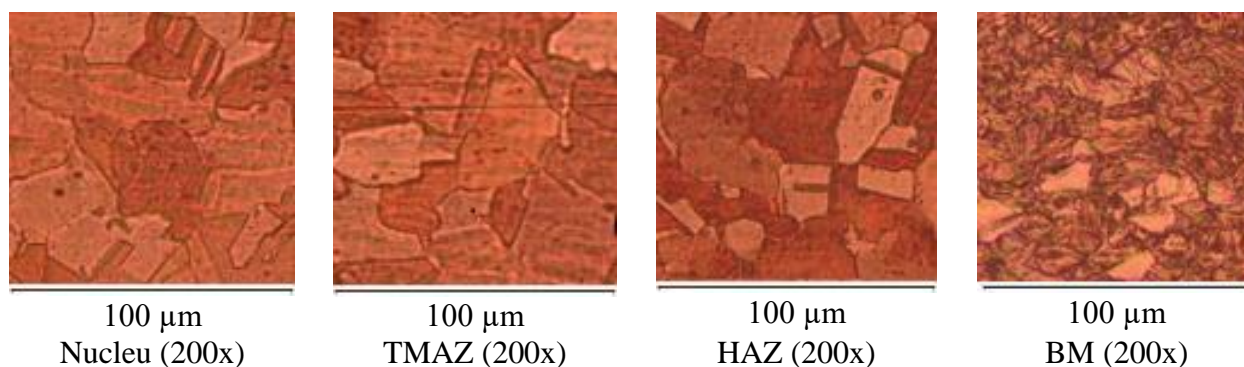


Fig. 7.3.5. Microstructura structurii sudate FSW-TIG 2.3

Examinarea microscopică a sudurii obținute prin procedeul hibrid FSW-TIG (exp. 2.3), în legătură cu zonele caracteristice unei îmbinări FSW, evidențiază următoarele aspecte (Fig. 7.3.5).

- În toate zonele cordonului de sudură, dimensiunile grăunților sunt mai mari decât cele ale grăunților BM.
- Microstructura îmbinării prezintă în zona NZ grăunți puțin deformați, de dimensiuni mai mari decât cei regăsiți în BM. Acest aspect al grăunților reprezintă efectul câmpului termic care a redus efectul importanțelor deformații mecanice realizate în această zonă.
- TMAZ prezintă, în mare măsură, aceleași caracteristici microstructurale ca NZ, ceea ce face ca pentru procedeul hibrid FSW-TIG granița dintre aceste două zone să fie practic insesizabilă.
- În HAZ, structura prezintă caracteristicile specifice unei temperaturi ridicate, care conduce, pe lângă începutul recrystalizării, la o creștere a dimensiunii grăunților, mai mari decât cei din BM, dar mai mici decât cei din NZ și TMAZ [C15].

Dimensiunile grăunților din zonele macrostructurale specifice îmbinărilor FSW și FSW-TIG sunt prezentate comparativ în varianta extinsă a acestei lucrări.

#### 7.4. Rugozitatea cordonului de sudură

Rugozitatea cordonului de sudură, caracteristică importantă a acestuia, s-a măsurat după cum se prezintă în § 6.7, respectiv, pe câte trei epruvete pentru fiecare structură sudată (Fig. 6.4.1). Măsurătorile au fost realizate pe direcția de sudare, pentru fiecare epruvetă fiind efectuate câte trei măsurători, conform celor prezentate în Fig. 6.7.1.

Cele mai mici valori ale rugozității Ra (sub 1  $\mu\text{m}$ ) corespund experiențelor în care s-au înregistrat cele mai scăzute temperaturi în timpul procesului FSW (sub 500  $^{\circ}\text{C}$ ), respectiv experiențele 1.2, 1.5 și 1.6. Cele mai mari valori ale rugozității Ra (de ~ 4  $\mu\text{m}$ ) s-au obținut pentru exp. 2.3, experiența FSW-TIG în care s-a înregistrat cea mai ridicată temperatură în timpul procesului.

#### 7.5. Microdurețea îmbinărilor sudate

Microdurețea îmbinărilor sudate, caracteristică importantă a acestora, s-a măsurat după cum se prezintă în § 6.8, respectiv, pe câte două epruvete pentru fiecare structură sudată (Fig. 6.4.1), pregătite conform celor prezentate în § 6.5. Măsurătorile au fost realizate transversal față de direcția de sudare, conform celor prezentate în Fig. 6.8.2.

Pentru analiza comparativă a microdureților corespunzătoare celor două epruvete din aceeași structură sudată (epruvete prelevate din zone diferite ale îmbinării / cu diferite condiții locale de proces), precum și pentru o comparare mai ușoară a microdureților din partea de avans cu cele din partea de retragere, profilurile microdureților celor două epruvete ale fiecărei structuri sudate au fost reunite pe o aceeași diagramă (Fig. 7.5.7, 7.5.12).

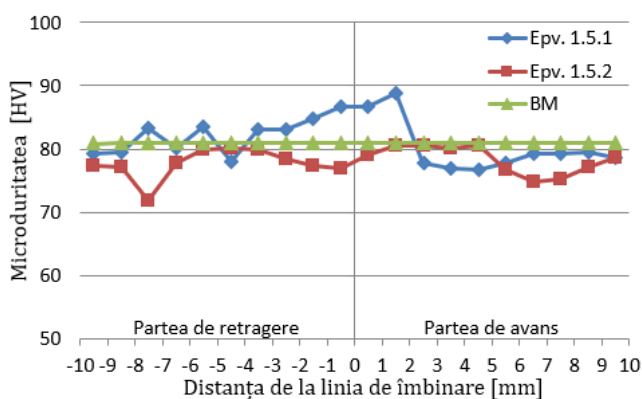


Fig. 7.5.7. Profilurile de microdurețea la epruvetele 1.5.1 și 1.5.2 (exp. 1.5)

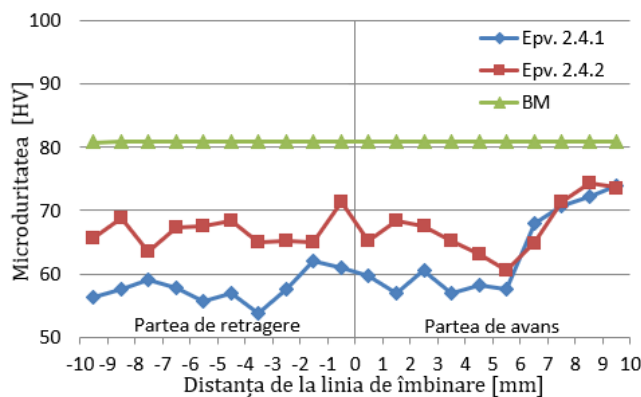


Fig. 7.5.12. Profilurile de microdurețea la epruvetele 2.4.1 și 2.4.2 (exp. 2.4)

Din analiza celor 20 de profiluri de microduritate s-a constatat că generarea unor temperaturi ridicate în cadrul procesului conduce la realizarea unei recoaceri de înmuiere și, în consecință, la o scădere a microdurității îmbinării [C01, C16, S06, S17, X01]. Astfel, cele mai mici valori ale microdurității s-au obținut pentru structurile sudate prin procedeul hibrid (Fig. 7.5.12), în care temperatura de proces a avut cele mai mari valori (Tabel 7.6.1). Scăderea cantității de căldură din timpul procesului conduce la o rafinare a dimensiunilor grăunților și astfel, la o microduritate ridicată a sudurilor, egală sau chiar mai mare decât cea a materialului de bază (Fig. 7.5.7).

Referitor la dependența profilului microdurității de condițiile de proces locale înregistrate la nivelul fiecărei epruvete, se desprind concluziile ce urmează.

- Nu sunt identificate diferențe semnificative între valorile microdurităților epruvetei prelevate de la începutul îmbinării și cele ale epruvetei prelevate de la sfârșitul acesteia atunci când valorile forței axiale și temperaturii din cadrul procesului sunt aproximativ egale în cele două zone asociate epruvetelor analizate.

- Valorile microdurităților epruvetei prelevate de la începutul îmbinării sunt mai mari decât cele ale epruvetei prelevate de la sfârșitul îmbinării (Fig. 7.5.7) atunci când temperaturile de proces sunt mai scăzute la începutul îmbinării și mai ridicate la finalul acesteia.

- Valorile microdurităților epruvetei prelevate de la începutul îmbinării sunt mai scăzute decât cele ale epruvetei prelevate de la sfârșitul îmbinării (Fig. 7.5.12), deși valorile temperaturii de proces în cele două zone sunt aproximativ egale sau chiar mai mari pentru epruvetele prelevate de la sfârșitul îmbinării atunci când vitezele de răcire pe cele două zone asociate epruvetelor analizate sunt diferite, respectiv, a doua epruvetă se răcește mai rapid.

## 7.6. Rezistența la tracțiune și alungirea relativă la rupere

Rezistența la tracțiune a îmbinărilor sudate, caracteristică importantă a acestora, s-a măsurat după cum se prezintă în § 6.9, respectiv, pe câte trei epruvete pentru fiecare structură sudată (Fig. 6.4.1), pregătite în prealabil conform datelor prezentate în § 6.5.

Rezistența la tracțiune a epruvetelor prezintă valori mai mari pentru epruvetele structurilor obținute prin procedeul clasic FSW și valori mai scăzute pentru epruvetele structurilor obținute prin procedeul FSW-TIG.

Prin realizarea unei corelații între valorile temperaturii din cadrul procesului și cele ale rezistenței la tracțiune, se observă, ca și în cazul microdurității, că odată cu creșterea temperaturii rezistența la tracțiune scade (Tabel 7.6.1). Se constată că cele mai mari trei valori ale rezistenței la tracțiune sunt obținute pentru structurile realizate în experiențele în care temperatura medie din proces este cuprinsă în intervalul 466 - 500 °C.

Alungirea relativă la rupere este, pentru majoritatea îmbinărilor realizate, mult mai scăzută decât cea a materialului de bază, a cărui valoare este de 55 %.

O sinteză ce cuprinde valorile medii ale temperaturii, forței axiale, rezistenței la tracțiune, alungirii relative și microdurității, asociate proceselor și structurilor experimentate în cele 10 experiențe realizate în cercetările preliminare este prezentată în Tabelul 7.6.1. Din acest tabel se identifică, cu relativă ușurință, condițiile experimentale care au condus la obținerea celor mai bune proprietăți ale îmbinărilor sudate, proprietăți care sunt în mare parte strâns legate de temperaturile medii din cadrul procesului.

Tabel 7.6.1. Valori medii ale mărimilor forță axială de proces, temperatură de proces, microduritate, rezistență la tracțiune și alungire relativă la rupere, în funcție de parametri tehnologici

Cod exp.	Turația	Viteza de avans	Intensi-tatea sursei TIG	Forța axială de proces	Temperatura de proces		Microduritate		Rezistența la tracțiune		Alungirea relativă la rupere		
	n	w	I	F <sub>z</sub> *	T*		HV*		R <sub>m</sub> *		A <sub>r</sub> *		
	[rot/min]	[mm/min]	[A]	[kN]	[°C]	C	[HV]	C	[MPa]	C	[%]	C	
1.1	1200	90	-	12.5	693	8	66.6	8	193.2	4	4.4	3	
1.2	1000	90		9.7	466	1	80.4	2	218.6	1	25.2	1	
1.3	1200	150		11.8	580	6	71.8	6	190.5	5	9.1	2	
1.4	1000	150		13.2	550	5	79.9	3	171.3	7	1.5	8	
1.5	800	90		12.6	476	2	79.6	4	216.6	2	2.5	5	
1.6	800	150		12.6	500	3	81.1	1	207.4	3	1.6	7	
1.7	1000	120		9.1	530	4	74	5	165.6	8	2.1	6	
1.8	1000	120		11.6	663	7	68.3	7	189.5	6	4.3	4	
2.3	1000	250		100	11.7	868	10	62.7	10	135.8	10	0.7	10
2.4	1000	350			12	845	9	63.9	9	147.8	9	1.2	9
<b>Materialul de bază (Cu-DHP)</b>							<b>81</b>		<b>257</b>		<b>55</b>		

Legendă Exp. FSW: 1.1, 1.2, ..., 1.8; Exp. FSW-TIG: 2.3, 2.4; \*: Medie a valorilor acceptabile, C: Clasament

## 7.7. Studiu de caz privind prezența și influența unor defecte din structuri sudate

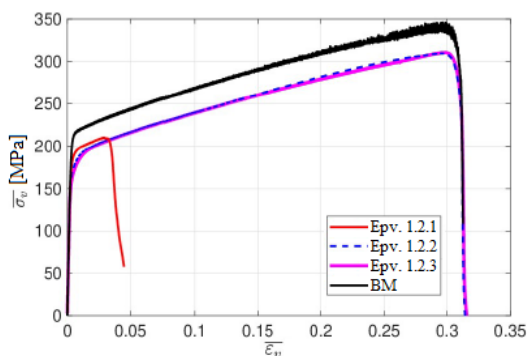
S-a efectuat un studiu de caz pentru evidențierea unor defecte din structurile sudate FSW și a influenței acestora asupra comportamentului epruvetelor specifice, pe baza datelor înregistrate în timpul probei de încercare la tracțiune și corelare digitală a imaginilor (Digital Image Correlation) (v. § 6.5, 6.9, 7.3, 7.6, [S10]), după cum urmează.

A fost ales grupul de epruvete prelevate din structurile sudate realizate la exp. 1.2 și 1.4, precum și din materialul de bază (BM). În condițiile încercării la tracțiune a unei epruvete (v. § 6.9), se consideră tensiunea reală,  $\sigma_v$ , și alungirea relativă reală,  $\varepsilon_v$ , respectiv:

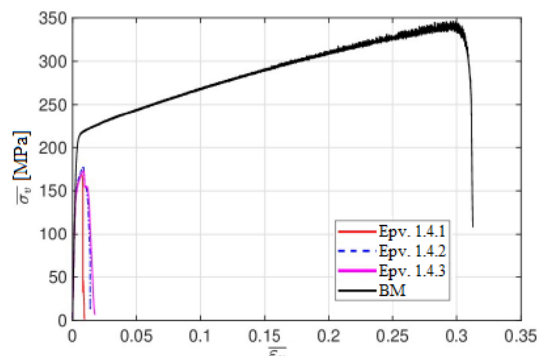
$$\sigma_v = \sigma(1 + \varepsilon), \varepsilon_v = \ln(1 + \varepsilon), \sigma = F/S_0, \varepsilon = \Delta L/L_0, \Delta L = L - L_0 \quad (7.7.2)$$

unde:  $\sigma$  și  $\varepsilon$  sunt tensiunea convențională și, respectiv, alungirea specifică convențională [R05];  $S_0$  și  $L_0$  – aria secțiunii transversale inițiale și, respectiv, lungimea/ distanța inițială dintre două repere asociate părții calibrate a epruvetei;  $F$  – forța de solicitare;  $\Delta L$  – alungirea epruvetei;  $L$  – lungimea porțiunii calibrate a epruvetei pe care se măsoară alungirea în orice moment al încercării [S18];

La fiecare epruvetă, se determină relația/ dependența dintre tensiunea medie reală,  $\overline{\sigma}_v$ , și alungirea relativă medie reală,  $\overline{\varepsilon}_v$ . Pentru epruvetele considerate, dependențele grafice rezultate sunt după cum se prezintă în Fig. 7.7.1 [S10].



a. Epv. 1.2.1, 1.2.2, 1.2.3, BM



b. Epv. 1.4.1, 1.4.2, 1.4.3, BM

Fig. 7.7.1. Relații dintre tensiunea medie reală,  $\overline{\sigma}_v$ , și alungirea relativă medie reală,  $\overline{\varepsilon}_v$

De ansamblu, se constată că, în comparație a structura sudată FSW 1.2, structura sudată FSW 1.4 prezintă o tensiune  $\overline{\sigma}_v$  maximă mai redusă cu aproximativ 44 %.

În raport cu cele de mai sus, se aprofundează analiza Epv. 1.2.3 și Epv. 1.4.3 (prelevate din zona de stabilitate a procesului de sudare) și se consideră relațiile  $(\overline{\sigma}_v, \overline{\epsilon}_v)$  pentru valori mici, 0 - 0,015, ale mărimii  $\overline{\epsilon}_v$ , respectiv:

$$\overline{\sigma}_v = f_v(\overline{\epsilon}_v), \overline{\epsilon}_v \in [0; 0,015] \quad (7.7.4)$$

Dependențele grafice rezultate (rel. 7.7.4) sunt după cum se prezintă în Fig. 7.7.4. De asemenea, se consideră o serie de valori de lucru ale mărimii  $\overline{\sigma}_v$  din timpul încercării la tracțiune și stările corespunzătoare  $(\overline{\sigma}_v, \overline{\epsilon}_v)$  ale Epv. 1.2.3 și Epv. 1.4.3, după cum se prezintă în Fig. 7.7.4.

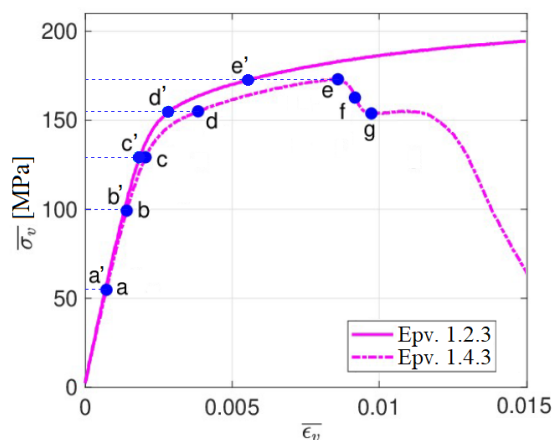


Fig. 7.7.4. Relațiile dintre tensiunea medie reală,  $\overline{\sigma}_v$ , și alungirea relativă medie reală,  $\overline{\epsilon}_v$ , pentru valori mici, 0 - 0,015, ale mărimii  $\overline{\epsilon}_v$ , la Epv. 1.2.3 și Epv. 1.4.3

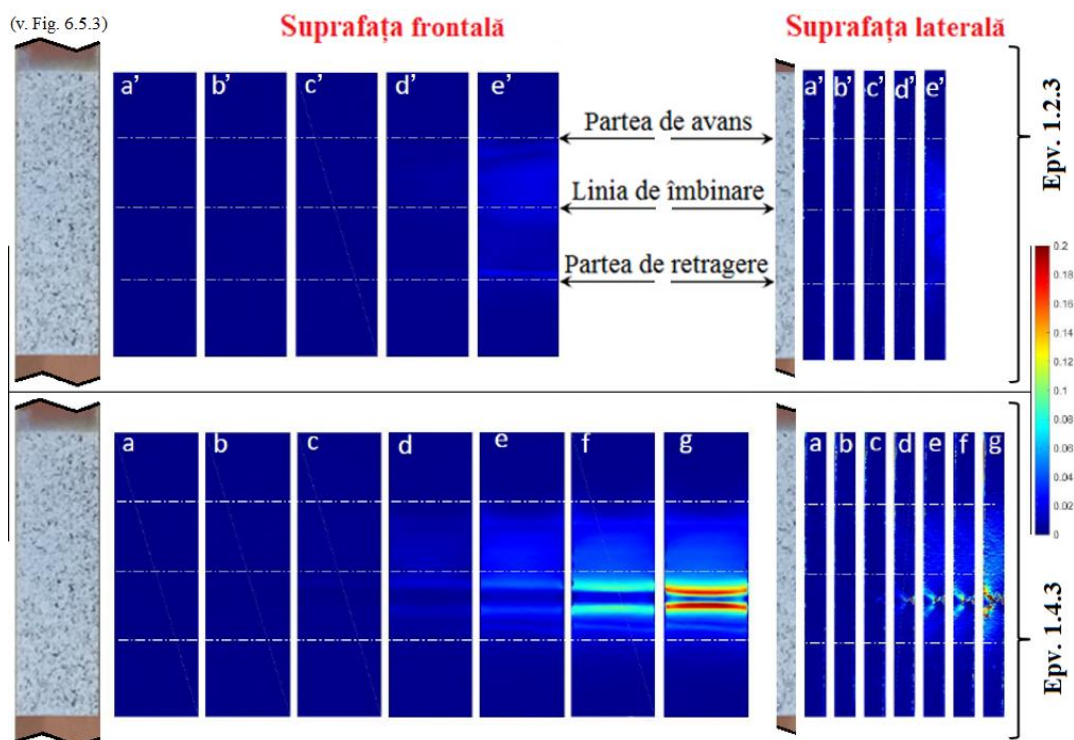


Fig. 7.7.6. Hărțile/ câmpurile de alungire relativă, asociate punctelor *pistrui* de pe suprafețele frontală și laterală, corespunzătoare stărilor  $a', b', \dots, e'$  și  $a, b, \dots, g$  ale Epv. 1.2.3 și Epv. 1.4.3, la tracțiune după direcția  $x$  (v. și Fig. 6.9.2)

Pentru fiecare stare  $a', b', \dots, e'$  și  $a, b, \dots, g$  se determină câmpul/ harta de alungire (vezi varianta extinsă a acestei lucrări) și câmpul/ harta de alungire relativă (Fig. 7.7.6) asociate punctelor *pistrui* de pe suprafețele frontală și laterală ale Epv. 1.2.3 și, respectiv, Epv. 1.4.3, prin prelucrarea datelor înregistrate în timpul probei de încercare la tracțiune și corelare digitală a imaginilor (Digital Image Correlation).

Diferențele dintre câmpurile de alungire relativă asociate stărilor  $d'$  și  $d$ ,  $e'$  și  $e$  și evoluția acestora pentru stările  $f$  și  $g$  indică faptul că Epv. 1.4.3 cedează la o tensiune și o alungire relativă de valori mai scăzute decât cele înregistrate la Epv. 1.2.3 (v. § 7.6, Fig. 7.7.1.a, b, 7.7.4).

În plus, la Epv. 1.4.3, câmpurile de alungire relativă evidențiază, cu începere de la starea  $d$  a suprafeței laterale (Fig. 7.7.6), localizarea unor alungiri relative mai severe sub formă de "fluture", formă specifică unui câmp al alungirilor relative realizate în jurul unei fisuri. Având în vedere faptul că, tot pe partea de retragere a îmbinării, în apropierea zonei de contact dintre suprafața conică a elementului activ și materialul sudat a fost identificat și defectul de tip *legătură incompletă* (kissing bond) (v. și § 7.3), apariția acestei fisuri este pusă pe seama prezenței acestui defect.

## 7.8. Orientarea cercetărilor avansate

Proprietățile mecanice ale îmbinărilor FSW și FSW-TIG ale cuprului sunt influențate negativ de creșterea temperaturii din cadrul procesului. Din rezultatele cercetărilor preliminare și din unele studii identificate în literatura de specialitate [H07] reiese faptul că cele mai bune proprietăți mecanice sunt obținute în experiențele în care temperaturile medii din timpul procesului sunt cuprinse în intervalul 460 - 530 °C.

În consecință, pentru a obține temperaturi mai scăzute în timpul procesului FSW-TIG și a îmbunătăți astfel proprietățile mecanice ale îmbinărilor obținute, menținând productivitatea ridicată a acestui procedeu, în cadrul cercetărilor avansate este necesară realizarea unor intervenții asupra valorilor parametrilor tehnologici. Astfel, din analiza rezultatelor cercetărilor preliminare reiese faptul că opțiunile fezabile de scădere a temperaturii procesului sunt reprezentate de scăderea turației elementului activ și scăderea aportului suplimentar de căldură generat de sursa TIG [C18].

## **Capitolul 8. Rezultate ale cercetării teoretico-experimentale avansate privind procesele de sudare prin frecare cu element activ rotitor fără sau și cu aport suplimentar de căldură a unor structuri din Cu-DHP**

Rezultate ale cercetării teoretico-experimentale avansate privind sudarea prin frecare cu element activ rotitor și aport suplimentar de căldură a unor structuri din cupru, care includ și elemente publicate ale autorului [C18], se prezintă în cele ce urmează, grupate pe mărimile analizate în timpul cercetării, care caracterizează procesul de sudare FSW/ FSW-TIG și structura sudată.

### 8.1. Date generale privind desfășurarea programului de cercetări teoretico-experimentale avansate

Având în vedere concluzia cercetării teoretico-experimentale preliminare, conform căreia opțiunile fezabile de scădere a temperaturii de proces, la valori ce conduc la obținerea unor bune proprietăți mecanice ale structurilor sudate prin procedeul FSW-TIG, sunt reprezentate de scăderea turației elementului activ și de scăderea aportului suplimentar de căldură generat de sursa TIG, au fost propuse și realizate experiențele prezentate în Tabelele 5.3.4 - 5.3.5, pentru sudarea cap la cap a Cu-DHP utilizând procedeul FSW, respectiv FSW-TIG.

Codificarea, pregătirea și caracterizarea epruvetelor prelevate din structurile sudate (Fig. 8.1.1) s-a realizat conform metodelor și mijloacelor de prelevare, codificare, pregătire și caracterizare stabilite anterior (v. § 6.1 - 6.8).



Fig. 8.1.1. Exemplificare de structură sudată și a epruvetelor prelevate din aceasta, în cadrul cercetărilor avansate (exp. 2.10)



## 8.2. Forța axială de proces și temperatura de proces

Temperatura și forța axială au fost măsurate cu ajutorul mijloacelor prezentate în § 6.2. Ca și în cazul cercetărilor preliminare, valorile măsurate ale temperaturii și forței axiale au fost reprezentate pe aceeași diagramă, suprapuse peste schema de prelevare a epruvetelor (Fig. 8.2.10).

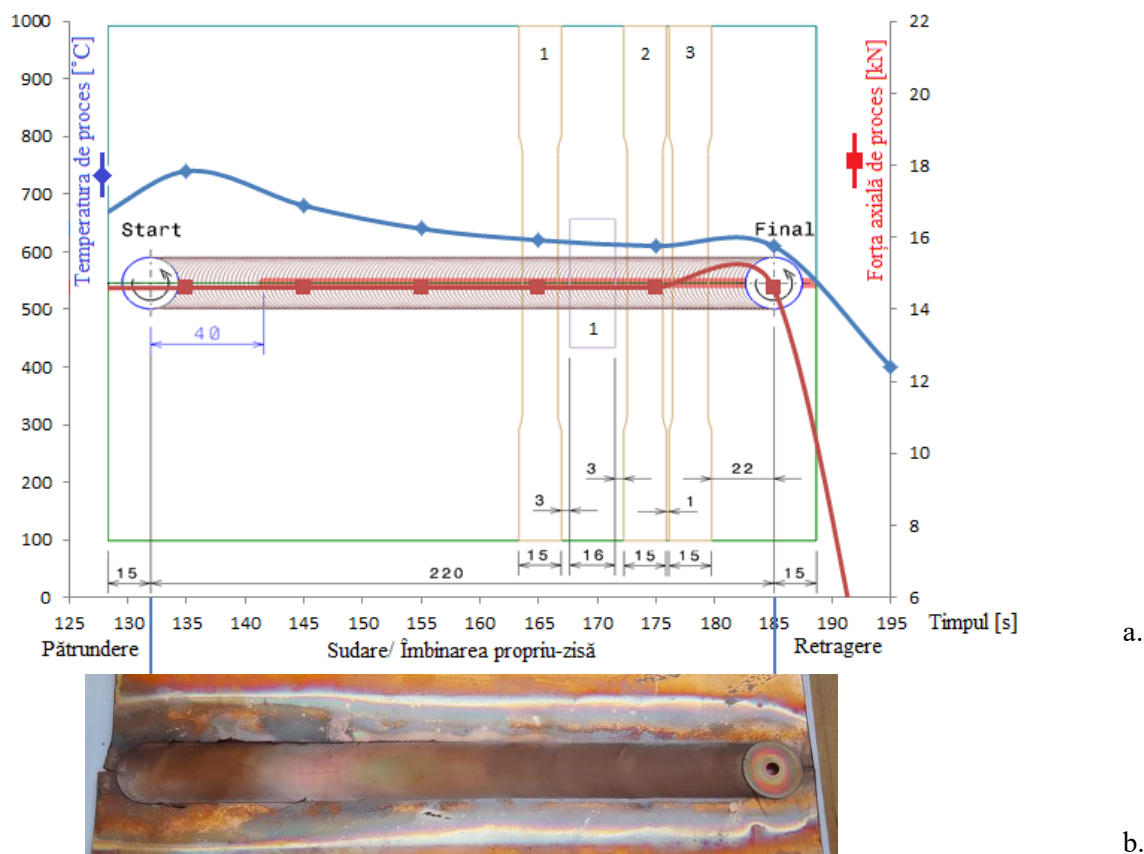


Fig. 8.2.10. Temperatura de proces, forța axială de proces (a) și aspectul îmbinării sudate (b) la sudarea FSW-TIG - exp. 2.10 ( $n = 1000$  rot/min,  $w = 250$  mm/min,  $I = 80$  A)

Analiza variației valorilor temperaturii și forței axiale din diagramele anterioare scoate în evidență o serie de dependențe. Se subliniază cele ce urmează.

- Temperaturile de proces înregistrate în experiențele FSW, prezentate în Tabelul 8.6.1, prezintă valori incluse sau foarte apropiate de intervalul țintit, 460 - 530 °C.
- Temperaturile înregistrate în procesul FSW-TIG au scăzut față de cele înregistrate în experiențele preliminare (Tabel 8.6.1), atingând valori mult mai apropiate de intervalul mai sus menționat. Acest fapt indică alegerea corectă a valorilor parametrilor tehnologici în cercetările avansate, asigurând premisele necesare îndeplinirii obiectivului stabilit.
- Forța axială de proces (forța de apăsare) are un rol foarte important în realizarea fără defecte a îmbinărilor FSW și FSW-TIG, în mod special în cazurile în care se utilizează un set de parametri tehnologici care conduc la o amestecare deficitară a materialului:

$$\frac{\text{Viteza de avans } \textit{mică} \text{ [rot/min]}}{\text{Viteza de avans } \textit{mare} \text{ [mm/min]}} = \text{Rata de amestecare } \textit{mică} \text{ [rot/mm]} \Rightarrow \text{Amestecare deficitară}$$

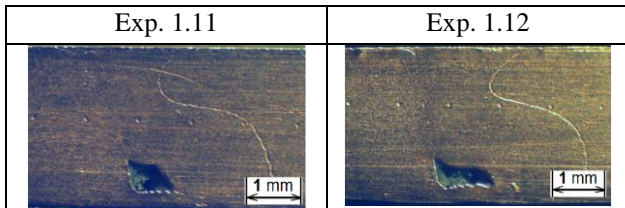
- Astfel că, în experiențele realizate odată ce viteza de avans este mărită, este necesară și mărirea forței axiale, pentru a compensa acest deficit de amestecare.

- Datorită scăderii temperaturilor de proces în aceste experiențe, se observă că defectele de tip bavură excesivă sunt mult diminuate.

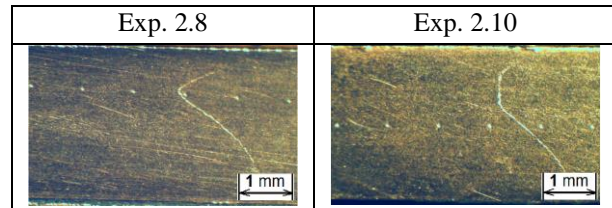
### 8.3. Suprafețele exterioare și macrostructura îmbinărilor sudate

Analiza macroscopică a fost realizată în secțiunea transversală a îmbinării, pe epruvetele dedicate acestei analize (Fig. 6.4.2), utilizând un microscop optic cu o mărire de 15x a imaginii preluate. Zona investigată macroscopic are aceeași localizare cu cea analizată macroscopic în cercetările preliminare (Fig. 7.3.2). Imagini reprezentative cu macrostructura îmbinărilor FSW/ FSW-TIG sunt prezentate în Tabelele 8.3.1, 8.3.2.

Tabel 8.3.1. Macrostructura îmbinărilor FSW



Tabel 8.3.2. Macrostructura îmbinărilor FSW-TIG



Analiza macrostructurală scoate în evidență, și de această dată, existența defectelor de tip tunel și de tip legătură incompletă (kissing bond) din interiorul cordonelor de sudură. Această analiză a permis localizarea acestor defecte în funcție de traiectoria urmată de elementul activ (Fig. 8.3.1) și identificarea cauzelor generării lor, care sunt prezentate în varianta extinsă a acestei lucrări.

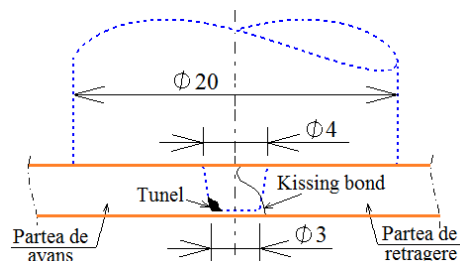


Fig. 8.3.1. Poziția unor defecte la îmbinările FSW și FSW-TIG

Singurele îmbinări realizate în cercetările avansate care nu prezintă defectul de tip tunel sunt îmbinările FSW-TIG 2.8 și 2.10. Se observă că structura sudată în exp. 2.8 prezintă caracteristicile unei îmbinări rezistente (temperatura medie de proces cuprinsă în intervalul 460 - 530 °C și absența defectului de tip tunel).

### 8.4. Rugozitatea cordonului de sudură

Rugozitatea cordonului de sudură, caracteristică importantă a acestuia, s-a măsurat după cum se prezintă în § 6.7. Dacă în cercetările preliminare rugozitatea a fost măsurată pe epruvete dedicate exclusiv acestei analize, de această dată, măsurătorile au fost realizate pe epruvetele pentru încercarea la tracțiune, înainte de încercarea acestora (v. § 6.4).

Din analiza valorilor medii ale rugozităților determinate la nivelul fiecărei structuri sudate se constată că cele mai mici valori ale rugozității corespund cordonelor de sudură realizate în

experiențele ce prezintă cele mai scăzute temperaturi înregistrate în cadrul procesului (FSW/ FSW-TIG) (Fig. 8.4.3). Așadar, odată cu creșterea temperaturii generate în cadrul procesului, rezistența la deformare plastică a materialului de sudat scade și, în consecință, suprafața îmbinării prezintă rugozități mai ridicate [C17].

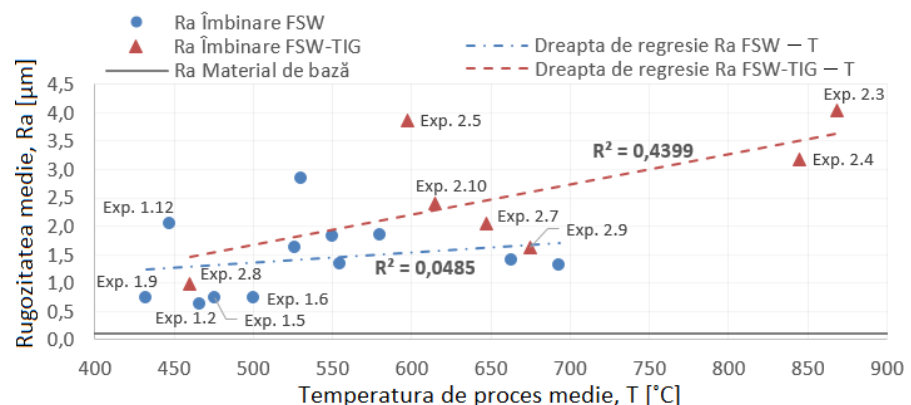


Fig. 8.4.3. Elemente asociate analizei de regresie privind corelația dintre rugozitatea cordonului de sudură și temperatura de proces medie

## 8.5. Microduritatea îmbinărilor sudate

Microduritatea îmbinărilor sudate, caracteristică importantă a acestora, s-a măsurat după cum se prezintă în § 6.8, respectiv, pe câte o epruvetă pentru fiecare structură sudată (Fig. 6.4.2), pregătită în prealabil conform datelor prezentate în § 6.5.

Profilurile microdurităților structurilor sudate în cercetările avansate au fost reunite într-o singură diagramă, pentru fiecare procedeu în parte, FSW (Fig. 8.5.1) și FSW-TIG (Fig. 8.5.2). Din analiza celor două diagrame se observă superioritatea procedeeului FSW clasic față de cel hibrid în ceea ce privește microduritățile rezultate în zona îmbinării.

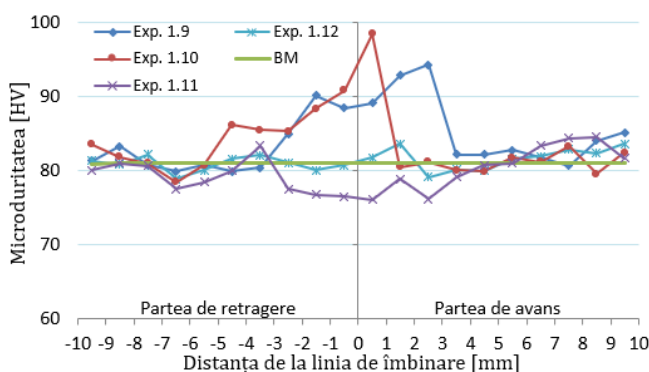


Fig. 8.5.1. Profilurile de microduritate la structurile sudate FSW

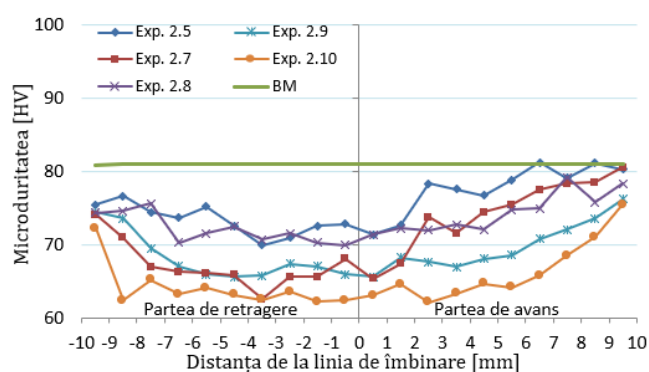


Fig. 8.5.2. Profilurile de microduritate la structurile sudate FSW-TIG

Panta negativă a dreptelor de regresie generate pe baza valorilor medii ale microdurităților îmbinărilor FSW și FSW-TIG indică, de asemenea, scăderea microdurității odată cu creșterea temperaturii înregistrate în cadrul procesului (Fig. 8.5.3). Valorile relativ mari ale coeficienților de determinare  $R^2$  indică faptul că microduritatea îmbinărilor este puternic influențată variația temperaturii.

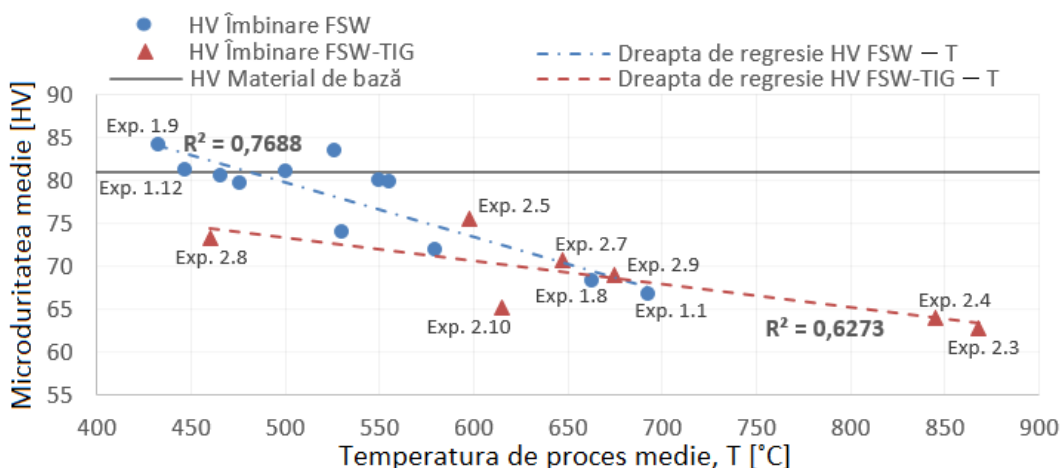


Fig. 8.5.3. Elemente ale analizei de regresie privind corelația dintre microduritatea medie a îmbinării și temperatura de proces medie

Analiza comparativă a microdurităților determinate pe epruvetele realizate în cercetările preliminare și a celor determinate pe epruvetele realizate în cercetările avansate, evidențiază faptul că microduritățile structurilor sudate în cercetările avansate au valori superioare celor obținute în cercetările preliminare. Acest fapt este datorat scăderii temperaturilor înregistrate în cadrul acestor experiențe (Tabel 8.6.1). Pentru îmbinările FSW a fost înregistrată o creștere a microdurității de 4 % față de microduritatea materialului de bază, iar pentru îmbinările FSW-TIG, o creștere de până la 93 % din microduritatea materialului de bază.

## 8.6. Rezistența la tracțiune și alungirea relativă la rupere

Rezistența la tracțiune a îmbinărilor sudate, caracteristică importantă a acestora, s-a măsurat după cum se prezintă în § 6.9, respectiv, pe câte trei epruvete pentru fiecare structură sudată (Fig. 6.4.2), pregătite în prealabil conform datelor prezentate în § 6.5.

O sinteză care cuprinde valorile medii ale rezistențelor la tracțiune ale epruvetelor prelevate din structurile sudate în cercetările avansate, este prezentată în Tabelul 8.6.1.

Tabel 8.6.1. Valori medii ale mărimilor forță axială de proces, temperatură de proces, microduritate, rezistență la tracțiune și alungire relativă la rupere, în funcție de parametri tehnologici

Cod exp.	Turația	Viteza de avans	Intensitatea sursei TIG	Forța axială de proces	Temperatura de proces		Microduritatea		Rezistența la tracțiune		Alungirea relativă la rupere	
	n	w	I	F <sub>z</sub> *	T*		HV*		R <sub>m</sub> *		A <sub>t</sub> *	
	[rot/min]	[mm/min]	[A]	[kN]	[°C]	C	[HV]	C	[MPa]	C	[%]	C
1.9	800	90	-	10.1	432.5	1	84.2	1	186.8	3	2.8	3
1.10	800	120		13.1	526	3	83.4	2	179.8	4	1.5	4
1.11	800	120		14.4	555	4	79.8	4	197.6	2	4.5	2
1.12	800	150		15.9	447	2	81.2	3	200.6	1	4.7	1
2.5	800	350	100	21	597.5	3	75.5	1	186.3	4	2.8	4
2.6	800	350		15.5	553	2	-	-	-	-	-	-
2.7	800	250		21	647.5	5	70.7	3	190.1	3	4.1	3
2.8	800	250		19.2	460	1	73.2	2	235.1	1	35.8	1
2.9	1000	350	80	20.4	675	6	68.9	4	150.9	5	1	5
2.10	1000	250		14.6	615	4	65.1	5	222.6	2	15	2
<b>Materialul de bază (Cu-DHP)</b>							<b>81</b>		<b>257</b>		<b>55</b>	
<i>Legendă</i> Exp. FSW : 1.9, 1.10, 1.11, 1.12; Exp. FSW-TIG: 2.5, 2.6, ..., 2.10; *: Medie a valorilor acceptabile, C: Clasament												

Au fost obținute îmbunătățiri considerabile ale rezistențelor la tracțiune ale structurilor sudate FSW-TIG în cercetările avansate, acestea ajungând până la 91,5 % din rezistența la tracțiune a materialului de bază. Acest procent este superior celui mai mare procent obținut pentru structurile îmbinate prin procedeul FSW, de 85,1 % din rezistența la tracțiune a materialului de bază.

Această creștere considerabilă a rezistenței la tracțiune a structurilor sudate este datorată scăderii temperaturilor din cadrul procesului hibrid, în contextul menținerii unei bune amestecări a materialului în cordonul de sudură. Această amestecare corespunzătoare este caracterizată de un aspect vizual uniform al cordonului de sudură și de lipsa defectelor, atât pe fața cordonului, cât și în secțiunea acestuia. Astfel, se poate alătura principalului avantaj al procedeei FSW-TIG, reprezentat de productivitatea sa mărită, și posibilitatea realizării de îmbinări ale Cu pur cu proprietăți mecanice superioare, similare celor realizate utilizând procedeul FSW clasic.

Panta negativă a dreptelor de regresie generate pe baza valorilor medii ale rezistențelor la tracțiune măsurate pe epruvetele prelevate din structurile sudate prin procedeele FSW și FSW-TIG indică aceeași tendință de scădere a rezistenței la tracțiune odată cu creșterea temperaturii înregistrate în cadrul procesului (Fig. 8.6.3).

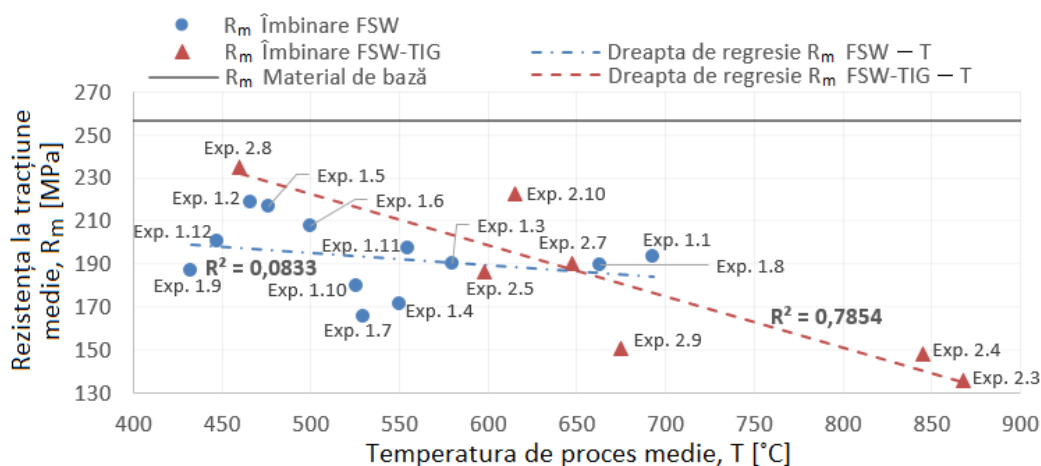


Fig. 8.6.3. Elemente ale analizei de regresie privind corelația dintre rezistența la tracțiune a structurilor sudate și temperatura de proces medie

Se observă că patru dintre cele mai mari cinci valori ale rezistenței la tracțiune s-au obținut în experiențele în care temperaturile medii de proces sunt cuprinse în intervalul 460 - 530 °C (Tabel 8.6.1, Fig. 8.6.3). Cea mai mare valoare medie a rezistenței la tracțiune este identificată pentru structura sudată în exp. 2.8, experiență FSW-TIG în care s-a înregistrat cea mai scăzută temperatură medie de proces. Cele mai scăzute valori ale rezistenței la tracțiune sunt cele ale structurilor sudate în experiențele FSW-TIG, 2.3 și 2.4, experiențe în care s-au înregistrat cele mai ridicate temperaturi medii de proces (Fig. 8.6.3). Deoarece aceste structuri au prezentat un aspect vizual corespunzător, atât pe fața cordonului, cât și în secțiune transversală, superior altor structuri, se apreciază că valorile scăzute ale rezistenței la tracțiune sunt cauzate de cantitatea ridicată de căldură generată în cadrul acestor experiențe.

Alungirea relativă la rupere a structurilor sudate rămâne, pentru majoritatea experiențelor realizate, mult mai scăzută decât cea a materialului de bază ( $A_t \text{ BM} = 55 \%$ ). Singurele structuri sudate pentru care s-a înregistrat o alungire relativă la rupere mai mare de 5 % sunt cele realizate în: exp. 2.8 –  $A_t = 35,8 \%$ , exp. 1.2 –  $A_t = 25,2 \%$ , exp. 2.10 –  $A_t = 15 \%$  și exp. 1.3 –  $A_t = 9,1 \%$ . Rezultă faptul că pentru majoritatea sudurilor ruperea a fost fragilă, în timp ce rupturile ductile au caracterizat sudurile cele mai rezistente (Tabel 8.6.1).

Așadar, cea mai mare valoare medie a alungirii relative atinge 65,1 % din alungirea relativă a materialului de bază. Aceasta a obținută, ca și în cazul rezistenței la tracțiune, pentru structura sudată în exp. 2.8, experiența FSW-TIG în care s-a înregistrat cea mai scăzută temperatură medie de proces, cuprinsă în intervalul 460 - 530 °C.

## **Capitolul 9. Modelarea și simularea numerică a procesului de sudare prin frecare cu element activ rotitor a unor structuri din Cu-DHP**

Dezvoltarea unui model numeric valid ce utilizează formularea CEL, pentru îmbinarea FSW a două piese de cupru pur și rezultatele obținute utilizând acest model, care includ și elemente publicate ale autorului [C13, C14, C19, C20], sunt prezentate în cele ce urmează.

### **9.1. Elaborarea modelului numeric**

În cadrul cercetărilor a fost dezvoltat un model numeric tridimensional cuplat termo-mecanic al procesului FSW pentru sudarea cap la cap a două plăci de cupru pur utilizând formularea CEL

(Coupled Eulerian-Lagrangian) și soft-ul Abaqus 6.13. Formularea CEL este una dintre puținele formulări capabile să modeleze deformații atât de mari, precum cele regăsite în procesele FSW.

Pentru dezvoltarea modelului numeric s-au efectuate următoarele activități: reproducerea geometriei elementelor constitutive, definirea comportamentului materialului și a tipului de contact dintre suprafețe, stabilirea condițiilor la limită (Fig. 9.1.1) și discretizarea elementelor constitutive. Aceste activități sunt prezentate mai detaliat în varianta extinsă a acestei lucrări.

Parametrii tehnologici utilizați pentru dezvoltarea acestui model numeric sunt identici cu cei utilizați în exp. 1.6 (experiență preliminară a procesului FSW). Motivul pentru care a fost aleasă această experiență este reprezentat de faptul că în cadrul acesteia s-a utilizat cea mai mare viteză de avans și s-a obținut structura sudată cu cea mai bună rezistență mecanică la tracțiune. Viteza de avans este parametrul tehnologic care, atât la nivel experimental, dar mai ales la nivelul simulării numerice, reduce considerabil durata de desfășurare/ calcul a procesului.

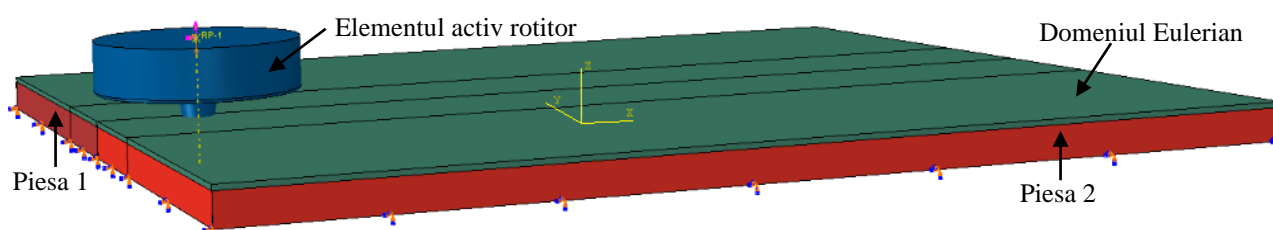


Fig. 9.1.1. Condițiile la limită ale modelului numeric în Abaqus/ Explicit

## 9.2. Rezultate ale simulării numerice

### Validarea modelului numeric

Se poate observa că, în etapa de pătrundere, temperatura este distribuită simetric față de axa îmbinării (Fig. 9.2.1). Aceste rezultate sunt similare cu cele identificate în literatura de specialitate [L03] și cu datele experimentale rezultate din analiza vizuală a distribuției zonei afectate termic în zona de pătrundere a elementului activ (Fig. 9.2.2).

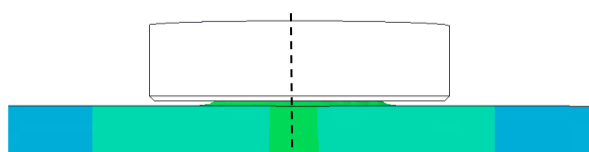


Fig. 9.2.1. Distribuția temperaturii în etapa de pătrundere (durata de calcul 0,8 s)

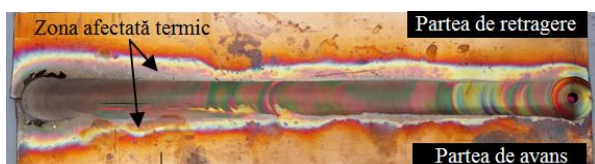


Fig. 9.2.2. Aspectul îmbinării FSW la exp. 1.6

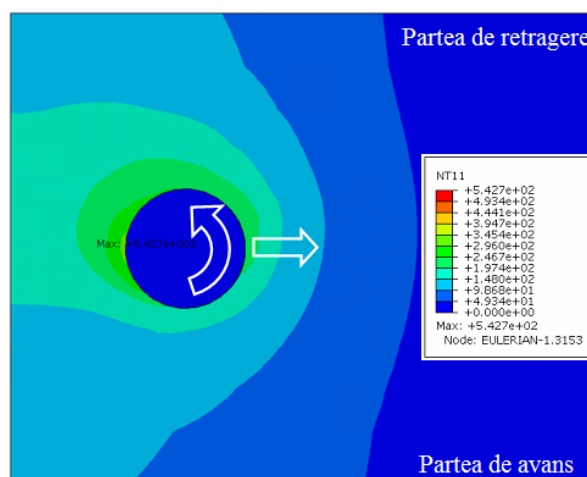


Fig. 9.2.3. Distribuția temperaturii de proces în etapa de translație/ sudare (durata de calcul 8 s)

În etapa de sudare efectivă, câmpul de temperatură prezintă o ușoară asimetrie (Fig. 9.2.3). Temperatura este mai mare pe partea de retragere a îmbinării în comparație cu partea de avans, datorită cantităților mai mari de material ce sunt antrenate pe această parte [J01, K02, P03]. Această temperatură mai ridicată pe partea de retragere, în timpul etapei de translație, se evidențiază și în rezultatele experimentale (Fig. 9.2.2).

Temperaturile nodale maxime estimate prin simulare numerică, la 20 mm și, respectiv, 50 mm de la începutul etapei de translație sunt de aproximativ 542 °C (Fig. 9.2.3) și, respectiv, 530 °C. Aceste valori sunt apropiate de temperaturile determinate experimental, de aproximativ 525 °C la 20 mm și, respectiv, 500 °C la 50 mm de la începutul etapei de translație.

Un dezavantaj important al formulării CEL este reprezentat de durata de calcul extrem de mare. De aceea, pentru a diminua acest dezavantaj, a fost utilizată o strategie de reducere a duratei de calcul, strategie care este prezentată în cele ce urmează.

### Aplicarea strategiei de scalare a masei (mass-scaling) pentru reducerea duratei de calcul

Strategia de scalare a masei realizează micșorarea duratei de calcul prin creșterea artificială a masei materialului (a densității acestuia) [L08, R02]. Astfel, densitatea utilizată în cadrul modelului numeric și implicit în determinarea pasului de calcul critic,  $\Delta t_{crit}$ , este scalată prin înlocuirea valorii densității  $\rho$  cu o densitate fictivă  $\rho^* = \kappa_m \rho$ , unde  $\kappa_m$  (factorul de scalare a masei)  $> 0$ .

Pentru a investiga efectul scalării masei, au fost utilizate patru valori ale factorului de scalare a masei,  $\kappa_m$ :  $\kappa_m \in [1, 10^2, 10^3 \text{ și } 10^4]$ . Fig. 9.2.7.a prezintă evoluția forței axiale de proces în timpul etapei de pătrundere, considerată un indicator în ceea ce privește adecvanța factorului de scalare a masei,  $\kappa_m$ , utilizat, în sensul în care, cu cât evoluția acestei caracteristici de proces este mai lină, cu atât factorul de scalare a masei,  $\kappa_m$ , este considerat mai adecvat. După cum era de așteptat, o evoluție constantă a forței axiale de proces este obținută pentru  $\kappa_m = 1$ . Pentru valori ale factorului de scalare a masei  $\kappa_m \geq 100$  putem observa o degradare a netezimii evoluției forței axiale de proces. Cu toate acestea, valorile determinate ale forței axiale pentru  $\kappa_m \geq 100$  rămân, în medie, destul de apropiate de cele obținute fără scalarea masei.

Distribuția câmpului de temperatură este comparată în Fig. 9.2.7.b pentru diferite valori ale lui  $\kappa_m$  de-a lungul liniei de îmbinare, la 11,05 s de la începerea etapei de translație. Se poate remarca faptul că există diferențe între distribuțiile temperaturii, în principal în vecinătatea pinului elementului activ (Fig. 9.2.7.b). Creșterea temperaturii odată cu creșterea valorii factorului de scalare a masei,  $\kappa_m$ , se explică prin faptul că o densitate mai mare a materialului generează o deformare plastică locală mai mare, din cauza inerției materialului, și presiuni de contact mai mari, care cresc cantitatea de căldură generată prin frecare.

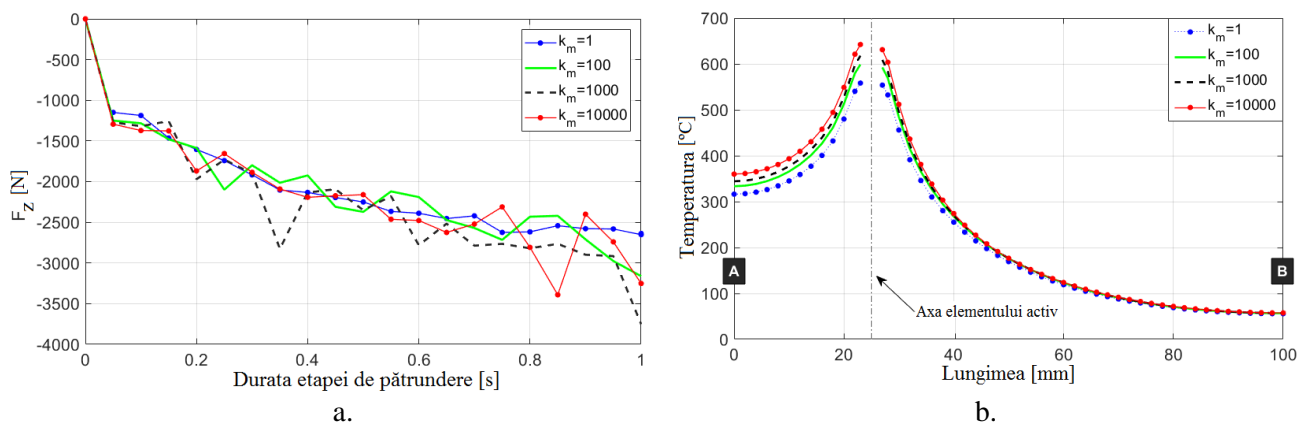


Fig. 9.2.7. Efectul scalării masei asupra: (a) evoluției forței axiale de proces,  $F_z$ , pe parcursul etapei de pătrundere, (b) distribuției câmpului de temperatură pe linia de îmbinare (AB)

Eroarea înregistrată în legătură cu temperaturile calculate în simulările cu valori ale  $\kappa_m > 1$  este prezentată în Fig. 9.2.8. Ea este calculată în vecinătatea pinului, unde diferențele dintre temperaturile calculate sunt cele mai mari. Se observă că această eroare de determinare a câmpului de temperatură este proporțională cu parametrul  $\kappa_m$ .

De asemenea, în Fig. 9.2.8 este reprezentată și influența factorului de scalare a masei,  $\kappa_m$ , asupra duratei de calcul. Se observă o diminuare semnificativă a duratei de calcul odată cu creșterea  $\kappa_m$ .

În concluzie, strategia de scalare a masei introdusă pentru a reduce durata de calcul a simulării numerice este eficientă. S-a demonstrat că durata de calcul a simulării numerice poate fi redusă semnificativ, cu o ușoară degradare a rezultatelor obținute. Astfel, această abordare poate fi utilizată pentru studii parametrice, necesare îmbunătățirii procesului FSW, sau pentru a simula alte aplicații industriale complexe.

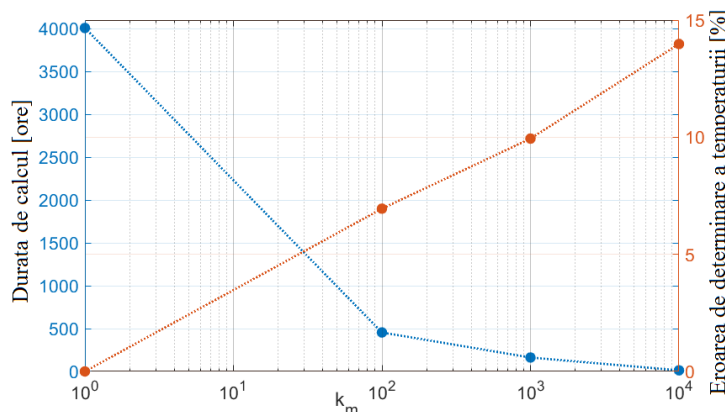


Fig. 9.2.8. Evoluția duratei de calcul și a erorii de determinare a temperaturii de proces în funcție de  $\kappa_m$

## Capitolul 10. Concluzii finale și contribuții principale la dezvoltarea și modelarea numerică a proceselor și sistemelor de sudare prin frecare cu element activ rotitor fără sau și cu aport suplimentar de căldură a unor structuri din Cu-DHP

(1) Din analiza stadiului actual al cercetării-dezvoltării și al aplicațiilor industriale privind sudarea prin frecare cu element activ rotitor și aport suplimentar de căldură a structurilor din cupru, s-au desprins concluzii importante, care sunt prezentate în capitolul 4.

(2) Având în vedere datele din analiza stadiului actual al cercetării-dezvoltării procesului de sudare prin frecare cu element activ rotitor și aport suplimentar de căldură a structurilor din cupru, s-au considerat a fi de actualitate direcțiile de cercetare-dezvoltare prezentate în § 5.1.

(3) În raport cu stadiul actual și direcțiile de cercetare-dezvoltare privind sudarea prin frecare cu element activ rotitor și aport suplimentar de căldură a unor structuri din cupru, s-a asumat ca obiectiv principal al activității de cercetare-dezvoltare în cadrul doctoratului (v. și § 5.2): dezvoltarea, prin cercetare teoretico-experimentală și modelare numerică, a proceselor și sistemelor de sudare prin frecare cu element activ rotitor fără sau și cu aport suplimentar de căldură a unor structuri din cupru.

(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 alese (v. § 5.3), sunt după cum urmează:

○ Temperatura înregistrată în cadrul proceselor FSW și FSW-TIG crește odată cu creșterea turației elementului activ, cu creșterea forței de axiale de proces și reducerea vitezei de avans, respectând astfel legile de variație prezentate în literatură. Forța axială de proces prezintă un rol foarte important în realizarea fără defecte de aspect a îmbinărilor FSW și FSW-TIG (v. § 7.2).

○ Analiza macrostructurală a scos în evidență existența unor defecte în interiorul cordoanelor de sudură, precum defecte de tip tunel sau de tip legătură incompletă. De asemenea, se evidențiază și faptul că epruvetele prelevate de la finalul îmbinării nu mai prezintă defectele identificate pe epruvetele prelevate din prima parte a îmbinărilor sau că aceste defecte sunt diminuate. Acest lucru este justificat prin stabilizarea procesului în cea de-a doua parte a îmbinării și certifică corecta prelevare a cât mai multor epruvete din cea de-a doua parte a îmbinărilor (v. § 7.3).



- Scăderea dimensiunilor grăunților se datorează scăderii temperaturii și creșterii deformațiilor înregistrate în cadrul experiențelor. Îmbinările ce au prezentat dimensiuni reduse ale grăunților au prezentat și bune proprietăți mecanice. Datorită faptului că toate zonele macrostructurale caracteristice îmbinărilor FSW (nucleu, TMAZ, HAZ) prezintă temperaturi foarte apropiate, generarea diferitelor zone microstructurale identificate la nivel de epruvetă este datorată distribuției deformațiilor plastice (v. § 7.3).
  - Temperatura înregistrată în cadrul procesului are un rol definitoriu și în variația valorilor rugozității îmbinărilor. Odată cu creșterea acesteia, materialul pieselor este mai ușor deformat și, în consecință, fața cordoanelor de sudură prezintă rugozități mai ridicate (v. § 7.4).
  - Creșterea cantității de căldură din timpul procesului de sudare conduce la o recoacere de înmuiere a materialului și, astfel, la scăderea microdureții acestuia. Reducerea cantității de căldură conduce la o micșorare a dimensiunilor grăunților și, în consecință, la o microdurete crescută a îmbinărilor, egală sau chiar mai mare decât cea a materialului de bază. A fost observată și o variație a microdureții îmbinărilor în funcție de viteza de răcire a acestora, în sensul în care creșterea vitezei de răcire a zonei din care a fost prelevată epruveta dedicată acestei analize, conduce la creșterea microdureților obținute, rezultate similare fiind identificate și în literatura de specialitate (v. § 7.5).
  - Rezistența la tracțiune a epruvetelor sudate prezintă valori mai mari, apropiate de cele ale materialului de bază, pentru procesul FSW și valori mai scăzute pentru procesul hibrid FSW-TIG. Creșterea peste o anumită limită a temperaturii înregistrate în cadrul procesului, întâlnită în cazul experiențelor FSW-TIG, conduce la scăderi semnificative ale valorilor rezistenței la tracțiune. Alungirea relativă la rupere prezintă, pentru majoritatea experiențelor realizate, valori mult mai scăzute decât cea a materialului de bază (v. § 7.6).
  - O nouă strategie pentru identificarea defectelor de tip legătură incompletă (kissing bond) ce utilizează metoda Corelării Digitale a Imaginilor pe două fețe perpendiculare ale unei epruvete sudate FSW sau FSW-TIG este prezentată în cadrul acestor cercetări. Acest defect este clar pus în evidență de câmpul de deplasări de pe fața laterală, ce permite identificarea deplasărilor în grosimea îmbinării, surprinzând astfel propagarea fisurii în funcție de solicitarea mecanică aplicată (v. § 7.7).
  - Se evidențiază drept concluzie generală a cercetărilor teoretico-experimentale preliminare faptul că proprietățile microstructurale și mecanice ale îmbinărilor FSW și FSW-TIG ale cuprului sunt influențate negativ de creșterea temperaturii înregistrate în cadrul procesului. Astfel, în cadrul cercetărilor teoretico-experimentale avansate au fost realizate unele modificări ale parametrilor tehnologici pentru a obține temperaturi mai scăzute și a îmbunătăți astfel valorile proprietăților mecanice ale îmbinărilor FSW-TIG, menținând în același timp productivitatea ridicată a acestor procedee (v. § 7.8).
- (5) Concluziile relevante privind activitatea de cercetare și dezvoltare de doctorat pentru atingerea obiectivului său principal, remarcate din cercetările teoretico-experimentale avansate realizate conform metodologiei de cercetare-dezvoltare, prin efectuarea intervențiilor anterior menționate asupra parametrilor tehnologici (v. § 8.1), sunt după cum urmează:
- Temperaturile înregistrate în cadrul procesului FSW-TIG au fost mai mici, atingând valori apropiate sau incluse în intervalul țintit. În acest interval, conform rezultatelor cercetărilor teoretico-experimentale preliminare și anumitor date identificate în literatura de specialitate, sunt obținute bune proprietăți mecanice la îmbinarea cuprului pur utilizând procedeul FSW (v. § 8.2).
  - Forțele axiale utilizate în cercetările experimentale avansate au fost mai mari decât cele din cercetările experimentale preliminare, având un rol foarte important în realizarea fără defecte a îmbinărilor FSW și FSW-TIG realizate cu acești parametri tehnologici (turații scăzute și viteze de avans ridicate). Acestea trebuie să suplinească deficitul de amestecare a materialului cauzat de valoarea scăzută a raportului dintre turațiile și vitezele de avans utilizate (v. § 8.2).

○ Analiza macrostructurală scoate în evidență existența aceluiași tipuri de defecte ce au fost identificate și în cazul îmbinărilor preliminare. Analiza tuturor îmbinărilor realizate evidențiază faptul că defectul de tip tunel este regăsit pe partea de avans a cordonului de sudură, în timp ce defectul de tip legătură incompletă este regăsit în marea majoritate a cazurilor pe partea de retragere a acestuia. Există însă și situații în care acesta prezintă o mică trecere în partea de avans (v. § 8.3).

○ Modul de variație a rugozității îmbinărilor, evidențiat în cercetările teoretico-experimentale preliminare, este identificat și în cazul celor avansate. Astfel, experiența FSW-TIG în care s-au obținut cele mai scăzute valori ale temperaturii și ale rugozității este exp. 2.8. Valoarea medie măsurată a rugozității, de 0,98  $\mu\text{m}$ , este comparabilă cu cea mai scăzută valoare medie obținută prin procedeul clasic FSW, de 0.62  $\mu\text{m}$ , pentru structura sudată în exp. 1.2 (v. § 8.4).

○ Microduritățile îmbinărilor realizate în cadrul cercetărilor teoretico-experimentale avansate prezintă valori superioare celor realizate în cercetările preliminare, comportament justificat de scăderea temperaturilor înregistrate în aceste experiențe. Analiza microdurităților tuturor îmbinărilor indică o variație strânsă a acestei caracteristici în funcție de temperatura generată în cadrul procesului. Pentru procedeul FSW, în exp. 1.9 s-a înregistrat o creștere de 4 % peste microduratea materialului de bază, iar pentru procedeul FSW-TIG, în exp. 2.5 s-a înregistrat o creștere de până la 93 % din microduratea materialului de bază (v. § 8.5).

○ Ca și în cazul microdurității, odată cu creșterea temperaturii, rezistența la tracțiune scade. Însă, dependența de temperatură a rezistenței la tracțiune nu este la fel de strânsă precum cea a microdurității. Obținerea celor mai bune proprietăți la tracțiune nu este garantată de generarea în orice condiții a unei temperaturi scăzute, ci de generarea acestor temperaturi scăzute prin utilizarea unui set de parametri tehnologici care să realizeze o bună amestecare a materialului în cordonul de sudură. Această bună amestecare este caracterizată de un aspect vizual uniform, fără defecte, atât pe fața cordonului, cât și în secțiunea acestuia. Astfel, indiciile ce caracterizează o îmbinare FSW sau FSW-TIG cu bune proprietăți mecanice, sunt:

- aspectul vizual specific acestor îmbinări pe fața cordonului (lățimea urmelor circulare egală cu diametrul umărului elementului activ),
- temperatura înregistrată în cadrul procesului cuprinsă în intervalul 460 - 530 °C,
- lipsa defectelor de tip tunel în secțiunea îmbinărilor (v. § 8.6).

○ Experiența din care a rezultat cea mai ridicată valoare medie a rezistenței la tracțiune este exp. 2.8 (experiență FSW-TIG), obținându-se 91,5 % din rezistența la tracțiune a materialului de bază. Putem astfel alătura principalului avantaj al procedeului FSW-TIG, reprezentat de productivitatea sa mărită, și posibilitatea realizării de suduri ale cuprului pur cu proprietăți mecanice superioare, similare celor realizate utilizând procedeul FSW clasic (v. § 8.6).

○ Alungirea relativă la rupere prezintă pentru majoritatea experiențelor realizate valori mult mai scăzute decât cea a materialului de bază. Cea mai mare valoare medie a alungirii relative, de 65,1 % din alungirea relativă a materialului de bază, a rezultat, ca și în cazul rezistenței la tracțiune, pentru structura sudată în exp. 2.8. De aici rezultă faptul că, pentru majoritatea structurilor sudate, ruperea a fost fragilă, în timp ce rupturile ductile caracterizează sudurile cele mai rezistente (v. § 8.6).

(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.

- Determinarea prin cercetări teoretico-experimentale a unor caracteristici de proces și a unor caracteristici ale îmbinărilor FSW și FSW-TIG ale cuprului pentru care, în unele situații, în literatura de specialitate sunt indicate date contradictorii.

- Identificarea condițiilor de realizare ale unei îmbinări FSW-TIG a cuprului pur fără defecte, cu o productivitate de cel puțin două ori mai mare decât cea a procedurii FSW și cu bune proprietăți mecanice, respectiv: 91,5 % din rezistența la tracțiune a materialului de bază, 65,1 % din alungirea relativă a materialului de bază și 90,4 % din microduritatea acestuia.
- Prezentarea unei noi strategii de identificare a defectelor din interiorul îmbinărilor sudate FSW sau FSW-TIG, utilizând în timpul încercării la tracțiune metoda Corelării Digitale a Imaginilor pe două din cele patru fețe perpendiculare ale epruvetei sudate.
- Dezvoltarea unui model numeric tridimensional cuplat termo-mecanic al procedurii FSW pentru sudarea cap la cap a două plăci de cupru pur utilizând formularea CEL (Coupled Eulerian-Lagrangian), capabil să simuleze îmbinarea FSW a plăcilor cu cupru pur și să determine distribuția temperaturii în cordonul de sudură.

\* \* \*

Prezenta teză de doctorat, prin problematică, modul de abordare și rezultate, dezvoltă cunoașterea procesului de sudare a cuprului prin frecare cu element activ rotitor și aport suplimentar de căldură generat de o sursă TIG și indică posibilitatea utilizării acestui proces cu rezultate remarcabile pentru îmbinarea acestui material.

Importanța științifică a prezentei teze de doctorat este susținută de contribuțiile aduse la determinarea unor dependențe ale caracteristicilor de proces și ale proprietăților îmbinărilor sudate de parametri tehnologici ai procesului FSW/ FSW-TIG, la îmbinarea unor structuri din cupru. De asemenea, aceste contribuții vizează și dezvoltarea unui model numeric valid pentru simularea procesului FSW de îmbinare cap la cap a unei structuri din cupru.

Importanța practică a prezentei teze de doctorat rezidă în aceea că prezintă metodologia de cercetare, metodele și mijloacele de cercetare ale proceselor FSW și FSW-TIG aplicate la îmbinarea unor structuri din cupru, ce reprezintă un sistem - suport util studenților, cadrelor didactice, organizațiilor și specialiștilor.

Problematica studierii proceselor FSW reclamă o activitate de cercetare - dezvoltare continuă și analitică, de determinare a comportamentului mecanic local, pe fiecare zonă a îmbinării prin exploatarea metodei Corelării Digitale a Imaginilor, prin care să se determine câmpurile de deplasări și deformații ce sunt generate în timpul încercării la tracțiune.

Ca direcții viitoare de cercetare, se poate avea în vedere majorarea valorilor turației și vitezei de avans în experiențele FSW-TIG, menținând constantă valoarea raportului dintre ele (3 - 4 rot/mm), în încercarea de a obține productivități cât mai mari. De asemenea, se poate îmbunătăți modelul numeric actual pentru a explora capabilitățile formulării CEL privind identificarea defectelor îmbinărilor FSW și extinde pentru analiza procesului FSW-TIG, în vederea constituirii unui mijloc pertinent de cercetare, evaluare și dezvoltare a acestor procese.

## Bibliografie

- [A03] F. Al-Badour, M. Nesar, S. Abdelrahman, A. Bazoune, *Coupled Eulerian Lagrangian finite element modeling of friction stir welding processes*, J. of Materials Processing Technology 213 (2013) 1433-1439.
- [A04] A. Ali, M. Brown, C. Rodopoulos, S. Gardiner, *Characterization of 2024-T351 friction stir welding joints*, J. of Failure Analysis and Prevention 6 (2006) 83-96.
- [A05] M. Al-Moussawi, *A Mathematical and Experimental Analysis of Friction Stir Welding of Steel*, Doctoral Thesis, Sheffield Hallam University, 2018.
- [A06] C.G. Andersson, R.E. Andrews, *Proceedings of the First Int'l Symposium on Friction Stir Welding*, 1999, Thousand Oaks, USA.
- [A09] P. Asadi, R.A. Mahdavinjad, S. Tutunchilar, *Simulation and experimental investigation of FSP of AZ91 magnesium alloy*, Materials Science and Engineering A 528 (2011) 6469-6477.
- [A10] M. Assidi, L. Fourment, S. Guerdoux, T. Nelson, *Friction model for friction stir welding process simulation: Calibrations from welding experiments*, Int'l J. of Machine Tools & Manufacture 50 (2010) 143-155.
- [A11] H.J. Aval, S. Serajzadeh, A.H. Kokabi, *Experimental and theoretical evaluations of thermal histories and residual stresses in dissimilar friction stir welding of AA5086-AA6061*, Int'l J. of Advanced Manufacturing Technology 61 (2012) 149-160.
- [B01] N. Balasubramanian, B. Gattu, R.S. Mishra, *Process forces during friction stir welding of aluminium alloys*, Science and Technology of Welding and Joining 14 (2009) 141-145.
- [B03] H. Bang, H.J. Song, S.M. Joo, *Joint properties of dissimilar Al6061-T6 aluminum alloy / Ti-6%Al-4%V titanium alloy by gas tungsten arc welding assisted hybrid friction stir welding*, Materials and Design 51 (2013) 544-551.
- [B05] G.F. Batalha, A. Farias, R. Magnabosco, S. Delijaicov, M. Adamiak, L.A. Dobrzański, *Evaluation of an AlCrN coated FSW tool*, J. of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering 55 (2012).
- [B06] J.M. Benjamin, *Welding of Copper Alloys*, <https://www.slideshare.net/JabinMathewBenjamin/welding-of-copper-alloys> (accessed on 12.08.2019).
- [B07] I. Boromei, L. Ceschini, A. Morri, G.L. Garagnani, *Friction stir welding of aluminium based composites reinforced with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particles: effects on microstructure and charpy impact energy*, Metallurgical Science and Technology 24(1) (2006) 12-21.
- [B08] A. Boşneag, **M.A. Constantin**, E. Nițu, *Numerical simulation of Friction Stir Welding of three dissimilar aluminium alloys*, Materials Science and Engineering 564 (2019) DOI: 10.1088/1757-899X/564/1/012033 (Innovative Manufacturing Engineering and Energy Int'l Conference, IManEE 2019, Pitești, România) [Volum ISI].
- [B13] A. Boşneag, **M.A. Constantin**, E. Nițu, M. Iordache, D. Iacomì, *Study on Analysis between Friction Stir Welding Process and Hybrid Friction Stir Welding Process*, Annals of the „Constantin Brâncuși” University of Târgu-Jiu, Engineering Series(3) (2015) 59-65 (Conferință științifică națională cu participare internațională, CONFERENG 2015, Târgu-Jiu, România) [Revistă BDI].
- [B14] A. Boşneag, **M.A. Constantin**, E. Nițu, M. Iordache, A. Rizea, *Friction Stir Welding of Composite Materials with Metallic Matrix: a Brief Review*, Applied Mechanics and Materials 809-810 (2015) 449-454, DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.809-810.449 (Innovative Manufacturing Engineering Int'l Conference, IManE 2015, Iași, România) [Volum BDI].
- [B15] G. Buffa, J. Hua, R. Shivpuri, L. Fratini, *A continuum-based FEM model for friction stir welding-model development*, Materials Science and Engineering A 419 (2006) 389-396.

- [C01] G. Cam, *Friction Stir Welded Structural Materials: Beyond Al-Alloys*, Int'l Materials Reviews 56 (2011) 1-48.
- [C02] D. Campanella, C. Casavola, A. Cazzato, L. Fratini, V. Moramarco, C. Pappalettere, *Residual Stress Measurement in Innovative FSW Processes*, Key Engineering Materials 754 (2017) 391-394.
- [C03] S.L. Campanelli, G. Casalino, C. Casavola, V. Moramarco, *Analysis and Comparison of Friction Stir Welding and Laser Assisted Friction Stir Welding of Aluminium Alloy*, Materials 6 (2013) 5923-5941.
- [C06] C. Casavola, A. Cazzato, V. Moramarco, *Residual Stress in Friction Stir Welding and Laser - Assisted Friction Stir Welding by Numerical Simulation and Experiments*, IntechOpen (2018).
- [C12] R. Cojocaru, C. Ciucă, L. Boțilă, V. Verbițchi, *FSW-TIG Welding of Cu 99 Copper*, Welding and Material Testing (2015).
- [C13] **M.A. Constantin**, A. Boșneag, M. Iordache, C. Bădulescu, E. Nițu, *Numerical Simulation of Friction Stir Spot Welding*, Applied Mechanics and Materials 834 (2016) 43-48, DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.834.43 (Int'l Conference on Advanced Manufacturing Technologies, ICAMaT 2015, Bucharest, România) [Volum BDI].
- [C14] **M.A. Constantin**, A. Boșneag, M. Iordache, E. Nițu, D. Iacomì, *Numerical Simulation of Friction Stir Welding of Aluminum Alloys: A Brief Review*, Applied Mechanics and Materials 809-810 (2015) 467-472, DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.809-810.467 (Innovative Manufacturing Engineering Int'l Conference, IManE 2015, Iași, România) [Volum BDI].
- [C15] **M.A. Constantin**, A. Boșneag, E. Nițu, L. Boțilă, *Establishing the Dependence of Output Parameters Depending on Local Process Conditions for Friction Stir Welding of Pure Copper Plates*, Advanced Materials Research 1146 (2018) 32-37, DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1146.32 (Structural Integrity of Welded Structures, ISCS 2017, Timișoara, România) [Volum BDI].
- [C16] **M.A. Constantin**, A. Boșneag, E. Nițu, M. Iordache, *Comparative study on microhardness between friction stir welding and tungsten inert gas assisted friction stir welding of pure copper*, MATEC Web of Conferences 178 (2018) DOI: 10.1051/mateconf/201817803002 (Innovative Manufacturing Engineering and Energy Int'l Conference, IManEE 2018, Chișinău, Republica Moldova) [Volum ISI].
- [C17] **M.A. Constantin**, A. Boșneag, E. Nițu, M. Iordache, *Experimental investigations of tungsten inert gas assisted friction stir welding of pure copper plates*, Materials Science and Engineering 252 (2017) DOI: 10.1088/1757-899X/252/1/012038, WOS: 000419817200038 (The Int'l Congress of Automotive and Transport Engineering, CAR 2017, Pitești, România) [Volum ISI].
- [C18] **M.A. Constantin**, A. Boșneag, E. Nițu, M. Iordache, *Orientation of process parameter values of TIG assisted FSW of copper to obtain improved mechanical properties*, Materials Science and Engineering 400 (2018) DOI: 10.1088/1757-899X/400/2/022017, WOS: 000461147400017 (Modern Technologies in Industrial Engineering, ModTech 2018, Constanța, România) [Volum ISI].
- [C19] **M.A. Constantin**, M. Iordache, E. Nițu, M. Diakhaté, Y. Demmouche, M. Dhondt, C. Bădulescu, *An efficient strategy for 3D numerical simulation of friction stir welding process of pure copper plates*, Materials Science and Engineering 916 (2020) DOI: 10.1088/1757-899X/916/1/012021 (Modern Technologies in Industrial Engineering, ModTech 2020, susținută online, România) [Volum BDI].
- [C20] **M.A. Constantin**, E. Nițu, C. Bădulescu, *Numerical simulation of friction stir welding of pure copper plates*, Materials Science and Engineering 564 (2019) DOI: 10.1088/1757-899X/564/1/012031 (Innovative Manufacturing Engineering and Energy Int'l Conference, IManEE 2019, Pitești, România) [Volum ISI].
- [D01] P. Dabeera, G. Shindeb, *Perspective of Friction Stir Welding Tools*, Materials Today: Proceedings 5 (2018).
- [D02] S. Daftardar, *Laser assisted friction stir welding: finite volume method and metaheuristic optimization*, Thesis, Louisiana State University, 2009.
- [D03] A.R. Darvazi, M. Iranmanesh, *Thermal modeling of friction stir welding of stainless steel 304L*, Int'l J. of Advanced Manufacturing Technology 75 (2014) 1299-1307.

- [D04] J. De Backer, *Robotic Friction Stir Welding for Automotive and Aviation Applications*, Master Thesis, University West, 2009.
- [D05] D. Deheleanu, R. Cojocaru, D. Ionescu, D. Țurcanu, *Procedeu și dispozitiv de sudare cu element activ rotitor*, Brevet de invenție RO 123349, Oficiul de Stat pentru Invenții și Mărci, București, 2011.
- [D06] Y. Demmouche, *Etude du comportement en fatigue d'assemblages soudés par FSW pour applications aeronautiques*, These, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2012.
- [F01] K. Fraser, L. St-Georges, L.I. Kiss, *A Mesh-Free Solid-Mechanics Approach for Simulating the Friction Stir-Welding Process*, *Joining Technologies* 3 (2016).
- [F04] H. Fujii, T. Tatsuno, T. Tsumura, M. Tanka, K. Nakata, *Hybrid Friction Stir Welding of Carbon Steel*, *Materials Science Forum* 580-582 (2008) 393-396.
- [G01] R. Gabor, A. Roos, J. Santos, L. Bergmann, *Friction stir welding of AA 5083-H111 alloy*, *Welding and Material Testing* (2010) 41-48.
- [G02] F. Gemme, *Modelisation numerique des phenomenes physiques du soudage par friction-malaxage et comportement en fatigue de joints soudés en aluminium 7075-T6*, These, Ecole Polytechnique de Montreal, 2011.
- [G03] C. Genevois, *Genèse des microstructures lors du soudage par friction malaxage d'alliages d'aluminium de la série 2000 et 5000 et comportement mécanique résultant*, Thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2004.
- [G04] P. Goel, A.N. Siddiquee, N.Z. Khan, M.A. Hussain, Z.A. Khan, M.H. Abidi, A. Al-Ahmari, *Investigation on the Effect of Tool Pin Profiles on Mechanical and Microstructural Properties of Friction Stir Butt and Scarf Welded Aluminium Alloy 6063*, *Metals* 8(1) (2018).
- [G05] K. Gök, M. Aydin, *Investigations of friction stir welding process using finite element method*, *Int'l J. of Advanced Manufacturing Technology* 68 (2013) 775-780.
- [G06] M. Grujicic, G. Arakere, H.V. Yalavarthy, T. He, C.F. Yen, B.A. Cheeseman, *Modeling of AA5083 Material-Microstructure Evolution During Butt Friction-Stir Welding*, *J. of Materials Engineering and Performance* 19(5) (2010) 672-684.
- [G07] M. Grujicic, B. Pandurangan, C.F. Yen, B.A. Cheeseman, *Modifications in the AA5083 Johnson-Cook Material Model for Use in Friction Stir Welding Computational Analyses*, *J. of Materials Engineering and Performance* 21(11) (2012) 2207-2217.
- [H01] C. Hamilton, S. Dymek, A. Sommers, *A thermal model of friction stir welding in aluminum alloys*, *Int'l J. of Machine Tools and Manufacture* 48 (2008) 1120-1130.
- [H04] H. Hori, S. Makita, H. Hino, *Friction stir welding of rolling stock for subway*, FSW Symposium, 1991, USA.
- [H06] F.J. Humphreys, M. Hatherly, *Recrystallization of Single-Phase Alloys*, *Recrystallization and Related Annealing Phenomena* 2(7) (2004).
- [H07] Y.M. Hwang, P.L. Fan, C.H. Lin, *Experimental study on friction stir welding of copper metals*, *J. of Material Processing Technology* 210(12) (2010) 1667-1672.
- [J01] M. Jabbari, *Elucidating of rotation speed in friction stir welding of pure copper: Thermal modelling*, *Computational Materials Science* 81 (2014) 296-302.
- [J02] D. Jacquin, B. Meesterb, A. Simarb, D. Deloisonc, F. Montheilleta, C. Desrayauda, *A simple Eulerian thermomechanical modeling of friction stir welding*, *J. of Materials Processing Technology* 211 (2011) 57-65.
- [J03] R. Jain, S.K. Pal, S.B. Singh, *Finite element simulation of temperature and strain distribution in Al2024 aluminum alloy by friction stir welding*, *All India Manufacturing Technology Design and Research Conference* (2014) 3-7.
- [J04] R. Jain, S.K. Pal, S.B. Singh, *Numerical modeling methodologies for friction stir welding process*, *Computational Methods and Production Engineering* 1(5) (2017) 125-169.

- [J05] M. James, M. Mahoney, *Proceedings of the first Int'l Symposium on Friction Stir Welding*, 1<sup>st</sup> Int'l Symposium on Friction Stir Welding, 1999, Thousand Oaks, USA.
- [J06] N. Jemal, *Qualification du domaine de soudabilité en soudage par friction malaxage*, These, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2011.
- [K02] G. Karrar, A.N. Shuaib, F.A. Al-Badour, N. Merah, A.K. Mahgoub, *Friction stir butt welding of commercially pure copper plates*, Int'l Mechanical Engineering Congress and Exposition, IMECE 2014, Montreal, Canada.
- [K03] H. Kasai, Y. Morisada, H. Fujii, *Dissimilar FSW of immiscible materials: Steel/magnesium*, Materials Science and Engineering 624 (2015) 250-255.
- [K07] G. Kohn, Y. Greenberg, I. Makover, A. Munitz, *Laser-Assisted Friction Stir Welding*, American Welding Society 81 (2002) 46-48.
- [L01] W.B. Lee, S.B. Jung, *The joint properties of copper by friction stir welding*, Materials Letters 58 (2004) 1041-1046.
- [L02] C.M.A. Leitao, *Influence of base material plastic properties and process parameters on friction stir weldability*, Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in Mechanical Engineering, University of Coimbra, 2013.
- [L03] W. Li, Z. Zhang, J. Li, Y.J. Chao, *Numerical Analysis of Joint Temperature Evolution During Friction Stir Welding Based on Sticking Contact*, J. of Materials Engineering and Performance 21(9) (2012) 1849-1856.
- [L04] H.J. Liu, J.J. Shen, Y.X. Huang, L.Y. Kuang, C. Liu, C. Li, *Effect of tool rotation rate on microstructure and mechanical properties of friction stir welded copper*, Science and Technology of Welding and Joining 14(6) (2009) 577-583.
- [L08] O. Lorrain, *Analyses expérimentale et numérique du procédé de soudage par friction malaxage FSW*, These, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2010.
- [M01] V.M. Magalhaes, C. Leitao, D.M. Rodrigues, *Friction stir welding industrialisation and research status*, Science and Technology of Welding and Joining 23 (2018) 400-409.
- [M04] S. Mandal, J. Rice, A.A. Elmustafa, *Experimental and numerical investigation of the plunge stage in friction stir welding*, J. of Materials Processing Technology 203 (2007) 411-419.
- [M05] K.P. Mehta, V.J. Badheka, *Hybrid approaches of assisted heating and cooling for friction stir welding of copper to aluminum joints*, J. of Materials Processing Technology 239 (2017) 336-345.
- [M06] A. Meilinger, I. Török, *The importance of Friction Stir Welding Tool*, Production Processes and Systems 6 (2013) 25-34.
- [M08] M. Milicic, P. Gladović, R. Bojanić, T.M. Savković, N. Stojic, *Friction stir welding (FSW) process of copper alloys*, Metalurgija 55(1) (2016) 107-110.
- [M11] R.S. Mishra, Z.Y. Ma, *Friction stir welding and processing*, Materials Science and Engineering 50 (2005) 1-78.
- [M12] R.S. Mishra, M.W. Mahoney, *Friction Stir Welding and Processing*, ASM Int'l, 2007.
- [M13] P. Mitesh, D. Utsav, J. Mehul, *Effects of FSW on Mechanical properties and Microstructure of copper at Weld Joint*, Int'l J. of Engineering Development and Research 3(4) (2015).
- [N02] R. Nandan, T. DebRoy, H.K.D.H. Bhadeshia, *Recent advances in friction-stir welding - process, weldment structure and properties*, Progress in Materials Science 53(6) (2008).
- [N03] R. Negrea, R. Budișteanu, **M.A. Constantin**, C. Ducu, A.G. Plăiasu, S. Tabacu, S. Moga, D. Negrea, *Advanced Complementary Techniques for the Investigation of Pure Copper Plates Friction Stir Welding* (poster presentation), Annual Int'l Conference on Sustainable Development through Nuclear Research and Education, Nuclear 2018, 23.05.2018 Mioveni, România.
- [N05] D.R. Ni, D.L. Chen, D. Wang, B.L. Xiao, Z.Y. Ma, *Tensile properties and strain-hardening behaviour of friction stir welded SiCp/AA2009 composite joints*, Materials Science and Engineering A 608 (2014) 1-10.

- [O01] K. Okamoto, M. Doi, S. Hirano, K. Aota, H. Okamura, Y. Aono, T.C. Ping, *Fabrication of Backing Plates of Copper Alloy by Friction Stir Welding*, 3<sup>rd</sup> Int'l Friction Stir Welding Conference, 2001, Kobe, Japan.
- [O02] K. Ozel, C. Cetinarslan, S.K. Genç, *Joining of Aluminum Alloys with Friction Stir Welding Method*, 3<sup>rd</sup> Int'l Conference on Recent Trends in Structural Materials, 2014, Pilsen, Czech Republic.
- [P02] H. Pashazadeh, A. Masoumi, J. Teimournezhad, *Numerical modelling for the hardness evaluation of friction stir welded copper metals*, *Materials and Design* 49 (2013) 913-921.
- [P03] H. Pashazadeh, J. Teimournezhad, A. Masoumi, *Numerical investigation on the mechanical, thermal, metallurgical and material flow characteristics in friction stir welding of copper sheets with experimental verification*, *Materials and Design* 55 (2014) 619-632.
- [P05] P. Prasanna, S.B. Rao, M.K.G. Rao, *Finite element modeling for maximum temperature in friction stir welding and its validation*, *Int'l J. of Advanced Manufacturing Technology* 51(9) (2010) 925-933.
- [R02] G. Rateau, *Méthode Arlequin pour les problèmes mécaniques multi-échelles: applications à des problèmes de jonction et de fissuration de structures élancées*, Ph.D. Thesis, École Centrale Paris, 2003.
- [R03] \*\*\*, Rezumatul etapei a II-a (*Concepție sistem de sudare. Concepție sistem de monitorizare utilizând termografia în infraroșu*) a contractului 72174/2008, cu titlul "Dezvoltarea unor metode și tehnici inovative de îmbinare a materialelor eterogene prin sudare prin frecare cu element activ rotitor", Institutul național de cercetare-dezvoltare în sudură și încercări de materiale - ISIM Timișoara.
- [S01] P. Sahlot, A.K. Singh, V.J. Badheka, A. Arora, *Friction Stir Welding of Copper: Numerical Modeling and Validation*, *Transactions of the Indian Institute of Metals* 72 (2019) 1339-1347.
- [S05] K. Savolainen, *Friction Stir Welding of Copper and Microstructure and Properties of the Welds*, Doctoral Thesis, Aalto University, 2012.
- [S06] K. Savolainen, J. Mononen, H. Saukkonen, J. Koivula, *Friction Stir Weldability of Copper Alloys*, 5<sup>th</sup> Int'l Symposium on Friction Stir Welding, 2004, Metz, France.
- [S10] D. Scirloiu, **M.A. Constantin**, C. Badulescu, D. Negrea, M. Diakhate, E. Nitu, M. Iordache, *Influence des défauts de soudage FSW sur le comportement mécanique d'un assemblage bout à bout en Cu-DHP: analyse microscopique et par corrélation d'images numériques*, 24<sup>ème</sup> Congrès Français de Mécanique, CFM 2019, Brest, France [Volum BDI].
- [S11] E. Scutelnicu, D. Birsan, R. Cojocaru, *Research on Friction Stir Welding and Tungsten Inert Gas assisted Friction Stir Welding of Copper*, *Recent Advances in Manufacturing Engineering* (2011) 97-102.
- [S12] J.J. Shen, H.J. Liu, F. Cui, *Effect of welding speed on microstructure and mechanical properties of friction stir welded copper*, *Materials and Design* 31 (2010) 3937-3942.
- [S13] P. Sinclair, W. Longhurst, C. Cox, D. Lammlein, A. Strauss, G. Cook, *Heated Friction Stir Welding: An Experimental and Theoretical Investigation into how Preheating Influences on Process Forces*, *Materials and Manufacturing Processes* 25 (2010) 1283-1291.
- [S17] K. Surekha, A. Els-Botes, *Development of High Strength, High Conductivity Copper by Friction Stir Processing*, *Materials and Design* 32 (2011) 911-916.
- [T02] W.M. Thomas, E.D. Nicholas, J.C. Needham, M.G. Murch, P. Temple-Smith, C.J. Dawes, Int'l Patent Application No. PCT/GB92/02203, GB Patent Application No. 9125978.8, US Patent Application No. 5.460.317, 1991.
- [T04] D. Trimble, J. Monaghan, G.E. O'Donnell, *Force generation during friction stir welding of AA2024-T3*, *Manufacturing Technology* 61 (2012) 9-12.
- [V02] \*\*\*, Vickers hardness tester, <https://www.innovatest-europe.com/testing-knowledge/> (accessed on 20.07.2020).
- [X01] G.M. Xie, Z.Y. Ma, L. Geng, *Development of a Fine-Grained Microstructure and the Properties of a Nugget Zone in Friction Stir Welded Pure Copper*, *Scripta Materialia* 57 (2007) 73-76.



- [Y01] D.K. Yaduwanshi, S. Bag, S. Pal, *Numerical modeling and experimental investigation on plasma-assisted hybrid friction stir welding of dissimilar materials*, *Materials and Design* 92 (2016) 166-183.
- [Z03] Y.N. Zhang, X. Cao, S. Larose, P. Wanjara, *Review of tools for friction stir welding and processing*, *Canadian Metallurgical Quarterly* 51 (2012).
- [Z04] Z. Zhang, H.W. Zhang, *A fully coupled thermo-mechanical model of friction stir welding*, *Int'l J. of Advanced Manufacturing Technology* (2007) 279-293.
- [Z07] X. Zhou, W. Pan, D. MacKenzie, *Identifying friction stir welding process parameters through coupled numerical and experimental analysis*, *Int'l J. of Pressure Vessels and Piping* 108-109 (2013) 2-6.
- [Z08] S. Zimmer, *Contribution a l'industrialisation du soudage par friction malaxage*, These, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Spécialité "Génie Mécanique", 2009.