

Deformarea plastică și curgerea în timpul procesului de sudare prin frecare cu element activ rotitor

Flow and plastic deformation during friction stir welding

B. RADU¹⁾, R. SUSAN-RESIGA²⁾, D. DEHELEAN¹⁾, V. SAFTA¹⁾

¹⁾ ISIM Timișoara, ²⁾ Universitatea "Politehnica" Timișoara

Keywords

Sudare prin frecare cu element activ rotitor, curgerea materialului, modelare, aluminiu

1. Procesul de sudare prin frecare cu element activ rotitor (FSW)

Sudarea prin frecare cu element rotitor este un procedeu de sudare în stare solidă, relativ recent dezvoltat (1992 la The Welding Institute, UK), în care energia suplimentară necesară realizării îmbinării sudate se obține sub forma energiei termo-mecanice (căldură-presiune) generată pe suprafața de contact dintre sculă și componentele care se sudează.

Scula execută o mișcare de rotație în jurul axei sale longitudinale simultan cu o deplasare pe direcția de sudare, exercitând o apăsare pe componentele de sudat în zona rostului de sudare (figura 1).

Ca urmare a specificului procesului, o parte a sculei execută o mișcare de avans, în direcția de sudare, pe când cealaltă parte execută o mișcare de retragere, opusă direcției de sudare, ceea

Keywords

Friction stir welding, flow, modeling, aluminum 5754.

1. Friction Stir Welding process (FSW)

The Friction Stir Welding (FSW) is a quite new solid-state welding process (developed at The Welding Institute UK, in 1991). The activation energy necessary to obtain the welded joint is obtained by the heat developed at the contact surface between the tool and work piece and severe plastic deformation of the welded material.

During the welding process, the tool makes two movements: one rotational movement, around its longitudinal axis and simultaneously an advancing (translation) movement, along the welding direction, that are presented in Figure 1.

Because of the particularities of the FSW process, there is an advancing side of the tool (that rotates in the welding direction and in this way the relative movement speed of the tool is higher) and a retreating side (where the direction of the tool

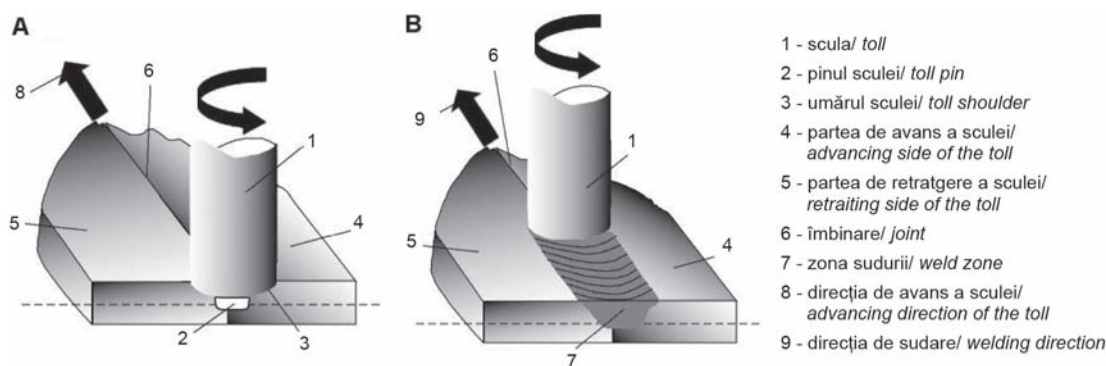


Figura 1. Procesul de sudare FSW cap la cap (schemă de principiu): a) începutul procesului de sudare; b) desfășurarea procesului de sudare/

Figure 1. Friction Stir Welding (FSW): a) the beginning of the welding process, b) the welding process [1]

ce face ca să se obțină o distribuție asimetrică atât a câmpului termo-deformațional, cât și a tuturor fenomenelor care însoțesc și contribuie la obținerea îmbinării sudate.

Scula are două roluri principale: încălzirea componentelor de sudat și deplasarea materialului astfel încât să se realizeze îmbinarea sudată. Încălzirea materialului înmoaie materialului din jurul știftului, iar rotația și translația sculei determină mișcarea materialului din fața știftului în spatele lui, producându-se astfel îmbinarea sudată în stare solidă. Funcție de forma geometrică a sculei mișcarea materialului în jurul știftului poate fi foarte complexă [2].

rotation is opposite to the welding direction and the relative movement speed of the tool is lower). This aspect will determine an asymmetric distribution of the thermo-deformational field and of all phenomena that contribute to welded joint formation.

The tool has two main roles: heating the work pieces and moving the plastic deformed material to obtain the welded joint. Heating the material will soften it and tool rotation and translation determine the movement of the material from the front of the tool to its back, forming the solid-state welded joint. According to the geometric shape of the tool, the flow of the material around the tool pin can be very complex [2].

Pe parcursul procesului de sudare materialul este supus unor procese de deformare plastică puternice, la temperaturi ridicate, care produc o recristalizare a grăunților, cu obținerea unor grăunți cristalini fini, echiaxiali. Aceștia conferă îmbinării sudate proprietăți mecanice foarte bune.

Observarea atentă a procesului de sudare și a microstructurii materialului din zona îmbinării [3] a relevat existența unei regiuni situate chiar în miezul îmbinării sudate, numită „nucleul îmbinării” (miezul îmbinării) (*nugget*), în care granulația a fost puternic finisată, diametrul grăunților ajungând de ordinul a câțiva μm .

Pe lângă aplicațiile „convenționale”, o aplicație nouă este modificarea microstructurală a unui material. Pentru aceasta, scula se introduce în materialul de prelucrat și se rotește, astfel încât se produc modificări microstructurale, care ridică proprietățile acestuia (superplasticitatea obținută la aliajul de aluminiu 7075). Mai mult, în ultimii ani s-au studiat și alte aplicații tehnologice ale acestui procedeu de „sudare”:

- posibilitatea de a crea o suprafață de material compozit pe un substrat de aluminiu [4];
- omogenizarea aliajelor de aluminiu prin metalurgia pulberilor [5];
- modificarea microstructurii compozitelor cu matrice metalică [6];
- îmbunătățirea proprietăților aliajelor de aluminiu turnate [7], etc.

2. Studiul deformării plastice și a curgerii în timpul procesului FSW

Pe durata procesului de sudare FSW, materialul din jurul pinului sculei este puternic deformat plastic și încălzit/răcit rapid, specific proceselor de sudare. Prin urmare, materialul din zona îmbinării va suferi modificări microstructurale specifice acestor condiții: modificarea dimensiunii grăunților, modificarea caracterului limitelor dintre grăunți, dizolvarea și creșterea precipitatelor, fragmentarea și redistribuția dispersiilor și a texturii, ecrusarea materialului, etc.

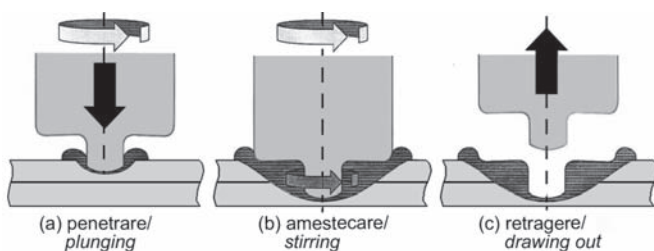


Figura 2. Etapele procesului de sudare FSW/
Figure 2. FSW stages [8]

Procesul de sudare FSW este o succesiune de faze, conform celor prezentate în figura 2. Într-o primă fază scula pătrunde în materialul care se sudează (etapa de pătrundere, figura 2.a) până când suprafața umărului sculei ajunge în contact cu suprafața componentelor care se sudează.

În etapa a doua scula continuă să se rotească și realizează simultan și mișcarea de avans pe direcția de sudare, iar la finalul procesului scula se retrage, lăsând un gol în materialul sudurii, corespunzător pinului.

Analiza macroscopică a unei îmbinări sudate pune în evidență subzonele caracteristice acestui procedeu de sudare:

During the entire welding process, the material undergoes large plastic deformations at elevated temperatures determining grain recrystallization, which provides good mechanical characteristics to the welded joint. Investigating the structure in the center of the welded joint revealed a zone, called “the nugget”, in which the grains are very fine (a few μm diameter) [3].

Beside “conventional” applications (welding), FSW can be used for other applications, like microstructural modification of material. In this case, the tool has the role to induce the desired microstructural transformations that raise some properties of the material (inducing superplasticity into 7075 alloy). In the past years, the following directions have been studied:

- production of a composite surface on an aluminum substrate [4];
- homogenization of aluminum alloys obtained by powder metallurgy [5];
- modification of the structure of metallic matrix composites [6];
- improvement of the properties of the cast aluminum alloys [7], etc.

2. Plastic deformation and material flow during FSW

During the entire FSW process, the material around the tool is severely deformed and heated/cooled with high speed, like in other welding processes. As a result, the material will suffer specific microstructural modifications: changes of grains size and shape, grain limits, dissolving and precipitations of phases, fragmentation and redistribution of some dispersions, changes in texture and material strengthening, etc.

The FSW process is a succession of three stages (Fig. 2). In the first one (plunging), the rotating tool plunges into the work piece material (Fig. 2.a), until the tool shoulder touches the surface of the work piece.

In the second stage (stirring), the rotation tool moves along the welding direction with the welding speed, creating the welded joint (Fig. 2.b). The final stage (drawing out) implies that the tool is extracted from the work piece and there remains a void corresponding to the pin.

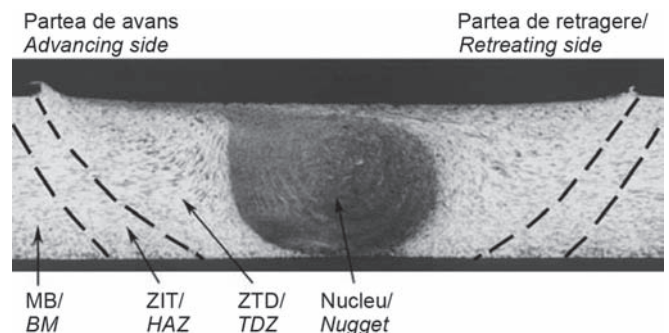


Figura 3. Subzonele unei îmbinări sudate prin frecare cu element activ rotitor/
Figure 3. Macroscopic aspect of FSW joint subzones

Metallographic macroscopic analysis of a welded joint (Fig. 3) revealed the characteristic zones: nugget, TDZ (Thermo Deformed Zone), HAZ (Heat Affected Zone) and BM (base material).

zona miezului, zona influențată termo-deformațional, (ZTD), zona influențată termic (ZIT), materialul de bază (MB) (figura 3).

2.1. Studiarea experimentală a curgerii cu ajutorul tehnicii markerilor

Literatura de specialitate prezintă studii ale curgerii materialului în timpul sudării prin frecare cu element activ rotitor utilizând metoda markerilor. Aceștia sunt mici componente cilindrice, dintr-un alt aliaj decât cel al componentelor care se sudează, plasați la diferite distanțe de axa îmbinării și la diferite adâncimi pe grosimea componentelor (figura 4) [9, 10, 11]. În general, materialul markerilor este astfel ales încât să iasă în evidență ușor în urma unui atac metalografic selectiv. De exemplu materialul componentelor este aluminiu (2195), iar materialul markerilor este un aliaj Al-Cu (5454) [11].

Materialul de bază și materialul markerilor au fost alese pentru a fi compatibile cu procesul de sudare cu element activ rotitor (ambele au sudabilitate bună) și compatibile unul cu celălalt, dar în același timp pentru a putea fi ușor distinse prin intermediul unei analize metalografice. Astfel, materialul de bază este un aliaj de aluminiu cu un conținut ridicat de Cu, pe când markerii sunt aliaje de aluminiu fără cupru. Prin urmare, la atacul metalografic cu reactiv Keller [10, 11] se vor observa cu ușurință zonele în care au ajuns markerii și se va putea estima deplasarea materialului în timpul procesului de sudare.

Markerii sunt componente cilindrice cu dimensiunile $\phi 2 \times 2 \text{ mm}$ amplasați la o distanță suficient de mare între ei, și alternativ în componența aflată în partea de avans a sculei și cea de retragere a sculei, pentru ca odată făcută analiza metalografică să putem identifica fără urmă de îndoială care dintre ei s-a deplasat în zona identificată prin această analiză. Totodată pentru a putea evidenția deplasarea materialului și pe verticală, markerii sunt amplasați astfel încât să acopere prima, a doua și a treia treime din grosimea componentelor.

Lungimea markerilor și amplasarea lor trebuie astfel realizată încât o parte din ei să rămână în zona de material care nu a fost afectată de câmpul termo-deformațional (în MB), astfel încât să nu fie deformați de procesul de sudare.

Evidențierea deplasării materialului prin curgere, în timpul procesului de sudare, trebuie realizată prin analiza metalografică a planelor în secțiune normală. Respectiv, prin frezarea succesivă a unor plane paralele cu suprafața tablelor sudate, cu pasul $0,20 \dots 0,25 \text{ mm}$, pornind de la suprafața superioară a îmbinării realizate. După fiecare frezare, suprafața astfel obținută a fost pregătită pentru analiză metalografică (șlefuire, lustruire și atac metalografic cu reactiv Keller), iar în urma analizei s-au identificat zonele în care s-a deplasat aliajul 5454 a permis „reconstruirea” unui model 3D a acestor zone, similar unei tomografii computerizate.

Reconstruirea computerizată 3D a curgerii permite într-o oarecare măsură și reconstruirea traseului parcurs de material în timpul procesului de sudare.

În figura 5 este prezentat rezultatul unei investigații microstructurale a unei îmbinări sudate prin frecare cu element activ rotitor, pe care se observă materialul markerilor. Săgețile reprezintă direcția de rotație a sculei, observându-se clar diferențele dintre partea de retragere a sculei și cea de avans a ei. Rezultatele din literatura de specialitate [10] subliniază existența unui fenomen de „curgere inversă”, care se manifestă prin deplasarea materialului de pe partea de avans a sculei în direcție opusă celei de rotație a ei. Materialul de pe partea de

2.1. Experimental study of material flow using markers

Literature presents some studies on the material flow during FSW of a material using as markers small pieces of another alloy, placed at different distances from the weld axis and at different depths in the work piece material (Fig. 4) [9, 10, 11]. As a rule, the markers material should be compatible with the work piece material, to obtain a quality weld, but at the same time different to be easily observed, by contrast with the work pieces material, using a selective etching. For example, work piece material is aluminum (2195) and markers material is an Al-Cu alloy (5454) [11]. They are placed at a significant distance one from another to be able to identify exactly the starting place from which markers are deformed and moved in the final position inside the weld. They are long enough so that a part of each marker to remain in the region that is not affected by the thermo-deformational field (in the BM).

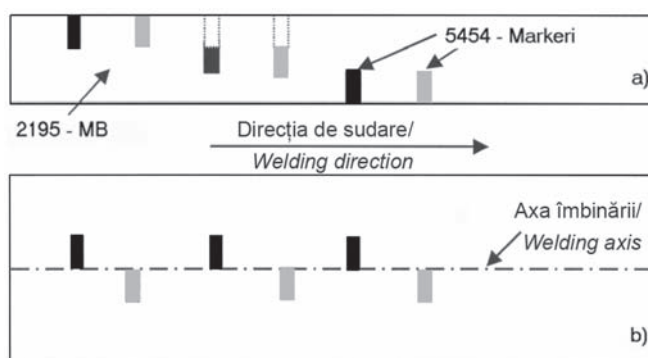


Figura 4. Schema amplasării markerilor în probele sudate FSW. (a – vedere laterală, b – vedere de sus; markerii negri sunt amplasați pe partea de avans a sculei, markerii gri sunt amplasați pe partea de retragere a sculei)/

Figure 4. Schematic positioning of markers (a – side view; b – upper view; black markers are placed on the advancing side of the tool, grey markers are placed on the retreating side of the tool) [11]

Microstructural analysis reveals the material flow using samples extracted along the normal plane across the welding direction. On each sample, planes cut with steps of $0.20 \dots 0.25 \text{ mm}$, starting from the surface of the work piece, were analyzed using a Keller etching solution [10, 11]. Converting the position of each zone with marker material in a 3D model allows the “reconstruction” of the material flow (trajectory) and material distribution.

Figure 5 presents an example of a metallographic microscopy of a friction stir welded joint with markers. The arrow represents the direction of tool rotation showing very clearly the differences between the material movement on the advancing side and that on the retreating side. The results presented in literature [10] emphasized the “serration” phenomenon that consists in a backward movement of the material, which is on the advancing side of the tool, in comparison with the rotation direction of the tool. The material placed on the retreating side of the tool moves only in the same direction with the tool rotation and is pushed in the back of the tool.

Existence of this “serration” is most probably a conclusion determined by the limitations of the markers technique that allows to see the final result of the material flow, but does not give any details about the development in time of this process.

retragere a sulei se deplasează doar în aceeași direcție cu cea de rotație a sculei, fiind împins direct în spatele sculei.

Existența acestui fenomen este dovedită de eşantioanele metalografice analizate din probele cu markeri ca urmare a limitărilor acestui tip de investigație. Respectiv, ca urmare a faptului că se pune în evidență poziția materialului markerilor după terminarea procesului de sudare, fără a putea evidenția deplasarea în timp a materialului markerilor.

2.2. Modelarea matematică a proceselor de curgere la sudarea FSW

Analizând literatura de specialitate am putut observa că modelele analizate până în acest moment sunt atât bi-dimensionale cât și tri-dimensionale. Unii autori utilizează soft-uri dedicate unei analize termice, din care extrapolând datele pot trage concluzii asupra efectelor de deformare plastică, pe când alții folosesc soft-uri capabile să facă o analiză a curgerii. Simplificările modelelor matematice acoperă de asemenea un spectru larg, de la modele bidimensionale care iau în considerare doar cantitatea de căldură introdusă în zona sudurii calculată cu ajutorul unor relații matematice (aproximative), până la modele care iau în considerare generarea căldurii ca urmare a frecării sculei și a alunecării materialului componentelor care se sudează în apropierea sculei [12, 13, 14, 15, 16, 17, 18].

Pentru modelarea matematică a curgerii materialului în timpul procesului de sudare cu element activ rotitor am folosit un model geometric tridimensional al componentelor care se sudează și al sculei considerând, atât căldura generată prin frecare, cât și cea generată ca urmare a curgerii plastice a materialului componentelor de sudat. Am considerat cazul sudării a două plăci 330x110x6mm, din aliaj de aluminiu, utilizând o tehnologie a cărei parametri principali au fost stabiliți în laboratoarele ISIM.

Din punct de vedere al procesului am considerat în cazul simulării un regim de sudare stabilizat, (etapa de amestecare) respectiv, după trecerea unui interval de timp necesar echilibrării termice a procesului de sudare, considerând vâscozitatea dependentă de temperatură după o lege exponențială.

Întregul proces de curgere care se produce în timpul sudării FSW poate fi studiat pornind de la premiza că procesul de sudare poate fi privit ca un proces de extrudare *in-situ*, în care scula de extrudare este formată din:

- umărul sculei de sudare;
- pinul sculei de sudare;
- limitele laterale ale materialelor de bază, mai depărtate de zona îmbinării, neinfluențat de câmpul termic și/sau de cel termo-deformațional;
- limita inferioară formată de suprafața de contact dintre componentele de sudat și placa suport a mașinii de sudat FSW.

Tensiunea de curgere poate fi descrisă de ecuația următoare:

$$\tau = \frac{(A + B\varepsilon^n) \cdot (1 + C \ln(\dot{\varepsilon})) \cdot (1 - \hat{T}^m)}{\sqrt{3}} \quad (1)$$

unde:

$$\hat{T} = \frac{T - T_c}{T_f - T_c}$$

(T_f = temperatura de fuziune, T_c = temperatura camerei);
 ε = deformația liniară efectivă;

2.2. Mathematical modeling of flow processes during FSW

Literature presents both bi-dimensional models and tri-dimensional models. Some authors used special codes for thermal analysis, from which, by extrapolations, extract data for an estimation of the plastic deformations, but others use codes capable to analyze directly the material flow. From the point of view of the model simplification, literature presents models that consider the heat introduced into the weld with a mathematical formula up to models that consider the heat generated both by friction between the tool and the work piece material and by shear of the work piece material [12, 13, 14, 15, 16, 17, 18].

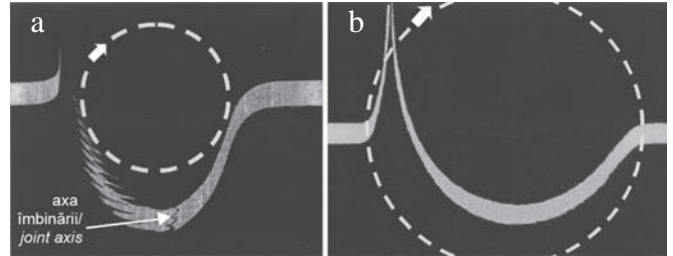


Figura 5. Deplasarea materialului markerilor amplasați la mijlocul grosimii plăcilor sudate: (a) la mijlocul grosimii plăcilor sudate, cercul întrerupt fiind circumferința pinului sculei; (b) la 0,25mm de suprafața plăcilor sudate, cercul întrerupt fiind circumferința umărului sculei/

Figure 5. Movement of the material of the markers placed at the middle of the work piece thickness: (a) at the middle of the work piece thickness, the white dotted circle is the diameter of the pin and (b) at 0.25mm from the surface of the work piece, the white dotted circle is the diameter of the tool shoulder [10]

In this paper, we used a 3D model, considering that heat is generated both by friction and by shear inside the work piece material. The work pieces were 330x110x6mm Al plates and the welding technology was developed inside ISIM. Because the plunging and drawing out stages are not stable, our model described only the stable stage of stirring, during which the process is stable and the heat field is stabilized. We also considered the viscosity as temperature dependent.

The flow process during FSW can be studied experimentally starting from the supposition that the entire process can be considered as an extrusion *in-situ* process, the extrusion tool being formed by:

- tool shoulder;
- tool pin;
- margins of the cold material from the work pieces (not influenced by thermo-deformational field);
- inferior contact surface of the work piece that is in contact with the FSW machine table.

Shear stress can be described by:

$$\tau = \frac{(A + B\varepsilon^n) \cdot (1 + C \ln(\dot{\varepsilon})) \cdot (1 - \hat{T}^m)}{\sqrt{3}} \quad (1)$$

where:

$$\hat{T} = \frac{T - T_c}{T_f - T_c}$$

(T_f = fusion temperature, T_c = room temperature);
 ε = linear effective deformation;

coeficienții A=265MPa; B=426MPa; n=0,34; C=0,015; m=1 (pentru aliajul de aluminiu utilizat).

Vâscozitatea efectivă a fost estimată cu relația următoare:

$$\mu = \frac{\tau}{\sqrt{3\dot{\epsilon}}} \quad (2)$$

care convertește tensiunea de forfecare în vâscozitate efectivă.

Cantitatea de căldură dezvoltată ca urmare a alunecării materialului sub acțiunea sculei (curgerea materialului) este estimată cu ajutorul relației:

$$Q_{sh} = v_{sh} \cdot \tau \quad (3)$$

unde:

$v_{alunecare}$ = viteza de alunecare;

t = tensiunea de forfecare aplicată la suprafață.

Viteza generării căldurii ca urmare a frecării dintre umărul sculei și materialul de sudat este estimată într-un mod similar cu situația sudării prin frecare convențională:

$$d\dot{q} = 2\pi\omega \cdot r^2 \cdot \mu(T)p(T)dr \quad (4)$$

iar însumând pe toată suprafața obținem:

$$\begin{aligned} \dot{q} &= \int_{r_1}^{r_2} 2\pi\omega \cdot r^2 \cdot \mu(T)p(T)dr = \\ &= \frac{2}{3}\pi\omega\mu(T)p(T)(r_2^3 - r_1^3) \end{aligned} \quad (5)$$

unde:

r_1 este raza pinului sculei, iar r_2 este raza umărului sculei;

μ = coeficientul de dilatare termică liniară.

Pentru început modelul este un model „simplificat”, care pornește de la premiza că în zona de acțiune a sculei se dezvoltă o cantitate de căldură ca urmare a două procese distincte: frecarea sculei cu materialul de sudat și alunecarea relativă a diverselor straturi din materialul de sudat, ca urmare a acțiunii sculei.

Cantitatea de căldură dezvoltată este pe de o parte folosită la plastifierea materialului din zona sudurii, iar pe de altă parte este pierdută:

- rămânând acumulată în cusătură (figura 6, fluxul 1);
- prin conducție în zonele reci ale materialului componentelor de sudat (figura 6, flux 2);
- prin conducție în placa suport pe care sunt fixate componentele care se sudează (figura 6, flux 3);
- prin conducție în părțile reci ale sculei (figura 6, flux 4);
- prin conducție în materialul componentelor din fața sculei (figura 6, flux 5).

Având în vedere aceste ipoteze „simplificatoare” am urmărit să determinăm modul de curgere a materialului plastefiat în zona îmbinării sudate, pe parcursul procesului de sudare. Pentru aceasta am considerat un șir de particule plasate pe direcția de deplasare a sculei de sudare (direcția de sudare) și am urmărit deplasarea lor în timpul procesului de sudare. Rezultatele sunt prezentate în figura 7.

Analizând distribuția temperaturii dezvoltate în zona îmbinării în planul paralel cu axa îmbinării, care trece chiar prin axa sculei (figura 7) se poate observa că valoarea maximă este atinsă în imediata vecinătate a sculei, scăzând rapid pe direcția de sudare a ei.

Curgerea materialului în zona îmbinării relevă antrenarea sa într-o mișcare de rotație în sensul de rotație al sculei, simultan cu o mișcare de deplasare înspre profunzimea cusăturii a materialului situat pe partea de retragere a ei.

coefficients A=265MPa; B=426MPa; n=0.34; C=0.015; m=1 (for the aluminum alloy).

Effective viscosity was estimated by the following equation:

$$\mu = \frac{\tau}{\sqrt{3\dot{\epsilon}}} \quad (2)$$

which transforms shear stress in effective viscosity.

The heat quantity developed as a result of shear was estimated by:

$$Q_{sh} = v_{sh} \cdot \tau \quad (3)$$

where:

v_{sh} = shear speed;

t = shear stress on the surface.

Heat generating speed as a result of friction between the tool shoulder and the work pieces was estimated in a similar manner with continuous friction welding:

$$d\dot{q} = 2\pi\omega \cdot r^2 \cdot \mu(T)p(T)dr \quad (4)$$

and on the entire surface:

$$\begin{aligned} \dot{q} &= \int_{r_1}^{r_2} 2\pi\omega \cdot r^2 \cdot \mu(T)p(T)dr = \\ &= \frac{2}{3}\pi\omega\mu(T)p(T)(r_2^3 - r_1^3) \end{aligned} \quad (5)$$

where:

r_1 tool pin radius, r_2 tool shoulder radius;

μ = linear thermal expansion coefficient.

The simplified model considers that two processes generate heat: friction between the tool and the work piece material and shear of the work piece material, under the action of the tool. The entire quantity of heat is divided into the heat accumulated in the materials and used for plastic deformation of the work piece material and the heat:

- accumulated into the weld (Fig. 6, flux 1);
- transmitted by conduction into the cold parts of the work pieces (Fig. 6, flux 2);
- transmitted by conduction into the support plate of the welding machine (Fig. 6, flux 3);
- transmitted by conduction into the cold parts of the tool (Fig. 6, flux 4);
- transmitted by conduction into the cold parts of the work pieces located in front of the tool (Fig. 6, flux 5).

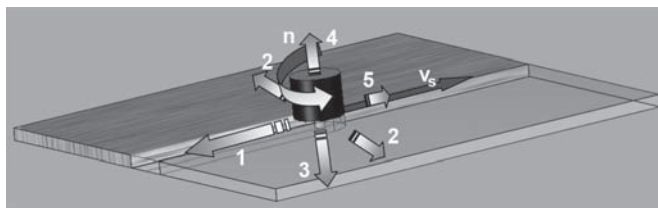


Figura 6. Direcțiile de transmitere a căldurii în timpul procesului de sudare prin frecare cu element activ rotator/

Figure 6. Heat fluxes on the geometrical model of FSW

Taking into consideration all these simplifications, we determined the material flow model in the welding zone. Considering some particles placed on the welding directions and watching their movement during the process, we were able to obtain the following results, presented in Figure 7.

Totodată se observă antrenarea particulelor de material din fața sculei, de pe partea de avans a ei, până în spatele ei, de asemenea pe partea de retragere a sa și oprirea mișcării acestora într-o zonă foarte apropiată de poziția de pornire.

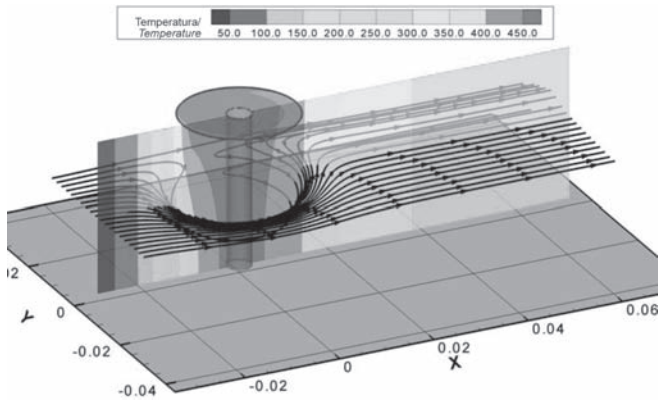


Figura 7. Deplasarea particulelor de material și câmpul termic dezvoltat de scula de sudare (vedere laterală, în planul care trece prin axa sculei)/

Figure 7. Material flow and thermal field developed by the welding tool (side view of a vertical plane along the welding direction, containing the tool axis)

Această antrenare pe un parcurs așa de lung și situarea punctului final aproape de punctul de început a stat la baza concluziei trase de Reynolds [21] asupra mișcării „inverse” a particulelor situate pe partea de retragere a sculei.

Pe suprafața componentelor, în zona de frecare a umărului sculei, distribuția temperaturii este asimetrică, câmpul termic fiind mai extins în partea de avans a sculei (figura 8).

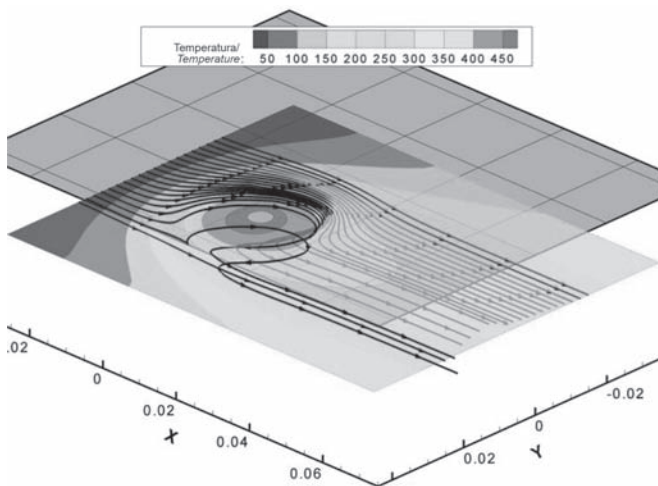


Figura 9. Deplasarea particulelor de material și câmpul termic dezvoltat de scula de sudare (vedere de jos, în planul median în secțiunea longitudinală a componentelor care se sudează)/

Figure 9. Vertical movement of particles and thermal field developed during FSW (view from beneath)

Analizând deplasarea pe verticală a materialului se observă că aceasta este mult mai amplă pe partea de retragere a sculei în comparație cu partea de avans a ei (figura 9).

Analizând distribuția vâscozității în materialul din zona îmbinării sudate se observă o plastefiere accentuată a materialului în vecinătatea zonei de acțiune a sculei și o scădere rapidă a acestei capacități de deformare plastică, pe măsură ce ne îndepărtăm de această vecinătate (figura 10).

Analyzing the temperature distribution in a plane along the welding direction containing the tool axis (Fig. 7), we observed that the maximum value is reached in the proximity of the tool, decreasing quickly with the distance from the tool. The material flows around the tool, in the same direction as the tool, simultaneously with a vertical movement towards the lower part of the work pieces especially on the retreating side in the backside of the tool.

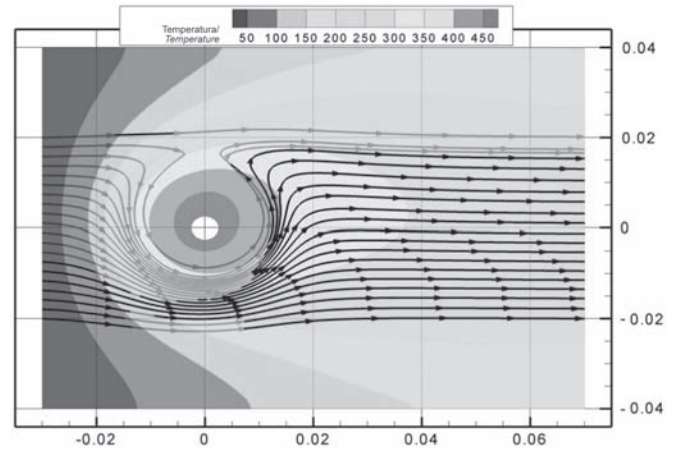


Figura 8. Deplasarea particulelor de material și câmpul termic dezvoltat de scula de sudare (vedere de sus)/

Figure 8. Upper view of the thermal field developed during FSW

Analyzing the movement of the particles that are placed in front of the tool, on the advancing side, we observed that they are moved, with high speed on a circular trajectory, up to the back of the tool, on the same side, almost to the same position from which they started the movement. This trajectory and the fact that the particle stops very close to the starting position led Reynolds [9] to the conclusion that there is a “serration” movement during the FSW process.

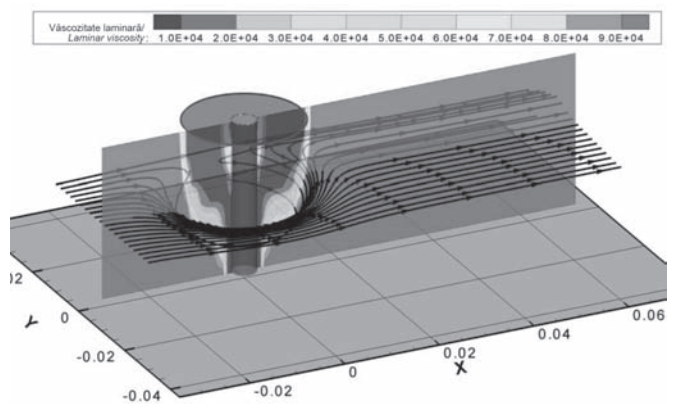


Figura 10. Deplasarea particulelor de material și vâscozitatea materialului (vedere laterală în planul care trece prin axa sculei)/

Figure 10. Particle movement and material viscosity evolution in the FSW process

Analyzing the temperature distribution on the work pieces surfaces reveals that it is asymmetric, having a larger extension on the advancing side of the tool (Fig. 8).

On a view from beneath, on the same plane, the vertical movement of the particles is better observed (Fig. 9). The am-

La o analiză atentă se poate observa că vâscozitatea materialului crește pe măsură ce ne îndepărtăm de sursa de căldură, dar este mare și într-un strat foarte subțire, care se află în imediata proximitate a sculei. Stratul respectiv este un strat de material care a „aderat” la suprafața sculei. Acest aspect are implicații mari asupra dinamicii procesului de sudare prin frecare cu element activ rotitor (similar cu procesul de sudare prin frecare convențională).

Concluzii

Procesul de sudare prin frecare cu element activ rotitor poate fi considerat un proces de extrudare deosebit, în care scula de extrudare este alcătuită din: pinul sculei de sudare și umărul acestei scule, suprafața rece a mesei mașinii de sudat.

Curgerea materialului în zona îmbinării poate fi studiată cu ajutorul unui model cu ajutorul analizei cu elemente finite, care poate fi ajustat cu ajutorul unor încercări experimentale care presupun: urmărirea curgerii materialului cu ajutorul unor markeri și a analizelor metalografice micro- și macro-structurale, urmărirea câmpului termic dezvoltat cu ajutorul unor termocuple și a unor termografii, eventual urmărirea curgerii cu ajutorul unor radiografii, studierea formei și dimensiunilor grăunților materialului din zona îmbinării, studierea transformărilor micro-structurale din aceeași zonă, etc.

Posibilitatea studierii fenomenelor termice, a curgerilor, tensiunilor și deformațiilor dezvoltate pe parcursul sudării cu element activ rotitor poate fi făcută cu ajutorul analizei cu elemente finite, cu rezultate bune, foarte apropiate de realitate.

Bibliografie/ References

[1] Fratini, L., Buffa, G., Palmieri, D., Material Flow in FSW of AA7075-T6 Butt Joints: Continuous Dynamic Recrystallization Phenomena, *Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME*, **128**, July 2006, pp. 428-435

[2] London, B., Mahoney, M., Bingel, B., Calabrese, M., Waldrom, D., Proceeding of the Third International Symposium on Friction Stir Welding, Kobe, Japan, 27-28 September, 2001

[3] Su, J. Q., Nelson, T. W., Mishra, R., and Mahoney, M., 2003 “Microstructural Investigation of Friction Stir Welded 7050-T654 Aluminium” *Acta Mater.*, **51**, pp. 713-729

[4] Mishra, R. S., Ma, Z. Y., Charit, I., *Mater. Sci. Eng.*, **A 341** (2002) 307

[5] Berbon, P. B., Bingel, W. H., Mishra, R. S., Bampton, C. C., Mahoney, M., W., *Scripta Mater.* **44** (2001) 61

[6] Spowart, J. E., Ma, Z. Y., Mishra, R. S., in: Jata, K. V., Mahoney, M. W., Mishra, R. S., Semiatin, S. L., Lienert, T. (Eds.), *Friction Stir Welding and Processing II*, TMS, 2003, pp. 243-252

[7] Ma, Z. Y., Sharma, S. R., Mishra, R. S., Mahoney, M. W., *Mater. Sci. Forum* **426-432** (2003) 2891

[8] David, S. A., Zhili Feng, *Friction Stir Welding of Advanced Materials: Challenges*, Materials Joining Group, Metals and Ceramics Division, Oak Ridge, TN, USA, 9th Materials Day in Graz, Austria, November 19, 2004

[9] Reynolds, A. P., *Visualization of Material Flow in an Autogenous Friction Stir Weld*, *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 5, no. 2, (2000), pp. 120-124

[10] Seidel, T. U., Reynolds, A. P., *Visualization of Material Flow in AA2195 Friction Stir Welds Using a Marker Insert Technique*, *Metallurgical and Materials Transactions, A*, vol. **32A**, November 2001, pp. 2879-2884

plitude of this movement is higher on the retreating side of the tool, than on the advancing side of it.

Analysis of the viscosity of the material in the welding zone reveals a large plastification of the material in the proximity of the tool and a rapid decrease of this capacity as the distance from the tool increases (Fig. 10).

Material viscosity increases as long as the distance from the heat source increases, but it is high in a very thin layer on the tool pin surface. This aspect is determined by the fact that the material of the work pieces adheres to the tool pin surface (similar to conventional friction welding process), which will have a great impact on the dynamics of the FSW process.

Conclusions

FSW process can be considered as an extrusion process in which the tool is formed by: tool pin and shoulder, cold margins of the work pieces and the support table of the welding machine.

The material flow in the welding zone can be studied with the aid of the finite element model that can be adjusted with experimental data, which trace the material flow with the aid of markers, metallographic investigations, distribution of the thermal field measured by thermocouples and by thermography, radiographic images, microstructural transformation, etc.

Studying the thermal phenomena, material flow, stresses and strains developed during FSW can be made using the finite element analysis, with very good results.

[11] Reynolds, A. P., Seidel, T. U., Simonsen, M., *Visualization of Material Flow in an Autogenous Friction Stir Weld*, In *Proceedings of 1st International Symposium on Friction Stir Welding*, Rockwell Science Center, Thousand Oaks, CA, (Jun. 1999)

[12] Colegrove, P., Shercliff, H., in: K. V. Jata, M. W. Mahoney, R. S. Mishra, S. L. Semiatin, T. Lienert (Eds.), *Friction Stir Welding and Processing II*, TMS, Warrendale, PA, USA, 2003, p.13

[13] Smith, C. B., Bendzsak, G. B., North, T. H., Noruk, J. F., Heideman, R. L., *Ninth International Conference on Computer Technology in Welding*, Detroit, Michigan, USA, 28-30 September 1999, 2000, p. 475

[14] Bendzsak, G. J., Smith, C. B., in: *Proceedings of Second International Symposium on Friction Stir Welding*, Gothenburg, Sweden, June 26-28, 2000

[15] Askari, A., Silling, S., London, B., Mahoney, M., in: K. V. Jata, M. W. Mahoney, R. S. Mishra, S. L. Semiatin, D. P. Filed (Eds.), *Friction Stir Welding and Processing*, TMS, Warrendale, PA, USA, 2001, p.43

[16] Goetz, R. L., Jata, K. V., in: K. V. Jata, M. W. Mahoney, R. S. Mishra, S. L. Semiatin, D. P. Filed (Eds.), *Friction Stir Welding and Processing*, TMS, Warrendale, PA, USA, 2001, p. 35

[17] Stewart, M. B., Adamas, G. P., Nunes Jr. A. C., Romine, P., *Developments in Theoretical and Applied Mechanics*, Florida Atlantic University, USA, 1998, pp. 472-484

[18] Nunes Jr. A. C., in: S. K. Das, J. G. Kaufmann, T. J. Lienert (Eds.), *Aluminum 2001*, TMS, Warrendale, PA, USA, 2001, p. 235

