

# Comportarea la sudarea prin frecare cu element activ rotitor a titanului Ti Gr 2

## Friction stir welding behaviour of titanium Ti Gr 2

Lia Boțilă, Radu Cojocaru, Voicu Safta

Institutul Național de Cercetare-Dezvoltare în Sudură și Încercări de Materiale

### Cuvinte cheie

Sudare prin frecare cu element activ rotitor, comportare la sudare, TiGr2, unealtă de sudare, parametri sudare

### Keywords

Friction stir welding, welding behaviour, titanium grade2, welding tool, welding paramters

### Introducere

Datorită punctului de topire relativ ridicat ( $1660^{\circ}\text{C}$ ) și reactivității aliajelor de titan, la sudarea FSW a titanului intervin unele aspecte care nu apar la sudarea materialelor cu punct de topire scăzut [1].

Temperaturile ridicate necesare plastifierii materialului fac ca elementul critic la sudare să îl reprezinte durabilitatea materialului din care este realizată unealta de sudare. Aliajele din care este realizată unealta de sudare sunt materiale reactive și necesită protecție la contaminarea interstițială. Probleme se pun și la materialul plăcii de bază care trebuie să prezinte o conductivitate termică scăzută, dar și o rezistență corespunzătoare la temperaturi ridicate situate în domeniul în care are loc procesul de plastifiere [2].

### Program experimental

#### • Aspecte tehnologice și regimuri de sudare

În cadrul lucrării au fost analizate posibilitățile îmbinării cap la cap prin procedeul FSW a tablelor din titan calitatea TiGr2 – ASTM W 3.7035, de grosime 4mm, având compoziția chimică din tabelul 1.

Tabelul 1. Compoziția chimică a TiGr2

Elementul	C	Fe	H	N	O	Ti
%	0,06-	0,2-0,3	0,013-	0,03-	0,18-	rest
Max.	0,08		0,015	0,05	0,25	

Fezabilitatea procedurii FSW a fost demonstrată în cadrul unor experimentări preliminare. În timpul acestor experimente s-a constatat că aliajele pe bază de wolfram sunt cele mai indicate pentru realizarea uneltelor destinate sudării FSW a tablelor de titan [3].

La alegerea materialului pentru placa de bază s-au avut în vedere particularitățile sudării FSW a aliajelor de Ti. Materialele recomandate la realizarea acesteia sunt aliajele refractare și ceramice.

Unealta de sudare s-a realizat cu umărul din oțel tratat la HRC 45-50, iar pinul din wolfram.

### Introduction

Because of the relatively high fusion temperature ( $1660^{\circ}\text{C}$ ) and reactivity of titanium alloys, in FSW intervene some aspects that are not present in welding materials with low fusion temperature [1].

Elevated temperatures necessary for plasticization of material make the durability of the welding tool material, the critical point in welding.

The alloys which the welding tools are made of are reactive materials and their protection for interstitial contamination is necessary.

Problems may also appear concerning the material for support plate that should have a low thermal conductivity, but also a proper mechanical strength for elevated temperatures at which the plasticization process takes place [2].

### Experimental program

#### • Technological aspects and welding regimes

In the paper were analyzed possibilities of butt joining using FSW process of TiGr2-ASTM W 3.7035 plates, 4mm thick, with chemical composition presented in Table 1.

Table1. Chemical composition of the TiGr2

Element	C	Fe	H	N	O	Ti
%	0.06-	0.2-0.3	0,013-	0,03-	0,18-	rest
Max.	0.08		0,015	0,05	0,25	

The feasibility of FSW process was demonstrated in some preliminary experiments. During these experiments there was discovered that wolfram based alloys are most indicated for FSW tool used in titanium plates welding [3].

When choosing the material for support plate, particularities of FSW process for Ti alloys were taken into consideration. The recommended materials are refractory alloys and ceramics.

Welding tool was made with a shoulder of heat treated steel at 45-50 HRC and the pin of wolfram.

The shape and dimensions of the welding tool were selected on the following considerations:

Forma și dimensiunile uneltei de sudare au fost alese pe baza următoarelor considerații:

- obținerea unei temperaturi necesare pentru o bună plastifiere a materialului în sudură
- utilizarea unui pin conic în vederea asigurării unei suficiente mișcări elicoidale de curgere a materialului pentru formarea nucleului pe direcția grosimii.

Probele sudate FSW s-au efectuat utilizând diferite combinații ale parametrilor turație și viteză de sudare, precum și dimensiuni diferite ale uneltei de sudare cu pin conic, conform datelor înscrise în tabelul 2.

Tabelul 2. Parametrii de sudare

Nr.crt.	Viteza de sudare $v_s$ (mm/min)	Turația $n$ (rot/min)	Unealta de sudare		
			$\varnothing_{pin}$ (mm)	$\varnothing_{um\bar{a}r}$ (mm)	$L_{pin}$ (mm)
Proba 1	95	950	5	25	3,5
Proba 2	95	950	4	20	3,0
Proba 3	118	750	5	25	2,8

### • Analiza macroscopică și microscopică

Aspectul îmbinării sudate cu parametrii corespunzători probei 1 este prezentat în figura 1, iar în figura 2 sunt prezentate analizele macroscopice aferente celor trei probe sudate.

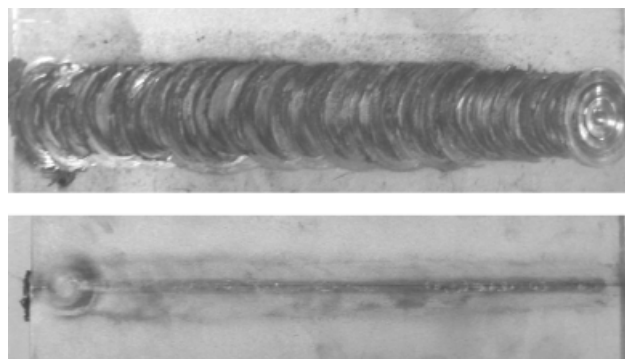


Figura 1. Aspectul îmbinării sudate FSW, proba 1/  
Figure 1. FSW joint aspect of sample 1

În figura 2a) se prezintă o îmbinare sudată fără defecte vizibile, realizată cu parametrii: viteza de sudare 95mm/min, turația 950rot/min, unealta având  $\varnothing_{pin} = 5mm$ ,  $\varnothing_{um\bar{a}r} = 25mm$ ,  $L_{pin} = 3,5mm$  (proba 1).

Mentținând constante viteza de sudare și turația, dar modificând dimensiunile uneltei de sudare:  $\varnothing_{pin} = 4mm$ ,  $\varnothing_{um\bar{a}r} = 20mm$ ,  $L_{pin} = 3,5mm$ , în figura 2b) se poate observa în sudură un defect care a apărut datorită cantității insuficiente de căldură introduse în proces (proba 2). Acest fapt este datorat dimensiunilor necorespunzătoare ale uneltei de sudare. Prin creșterea vitezei de sudare la 118mm/min și scăderea turației la 750 rot/min, corelat cu modificarea dimensiunilor uneltei de sudare  $\varnothing_{pin} = 4mm$ ,  $\varnothing_{um\bar{a}r} = 25mm$ ,  $L_{pin} = 2,8mm$ , în figura 2c) se constată o lipsă de pătrundere datorată dimensiunii (lungimii) insuficiente a elementului activ rotitor (proba 3).

Analiza microstructurală a relevat următoarele aspecte mai semnificative:

- materialul de bază are o structură de soluție solidă  $\alpha$ , cu grăunți poliedrici având dimensiunile cuprinse între 60-80mm, conform figurii 3.

- obtaining a temperature necessary for a good plasticization of the material in the weld;
- using a conical pin to provide an enough helicoidal movement of material flow, to form nugget on the cross section of the material.

FSW welded samples were made using combinations of the welding parameters rotating speed and welding speed, as well as different dimensions of the welding tool with a conical pin, according to data in Table 2.

Table 2. Welding parameters

No.	Welding speed $v_s$ (mm/min)	Rotation speed $n$ (rot/min)	Welding tool		
			$\varnothing_{pin}$ (mm)	$\varnothing_{shoulder}$ (mm)	$L_{pin}$ (mm)
Sample 1	95	950	5	25	3.5
Sample 2	95	950	4	20	3.0
Sample 3	118	750	5	25	2.8

### • Macroscopic and microscopic analysis

The aspect of the welded joint made with parameters of sample 1 is presented in Figure 1 and the one corresponding to welded sample 2 in Figure 2.

In Figure 2a) is presented a welded joint without visible defects, obtained with a welding speed of 95mm/min, a rotating speed of 950rot/min, tool with  $\varnothing_{pin} = 5mm$ ,  $\varnothing_{shoulder} = 25mm$ ,  $L_{pin} = 3.5mm$  (sample 1).

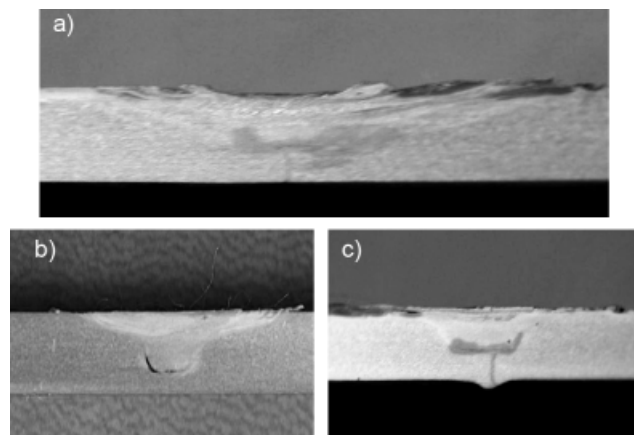


Figura 2 Analize macroscopice suduri FSW, TiGr2.

a) proba 1; b) proba 2; c) proba 3/

Figure 2. Macroscopic analysis of FSW joint TiGr2  
a) sample 1; b) sample 2; c) sample 3/

Keeping constant the welding speed and the rotation speed, but modifying the dimensions of the welding tool  $\varnothing_{pin} = 4mm$ ,  $\varnothing_{shoulder} = 20mm$ ,  $L_{pin} = 3.0mm$ , in Figure 2b, a defect can be observed that appeared as a result of insufficient quantity of heat introduced in the process (sample 2). The improper dimensions of the welding tool generate this aspect. By increasing the welding speed to 118mm/min and decreasing the rotation speed to 750 rot/min, correlated with modification of the welding tool dimensions  $\varnothing_{pin} = 4mm$ ,  $\varnothing_{shoulder} = 25mm$ ,  $L_{pin} = 2.8mm$ , in Figure 2, a lack of penetration due to the insufficient dimension (length) of the active rotating element (sample 3) can be observed.

Microstructural analysis revealed the following significant aspects:

- base material has an  $\alpha$  solid solution structure, with

- zona influențată termic pe partea de retragere a uneltei (figura 4a), precum și cea de pe partea de avans a uneltei (figura 4b) relevă o structură cu o granulație mai fină decât cea a materialului de bază. Pe partea de retragere a uneltei grăunții sunt alungiți având dimensiuni cuprinse între 5-67mm, iar pe partea de avans a uneltei grăunții sunt poliedrici, cu dimensiuni variind între 12-46mm.

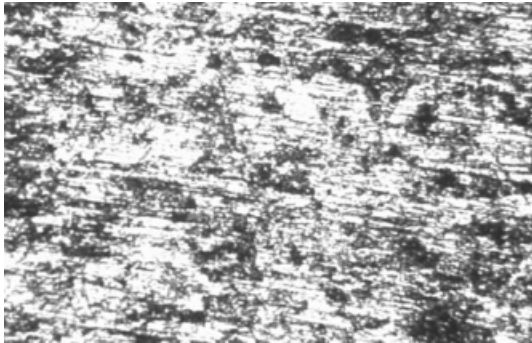


Figura 3 Microstructura materialului de bază (MO, 100x)/  
Figure 3. Microstructure of base material (MO, 100x)

- zona de tranziție cuprinsă între zona influențată termic și zona nucleului nu indică modificări structurale semnificative (figura 5). Se evidențiază totuși că solidificarea este orientată preferențial pe direcția fluxului termic, în care grăunții sunt mai puternic deformați. Aceste zone se regăsesc sub forma unor fâșii de curgere separate antrenate concentric de unealta de sudare.

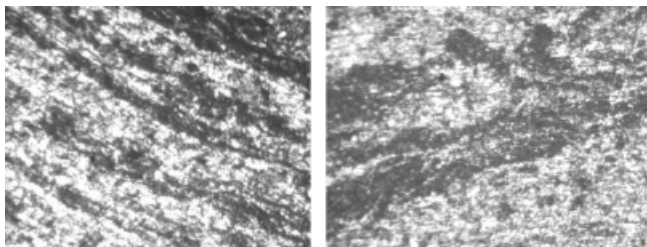


Figura 5. Microstructura zonei influențate termo-deformațional (MO, 100x)/  
Figure 5. TMAZ microstructure (MO, 100x)

- în zona nucleului se observă, de asemenea, o granulație fină poliedrică (figura 6) cu menținerea structurii granulare de soluție solidă  $\alpha$ , caracteristică materialului de bază. Dimensiunile grăunților variază între 2-7mm, remarcându-se finisarea puternică a granulației nucleului comparativ cu metalul de bază și zona influențată termic.

#### • Încercări de duritate

Încercările sclerometrice efectuate transversal pe îmbinarea sudată (figura 7) relevă mici diferențe între subzonele caracteristice îmbinării sudate.

Variațiile sunt cuprinse între 160 și 200 HV1, cu excepția subzonei de amestec mecanic, unde, în pofida rezultatelor analizei microscopice, se pune în evidență o durificare a materialului până la 310 HV1, ceea ce corespunde unui grad de durificare de peste 50% față de materialul de bază. Rezultatul poate fi explicat cu tendința de ecruisare a materialului, ca urmare a procesului de deformare plastică.

Cu toate că microstructurile nu relevă clar existența unei

polygonal grains with dimensions between 60-80mm, according to Figure 3.

- HAZ on the retreating side of the tool (Figure 4a) as well as on the advancing side of the tool (Figure 4b) reveals a structure of finer grains than in base material. On the retreating side of the tool with dimensions between 5-67mm and on advancing side of the tool polygonal grains with dimensions between 12-46mm.

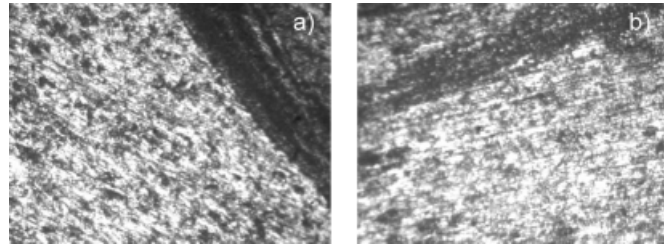


Figura 4. Microstructura zonei influențate termic (MO, 100x)  
a) partea de retragere a uneltei, b) partea de avans a uneltei/  
Figure 4. Microstructure of HAZ (MO, 100x)  
a) retreating side of the tool, b) advancing side of the tool

- the transition zone between HAZ and nugget zone does not indicate significant structural modifications (Figure 5). It is emphasized that the grains are strongly deformed, preferentially in the direction of the thermal flux. These zones are found in the shape of separated flowing strips that are moved concentrically by the welding tool.

- in nugget zone fine polygonal grains are observed (Figure 6) that maintain  $\alpha$  solid solution characteristic to base material. Grains dimensions are between 2-7mm, observing a strong refining of the grains in nugget zone in comparison with base material and HAZ.

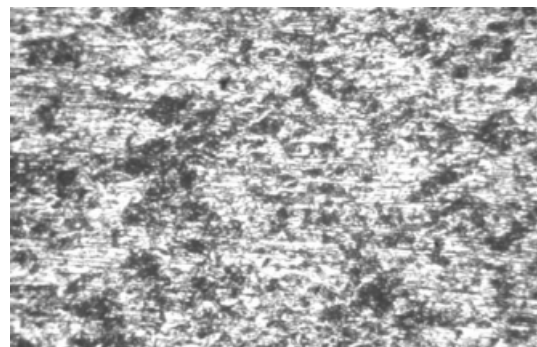


Figura 6. Microstructura zonei nucleului (MO, 100x)/  
Figure 6. Nugget zone microstructure (MO, 100x)

#### • Hardness tests

Hardness tests on transversal section of the weld (Figure 7) reveal small differences in characteristic sub-zones of the welded joint.

Variations are between 160 and 200 HV1, except in sub zone of mechanical mixing, where, against the microscopic analysis, is revealed the hardening of the material up to 310 HV1, corresponding to a degree of 50% from the base material. The result can be explained with the tendency of cold hardening as a result of the plastic deformation process.

Even if the microstructure does not reveal the presence of the TMAZ, hardness evolution supports the existence of a strip of hardened material between the HAZ and nugget, due to plastic deformation of the material (grain refinement).



zone influențate termo-mecanic, evoluția durtății susține existența unei fâșii de material cu o durificare de cca. 33% între zona influențată termic și zona nucleului, ca urmare a deformării plastice la care a fost supus materialul (finisarea granulației).

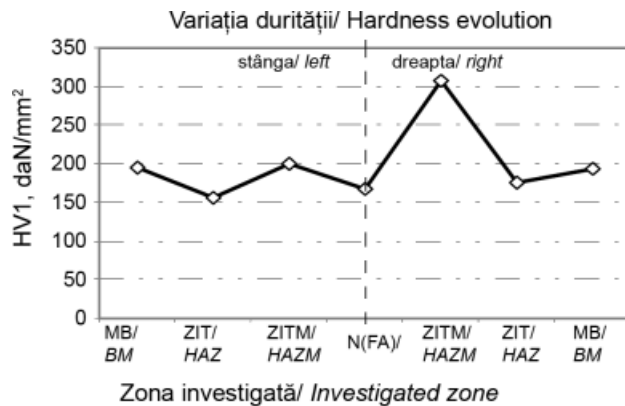


Figura 7. Variația durtății transversal pe îmbinarea sudată / Figure 7. Hardness evolution transversal on the welded joint

### • Caracteristici mecanice la tracțiune

Rezultatele încercărilor la tracțiune a titanului TiGr2 ca material de bază și a îmbinărilor sudate prin frecare cu element activ rotator (pentru regimurile tehnologice 1 și 2 din tabelul 2), sunt prezentate în tabelul 3.

Tabelul 3. Rezultatele încercărilor la tracțiune

Nr. eprv.	H <sub>0</sub> [mm]	B <sub>0</sub> [mm]	E [N/mm <sup>2</sup> ]	R <sub>p0,2</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	R <sub>m</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	A <sub>gt</sub> %	A <sub>t</sub> %
MB	4	13	119,990	356,5	444,9	7,6	27,8
Pr. 1	4	13	128,077	380,3	423,3	1,4	2,5
Pr. 2	4	13	140,907	385,1	398,0	1,2	2,5

### • Tensile mechanic characteristics

Tensile test results of TiGr2 as base material and the FSW welded joints (for samples 1 and 2 in Table 2) are presented in Table 3.

These represent the average between 3 measurements for each experiment in Table 3.

Diagrams in Figures 8 and 9 represent tensile test characteristic curves registered with testing machines on base material (Figure 8) and respectively welded joints (Figure 9).

Table 3. Tensile tests results

Spec. No.	H <sub>0</sub> [mm]	B <sub>0</sub> [mm]	E [N/mm <sup>2</sup> ]	R <sub>p0,2</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	R <sub>m</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	A <sub>gt</sub> %	A <sub>t</sub> %
BM	4	13	119.990	356.5	444.9	7.6	27.8
Sample 1	4	13	128.077	380.3	423.3	1.4	2.5
Sample 2	4	13	140.907	385.1	398.0	1.2	2.5

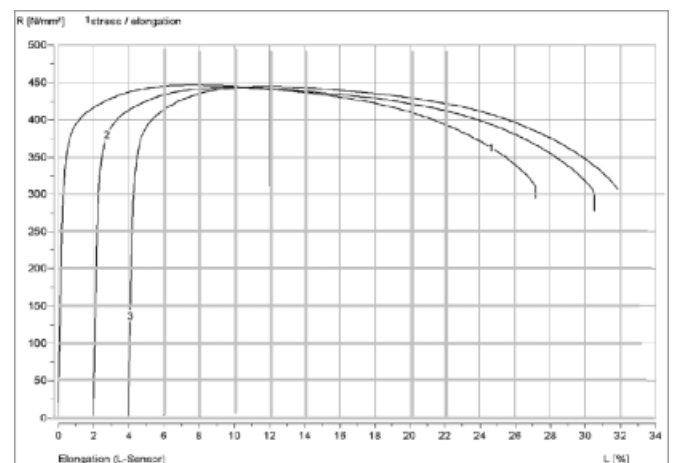


Figura 8. Curbe caracteristice la încercarea la tracțiune a epruvetelor din material de bază / Figure 8. Tensile testing characteristic curves for specimen of base material

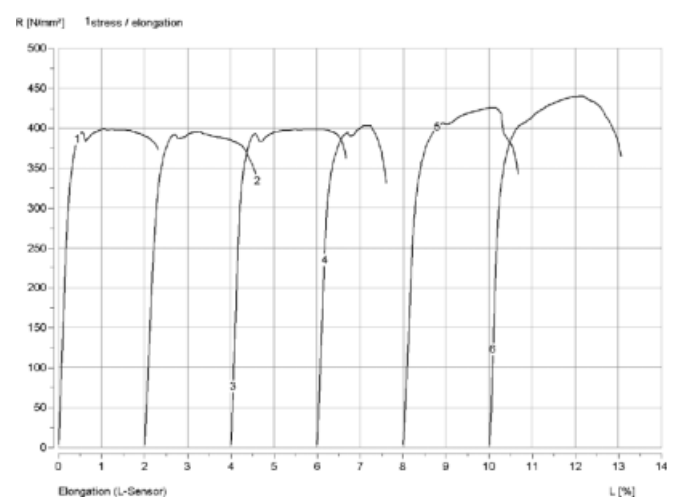


Figura 9. Curbe caracteristice la încercarea la tracțiune a epruvetelor din îmbinări sudate / Figure 9. Tensile test characteristic curves for welded joints specimens

In Figure 9, tensile characteristics corresponding to sample 2 are numbered 1-3 and tensile characteristics corresponding to sample number 1 are numbered 4-6.

## • Încercări la temperaturi ridicate

Încercările la tracțiune la temperaturi ridicate au urmărit determinarea rezistenței la rupere ( $R_m$ ) și a alungirii la rupere ( $A_5$ ) în intervalul situat în limitele 650-850°C în care are loc procesul de curgere a aliajelor de titan în cursul sudării FSW. Intervalul de temperaturi s-a ales pe baza înregistrărilor efective din cursul procesului de sudare, folosind o cameră de termografie în infraroșu, care s-a focalizat pe linia de îmbinare la cca. 1mm distanță de umărul uneltei de sudare, figurile 10 și 11. Încercările au urmărit stabilirea caracteristicilor reologice în intervalul de temperaturi menționat în vederea simulării cât mai apropiate a procesului de deformare plastică în jurul uneltei de sudare. Precizia măsurătorilor de temperatură în instalația de încălzire a fost de  $\pm 3^{\circ}\text{C}$ .



Figura 10. Vizualizarea temperaturii atinse în umărul uneltei la sudarea FSW a tablelor de titan/

Figure 10. Visualization of temperature reached in the shoulder of the FSW tool on welding titanium plates

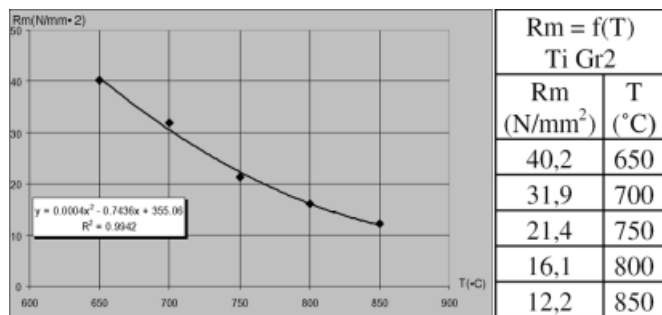


Figura 12. Variația rezistenței la rupere cu temperatura/  
Figure 12. Mechanical strength evolution with temperature

Caracteristicile reologice au fost ridicate la cinci valori ale temperaturii situate într-un interval de câte 50°C. Rezultatele determinărilor au permis ridicarea dependențelor de temperatură a rezistenței la rupere  $R_m = f(T)$  - figura 12, respectiv a alungirii la rupere  $A_5 = f(T)$ , figura 13. Analiza lor permite evidențierea următoarelor aspecte:

- rezistența la rupere ( $R_m$ ) în intervalul de temperaturi menționat scade de aproape 4 ori
- alungirea la rupere ( $A_5$ ) este foarte ridicată, cu cca. un ordin de mărime superioară celei înregistrate la temperatura normală; în schimb variația acesteia cu temperatura este destul de limitată.

Datorită afinității titanului față de oxigen, se intenționează continuarea cercetărilor prin realizarea de experimentări de sudare

The analysis of these results allowed to observe the following aspects:

- results from the two experiments are extremely homogeneous;
- from the point of view of determined mechanical characteristics, the differences between the two welding regimes are in the limits of 5-6% for mechanical strength ( $R_m$ ) and under 2% for yield limit ( $R_{p0,2}$ );
- the ratio between mechanical strength of FSW welds and mechanical strength of the base material is between 0.90-0.96;
- deformability characteristics, elongation  $A_5$  and elongation corresponding to the maximum of function  $\sigma = f(\epsilon)$ ,  $A_{gt}$ , are fundamentally effected, the differences reaching more than an order of magnitude.

## • Tests at elevated temperatures

Tensile tests at elevated temperatures have determined mechanical strength ( $R_m$ ) and fracture elongation ( $A_5$ ) in the interval 650-850°C in which the flow process for titanium alloys takes place during FSW process. The temperature interval was chosen based on the recordings made during the welding process with the infrared thermographic photo camera focused on the welding axis, at around 1mm distance from the welding tool shoulder, Figures 10 and 11. The tests tried to determine

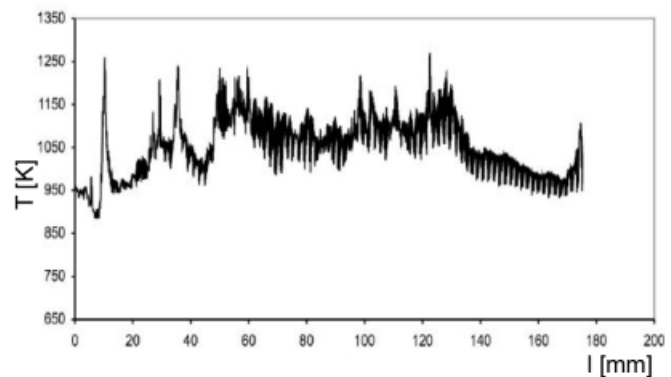


Figura 11. Evoluția temperaturii în timpul sudării/  
Figure 11. Temperature evolution during welding

the rheological characteristics in the temperature interval specified, to simulate as close as possible the plastic deformation process around the welding tool. Temperature measurements precision in heating device was  $\pm 3^{\circ}\text{C}$ .

Rheological characteristics were raised at five values of temperature situated in an interval of 50°C. The results of the measurements allowed to raise the link between the temperature and mechanical strength  $R_m = f(T)$  - Figure 12, respectively fracture elongation  $A_5 = f(T)$ , Figure 13. Their analysis allowed us to emphasize the following aspects:

- mechanical strength ( $R_m$ ) in the above temperature interval is decreasing almost 4 times;
- fracture elongation ( $A_5$ ) is very high, with almost an order of magnitude over the one recorded at room temperature, but its variation with temperature is limited.

Due to the fact that titanium is very avid for oxygen, the researches will continue to experiment FSW welding in an argon environment, to prevent oxidation of the parts. For this, a protective device, as presented in the literature [4], can protect the entire welding zone.

FSW în mediu de argon pentru a preveni oxidarea pieselor. Pentru aceasta se poate realiza înconjurarea întregii zone de lucru cu o incintă de protecție, fapt relevant și în literatura de specialitate [4].

Lucrarea a fost realizată în cadrul proiectului CEEX „Tehnologii inovative și ecologice de procesare a materialelor

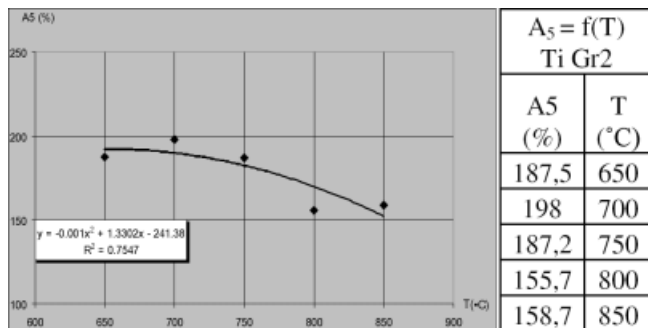


Figura 13. Variația alungirii la rupere cu temperatura/  
Figure 13. Variation of fracture elongation with temperature

avansate, prin frecare cu element activ rotitor”, cu finalizare în septembrie 2008, Autoritatea contractantă fiind Universitatea Politehnica București, program MATNANTECH.

## Concluzii

– În lucrare s-au stabilit regimuri de sudare FSW a titanului TiGr2, care asigură caracteristici mecanice corespunzătoare ale îmbinării. Regimurile optime s-au constatat la o viteză de sudare  $v_s = 95\text{mm/min}$  și turația  $n = 950\text{ min}^{-1}$ .

– S-au pus în evidență modificările produse în structura omogenă de soluție  $\alpha$ , în zonele specifice îmbinării, constatându-se finisarea diferită a granulației funcție de tipul și amplasamentul zonei. Parțial ele au fost confirmate și prin încercări sclerometrice.

– Modificări limitate ale pin-ului uneltei au indus defecte de tipul lipsei de aderență și mai ales a lipsei de topire sub nucleu.

– La regimurile favorabile de sudare caracteristicile mecanice obținute se caracterizează printr-o bună omogenitate. Rezistența la rupere a îmbinării sudate a fost deosebit de favorabilă, raportul acesteia față de cea corespunzătoare materialului de bază ajungând până la 0,96. Alungirea la rupere a scăzut însă cu un ordin de mărime.

– Încercările de scurtă durată ale titanului Gr2 la temperaturi ridicate, alese funcție de rezultatul înregistrărilor on-line prin termografie în infraroșu, au indicat variații deosebit de mari ale rezistenței la rupere, de până la 400 % în intervalul 650-850°C, respectiv o deformabilitate foarte bună în acest domeniu, cuprinsă între 200-160%.

Lucrarea susținută în cadrul conferinței internaționale „Tehnologii inovative pentru îmbinarea materialelor avansate”, Timișoara, 12-13 iunie 2008.

The paper was done in the CEEX project “Innovative and ecologic technologies for processing advanced materials by FSW” to be concluded in September 2008, the contractual authority being University “Politehnica” Bucharest, program MATNANTECH.

## Conclusions

– In the paper there were determined FSW technologies for TiGr2 that provide corresponding mechanical characteristics for the weld. Optimum welding regimes were found at a welding speed of  $v_s = 95\text{mm/min}$  and a rotation speed of  $n = 950\text{ min}^{-1}$ .

– The modifications of the  $\alpha$  solid solution homogeneous structure in the weld zones were revealed, emphasizing different finishing of the grains as a function of type and the position of the zone. Partially, they were also confirmed by hardness tests.

– Limited modifications of the tool pin induced defects as lack of adhesion and specially lack of penetration.

– For the optimum regimes mechanical characteristics are characterized by good homogeneity. Mechanical strength was very good, its ratio with the base material reaching up to 0,96. Fracture elongation decreased with an order of magnitude.

– Short time tests of TiGr2 at high temperatures, selected with the online infrared thermographic records, have indicated large variations of mechanical strength, up to 400% in the interval 650-850°C, respectively a very good deformability in this range, between 200-160%.

## Bibliografie/ References


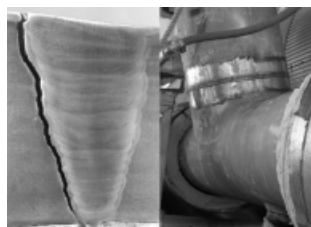
[1] Mishra R. S. , Mahoney M.W.: „Friction Stir Welding and Processing”, p.123-155, ASM International, ISBN-13: 978-0-87170-840-3, 2007.

[2] Russell M.J., Blignault C.: „Recent Developments in Friction Stir Welding of Ti Alloys”, 6<sup>th</sup> International Symposium on Friction Stir Welding, 10 - 13 October, Saint-Sauveur, Montreal, Canada, 2006.

[3] Dehelean D. ș.a.: Innovative and ecological technologies to process advanced materials by friction stir welding (in Romanian), ISIM Timișoara, Project CEEX No.66/2006-2008.

[4] Ikeda M. ș.a.: „Fundamental Study for Development of New Tool for Titanium and its Alloys”, 6<sup>th</sup> International Symposium on Friction Stir Welding, 10 - 13 October, Saint-Sauveur, Montreal, Canada, 2006.

The paper was presented at the International Conference “Innovative technologies for joining advanced materials” – June 12-13, 2008, Timișoara (Romania)

	<b>International Conference WELDS 2009</b>	
	<b>Design, Testing, Assessment, and Safety of High-Temperature Welded Structures</b>	
	<b>June 24–26, 2009</b>	
	<b>Sanibel Harbour Resort &amp; Spa, Fort Myers, Florida, USA</b>	
<a href="http://www.epri.com">www.epri.com</a>		Conference Chairmen <b>Bilal Dogan</b> E-mail: bdogan@epri.com <b>Kent Coleman</b> E-mail: kcoleman@epri.com
		