

Application of infrared thermography in the non-destructive examination of friction stir welds

Aplicarea termografiei în infraroșu la controlul nedistructiv al îmbinărilor sudate prin frecare cu element activ rotitor

Prof. dr. ing. V. Safta, member of the Romanian Academy of Technical Sciences
ISIM Timișoara, Romania

Keywords

Non-destructive testing, thermography, heat transfer, friction stir welding, artificial defects

Cuvinte cheie

Control nedistructiv, termografie, transfer de căldură, sudare cu element activ rotitor, defecte artificiale

1. Introduction

Nowadays trends in non-destructive examinations applied to FSW welded joints, depending on possible defects types, too, lay a special importance on the possibilities to visualize defects [1], [2], certainty of diagnose [3] and monitoring potential [4]. The present paper mainly considers the last aspect, as well as the detection capacity as a function of the nature and the volume dislocated by defect.

2. Considerations on infrared thermography

The infrared thermography is an examination method used for the thermal images in the infrared spectrum. This method can be applied in the real time and on-line, respectively.

The base relation of the heat transfer between two real bodies having the temperatures T_1 and T_2 , respectively, is given by the Stefan – Boltzmann law:

$$q = c \cdot \varepsilon \cdot A (T_1^4 - T_2^4) \quad (1)$$

where c is the coefficient of radiation for the black body, $c = 5.671 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$; ε is the emission factor, $\varepsilon < 1$; A is the heat exchange by the radiation area.

The infrared radiation intensity is measured using an infrared thermographic camera (CTI). This camera has the photons detectors, placed in the microbolometric lattice, which transform the radiation intensity in voltage, U .

The scheme of the radiation capture by the thermographic camera is presented in Figure 1.

The energy balance is given by the relation:

$$q_{tot} = \varepsilon \tau \cdot q_{ob} + (1 - \varepsilon) \tau q_{refl} + (1 - \tau) q_{atm} \quad (2)$$

In relation (2), making the substitution $U = kq$ and explaining q_{ob} , it can be obtained the voltage corresponding to the object, and then the object absolute temperature:

$$U_{ob} = \frac{1}{\varepsilon \cdot \tau} U_{tot} - \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} U_{refl} - \frac{1 - \tau}{\varepsilon \tau} U_{atm} \quad (3)$$

1. Introducere

Tendințele actuale ale examinărilor nedistructive aplicate îmbinărilor sudate FSW, funcție și de tipologia defectelor posibile, pun un accent deosebit pe posibilitățile de vizualizare a defectelor [1], [2], siguranța diagnozei [3] și potențialul de monitorizare [4]. Lucrarea de față are în vedere în principal ultimul aspect, precum și capacitatea de detectare în funcție de natura și volumul dislocat de defect.

2. Considerații asupra termografiei în infraroșu

Termografia în infraroșu reprezintă o tehnică de examinare a imaginilor termice în domeniul spectrului de radiații infraroșii. Marele avantaj al acestei metode de control nedistructiv constă în posibilitatea aplicării în timp real și intervenția on-line.

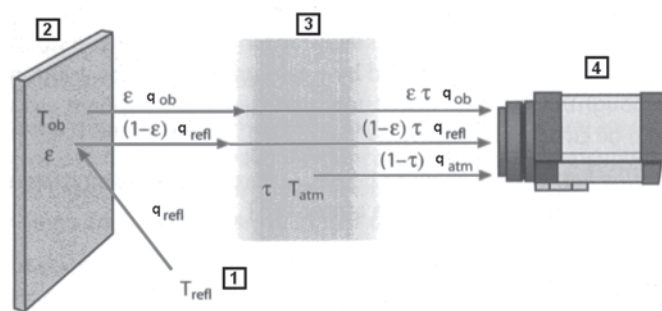


Figure 1. Scheme of the radiation capture:
1) environment, 2) object, 3) atmosphere (coefficient of heat transfer), 4) thermographic camera/
Figura 1. Schema de captare a radiației: 1) mediu înconjurător, 2) obiect, 3) atmosferă (coeficient de transmisie), 4) cameră termografică

Relația de bază a transferului de energie dintre două corpuri reale având temperatura T_1 , respectiv T_2 , se exprimă pe baza legii lui Stefan – Boltzmann (ecuația 1), unde c este coeficientul de radiație a corpului negru, $c = 5,671 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$; ε este factorul de emisie, $\varepsilon < 1$; A este aria suprafeței de schimb de căldură.

In order to facilitate the interpretation of relations (2) and (3), some values of the emission factor are presented in Table 1.

The thermographic camera works with 50 images/s, f . So, if the camera speed moving is the same with the welding speed, v_s , it can be determined the distance between the two consecutive images:

$$\Delta l = \frac{V_s}{f} \quad (4)$$

In this case, there is the possibility to know the position of every measured point and to obtain the graphical representation, $T = f(l)$.

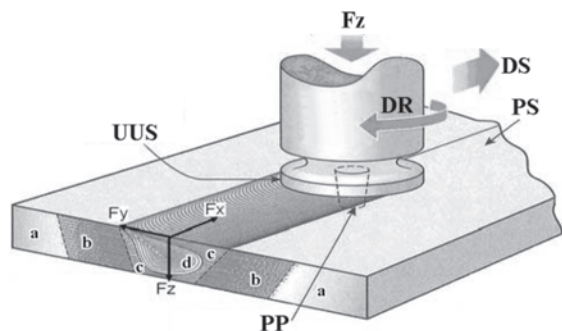
The measurement accuracy of the temperature using the thermographic camera is $\pm 2^\circ\text{C}$, at the ambient temperature, and generally, $\pm 2\%$ of the measured value.

3. Heat transfer in the FSW process

FSW process is developed by dynamic diffusion of the materials, in crystalline state, because of the friction temperature in the weld zone.

In Figure 2 [5], the scheme of the FSW procedure is presented. The joining of the components is made by the welding tool rotation at the same time with the action of the press force, F_z and the moving force, F_x . So, the subzones showed in the figure are formed.

The heat transfer from the tool to the welded piece is made by conduction [6], in all the three directions, x, y, z , its modelling being approached by more methods [7], [8].



- Fz** - Press force/Forța de apăsare
DS - Welding direction/Direcția de sudare
DR - Direction of the tool rotation/Direcția de rotație a uneltei
PS - Work piece/Piesa de sudat
PP - Profiled pin/Profilul pinului
UUS - Tool shoulder/Umăr unealtă de sudare
a - Unaffected material/Zona neafectată a materialului
b - Heat affected zone (HAZ)/Zona influențată termic (ZIT)
c - Thermomechanically affected zone (TMAZ)/Zona influențată termomecanic (ZITM)
d - Weld nugget (part of TMAZ)/Nucleul sudat (parte a ZITM)

Figure 2. Scheme of the FSW procedure/
 Figura 2. Schema procedurii de sudare prin
 frecare cu element activ rotitor

The quantity of heat emitted by friction in a certain zone, per unit of time (thermal flux), is determined by the relation:

$$q_f = 2\pi\omega \int_0^{r_u} \mu \cdot F_z \cdot dr \quad (5)$$

Instrumentul de măsură a intensității radiației infraroșii este camera termografică în infraroșu (CTI). Aceasta conține detectori de fotoni dispuși în rețea microbolometrică, care transformă prin intermediul rezistenței electrice intensitatea radiației în tensiune, U .

Schema de captare a radiației de către camera termografică este reprezentată în figura 1.

Scriind bilanțul energetic se obține ecuația (2).

Înlocuind în ecuația (2) $U = kq$ și explicitând funcție de q_{ob} , se obține tensiunea corespunzătoare obiectului și ca urmare temperatura absolută a acestuia ecuația (3).

Pentru a facilita interpretarea relațiilor (2) și (3), în tabelul 1 se prezintă câteva valori ale factorului de emisie în medii de interes.

Table 1/Tabelul 1

Material/ Material	Environment/ Surface state/ Mediu/ Starea suprafeței	Temperature/ Temperatură [°C]	Emission factor/ Factor de emisie ϵ
Al	- polished/lustruit	100	0.05
	- oxidized/oxidat	100	0.55
Cu	- polished/lustruit	100	0.05
	- oxidized/oxidat	20	0.78
Steel/ Oțel	- polished/lustruit	100	0.07
	- oxidized/oxidat	200	0.79
Glass / Sticlă		20	0.94
Water / Apă		20	0.96

Camera lucrează cu un număr de până la 50 de imagini pe secundă f , astfel încât în funcție de viteza de mișcare a camerei, egală cu viteza de sudare v_s , se poate determina intervalul de deplasare între două imagini consecutive conform relației (4).

Există astfel posibilitatea poziționării fiecărui punct măsurat și obținerea pe această cale a reprezentării grafice $T = f(l)$.

Precizia de măsurare a temperaturii cu ajutorul camerei de termografiere este de $\pm 2^\circ\text{C}$ la temperatura ambiantă și în general $\pm 2\%$ din valoarea măsurată.

3. Transmiterea căldurii la sudarea FSW

Procesul de sudare FSW are loc în stare solidă, prin difuzie dinamică la nivelul structurii cristaline a materialelor, ca urmare a temperaturii produse prin frecare în zona îmbinării.

Așa cum rezultă din figura 2 [5], care reprezintă schema procedurii, în urma mișcării de rotație a uneltei de sudare, a acționării concomitente a forței de apăsare F_z și a forței de deplasare F_x , are loc îmbinarea celor două componente odată cu formarea subzonelor indicate în figură.

Transferul de căldură de la unealta de sudare în piesa sudată are loc în principal prin conducție [6] pe cele trei direcții x, y și z , modelarea acestuia fiind abordată prin mai multe metode [7], [8].

Cantitatea de căldură degajată prin frecare pe o anumită suprafață, în unitatea de timp (fluxul termic) este determinată prin relația (5), unde r_u este raza umărului uneltei de sudare, ω – viteza unghiulară, μ – coeficientul de frecare $\mu = \mu(T)$, iar F_z – forța normală de apăsare pe direcția z .

În ipoteza unei viteze mari de mișcare a sursei de căldură (egală cu viteza de sudare v_s) și a unui regim stabilizat pe

where r_u is the radius of the tool shoulder, ω – angular speed, μ – friction coefficient, $\mu = \mu(T)$, and F_z – press force on z direction.

Taking into consideration a high speed of the thermal source (equal to the welding speed, v_s) and the stabilized welding conditions in the material thickness, s , the quantity of heat transmitted by conduction from the monodirection source, y through the surface A per unit of time, at the temperature variation, ΔT , in the constant thermal conditions, is given by Fourier equation:

$$q = \frac{dQ}{dt} = -\lambda A \frac{dT}{dy} \quad (6)$$

where λ is the thermal conductivity, and $\Delta T/\Delta y$ – thermal gradient. The emission surface, perpendicular on the y direction, can be approximated taking into consideration the zone of maximum temperature of the thermal field and the tool diameter, so:

$$A = 2r_u \cdot s \quad (7)$$

where s is the thickness of the piece.

Making a substitution in relation (6) and considering the hypothesis of good approximation, $q_f = q$, it can be obtained:

$$4\pi^2 n \mu F \cdot r_u = 2\lambda s r_u \frac{dT}{dy} \quad (8)$$

As a result, the thermal gradient on the perpendicular direction on the possible defect in the plane xoz is given by the relation:

$$\frac{\Delta T}{\Delta y} = 2\pi^2 n \cdot \mu F_z \cdot \frac{1}{\lambda s} \quad (9)$$

So, only the λ parameter is sensitive to the thermal field, because the relation (9) can be written as:

$$\frac{\Delta T}{\Delta y} = k \cdot \lambda^{-1} \quad (10)$$

where k is an experimental constant.

The differences between λ coefficients in the air volume or gas inclusions within the defects, and the same coefficients in the considered material, lead to the temperature increase in the zones obturated by the defects.

In order to make a comparison, the values of the thermal conductivity of some materials of interest are presented in Table 2.

4. Experimental conditions

Temperature recording was realized on-line, using a camera Thermo – Vision A 40 M, having a frequency of 20 images/s. This camera was placed on the welding equipment, (Figure 3) in order to follow the intersection zone of the tool shoulder with the weld surface, on the back semi-circle zone ($\pi/2$), Figure 4. The temperature recording was made using the software, Thermo Cam Researcher Pro.

In order to make a practical test of the possibilities to apply the infrared thermography monitoring on-line the welded joints defects, it was developed an experimental program, presented in Figure 5. This program was made for two types of artificial defects, on the Al 99.5 plate, having the dimensions 330x10 mm:

grosimea materialului s , cantitatea de căldură transmisă prin conducție de o sursă monodirecțională y printr-o suprafață A în unitatea de timp, la o variație de temperatură ΔT în care regimul termic se consideră constant, se exprimă cu ajutorul relației lui Fourier (6), unde λ este coeficientul de conductivitate termică, iar $\Delta T/\Delta y$ este gradientul termic.

Suprafața de transmisie orientată perpendicular pe direcția y poate fi aproximată ținând seama că zona de maximă temperatură a câmpului termic și corespunde cu aproximație diametrului unelei de sudare, conform relației (7), unde s reprezintă grosimea piesei.

Înlocuind în relația (6) și considerând ipoteza de bună aproximație $q_f = q$, se obține relația (8).

Rezultă că gradientul temperaturii pe direcția perpendiculară pe un eventual defect cuprins în planul xoz este dat de relația (9).

Astfel, singurul parametru sensibil la mediul de transmitere a căldurii este λ , deoarece relația (9) se poate scrie sub forma relației (10), unde k este o constantă experimentală.

Diferențele extrem de mari între coeficienții λ , din volumul de aer sau gaze incluzionate în defecte, pe de o parte și cei corespunzători materialului luat în considerație, pe de altă parte, măresc rezistența la conducție și determină creșterea temperaturii în zonele obturate de defecte.

Table 2/Tabelul 2

Material/Environment/ Material/mediu	λ (W / m°C) at/la 0°C
Air/Aer	0.024
Water/Apă	~0.15
Nitrogen/Azot	0.024
Al	236
Cu	401
Fe	83.5
Steel/Oțel (C=1%)	43.0
Ti	22.4

Pentru comparație, în tabelul 2 sunt indicate valorile conductivității termice la unele materiale de interes.

4. Condiții experimentale

Înregistrarea temperaturii s-a realizat on-line cu ajutorul unei camere Thermo – Vision A 40 M, cu o frecvență de 20 imagini/s, montată pe instalația de sudare, (figura 3) astfel încât să urmărească zona de intersecție a umărului unelei de sudare cu suprafața îmbinării, pe partea semicirculară ($\pi/2$) din spate, (figura 4). Înregistrările pe laptop au folosit Software-ul, Thermo Cam Researcher Pro.

În vederea testării practice a posibilităților de aplicare a termografiei în infraroșu la monitorizarea on-line a defectelor îmbinărilor sudate, s-a conceput un program experimental prezentat în figura 5, care cuprinde două categorii de defecte artificiale simulate pe tablă de Al 99,5 având dimensiunile 330x10 mm:

- defecte incluzionate practicate perpendicular pe plăci și acoperite cu sudură FSW, cu o unealtă de sudare având lungimea mai mare decât adâncimea defectelor,
- defecte practicate în rostul îmbinării pe suprafața frontală, pe direcție longitudinală a uneia din plăcile sudate obișnuit FSW.

- included defects, perpendicular on the plates and covered by FSW, using a tool of length more than the depth of the defects,
- defects in the weld gap, on the frontal surface, in longitudinal direction of one of the plates welded usually by FSW.

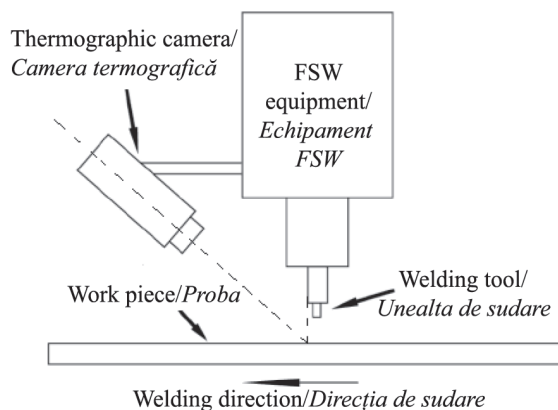


Figure 3. Schema of the welding machine and infrared thermographic camera/
Figura 3. Schema instalației de sudare și de termografiere în infraroșu

5. Rezultatele monitorizării defectelor

• Experimentul I

Urmărirea trecerii cu sudură peste orificiile deschise având adâncimea de 4 mm și diametre diferite $d = 2; 3; 4; 5; 6$ și 7 mm, distanțate la 47 mm în lungul plăcii de lungime $l = 330$ mm (figura 6) a avut ca rezultat înregistrarea $T = f(l)$, redată în oscilograma din figura 7.

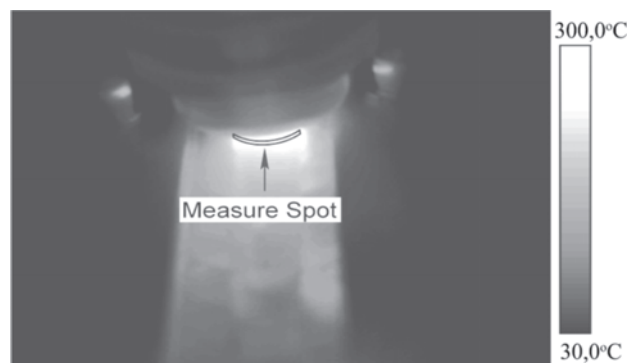


Figure 4. Measure spot seen on the infrared image/
Figura 4. Mărima spotului vizualizat pe imaginea în infraroșu

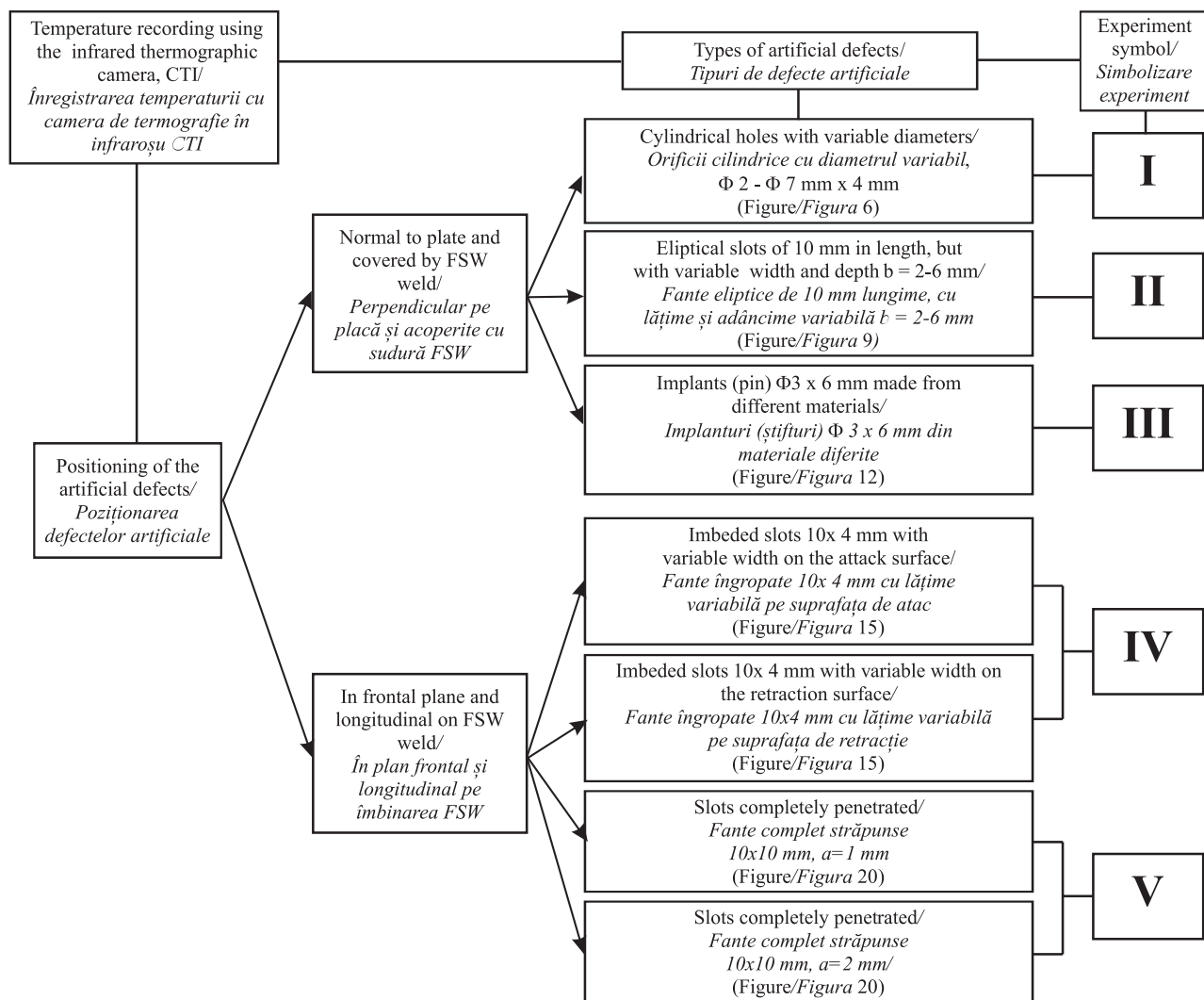


Figure 5. Experimental program of monitoring the defects by infrared thermography/
Figura 5. Programul experimental de monitorizare a defectelor prin termografie în infraroșu

5. Results of the defects monitoring

• Experiment I

After the welding made over the open slots, having the depth of 4 mm and different diameters, $d = 2; 3; 4; 5; 6$ and 7 mm, and placed at 47 mm, one by one, in the longitudinal direction on a plate of $l = 330$ mm (Figure 6), it was obtained the recording $T = f(l)$, presented in the oscillogram in Figure 7.

This diagram shows a general tendency of increasing the temperature along the work piece length, in the range of 560 – 580 K. In this case, the penetration zone of the welding tool, being a transition zone of the thermal field, is not taken into consideration. In addition, this recording contains some peaks of temperature. It is the result of the local overheating, determined by the significant decrease of the thermal

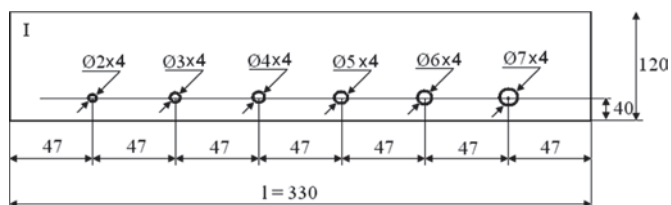


Figure 6. Schema of the sample with artificial defects in the shape of open holes with variable diameter/
Figura 6. Schița probei cu defecte artificiale sub formă de orificii deschise cu diametru variabil

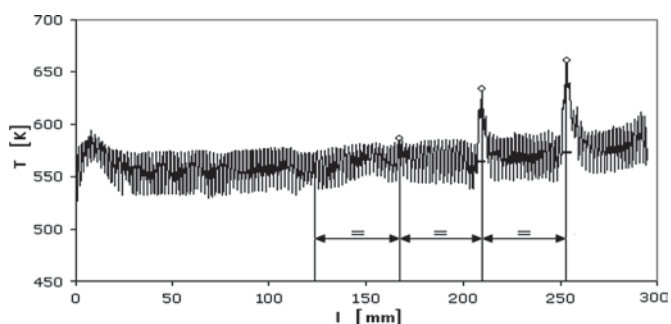


Figure 7. CTI recording of the experiment I/
Figura 7. Înregistrarea CTI a experimentului I

conductivity, λ in the air volume contained by the slots. Taking into consideration the constant depth of slots, $h = 4$ mm, the temperature peaks are in correlation with d^2 . Also, the temperature variation measured from the interpolated level in the peaks zone, led to the results presented in Table 3.

For the diameters of 2; 3 and 4 mm, no temperature variation was observed. But, in the case of slots of 6 and 7 mm, some additional peaks have been observed. They are explained by partial covering of the slots in the limit zone. So, it must be mentioned that the distances between peaks are the same. This can prove the experiment reproducibility.

The obtained results show that the function $\Delta T = f(V)$ is linear, for the cylindric defects, Figure 8. So, $\Delta T = f(d)$ can be written as the following relation:

$$\Delta T = 0.7864V - 27.203 \quad (11)$$

• Experiment II

The experiment II is similar with the experiment I, but in this case, the CTI recording was made on the artificial defects, as

Urmărind banda de analiză și excluzând zona de pătrundere a uneltei de sudare în vederea depunerii sudurii FSW, zonă de tranziție a regimului termic, diagrama indică o tendință generală de creștere lentă a temperaturii pe lungimea probei în intervalul 560 – 580 K. Înregistrarea conține în plus și câteva vârfuri de temperatură. Acestea sunt rezultatul supraîncălzirilor locale determinate de scăderea marcantă a coeficientului de conductibilitate λ în volumul de aer cuprins de orificii. Având în vedere că adâncimea găurilor a fost constantă, $h = 4$ mm, vârfurile de temperatură sunt în corelație cu d^2 . Luând în considerare variația de temperatură măsurată de la nivelul traseului interpolat în zona vârfurilor s-au obținut rezultatele prezentate în tabelul 3.

Table 3/Tabelul 3

$\varnothing$ [mm]	V [mm ³]	d^2 [mm ²]	ΔT [°K]
2	12.5	4	-
3	28.3	9	-
4	50.2	16	-
5	78.5	25	30
6	113	36	70
7	153.9	49	90

La diametre de 2, 3 și 4 mm, practic nu s-au decelat variații. De asemenea, în cazul orificiilor de 6 și 7 mm s-au pus în evidență și peak-uri suplimentare; acestea se explică prin acoperirea incompletă a gurilor în zona marginală. Se poate remarca astfel, că distanțele dintre vârfuri (peak-uri) sunt egale, ceea ce atestă în bună măsură reproductibilitatea experimentului.

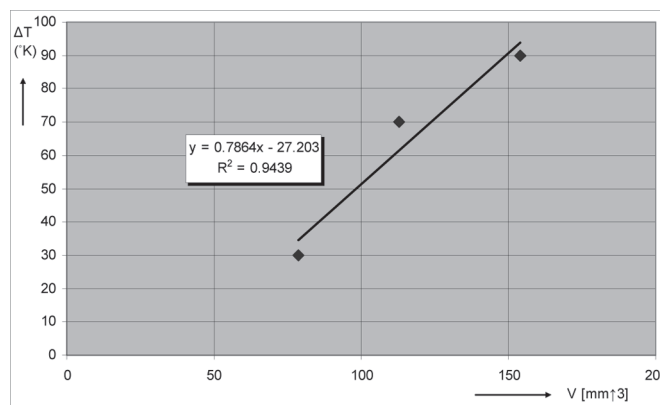


Figure 8. Variation of ΔT function of V, in the sample with artificial defects in the shape of open holes/
Figura 8. Variația ΔT funcție de V la proba cu defecte artificiale sub formă de orificii deschise

Rezultatul obținut indică, conform figurii 8, că dependența $\Delta T = f(V)$ în cazul defectelor cilindrice este liniară; ca urmare, $\Delta T = f(d)$ poate fi exprimată printr-o funcție de forma relației (11).

• Experimentul II

Experimentul II este asemănător cu primul, dar de data aceasta înregistrarea CTI a trecerii cu sudură FSW s-a realizat peste defecte artificiale de tipul fantelor eliptice de lățime

elliptical slots of variable width, from 2 to 6 mm, and the constant depth, $h = 4$ mm, Figure 9. On the abscissa, the defects positions are marked with the thick line.

CTI recording for this experiment is presented in the diagram in Figure 10. As in the previous case, the diagram shows a slow increase of the temperature in length of piece, in a range of 20 – 30 degrees. This can be explained by the general heating of the work piece during the experiment.

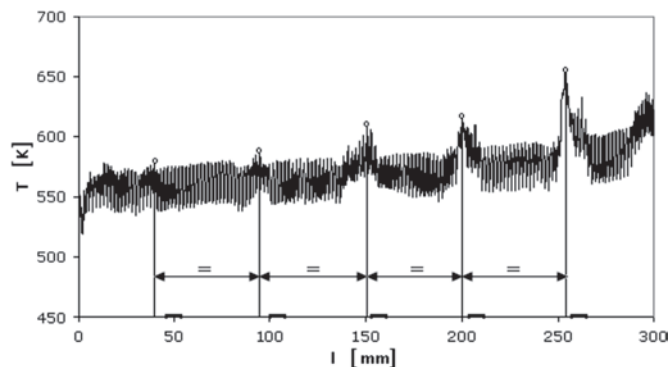


Figure 10. CTI recording of the experiment II/
Figura 10. Înregistrarea CTI a experimentului II

There are observed some temperature peaks in the slots zone, because of the local overheating. The measurement results are presented in Table 4. Taking into consideration the shape of the cross section, the volume dislocated by the slots can be approximated by the relation:

$$V = 0.85b \cdot h \cdot l = 0.85 \cdot 40b \quad (12)$$

So, there are evinced some important aspects such as:

- the presence of some variation ΔT with high gradient for almost all slots with width of 2 to 6 mm;
- the equidistant positioning of the peak, corresponding to the temperature variation, so a good reproducibility of the defect position;
- the appearance of peaks in position where the tool shoulder partially covers the defect.

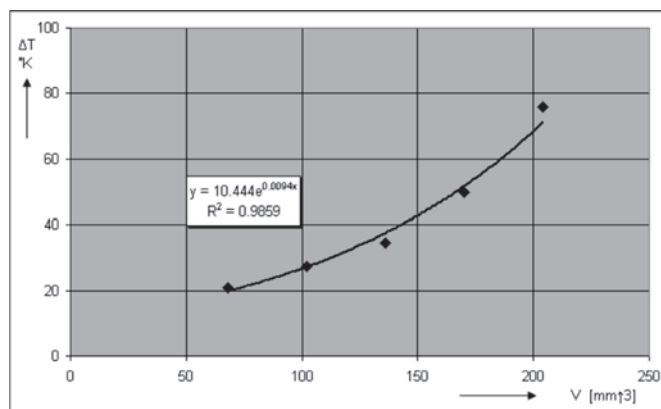


Figure 11. Variation of ΔT function of V in the sample with artificial defects in the shape of slots/
Figura 11. Variația ΔT funcție de V la proba cu defecte artificiale sub formă de fante

The obtained results show that the functions $\Delta T = f(V)$, corresponding to volume, and $\Delta T = f(S)$, corresponding to surface are exponential, in the case of the elliptic artificial defects,

variabilă, între 2 și 6 mm și adâncime constantă de $h = 4$ mm, conform figurii 9.

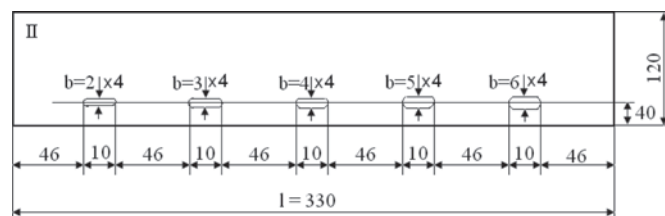


Figure 9. Schema of the sample with artificial defects in the shape of slots of 10 mm, with variable width/
Figura 9. Schița probei cu defecte artificiale sub formă de fante de 10 mm cu lățime variabilă

Înregistrarea CTI corespunzătoare experimentului este prezentată în diagrama din figura 10. Pe abscisă sunt marcate cu linie îngroșată pozițiile defectelor.

Ca și în cazul anterior, diagrama arată o creștere lentă a temperaturii medii pe lungimea probei într-un interval de 20-30 grade, care poate fi pusă pe seama încălzirii generale a probei în cursul experimentului.

Relevante pentru experiment sunt salturile de temperatură în zona fantelor, ca urmare a supraîncălzirilor locale.

Rezultatele măsurărilor efectuate sunt prezentate în tabelul 4. Având în vedere forma secțiunii transversale, volumul dislocat de fantă s-a aproximat cu relația (12).

Table 4/Tabelul 4

Slot width/ Lățime fantă b [mm]	2	3	4	5	6
Volum e/ Volum $0,85 \cdot 40b$ [mm³]	68	102	136	170	204
Surface/ Suprafață $\sim 8.5b$ [mm²]	17	25.5	34	42.5	51
ΔT [°K]	20.7	27.5	34.5	50	76

Astfel se pun în evidență următoarele aspecte mai importante:

- prezența unor variații ΔT cu gradient ridicat aproape la toate fantele cu lățimi de la 2 la 6 mm;
- poziționarea echidistantă a peak-urilor corespunzătoare variațiilor de temperatură, ceea ce demonstrează un grad bun de reproductibilitate a indicării poziției defectului;
- formarea peak -urilor în poziția în care umărul uneltei de sudare acoperă parțial defectul.

Analiza rezultatelor obținute indică conform figurii 11, că dependența de volum $\Delta T = f(V)$ sau de suprafață $\Delta T = f(S)$ în cazul defectelor simulate eliptic este exponențială și că datorită valorii ridicate a coeficientului de corelație R^2 , relația între cele două mărimi are forma (13).

• Experimentul III

Experimentul III s-a realizat prin trecerea cu sudură FSW peste implanturi din materiale diferite: Mg, Cu, oțel de scule (OSC), oțel inoxidabil (INOX), având diametrul

in accordance with Figure 11. The correlation coefficient R^2 , has a high value and the relation between the two functions is:

$$\Delta T = 10.444 e^{0.0094V} \quad (13)$$

• Experiment III

The experiment III was realized by FSW covering the implants, made of different materials such as: Mg, Cu, tool steel (OSC), stainless steel (INOX), having the diameter, $\varnothing 3$ mm and the depth, $h = 4$ mm, as it can be seen in Figure 12.

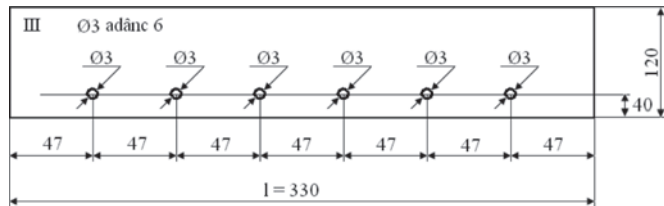


Figure 12. Schema of the sample with artificial defects as implants in different materials/
Figura 12. Schița probei cu defecte artificiale prin implanturi din diferite materiale

The thermographic diagram, $\Delta T = f(l)$, obtained by FSW over the implants is presented in Figure 13. In this diagram, the implants positions and the corresponding materials are indicated. It can be seen that, in all the positions, the diagram presents the peaks, placed on the oscillogram cover (for OSC and INOX steels) or the minimum values (for Mg, Cu, Mg). The implant of Cu, from the left side of the oscillogram, represents the only exception.

The temperatures corresponding to the mean curve, determined on the oscillogram, are represented in Table 5.

The analysis of the thermographic diagram is more difficult, for this case, because of the small variations of temperature and the lack of peaks. This fact can be explained by the small-dislocated volume by the implants of $\varnothing 3 \times 4$ mm:

$$V = \pi d^2 \frac{h}{4} = 28.26 \text{ mm}^3 \quad (14)$$

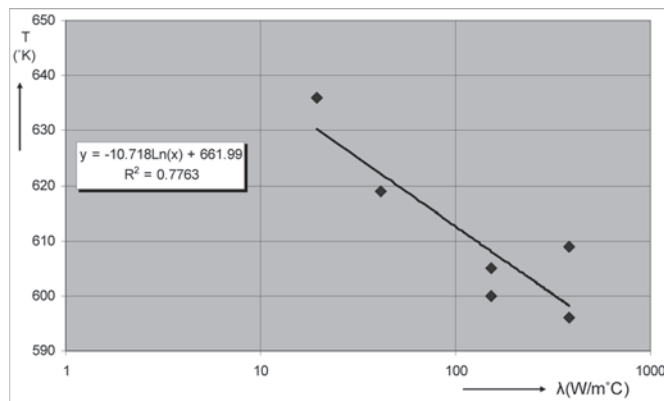


Figure 14. Variation of T function of λ in the sample with artificial defects as implants/
Figura 14. Variația T funcție de λ la proba cu defecte artificiale prin implanturi

The recording results for the temperature and the thermal conductivity, λ , at 300°C , as mean temperature of the superficial layer, are presented in Table 5.

$\varnothing 3$ mm și adâncimea $h = 4$ mm, conform configurației din figura 12.

Diagrama termografică $\Delta T = f(l)$ obținută la trecerea cu sudură FSW peste implanturi este prezentată în figura 13. În diagramă sunt indicate pozițiile și materialele din care au fost confecționate implanturile. Se remarcă faptul că în toate pozițiile oscilograma indică fie peak-uri ce depășesc învelitoarea oscillogramei (cazul OSC și INOX), fie minime (cazul Mg, Cu, Mg). Singura excepție o reprezintă implantul de Cu din stânga oscillogramei.

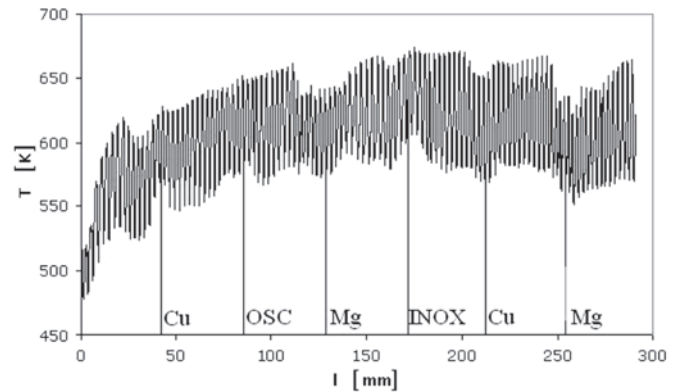


Figure 13. CTI recording of the experiment III/
Figura 13. Înregistrarea CTI a experimentului III

Temperaturile corespunzătoare curbei medii determinate de pe oscilogramă sunt prezentate în tabelul 5.

Table 5/ Tabelul 5

Implant material/ Material implant	T [°K]	Λ at/la 300°C [W/m°C]
Cu	596	384
OSC	619	41.5
Mg	605	152
INOX	636	19
Cu	609	384
Mg	600	152

Analiza diagramei termografice pentru acest caz este mult mai dificilă, urmare a variațiilor mici de temperatură și a absenței vârfulor desprinse din banda de oscilații. Acest fapt se explică prin faptul că implanturile practicate din materiale diferite $\varnothing 3 \times 4$ mm au avut un volum dislocat relativ scăzut (relația 14).

Rezultatele înregistrărilor de temperatură și coeficienții de conductivitate termică λ la o temperatură medie a stratului superficial de 300°C sunt prezentate în tabelul 5.

În implanturi, spre deosebire de orificii și fante, căldura a fost transmisă prin conducție prin materiale cu coeficienți de conducție λ mai apropiați de cel al materialului de bază Al 99,5 astfel încât și variațiile de temperatură au fost mai mici.

Cu toate acestea, analiza rezultatelor arată că există o corespondență între temperatură și coeficientul de conductivitate termică a implanturilor folosite în experiment, în sensul scăderii lente a acestuia, pe măsura creșterii coeficientului de conductivitate termică.

Rezultatul este prezentat grafic în coordonate semilogaritmice în figura 14, iar corelația cu coeficientul $R = 0,77$ este logaritmică (relația 15).

Comercial

Within the implants, the heat is transmitted by conduction through the materials having the thermal conductivity, λ close to the the same coefficient for the base material, Al 99.5. So, the temperature variations have been very small. In this case, the results show a correlation between the temperature and the thermal conductivity of the implants used in this experiment. As a result, if the thermal conductivity is increased, the temperature has a slow decrease.

The result is represented graphically, in semi-logarithmic coordinates, in Figure 14, and the correlation coefficient is $R = 0.77$:

$$T = -10.718 \ln \lambda + 662 \quad (15)$$

• Experiment IV

The experiment IV was realized on the FSW welded joints, having the slots of variable width and depth, between 2x2x10 mm and 6x6x10 mm, Figure 15. The slots are placed on the advance surface of the welding tool and on the retraction surface, respectively.

CTI recording corresponding to the scheme in Figure 15 (defects on the advanced surface) is presented in the oscillogram in Figure 16. In this figure, the artificial defects positions are

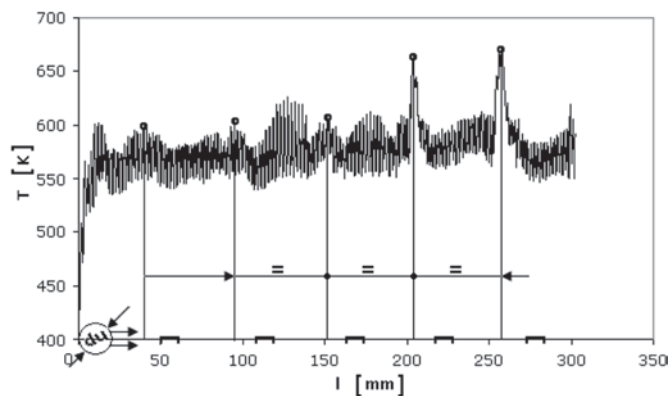


Figure 16. CTI recording of the experiment IV with defects in the shape of slots, placed in the advanced position of the welding tool/

Figura 16. Înregistrarea CTI la experimentul IV cu defecte de tip fantă, plasate pe partea de avans a uneltei de sudare

marked on the abscissa with thick lines. Analysing the oscillogram, it can be seen the temperature peaks presence, placed at a quasi-constant distance from the limit of defect. The peaks positions are approximately in the same position of the welding tool, when the tool shoulder partially covers the defect.

The evaluation results are presented in Table 6. Taking into consideration the slot profile and its length, $l = 10$ mm, the dislocated volume can be calculated using the relation:

$$V = 8.5b^2 \quad (16)$$

The graphical representation, $\Delta T = f(V)$, leads to the diagram in Figure 17, almost the same with the diagram for the included slots, covered by FSW.

In this case, the temperature variation can be calculated by the relation:

$$DT = 16.908e^{0.005V} \quad (17)$$

CTI recording corresponding to the scheme in Figure 15

• Experimentul IV

Experimentul IV este realizat pe probe sudate FSW, având pe suprafața frontală longitudinală de atac, respectiv pe suprafața de retracție, practicate fante de lățime și adâncime variabilă, între 2x2x10 mm și 6x6x10 mm, conform figurii 15.

Înregistrarea CTI corespunzătoare poziționării din figura 15 (defectele pe partea de atac) este prezentată în oscilograma din figura 16, având marcate, gros pe abscisă, pozițiile defectelor

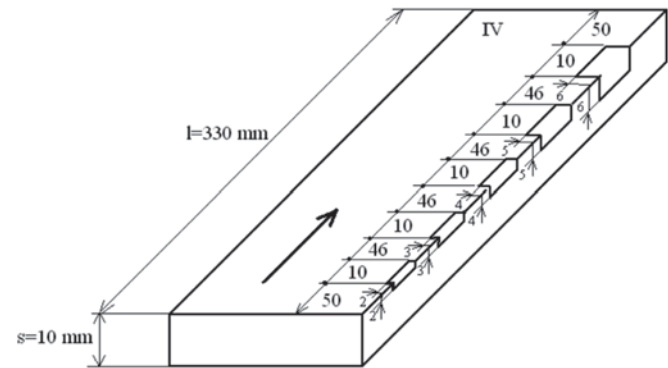


Figure 15. Schema of the sample with artificial defects in the shape of included slots of different width and depth, placed in the advanced position, and in the retraction position of the welding tool/ Figura 15. Schița probei cu defecte artificiale sub formă de fante incluzionate de diferite lățimi și a dâncimi situate pe partea de avans, respectiv de retracție a uneltei de sudare de sudare

artificiale paralelipipedice. Analiza acestora ne indică faptul că la toate defectele se constată prezența peak-urilor de temperatură, situate la distanță cvasi constantă de marginea defectului. Pozițiile vârfurilor coincid cu poziția aproximativă a uneltei de sudare, în momentul care umărul acestuia acoperă parțial defectul.

Rezultatele evaluărilor sunt prezentate în tabelul 6. Având în vedere că profilul fantei este cu racord și lungimea $l = 10$ mm, volumul dislocat s-a aproximat cu relația (16).

Prin reprezentarea grafică $\Delta T = f(V)$ se obține diagrama din figura 17, indicând o dependență exponențială $\Delta T = f(V)$ destul de apropiată de cele determinate în cazul fantelor incluzionate acoperite cu sudură.

În acest caz, variația de temperatură s-a apreciat cu relația (17).

Table 6/Tabelul 6

b [mm]	V [mm ³]	ΔT [°K]
2	34	21
3	76.5	25
4	136	30
5	212.5	75
6	306	80

Înregistrarea CTI corespunzătoare configurației din figura 15, cu defecte situate în secțiunea de retracție, este prezentată în figura 18. Ca și în cazul anterior, se disting vârfuri de temperatură pentru fiecare defect în parte, aflate în aceleași secțiuni. Aceste secțiuni se situează în pozițiile în care umărul uneltei de sudare acoperă parțial defectul.

Rezultatele evaluărilor sunt prezentate în tabelul 7.

(defects on the retraction surface) is presented in the oscillogram in Figure 18. In this case, there are peaks of temperature for every defect, in the same cross sections. These sections are placed in the positions when the tool shoulder

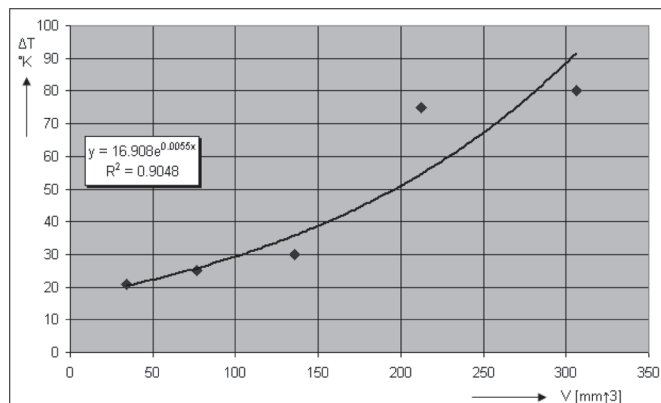


Figure 17. Variation of ΔT function of V in the sample with defects in the shape of slots, placed in the advanced position of the welding tool/

Figura 17. Variația ΔT funcție de V la proba cu fante pe partea de avans a unelei de sudare de sudare

partially covers the defect.

The evaluation results are presented in Table 7.

The temperature variation, calculated by the relation:

$$\Delta T = 8.5871e^{0.0045V} \quad (18)$$

leads to the graphical representation, $\Delta T = f(V)$, obtaining the diagram in Figure 19.

Table 7/Tabelul 7

b [mm]	V [mm ³]	ΔT [°K]
2	34	11
3	76.5	11
4	136	14
5	212.5	26
6	306	32

As in the previous case, in the experiment IV, the obtained function is also exponential. The relations (17) and (18) have also the same shape, close to the relation (13).

• Experiment V

The experiment V contained the monitoring with infrared camera, CTI of the defects as slots completely penetrated of 10 x 10 mm, having the depth, $a = 1$ mm, and $a = 2$ mm, respectively placed at equal distance one from another, on the frontal surface of the work piece, Figure 20.

In the case of the artificial defect, as slot with depth of 2 mm, the oscillogram is presented in the Figure 21. In order to explain this, on the abscissa, the defects positions are marked with the thick line. There have been observed some peaks of temperature, placed in the cross section of the defect or in the close position, when the tool shoulder covers the defect.

In the case of the artificial defect as slot with depth of 1 mm, the temperature oscillogram is presented in Figure 22. It can be seen that, also in this case, the results are approximately the

Variația de temperatură calculată cu relația (18) conduce la reprezentarea grafică a acestei dependențe $\Delta T = f(V)$, obținându-se diagrama din figura 19.

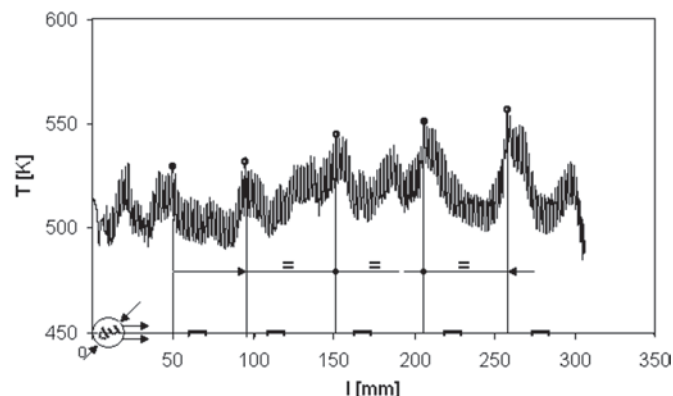


Figure 18. CTI recording of the experiment IV with defects in the right side/

Figura 18. Înregistrarea CTI la experimentul IV defecte dreapta

Ca și în celălalt caz, la experimentul IV, funcția obținută este tot exponențială. Relațiile (17) și (18) sunt de asemenea de aceeași formă și apropiate de relația (13).

• Experimentul V

Experimentul V s-a referit la monitorizarea cu camera termografică în infraroșu, CTI a defectelor de tipul fantelor

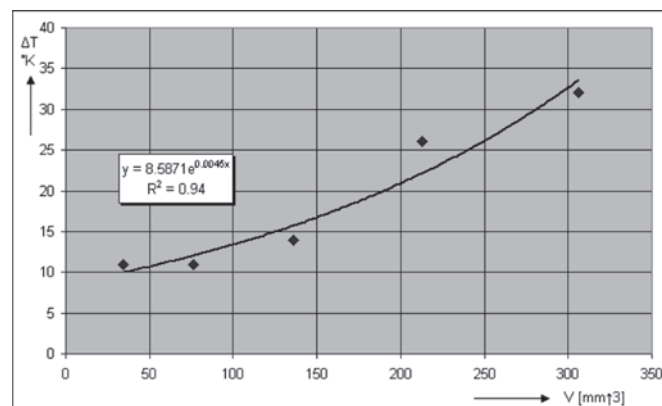


Figure 19. Variation of ΔT function of V in the sample with defects in the shape of slots, placed in the retraction position of the welding tool/

Figura 19. Variația ΔT funcție de V la proba cu fante pe partea de retracție a unelei de sudare

complet pătrunse, de 10 x 10 mm, având adâncimea $a = 1$ mm, respectiv $a = 2$ mm, fante situate la distanțe egale pe suprafața frontală a piesei, conform figurii 20.

În cazul defectului artificial sub formă de fantă de 2 mm adâncime, oscillograma obținută este prezentată în figura 21. În vederea interpretării ei, pe abscisă au fost demarcate cu segmente groase pozițiile fantelor. Excluzând zonele de tranziție de la capetele plăcii sudate, se pun în evidență vârfuri de temperatură situate, fie în secțiunea defectului, fie într-o poziție apropiată unde umărul unelei de sudare acoperă defectul.

În cazul sudării plăcilor cu fante pătrunse de 1 mm adâncime, oscillograma temperaturii se prezintă ca în figura 22. Ca și în cazul precedent și la acest experiment s-

same. The temperature peaks correspond to the slots location. There is an exception concerning the two maxima from the left side of the oscillogram. These maximum values correspond to

au obținut rezultate comparabile. Peak-urile de temperatură corespund locației fantelor. Fac excepție cele două maxime din stânga oscillogramei. Acestea corespund regimului

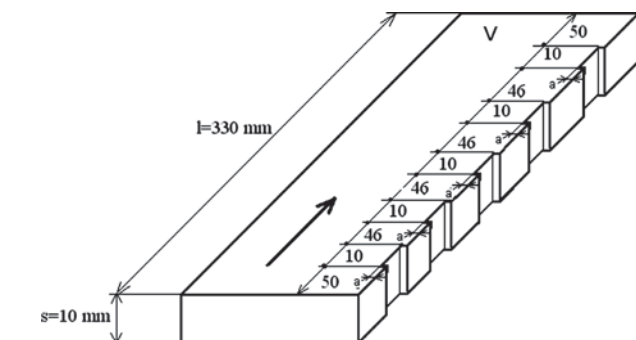


Figure 20. Experimental plate with completely penetrated slots of constant depth, $a = 1 \text{ mm}$ and $a = 2 \text{ mm}$ /
Figura 20. Placă experimentală cu fante complet pătrunse de adâncime constantă, $a = 1 \text{ mm}$ și $a = 2 \text{ mm}$

the transition regime in the weld limit and/or the moment to detach the material from the tool. The both situations can explain the accidental variations of the temperature.

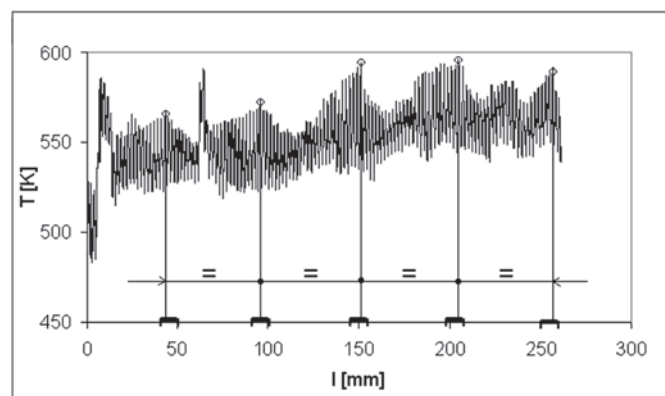


Figure 22. Oscillogram $T = f(l)$ for the defects in the shape of completely penetrated slots of 1 mm in depth/
Figura 22. Oscilograma $T = f(l)$ la defecte de tipul fantelor complet pătrunse de 1 mm adâncime

Analysing the oscillograms, it can be seen that in every defect zone, the peak of temperature is placed on the oscillogram cover of the temperature variation. The sudden peaks are not specific to the analysed defects. They can be considered as “arte factum” of the process.

The equidistant positioning of the temperature peaks, and their superposition with the defects location, seen in Figure 23 as the real image in the welded joint, confirms completely the obtained results.

6. Brief statistical analysis

The statistical analysis of the temperature variations, based on 2000 – 3000 measurements, allowed to establish the following statistical parameters: mean value, $\bar{x}_a$, square mean deviation, σ , modulus, M_0 and Pearson coefficient, s_k , presented in Table 8.

Taking into consideration the normal distribution and the values of Pearson coefficient, the statistical curves are a little asymmetric on the left side.

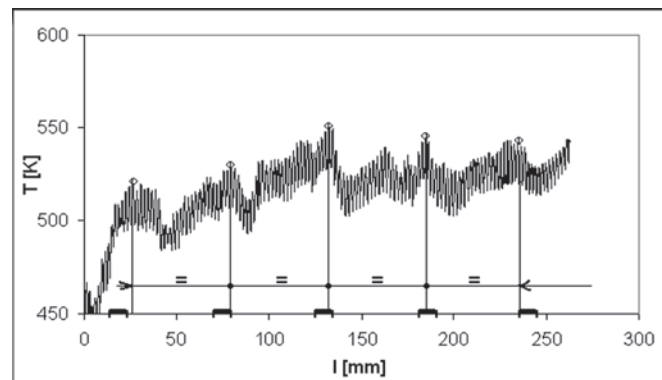


Figure 21. Oscillogram $T = f(l)$ for the defects in the shape of completely penetrated slots of 2 mm in depth/
Figura 21. Oscilograma $T = f(l)$ la defecte de tipul fantelor complet pătrunse de 2 mm adâncime

tranzitoriu de la marginea sudurii și/sau momentului de desprindere a materialului aderent de pe unealta de sudare, situații care pot explica variațiile accidentale de temperatură.

Din analiza oscilogramelor se desprinde faptul că în fiecare zonă de defect vârful de temperatură se poziționează pe o învelitoare de variație a temperaturii. Vârfurile bruște, nu sunt specifice defectelor analizate, acestea putând fi considerate “arte factum” al procesului urmărit.

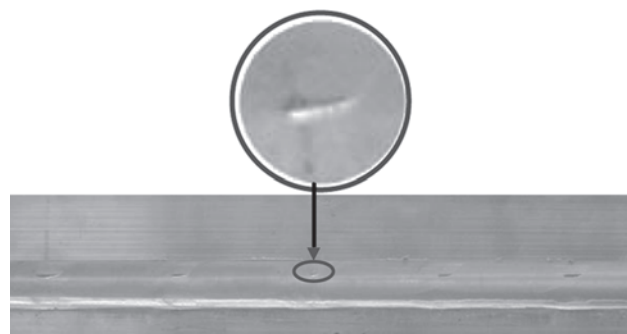


Figure 23. Aspect of FSW welded plate with slots of 1 mm in depth/
Figura 23. Imaginea plăcii sudate FSW, având fante de 1 mm adâncime

Poziționarea echidistantă a vârfurilor de temperatură, precum și suprapunerea acestora cu poziția defectelor, vizualizate în figura 23 în imagine reală în lungul îmbinării sudate, confirmă pe deplin rezultatele obținute.

6. Scurtă analiză statistică

Analiza statistică a variațiilor de temperatură înregistrate în cursul experimentelor, având la bază câte 2000 – 3000 măsurători, a permis stabilirea următorilor parametrii statistici: media $\bar{x}_a$, abaterea pătratică medie σ , modulul M_0 și coeficientul Pearson, s_k , conform tabelului 8.

Luând în considerare distribuția normală și având în vedere valorile coeficientului Pearson, rezultă că în general curbele de repartiție statistică sunt ușor asimetrice la stânga.

The differences between the mean values and between the modules can be explained by the initial welding conditions.

7. Conclusions

The performed researches evinced the real possibilities, qualitative and quantitative, to detect the defects of FSW joints, using the infrared thermography method.

The good reproducibility of the results and the temperature variation with the dislocated volume by the defects have been also evinced.

The appearance of the peaks of temperature in the length of the welded joint and their positions in the defects zone, and in the working area of the welding tool respectively, was determined by the sudden modification of the temperature gradient, because of the thermal conductivity variation.

It was drawn the conclusion that, no matter the artificial defect shape, the minimum necessary volume to obtain a good evaluation of the thermographic recording can be determined.

Unlike the other non-destructive examination methods, the thermography method is more limited from the defect size and detection reproducibility point of view, taking into account the compulsory correlation with the welding speed.

References/Bibliografie

- [1]. Levesque, D., a.o.: Detectability of FSW defects with NDE methods, 7th Int. Friction Stir Welding Symposium, Japan, May 2008.
- [2]. Kröning, M., a.o.: Sampling phased array. A new method of signal processing and image reconstruction in ultrasonic non-destructive testing, Int. Conf. on pressure vessel and piping, Kalpakam, Indian Institute of Metals, 2006, B7-1.
- [3]. xxx: ASTM E-2373-04: Standard practice of use of the time-of-flight diffraction technique.
- [4]. Dehelean, D., Safta, V., Cojocaru, R., Hälker, T., Ciucă, C.: Monitoring the quality of friction stir welding joints by infrared thermography, Welding in the World, vol. 52, 2008, p. 621-626, Special Issue, Paris, France.
- [5]. xxx: DOC IIW-C-III-1410 and 1411-2006, Friction stir welding of aluminium. General requirements.
- [6]. Mishra, R.S., Mahoney, M.W.: Friction stir welding and processing, ASM International, Ohio, 2008.
- [7]. Wu, X., Kumar, A.: 3D finite element modelling of thermomechanical conditions during friction stir welding steels, 7th Int. Friction Stir Welding Symposium, Japan, May, 2008.
- [8]. Santos, T., Vilaca, P., Couthino, L.: Computational tools for analytical modelling and NDT techniques for FSW, 3rd FSW Modelling and Flow Visualisation, Seminar GKSS - Forschungszentrum Geesthacht, April 2008.



Diferențele dintre valorile medii și dintre module au ca explicație condițiile inițiale de sudare.

Table 8/Tabelul 8

Experiment	x_a [°K]	σ [°K]	M_o [°K]	s_k^*
I	556	13.0	572	- 1.23
II	563	16.5	575	- 0.73
III	598	31.0	586	0.39
IV a	563	16.5	583	-1.21
IV b	509	13.0	508	0.08
V a	517	19.7	523	- 0.31
V b	518	14.2	550	- 0.34

$$*s_k = (x_a - M_o) / \sigma$$

7. Concluzii

Cercetările efectuate au scos în evidență posibilitățile reale, calitative și cantitative de detectare a defectelor din îmbinările sudate FSW prin metoda termografiei în infraroșu.

S-a pus în evidență, pe de o parte o bună reproductibilitate a rezultatelor în ce privește localizarea defectelor, iar pe de altă parte o dependență a variațiilor de temperatură de volumul dislocat cu ajutorul defectelor.

Apariția vârfulor de temperatură în lungul îmbinării și localizarea lor sistematică în zona defectului, respectiv în raza de acțiune a unelei de sudare are ca explicație modificarea bruscă a gradientului temperaturii, urmare a variației conductivității termice.

S-a constatat totodată, că indiferent de forma defectului simulat, se poate delimita volumul minim necesar pentru ca în limitele preciziei de determinare să se obțină o evaluare corespunzătoare a înregistrărilor termografice.

Spre deosebire de celelalte metode de examinare nedistructivă metoda termografiei este mai limitată din punctul de vedere al mărimii defectului și a reproductibilității detectării, având în vedere corelarea obligatorie cu viteza de sudare.

