

Considerații privind defectoscopia îmbinărilor sudate prin frecare cu element activ rotitor – FSW

Considerations on friction stir (FSW) welded joints non-destructive testing

Safta V., Cojocaru R., Radu B.
ISIM Timișoara

Cuvinte cheie

Îmbinări sudate, defectoscopie, sudare prin frecare cu element activ rotitor, cavități

Key words

Welded joints, non-destructive testing, friction stir welding, cavities

1. Caracteristicile defectelor îmbinărilor sudate FSW

Caracteristic pentru defectele produse la procedeul de sudare FSW sunt următoarele aspecte:

- diversitate mult limitată în raport cu tipologia defectelor induse de procedeele de sudare prin topire și chiar prin presiune;
- posibilitatea apariției și dezvoltării multidirecționale, cu o orientare variabilă;
- îngustimea și ermetismul lor.

Prin analogie însă cu modul de clasificare și de calificare a influenței defectelor asupra integrității îmbinării se poate accepta gruparea pe următoarele două categorii:

♦ Imperfecțiuni și/sau defecte volumice, incluzionate în secțiunea îmbinării sudate. Dintre cele mai semnificative defecte de acest tip fac parte:

- cavitățile izolate subsuperficiale
- cavitățile tubulare de tip tunel
- incluziuni de natură fizico – chimică diferită: metalice și de oxizi.

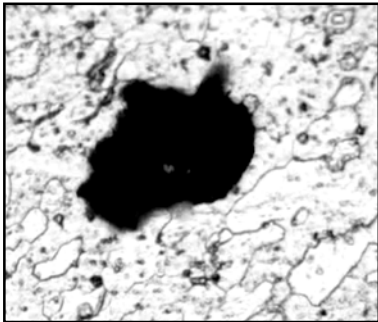


Figura 1. Cavități izolate în îmbinarea FSW a unui aliaj Al 99,5; x100/
Figure 1. Isolated cavity in FSW joint of a 99.5 Al alloy, x100

Un exemplu de cavități izolate observată în secțiunea unei îmbinări la un aliaj Al 99,5 este redat în figura 1. Cavitățile tubulare tip tunel sunt determinate mai ales de condițiile de formare a desprinderii de straturi – kissing bond. Un caz tipic de cavități de tip tunel situat la suprafață este pus în evidență în figura 2.

1. Characteristics of the FSW joints defects

The following aspects are typical to the FSW process:

- considerable limited diversity as compared to the typology of defects induced by fusion welding processes and even by pressure welding processes;
- possibilities to appear and develop multi-directionally with variable orientation;
- their narrowness and tightness.

By analogy with the mode of classification and qualification of the defect influence on the entire joint, we can accept grouping under the following two categories:

♦ Imperfections and/or volume defects, included in the welded joint section. Among the most significant defects of this type there are:

- isolated cavities under the superficial surface
- tubular cavities of tunnel type
- inclusions of physical-chemical nature like: metals and oxides.

One example of isolated cavities observed in a joint section of an Al99,5 alloy is presented in Figure 1. Tubular cavities of tunnel type are determined mainly by the condition in which

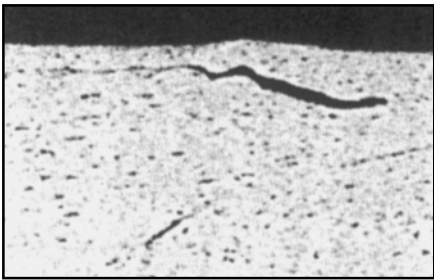


Figura 2. Cavități tubulare tip tunel formate în procesul de stratificare/
Figure 2. Tubular cavities of tunnel type formed in the layering process

the layers were peeled – kissing bond. A typical case of tunnel type cavity at surface is revealed in Figure 2.

- ♦ Plane imperfections and/or defects. The most significant defects of this category are:
- lack of penetration, placed exclusively in the root joint zone

♦ Imperfecțiuni și/sau defecte plane. Între cele mai semnificative defecte din această categorie fac parte:

- lipsa de pătrundere, amplasată cu exclusivitate în zona de rădăcină a îmbinării
- lipsa de aderență (kissing bond) între straturi, așa numitele suprapuneri (asemănătoare cu suprapunerile cunoscute în procesul de laminare), amplasate în subzona afectată mecanic și termic
- fisura care este localizată în zona influențată termic.



Figura 3. Lipsa de aderență între straturi în zona de retragere; x100/

Figure 3. Kissing bond between layers in the retreating zone, X100

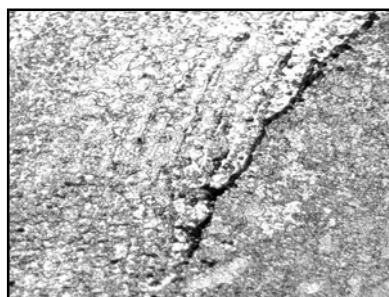


Figura 4. Lipsă de aderență în zona de trecere spre materialul de bază. Al 99,5; x100/

Figure 4. Kissing bond in the transition zone towards base material Al 99,5, X100

Defectele plane, în special lipsa de aderență kissing bond se formează în special în zona de avans unde există condiții favorabile de substituie a fenomenului de aderență mecanică cu fenomene de alunecare pe benzi de alunecare [12], cu gradient ridicat în jurul pin – ului sculei. Apariția defectului este favorizat în cazul utilizării unor regimuri de sudare cu energii lineare ridicate – turații mari, viteze de avans mai scăzute.

În figura 3 se pune în evidență lipsa de aderență kissing bond între straturi succesive antrenate de sculă în subzona de amestec mecanic.

În figura 4 același tip de defect se regăsește la limita cu zona influențată termic.

Lipsa de aderență este favorizată de prezența straturilor de incluziuni de oxizi precum și de fenomenele de desprindere a straturilor antrenate și lipite pe partea activă a sculei. S-a dovedit de asemenea, că un rol important revine și formei părții active a sculei și nepotrivirii cu dimensiunile componentelor sudate. [20].

Unul dintre cele mai frecvente defecte din îmbinările sudate FSW produse mai ales ca urmare a nerespectării adâncimii de pătrundere a pin – ului sculei și ale unor rosturi de lățime inconstantă este nepătrunderea. În figura 5 se prezintă aspectul macroscopic a unei îmbinări care atestă plasamentul lipsei de pătrundere la rădăcina nucleului îmbinării, iar în figura 6 rezultatul controlului cu lichide penetrante.

- lack of adhesion (kissing bond) between layers, so-called overlapping (similar to superimposing known from lamination process), placed in the thermo-mechanical influenced zone
- crack located in the heat affected zone.

Plane defects, especially lack of adhesion, kissing bond, form specially in the advancing zone where there are favorable conditions to replace the mechanical adhesion phenomenon with the tape shape sliding phenomenon [12], with high gradient around tool pin. High linear energy welding technologies – high rotation speeds, low welding speeds – favor the formation of the defect.

Figure 3 reveals the lack of adhesion, kissing bond, between successive layers stirred by the tool in the mechanical mixing subzone.

Figure 4 presents the same type of defect placed at the limit with the heat affected zone.

Oxides inclusion layers and strip off stirred layers adherent to the tool active surfaces favor the lack of adhesion. An important role in this process has the shape of the active part of the tool and the misfit between tool dimensions and the thickness of the welded components [20].

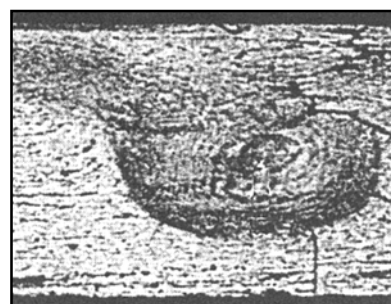


Figura 5. Lipsă de pătrundere la rădăcina nucleului îmbinării/

Figure 5. Lack of penetration at the joint nucleus root

One of the most frequent defects in FSW joints caused by the incorrect depth of the tool pin and by the not equal width of the groove is lack of penetration. Figure 5 presents the macroscopic aspect of the joint that proves placement of the lack of penetration at the nucleus root and Figure 6 presents the result of penetrant liquid control.

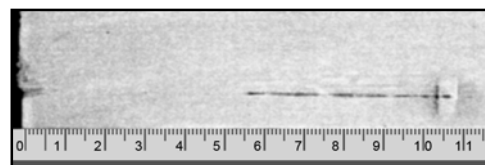


Figura 6. Evidențierea nepătrunderii la rădăcina cu ajutorul lichidelor penetrante/

Figure 6. Revealing root lack of penetration with penetrant liquids

A typical case of combination between lack of adhesion and lack of penetration at the nucleus root of the joint from a 99.5% Al alloy is given in Figure 7.

The presence of cracks in FSW joints is less probable than in case of other welding processes because the temperature during the process and the thermal field does not favor this.

The most frequent location of a crack is at the limit of the heat affected zone from the base material, as it can be seen in Figure 8, and probability to appear grows for the case of dissimilar joints in which one component is more sensitive to cracking.

Un caz tipic de combinare a lipsei de aderență și a unei nepătrunderi la rădăcina nucleului îmbinării la un aliaj de Al 99,5%, este prezentat în figura 7.

Prezența fisurilor în îmbinările sudate FSW este incomparabil mai puțin probabilă decât în cazul celorlalte procedee de sudare, deoarece temperatura degajată în proces și întreg ciclul termic este complet nefavorabil la sudarea FSW.

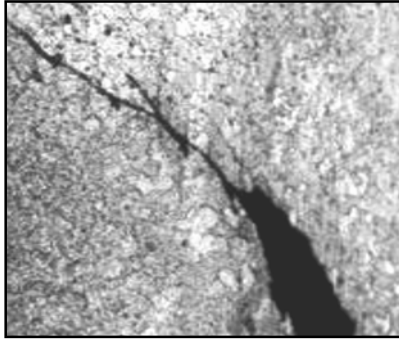


Figura 7. Lipsă de aderență deschisă într-o lipsă de pătrundere/

Figure 7. kissing bond opened into a defect of lack of penetration

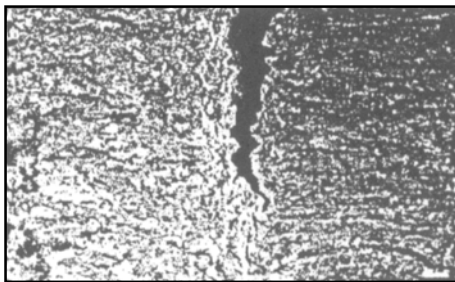


Figura 8. Fisură în zona influențată termic/

Figure 8. Crack into the heat affected zone

Localizarea cea mai frecventă a fisurii este la limita influențată termic spre materialul de bază așa cum se evidențiază în figura 8, iar probabilitatea de formare crește în cazul sudării pieselor disimilare la care una din componente este mai sensibilă la fisurare.

2. Examinarea nedistructivă a îmbinărilor sudate FSW prin metoda ultrasonică cu rețea matricială de difracție - UT PHASED ARRAY

Analizând particularitățile tipologiei defectelor la îmbinările sudate FSW (par.2), literatura de specialitate [11], [14], [16] a stabilit în mod univoc pe baza criteriilor de pretabilitate, productivitatea examinărilor, precum și de calitate și siguranța interpretării rezultatelor, că metoda cea mai adecvată este metoda ultrasonică folosind o rețea matricială de difracție a undelor în material cunoscută sub denumirea UT – Phased Array. Ea pune la dispoziția examinatorului în timp real imagini ale defectelor în diferite vederi (planuri).

Imagistica ultrasonică cu rețea matricială de difracție oferă următoarele posibilități și avantaje, care facilitează localizarea și evaluarea cantitativă a imperfecțiunilor și defectelor indiferent de orientarea lor:

- baleierea simplificată a îmbinării sudate cu piezocristale dispuse în rețele de diferite forme, conținând 16÷128 unități (elemente);

2. Non destructive examination of the FSW joints using ultrasound in a diffraction matrix network method – UT- Phased Array

By analyzing the particularities of the defect typology that appear in FSW joints (par. 2), the literature [11], [14], [16] established without any doubt, based on criteria of productivity of examinations, quality and safety of results interpretation, that the most fit method is the ultrasound using a diffraction matrix network of waves in material, known as UT - Phased Array. This method gives the examiner real time images of the imperfections and defects in different views (planes).

Diffraction matrix network ultrasound imagistic gives the following advantages and possibilities that facilitate to localize and quantitatively evaluate imperfections and defects of any orientation.

- simplified scanning of the joint with piezoelectric crystals placed in networks with different shapes, containing 16-128 units (elements);
- working on a large range of diffraction angles and variable focusing distances, that make possible to receive defect signals regardless of their size and orientation, including zone scanning with a certain diffraction angle;
- high detecting precision due to the possibility to split the area in small zones to be analyzed and so the volume of the material controlled will be processed by a computer;
- automatic processing of information displaying the result in two systems analogical A and digital in planes B, C, D and S;
- reducing the dead angle of the probe due to the different distances to crystals of the matrix probe as to the discontinuities in the close plane.

The scheme of the system is presented in Figure 9.

The emission – receiving unit (5) transmits pulses specific to probe frequency (2), successive to all crystals of the probes, that transmits them into the part (1) in incident waves, delayed in time and receives the echoes from defects existing into the part, that are also delayed in time. Both emitted pulses and received pulses are recorded as amplitude and time delay and stored into the computer's memory.

The main working frequencies for metal defectoscopy are: 2, 2.5 and 5MHz for steels and respectively 5,6 and 10 MHz for light metals.

One probe consists of a network of piezoelectric crystals of composite materials, made of 16, 32, 64 and 128 elements that can be individual or group activated as blocks of 16 [14].

Depending on the control objective, the crystals, as can be seen in figure 8, can be in circular matrix, concentric, in rectangle or square, respectively in linear matrix.

Due to the ease of data processing, the most frequently used is the linear positioning.

Piezo-electric transducers are made of a composite material, piezo-ceramic wires inserted into a polymer. The percentage of active piezo-electric material can be changed by changing its diameter or the step between wires.

2.1. Welded joints scanning

Scanning can be made manually classic, manually assisted by a monitoring mechanism for movements or robotized.

Principally the scanning technique can be of two types:

- operarea pe un câmp larg de unghiuri de difracție și distanțe focale variabile, ceea ce face posibilă recepția semnalelor de defect indiferent de mărimea și orientarea acestora, inclusiv prin scanare sectorială cu un anumit unghi de difracție;

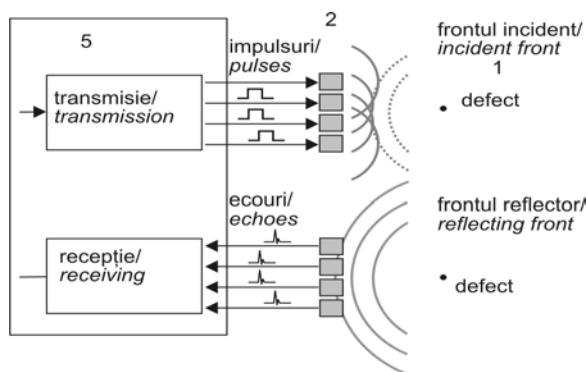


Figura 9. Schematizarea rolului sistemului de emisie – recepție a undelor/
Figure 9. Schematic role of the transmission – receiving waves system

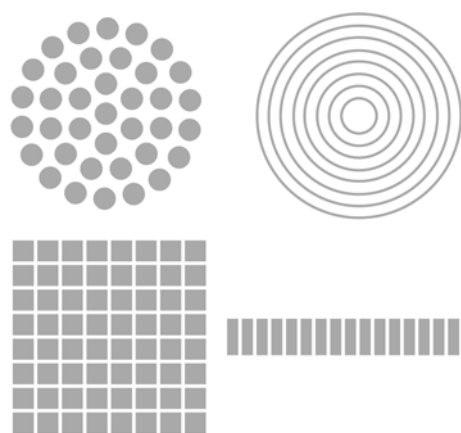


Figura 10. Matrici de dispunere a traductoarelor/
Figure 10. Transducers placement matrix

- obținerea unei precizii mari de detectare datorită posibilității de discretizare a ariei de analiză și practic informatizarea volumului de material controlat;
- prelucrarea automată a informației și redarea rezultatului în două sisteme: analogic A și digital în planurile B, C, D și S.
- micșorarea zonei moarte a palpatorului datorită distanțelor diferite la care se află cristalele palpatorului matricial în raport cu discontinuitățile din plan apropiat.

Schematic funcționarea unui astfel de sistem este prezentată în figura 9.

Unitatea de emisie – recepție (5) transmite pulsuri normate de frecvența palpatorului (2), respectiv succesiv tuturor cristalelor palpatorului, care le emite în piesă (1) sub formă de unde incidente, defazate în timp și recepționează din piesă semnale reflectate (ecouri) de la defecte, semnale, care de asemenea sunt decalate în timp. Atât impulsurile de emisie cât și semnalele reflectate sunt înregistrate ca mărime și defazare în timp și stocate în memoria calculatorului.

Principalele frecvențe de lucru pentru defectoscopia metalelor sunt: 2, 2,5 și 5 MHz, în cazul oțelurilor, respectiv 5, 6 și 10 MHz în cazul metalelor ușoare.

Un palpator conține o rețea de piezocristale din materiale compozite formată din 16, 32, 64 sau 128 elemente care pot fi activate individual sau în grup de câte 16, [14].

În funcție de scopul urmărit la control, dispunerea cristalelor,

a) step by step, in classical system with monocrystal probe with on-coming movements between two limits, followed by a move parallel with the joint axis and replay the operation as indicated in figure 11.a

b) in-line, with matrix diffraction probe, that in any position scans the entire section of the welded joint, as in the sketch in figure 11.b.

Due to the possibilities to splay transversal waves, it is sufficient to scan from one position the entire transversal section of the joint (figure 12) and to move longitudinally, at constant distance, along the joint. In this way information of transversal section B-scan, longitudinal section D-scan and by compounding upper view C-scan can be obtained.

The probe can be electronic directed for scanning along the joint – respectively in sectors as demonstrated in Figure 12, corresponding to angles $\beta=25^\circ \div 70^\circ$ [14], that gives the possibility to zone views – S scan. Depending on the reflected signal amplitude exists also the possibility to automatic focusing on a certain incident angle.

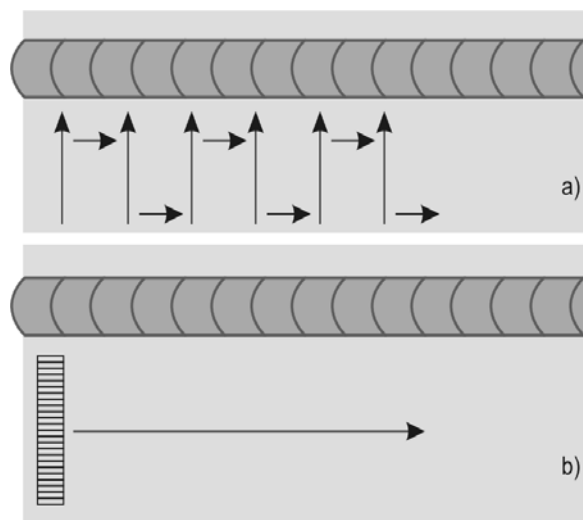


Figura 11. Scanarea în trepte (a) și scanarea în linie (b)/
Figure 11. Step scanning (a) and in-line scanning (b)

2.2. Focusing in depth and diffraction angle

- Incident angle (diffraction) $\beta = 0$, longitudinal waves

Focusing in depth, based on the principle of strategy of the crystals, can be obtained with the aid of an electric driven delay function of the active crystals from the probe. In case of using the longitudinal waves probes with incident angle (diffraction) $\beta=0$, parabolic function of delay Δt [2], [3], [4], is symmetric with the peak centered on center crystal, Figure 13. Delay Δt is expressed in relation:

$$\Delta t = \frac{f}{v} \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{nd}{f} \right)^2 - 2 \frac{nd}{f} \sin \theta \right]^{1/2} \right\} + t_0 \quad (1)$$

where:

- f – focal distance
- v – waves speed
- n – number of active crystals
- d – distance between two crystals
- θ – incident angle of the active crystal.

It is directed so that it will increase from the crystals from the margin of the probe (compare 1 with 1' in Figure 13) towards the

după cum rezultă din figura 8 poate fi: în matrice circulară, concentrică, în matrice dreptunghiulară sau pătrată, respectiv în matrice liniară.

Datorită ușurinței în ceea ce privește prelucrarea datelor cel mai frecvent se folosește dispunerea liniară.

Traductoarele piezo-electrice sunt confecționate din materiale compozite, formate din sârmă piezo-ceramică inserționată într-un polimer. Procentajul de material activ piezo-ceramic se poate modifica prin diametrul acestuia sau prin pasul (distanța) acestuia.

2.1. Scanarea îmbinărilor sudate

Scanarea poate fi realizată clasic manual, manual asistat de un mecanism de codificare a deplasărilor, sau robotizat.

Principial tehnica scanării este de două feluri:

a) în trepte, pas cu pas, în sistem clasic cu palpator monocristal cu mișcări de apropiere a palpatorului între două limite, urmate de un salt paralel cu axa sudurii și repetarea operației așa cum este indicat în figura 11.a.

b) în linie, cu palpator matricial de difracție, care în orice poziție baleiază întreaga secțiune a îmbinării sudate, după cum este schițat în figura 11.b.

Datorită posibilităților de evazare a undelor transversale este suficientă scanarea dintr-o singură poziție a întregii secțiuni transversale a îmbinării (figura 12) și mișcarea longitudinală la distanță constantă în lungul îmbinării. Se obțin astfel informații în vedere transversală B – scan, în vedere longitudinală D – scan și prin compunere în vedere de sus C – scan.

Palpatorul poate fi comandat electronic pentru scanarea în lungul îmbinării – respectiv sectorial cum este exemplificat în figura 12 corespunzător unor unghiuri $\beta = 25^\circ \div 70^\circ$ [14] ceea ce oferă posibilitatea vizionării sectoriale – S scan. În funcție de amplitudinea semnalului reflectat există și posibilitatea focalizării automate pe un anumit unghi de incidență.

2.2. Focalizarea în adâncime și unghiul de difracție

• Unghiul de incidență (difracție) $\beta = 0$, unde longitudinale.

Focalizarea în adâncime pe principiul tacticizării cristalelor se realizează cu ajutorul unei anume funcții de defazaj a cristalelor active din palpator, comandată electric. În cazul folosirii palpatoarelor de unde longitudinale cu unghiul de incidență (difracție) $\beta = 0$, funcția parabolică de defazare Δt [2], [3], [4], este simetrică cu vârful centrat pe cristalul din mijloc, figura 13. Defazajul Δt se exprimă prin relația:

$$\Delta t = \frac{f}{v} \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{nd}{f} \right)^2 - 2 \frac{nd}{f} \sin \theta \right]^{1/2} \right\} + t_0 \tag{1}$$

- unde: - f – este distanța focală
- v – viteza de propagare a undelor
- n – numărul de cristale active
- d – distanța dintre două cristale
- θ – unghiul de incidență a cristalului activ.

El este comandat astfel încât acesta să se mărească dinspre cristalele situate la marginea palpatorului (a se compara 1 cu 1' din figura 13) spre cristalele situate spre mijloc (3 din figura 13). În acest fel frontul undelor de emisie își micșorează raza de curbă R , pe măsura înaintării în profunzimea piesei. Focalizarea are loc în poziția în care $R = 0$.

• Unghiul de incidență (difracție) $\beta \neq 0$, unde longitudinale sau transversale.

crystals situated in the middle (3 in Figure 13). In this way the emitted wave front decreases radius R , as long as they deepness into the part. Focusing takes place in position in which $R = 0$.



Figura 12. Schema scanării îmbinărilor sudate/
Figure 12. The scheme of welded joint scanning

• Incident angle (diffraction) $\beta \neq 0$, longitudinal and transversal waves.

To emit and focus inclined waves transversal or even longitudinal, based on refraction law (Snell), angle β and focus depends of the wave type, aperture of the beam, focusing depth. These can be tuned with a different shape from that before the delay function (figure 14). In this case, the time delay of the

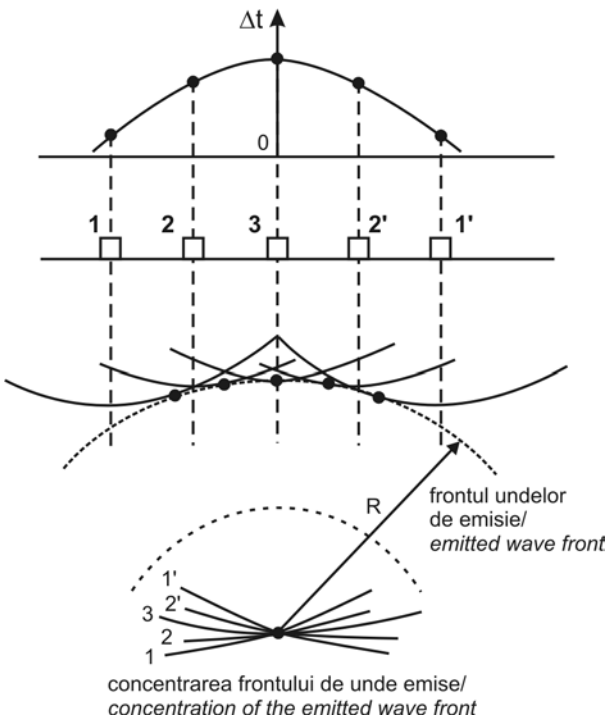


Figura 13. Prezentarea simplificată a principiului focalizării undelor de emisie cu ajutorul unui palpator cu 5 cristale dispuse în linie pentru cazul undelor longitudinale ($\beta = 0$)

Figure 13. Simplified representation of the emission waves focusing with a 5 crystals probe placed in-line for transversal and longitudinal ($\beta = 0$) waves

crystals is realized after semi parabolic function having the peak in the position of the last crystal from the probe. Wave front moves with the desired inclination β . Focalization takes place in section, driven by the delaying function Δt .

2.3. Opening of the aperture of the emission waves and the beam spreading by modal emission.

To obtain a scan as complete as possible of the section of the welded joint, specially to parts of large thickness, multi mode

În vederea emisiei și focalizării de unde înclinate transversale sau chiar longitudinale, pe baza legii refracției (Snell), unghiul β și focalizarea este dependentă de tipul undei, de apertura (evazajul) fascicului, de adâncimea de focalizare. Acestea pot fi reglate cu ajutorul unei forme diferite de cea anterioară a funcției de defazare (figura 14). În acest caz defazarea în timp a

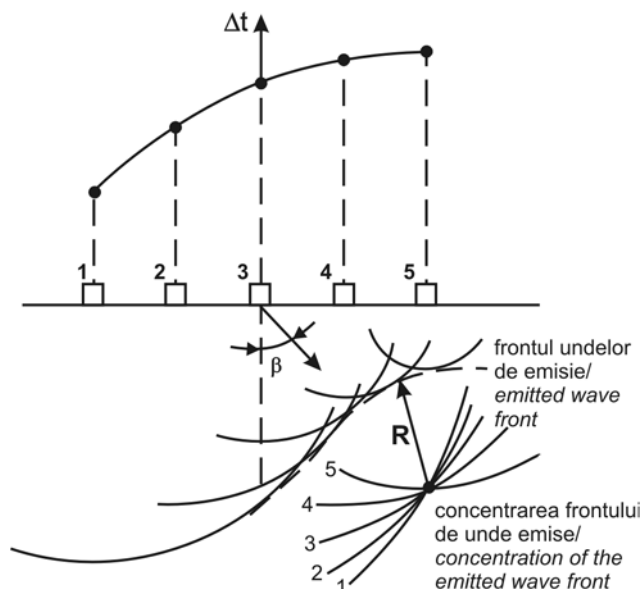


Figura 14. Prezentarea simplificată a principiului focalizării și înclinării undelor de emisie, cu ajutorul unui palpator cu 5 cristale dispuse în linie pentru cazul emisiei undelor transversale și longitudinale înclinate ($\beta \neq 0$)

Figure 14. Simplified representation of focusing and inclining emission waves with the aid of a 5 crystals probe placed in-line for transversal and inclined longitudinal waves ($\beta \neq 0$)

cristalelor se realizează după o funcție semiparabolică având vârful în dreptul ultimului cristal din palpator. Frontul de unde înaintază cu înclinația dorită β . Focalizarea are loc în secțiunea, comandată prin funcția de întârziere Δt .

2.3. Deschiderea aperturii undelor de emisie și gradul de evazare a fascicului de unde prin emisie multi-modală.

Pentru cuprinderea cât mai completă a secțiunii îmbinărilor sudate în special la controlul pieselor de grosimi mari se folosește tehnica multimodală de introducere tacticizată atât a undelor longitudinale (L) cât și a undelor transversale (T), [11]. Urmare a diferențelor de viteze de propagare $v_L > v_T$ loburile de emisie sunt decalate, atât ca unghi cât și ca defazaj de timp. Astfel conform legii Snell zonele unghiurilor mari de incidență β revin câmpurilor de unde longitudinale, iar ale unghiurilor mici de incidență revin câmpurilor de unde transversale, așa cum rezultă din figura 15.

Printr-o tacticizare sau activare succesivă cu Δt diferit se obține în plus și o evazare (divergență) suplimentară a celor două loburi L și T, chiar și o suprapunere a acestora cu efect benefic atât asupra posibilităților mai largi și ca focalizare (precizie de localizare), cât și asupra lărgirii secțiunii investigate, concomitent cu micșorarea zonei moarte, ceea ce le conferă un avantaj important la detectarea defectelor orientate defavorabil.

Imaginile obținute de la diferite tipuri de unde se suprapun într-o singură imagine având ca efect mărirea expresivității zonelor investigate și a unei reproductivități superioare.

techniques of tactic introducing both longitudinal (L) and transversal (T) waves, [11]. As a result of waves propagation speed differences $v_L > v_T$ the emission lobes are delayed, as angles and time. According to Snell law, zones of large incident angles β belongs to the longitudinal waves fields and those of the small incident angles belongs to fields of transversal waves, as results from figure 15.

Through a certain tactic and successive activation with different Δt it can be obtained a supplementary spreading (divergence) of lobes L and T, even a superimposing of these with benefic effects on focusing precision and also on widening the investigating section, at the same time with decreasing the dead zone, which is an important advantage to detect the defects without a favorable orientation.

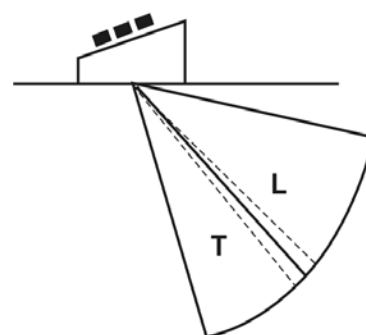


Figura 15. Emisia multi-modală cu doi lobi de unde tacticizate/
Figure 15. Multi modal emission with two lobes of tactic waves

The images obtained from different types of waves are superimposed on a single image having as effect the increasing clarity of investigated zones and a superior reproducibility.

2.4. Receiving reflected waves

The emission waves introduced into the part, together with the reflected waves from the defects (echoes) and interference waves, form a complex delayed moving wave field, simple but in most cases interfered (overlapped) that decreases in intensity.

The reflecting waves from a defect in the part are presented simplified in Figure 14. Received reflected waves at each transducer 1 – n is made with a time delay $\Delta t_1 \div \Delta t_n$ depending on the distance along which the waves travel $r_1 \div r_n$. Knowing the traveling speed of the waves v , the time delay between the signals received determines a parabola variation in the plane of Figure 16.

There are two different systems of detection using diffraction matrix probes.

- Sampling Phased Array in which the direction and focusing are commanded by a receiving delaying device and the image is reconstructed by reconstructing the scanning zone by calculating the relevant incident angle.
- Syn Foc with synthetic active crystals oriented and focused [7], [8], [9], [14] in such a way that the entire zone can be calculated point by point with special reconstructing algorithms.

2.5. Signals processing and image reconstruction

Time delay Δt of reflected signals from the part represents a fundamental characteristic of the matrix crystals systems. The value $\Delta t_{\min}$ determines maximum waves frequencies. This delay depends on the following factors:

2.4. Recepția undelor reflectate

Undele emise de traductoare în piesă, undele reflectate de la surse de defecte (ecouri) și undele de interferență, formează un câmp complex de unde călătoare decalate, deplasabile și amortizabile, simple și mai ales suprapuse (de interferență).

Formarea undelor de reflexie provenind de la un defect din piesă este prezentată schematic în figura 16. Recepția undelor reflectate la fiecare traductor $1 \div n$ se face cu un decalaj de timp $\Delta t_1 \div \Delta t_n$ în funcție de distanțele parcursului undelor $r_1 \div r_n$. Cunoșcând viteza de propagare a undelor v , decalajul de timp dintre semnalele recepționate determină o variație parabolică în planul figurii 16.

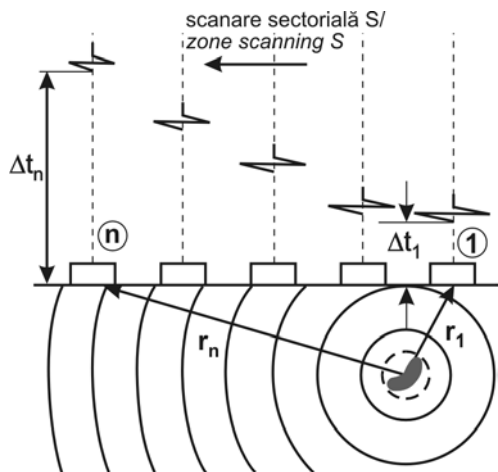


Figura 16. Schema recepționării cu defazare de timp Δt , a semnalelor provenite de la defect/
Figure 16. Receiving scheme with time delay Δt , for the signals produced by defects

Există două sisteme diferite de detectare cu palpatoare matri— ciale de difracție:

- Sampling Phased Array la care direcționarea și focalizarea este comandată prin dispozitive de întârziere a recepției și reconstruirea imaginii prin reconstruirea sectorului de scanare prin calculul unghiului de incidență relevant.
- Syn Foc cu cristale activate sintetic orientate și focalizate [7], [8], [9], [14] astfel încât întreaga zonă să poată fi calculată punct cu punct prin algoritmi speciali de reconstrucție.

2.5. Prelucrarea semnalelor și reconstrucția imaginii

Defazarea în timp Δt a semnalelor reflectate recepționate din piesă reprezintă caracteristica fundamentală a construcției sistemelor matriciale de cristale. Valoarea Δt_{min} determină frecvența maximă a undelor. Acest defazaj (întârziere) depinde de următorii factorii:

- tipul undei – longitudinală sau transversală,
- unghiul de difracție,
- deschiderea sau apertura grupului de cristale active,
- dimensiunea sau distanța dintre cristale.

Pentru reconstrucția imaginilor sectoriale se folosește tehnica activării tacticizate [8], [9], [10] orice piezocristal putând fi imaginat ca deplasându-se dealungul întregului grup de cristale din componența palpatorului.

Reținându-se semnalele de ieșire și de intrare de la fiecare traductor în parte, semnale, provenite de la toate traductoarele activate, se formează o matrice informațională, în orice secțiune sectorială.

- wave type – longitudinal and transversal;
- diffraction angle;
- opening or aperture of the group of active crystals;
- dimensions and distances between crystals.

To reconstruct zone images a strategic activation technique is used [8], [9], [10], any crystal can be imagined as moving along the entire group of crystals composing the probe.

Storing output and input signals from each of the transducers, from all activated transducers, an information matrix is formed in any section zone.

To each point a delay in time of the wave route can be determined up to each crystal from the network and so to the image can be associated a certain value of the signal amplitude. As a result, using the matrix, we can automatically focus on any point of the section, the localization corresponding to the maximum value.

To reconstruct the image of the defect [15] is defined the area and the degree of discretization of the part section in which we intend to identify and locate the defect (rectangular network). From each point of the area there are determined the shape and characteristics of the wave received by each of the piezoelectric transducers composing the probe. This pseudo image simulated, B-scan type, is compared with the real image (experimental), corresponding to each pixel of the reconstructed section, Figure 17.

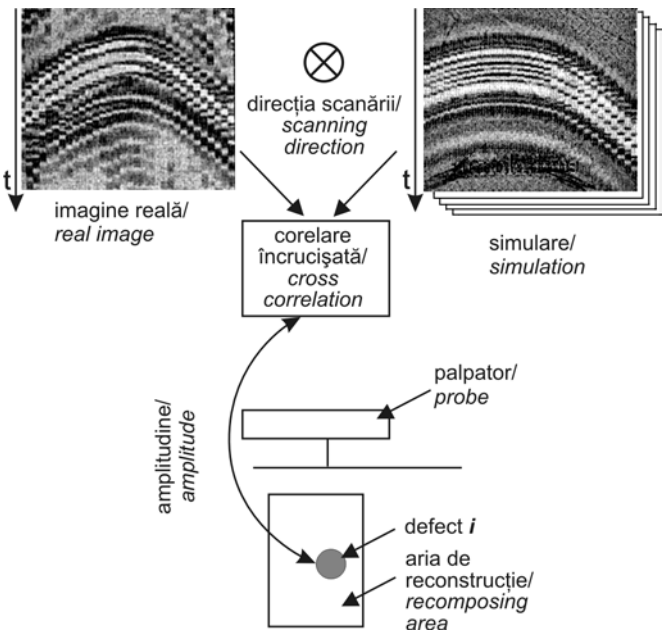


Figura 17. Principiul de reconstrucție și localizare a imaginii de la un defect oarecare i aflat în aria de reconstrucție/
Figure 17. The principle of recomposing and locating the image of a defect i in the recomposing area

The comparison is based on the real crossed simulated correlation – from each transducer. The amplitude of each pixel from the reconstructed area is proportional to the probability of the presence and position of the defect which is searched for.

Additional information can be obtained by zone scanning and mechanical movement along X direction of the probe and image superposing, as is suggested in the simulation part of Figure 17.

The advantage of using matrix systems is the automatic focusing of each point from the investigated section and instant locating, and in this way the display and correct recomposition of the defect image.

Cum fiecărui punct la rândul său i se poate determina defazajul de timp de parcurs al undelor până la fiecare cristal din rețea, imaginii i se poate asocia o anumită valoare a amplitudinii semnalului. Ca urmare, prin folosirea matricii se poate focaliza automat orice punct din secțiune iar localizarea corespunde valorii maxime.

În vederea reconstrucției imaginii de defect [15] se definește aria și gradul de discretizare din secțiunea piesei în care se dorește identificarea și localizarea defectului (rețea rectangulară). Din fiecare punct al ariei se determină forma și caracteristicile unde pe care le recepționează fiecare traductor piezoelectric (cristal) din componența palpatorului. Se compară apoi această pseudo – imagine simulată de tip B – scan cu imaginea reală (experimentală), corespunzător fiecărui pixel cuprins de secțiunea de reconstrucție, figura 17.

Comparația are la bază corelația încrucișată simulat – real de la fiecare traductor. Amplitudinea fiecărui pixel din aria de

➤ Example of defect image recomposing

A typical example of multiple recomposing in the mentioned representations, obtained with an Omniscan MX Olympus NDT [14], is presented in Figure 18.

With the scanner for locating is also presented the grid to frame the defects fields in the three sections: transversal B (middle upper window), upper C (down left window), longitudinal D (middle down window). In the upper left window a zone S image is presented, corresponding to a 58°50' diffraction angle. In the right side window there is recorded the variation of amplitude of the captured signal in the region of 0.6 ÷ 0.7 depth, along the azimuthal direction, indicated and marked in the left upper window. For an exact locating of the defects, the probe movement is synchronized by an automatic recording – coding and decoding system, known as the encoder. The resolution of such a system is 9 ÷ 12 pulses/mm (mm along the linear route).

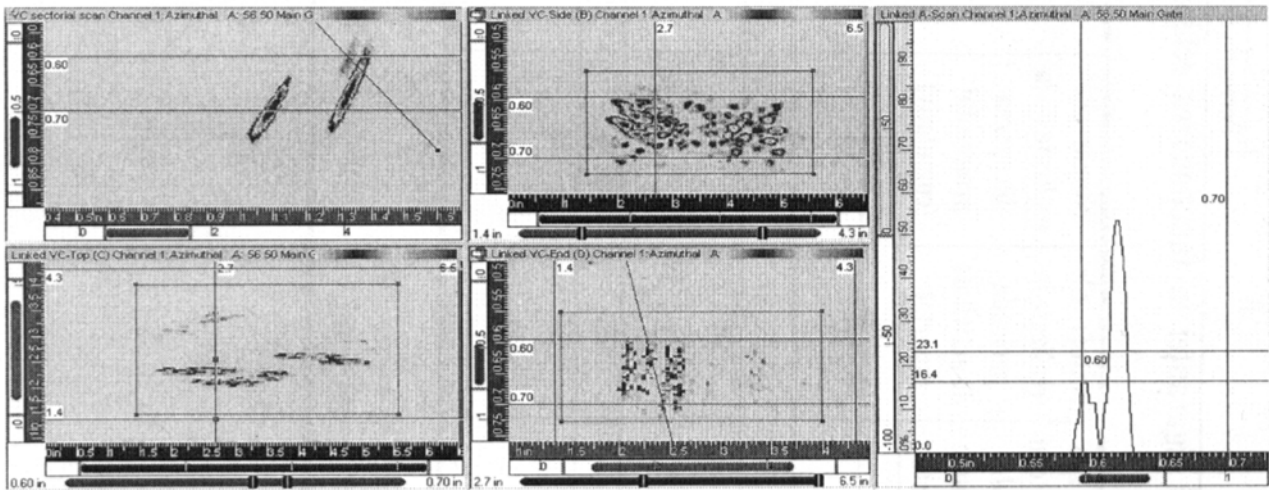


Figura 18. Imaginile unui câmp de defecte situate la cca 0,6 – 0,7 adâncime scanate, în următoarele reprezentări:

S – stânga sus; B – mijloc sus; C – stânga jos; D – mijloc jos; A – în dreapta/

Figure 18. The images of a defect field situated at almost 0.6-0.7 from the scanned depth, in the following representations:

S – upper left; B – upper middle; C – down left; D – down middle, A – right side.

reconstrucție este proporțională cu probabilitatea prezenței și locației defectului căutat.

Un plus de informații se obțin prin combinarea scanării sectoriale și a mișcării mecanice pe direcția X a palpatorului și a suprapunerii imaginii, așa cum este sugerat pe partea de simulare din figura 17.

Avantajul folosirii sistemelor matriciale constau în focalizarea automată a fiecărui punct din secțiunea investigată și localizarea instantanee și prin aceasta redarea și recompunerea corectă a imaginii defectului.

➤ Exemplu de reconstrucție a imaginii defectului

Un exemplu tipic de reconstrucție multiplă în reprezentările menționate, obținut cu un aparat Omniscan MX Olympus NDT [14] este ilustrat în figura 18.

Cu ajutorul scannerului de localizare s-a reprezentat și carioajul de încadrare a câmpurilor de defecte în cele trei vederi (secțiuni): transversală B (fereastra din mijloc sus), de sus C (fereastra din stânga jos), longitudinală D (fereastra din mijloc jos). În fereastra din stânga sus se prezintă imaginea sectorială S, corespunzătoare unui unghi de difracție de 56° 50'. În fereastra din dreapta este înregistrată variația amplitudinii semnalului captat în zona

3. Conclusions

- The defects such as: lack of adhesion, lack of penetration and tubular cavities of tunnel type, are the most frequent of FSW joints of aluminum alloys;
- Grouping the FSW joints defects in the category of volume defects, respectively plane defects, allows us to correlate their influence on the mechanical characteristics;
- The system CND, UT – Phased Array, that uses ultrasound wave diffraction matrix of transducers proves to be the most efficient considering the typology of the defects of FSW joints;
- To focus in depth of the waves, diffraction to different angles and ultra-mode emission, phase array system uses the strategic electronic activation of the piezoelectric mini-transducers with different delay functions, correlated with the objective;
- The approach of the mentioned phenomena allows us to understand the complete informatization techniques for the scanned section, by synthetic activation of phased array transducers and to obtain a real time image of the section.

adâncimii $0,6 \div 0,7$, pe direcția azimutală indicată și marcată în fereastra din stânga sus. În vederea localizării exacte a defectelor mișcarea palpatorului este sincronizată printr-un sistem automat de înregistrare – codificare și de decodificare, cunoscut și sub denumirea de encoder. Rezoluția unui astfel de sistem este de $9 \div 12$ pulsuri/mm liniar de parcurs.

3. Concluzii

- Defectele de tip lipsă de aderență, lipsă de pătrundere și cavități tubulare tip tunel, reprezintă cele mai frecvente defecte ale îmbinării FSW la aliaje de aluminiu;
- Gruparea defectelor îmbinării FSW în categoria defectelor volumice respectiv a defectelor plane, permite corelarea cu influența exercitată asupra caracteristicilor mecanice;
- Sistemul CND, UT – phased array, care utilizează traductoare matriciale de difracție a undelor ultrasonice, se dovedește a fi cel mai eficient în raport cu tipologia defectelor îmbinărilor FSW;
- Pentru focalizarea în adâncime a undelor, difracția la diferite unghiuri și emisii multi – modale, sistemul phased array se folosește de activarea tacticizată electronică a minitraductoarelor piezoelectrice după funcții de defazaj diferite, corelate cu scopul urmărit;
- Abordarea fenomenelor menționate permit înțelegerea tehnicii de informatizare completă a secțiunii baleiate prin activarea sintetică a traductoarelor phased array și de obținere în timp real a imaginii secțiunii.

Bibliografie/ References

- [1] Blanch O., F.Senne: *2GKSS Workshop – Tagungsband, Friction Stir Welding*, GKSS Forschungszentrum, 2002, p. 85 - 94.
- [2] Bulavinov A.: *Der getaktete Gruppenstrahler*, Saarbrücken 2005 (Dissertation).
- [3] Bulavinov A. et al.: *Quantitative US – Prüfung an Druckführenden Komponenten mit den Getakteten Gruppenstrahler*, 32 MPA – Seminar, Stuttgart, 2006.
- [4] Bird C. et al.: *New developments of the ultrasond phased array for the evolution of friction stir welds*, TMS Conf. Proceedings 2003.
- [5] Kalee S.W., et al.: *2GKSS Workshop – Tagungsband, Friction Stir Welding*, GKSS Forschungszentrum, 2002, p. 9 - 21.
- [6] Katoh K., H. Tokisue: *IIW Pre-Assembly Meeting on FSW in Nagoya*, Ed. Kinichi Matsuyama, 2004, p. 167 – 177.
- [7] Kokawa H., et al.: *IIW Pre-Assembly Meeting on FSW in Nagoya*, Ed. Kinichi Matsuyama, 2004, p. 7 - 18.
- [8] Kröning M., Bulavinov A., Reddy K. M.: *Deutsche Patentanmeldung Nr. 10 2005 051 783.8. Verfahren und Vorrichtung zur bildgebenden Ultraschallprüfung an einem dreidimensionalen Werkstück*. Anmeldetag 28. 10. 2005.
- [9] Kröning M., Bulavinov A., Reddy K. M.: *Deutsche Patentanmeldung Nr. 10 2006 003 978.5. Verfahren zur zerstörungsfreien Untersuchung eines wenigstens akustisch anisotropen Werkstoffbereich aufweisenden Prüfkörpers*. Anmeldetag 27. 01. 2006.
- [10] Kröning M. et al.: *Sampling Phased Array: A New Method of Signal Processing and Image Reconstruction in Ultrasonic Non – Destructive Testing*, Indian Institute of Metals: International Conference & Exhibition on Pressure

Vessels and Piping 2006. Kalpakam: Indian Institute of Metals, 2006, B7-1.

[11] Kröning M.: *New sensors for ndt and material evolution*, BID ISIM, Timișoara, Nr. 4/2006.

[12] Osterkamp A., et al.: *Kissing Bond Phenomena in Solid-State Welds of Aluminium Alloys*, Welding Journal 2004/8, p. 225s – 230s.

[13] Palm F., et al.: *2GKSS Workshop – Tagungsband, Friction Stir Welding*, GKSS Forschungszentrum, 2002, p. 99 - 114.

[14] xxx: *Phased Array Technical Guidelines*, R/D Tech. Corp.

[15] Porré J. et al.: *Simulation of Phased Array Techniques and Model Based Data Reconstruction Comm*, 1' Energie Atomique DRT/LIST CEA Saclay Bat.

[16] xxx: *Phased array ultrasonic System for inspection of FSW*, Aerospace Appl. Note Rev. 2002 – 05RD Tech. Inovation in NDT. Quebec.

[17] xxx: *Prospecte Olympus – Innovation in NDT. Ultrasound and Phased Array Software*.

[18] Shinoda Y., et al.: *IIW Pre-Assembly Meeting on FSW in Nagoya*, Ed. Kin – ichi Matsuyama, 2004, p. 107 – 116.

[19] Thomas W., et al.: *IIW Pre-Assembly Meeting on FSW in Nagoya*, Ed. Kin – ichi Matsuyama, 2004, p. 53 – 64.

[20] Zettler R., et al.: *Effect of Tool Geometry and Process Parameters on Material Flow in FSW of Al, Alloys* 2nd FSW Modelling Seminar – GKSS -2005, ASME Section V Article4, 2005 Edition.

