

Etude de la corrélation entre les paramètres-procédé et les caractéristiques mécaniques des tôles en aluminium soudées par la technique FSW.

Mohamed MERZOUG^{1*}, Abdelkader GHAZI¹, Abdelkader BOULENOUAR¹,

Benattou BOUCHOUICHA¹, Mohamed MAZARI¹

Laboratoire de mécanique et de systèmes réactifs
Département de Génie mécanique, Faculté de Technologie. Université Djillali Liabès – Sidi Bel
Abbès. BP 89, Cité Larbi Ben M'hidi 22000 Sidi Bel Abbès, Algérie

* auteur correspondant : m_merzoug01@yahoo.fr

Résumé - Ce sujet de recherche vise le procédé de soudage par friction malaxage (FSW). L'étude menée se focalise sur la corrélation entre les paramètres du procédé (vitesse d'avance et fréquence de rotation de l'outil) et les caractéristiques mécaniques et microstructurales des tôles d'alliage d'aluminium 5083 H111 de six millimètres d'épaisseur mises bout à bout et soudées par une fraiseuse verticale du département de génie mécanique. Les soudures ont été réalisées en faisant varier la vitesse d'avance et la fréquence de rotation. Cette approche expérimentale est basée sur la variation de la profondeur de pénétration de l'épaulement de l'outil permettant de contribuer à maîtriser l'effort axial a fin de prédire le domaine opératoire de soudabilité pour cette nuance d'aluminium par le procédé de soudage FSW.

Mots Clés : Soudage FSW, aluminium, pénétration, pion.

Nomenclature

<i>FSW</i>	Friction stir welding	<i>MB</i>	Métal de base
<i>Fz</i>	Effort axial de soudage (KN)	<i>ZAT</i>	Zone affectée thermiquement
<i>P_{ép}</i>	Profondeur de pénétration de l'épaulement	<i>ZATM</i>	Zone affectée thermo mécaniquement
<i>N</i>	Vitesse de rotation (tr/min)	<i>ZF</i>	Zone fondue ou zone de soudage
<i>Va</i>	Vitesse d'avance (mm /min)		
α	Angle d'inclinaison de l'axe de rotation.		

7. Introduction

Vu leurs difficulté de soudage par voie classique (diffusivité thermique et coefficient de dilations élevés, présence d'une couche d'alumine en surface et formation de soufflures), les alliages d'aluminium à durcissement structural utilisés dans l'allégement des structures à application aéronautique, sont soudés par un procédé d'assemblage dit Soudage par friction malaxage ou Friction Stir Welding [1]. Contrairement aux procédés traditionnels de soudage, cette technique ne chauffe pas le métal jusqu'à son point de fusion. C'est un soudage à l'état pâteux de la matière qui est recommandé pour des applications où il est important de conserver les caractéristiques originelles du métal. Ce procédé convient particulièrement bien à l'assemblage de pièces en aluminium ; ce qui nous évite tous les défauts rencontrés lors de la solidification affectant les contraintes internes [2] et [3]. Il a été mis au point en 1991 par le TWI (The Welding Institute).

Il est utilisé pour plusieurs applications, surtout l'aviation, la navigation spatiale, les tiges de piston et pièces de boîte à vitesse ainsi que pour les outillages de forage en pétrochimie [4].

Plusieurs zones présentant différentes microstructures seront distinguées après la soudure. Les microstructures obtenues après soudage par FSW sont connues mais le détail du mécanisme aboutissant à ces dernières et les propriétés mécaniques des joints soudés ne sont pas bien maîtrisées [5].

Le principe du FSW consiste à malaxer et plastifier la matière par l'intermédiaire de la chaleur fournie par le frottement entre l'outil et les pièces à souder. Ces dernières sont maintenues rigidement pour éliminer tout mouvement lors du malaxage [2].

Dans le FSW, une tige cylindrique ou conique de préférence fileté ou striée, tourne à une très grande vitesse (200 à 2000tr/min) et plonge à l'interface des deux pièces à souder. La friction de l'épaulement provoque un amollissement de la matière et s'appuie avec une force importante sur les bords des plaques empêche le métal d'être engagé [6]. Les bordures des plaques se déforment plastiquement. Le principe de base du procédé FSW est effectué sur une fraiseuse conventionnelle (figure 1).

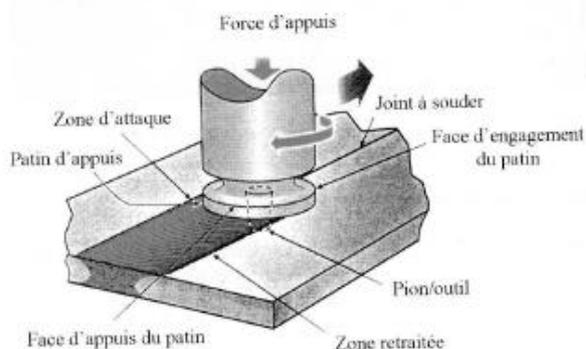


Figure 1 : Principe du soudage par friction malaxage

8. Étude expérimentale

Les soudures ont été effectuées sur une fraiseuse verticale du département de génie mécanique (Figure 2) sur laquelle un outil est adapté. Dans cette étude nous allons nous intéresser à la caractérisation des éprouvettes en aluminium 5083 H111 :

- Des éprouvettes haltères ont été usinées pour réaliser des essais de traction monotone jusqu'à la rupture.
- Des essais de micro dureté sur toute la surface permettront d'obtenir des caractéristiques de dureté suivant l'épaisseur de la surface FSW.
- Les variations de dureté doivent permettre de déterminer les frontières des différentes zones de la soudure FSW.

L'alliage d'aluminium 5083 H111 à durcissement par écrouissage nous servira à comprendre les différents phénomènes qui se produisent durant le soudage sans faire intervenir la précipitation. Le tableau 1 présente la composition chimique et les propriétés mécaniques de l'alliage.

Tableau 1 : Composition chimique et propriétés mécaniques de l'alliage d'aluminium 5083 H11

Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
0,15	0,40	0,40	0,10	0,10	4,90	0,25	0,25	0,15
E (MPa)	Rp (MPa)		Rm (MPa)		A (%)	K(J/cm ²)		Hv
71008	155		236		16.5	45		88

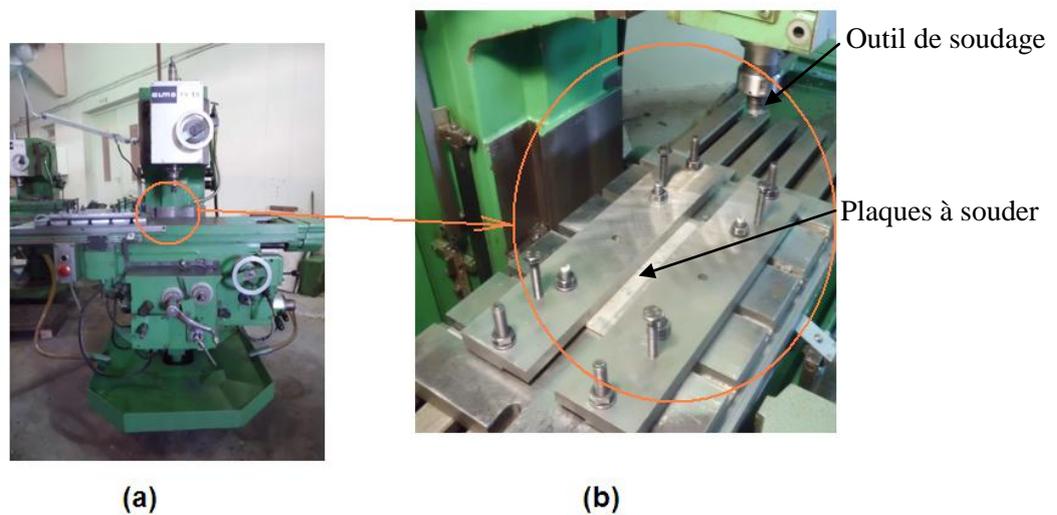


Figure 2 : (a) Fraiseuse utilisée pour le procédé FSW (b) système de bridage des plaques à souder

Les soudures ont été réalisées à l'aide deux outils de malaxage. Le premier est un acier fortement allié du type X210Cr12 (ex Z200) qui travaille à froid avec une grande résistance à l'usure (teneur élevée en carbures de chrome). Le deuxième est un acier faiblement allié du type 42 Cr Mo4 (ex 42CD4) de traitement à multiples applications avec une grande résistance mécanique et une haute ténacité.

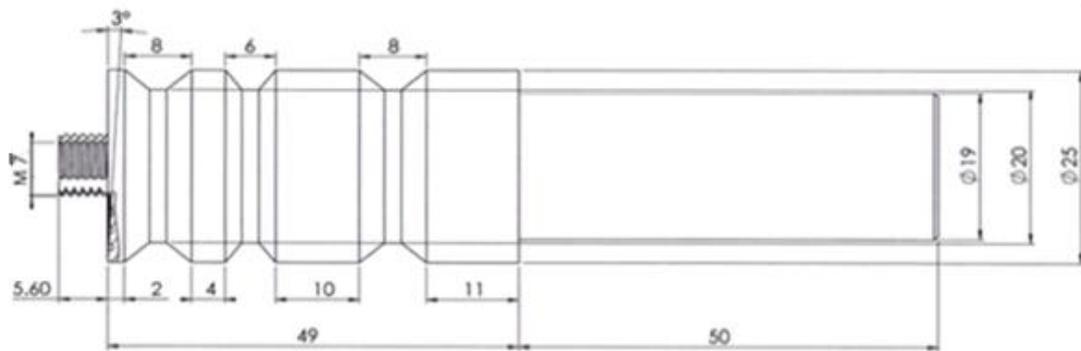
La figure 3 donne les détails des géométries des outils avec les dimensions en mm. Leurs compositions chimiques et propriétés mécaniques sont présentées respectivement dans les tableaux 2 et 3.

Tableau 2 : Composition chimique et propriétés mécaniques de l'acier X210Cr12

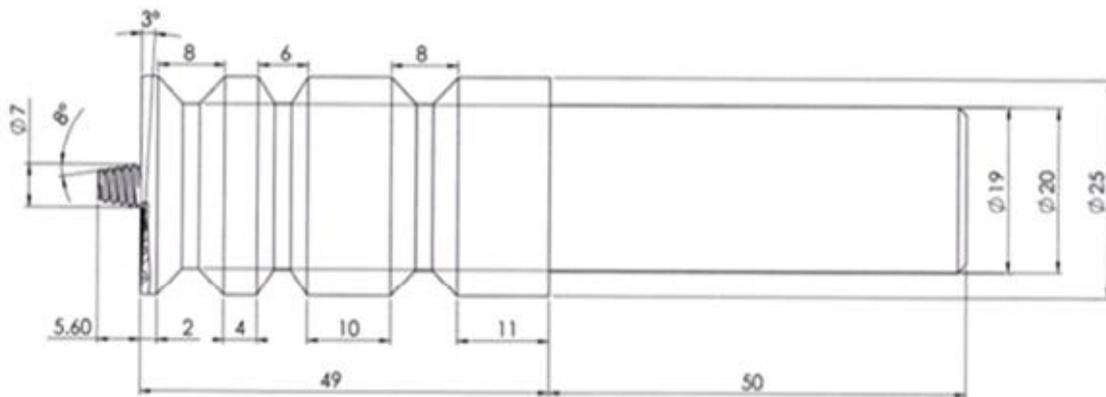
C(%)	Si	Mn	Cr	P	S
1,9-2,2	0,1-0,6	0,2-0,6	11,0-13,0	0-0,03	0-0,03
	E (Mpa)	Rm (Mpa)	A(%)	Re (Mpa)	v
	210000	870	15	355	0,33

Tableau 3 : Composition chimique et propriétés mécaniques de l'acier 42 Cr Mo4

C (%)	Si	Mn	Cr	P	S	C	Mo
1,9-	0,40	0,60-	0,90-	<0,035	<0,035	0,38-0,45	0,15-
2,2	Maxi	0,90	1,20				0,30
E(Mpa)		Rm(N/mm ²)		A(%)		Re (N/mm ²)	
210000		750/1300		10-14		500 /900	



(a) Outil à pion cylindrique fileté.



(b) Outil à pion tronconique fileté.

Figure 3 : Géométries des outils de soudage utilisés

Les paramètres de soudage utilisés dans cette étude sont résumés dans le tableau 4.

Tableau 4 : Paramètres de soudage utilisés

ω (rpm)	710	1000	1400	2000	Pénétration (mm)
	16	16	40	40	0,1
V	25	25	80	80	0,2
(mm/min)	50	50	100	100	0,3
	80	80	200	200	0,35
	150	150	400	400	0,40

Les éprouvettes de traction ont été fabriquées selon la norme (ASTM E8M-04) [7] pour évaluer les propriétés de traction des joints. Les propriétés mécaniques globales du joint de soudure sont déterminées par des essais de traction monotone sur éprouvettes haltères prises perpendiculairement à la direction de soudage (figure 4).

Les caractéristiques géométriques de ces échantillons sont données en mm. Les éprouvettes sont après polies pour des mesures de micro-dureté perpendiculaire à l'axe de soudage. Des prises de mesure sont effectués chaque millimètre.

Des essais de traction ont été effectuées en utilisant une machine universelle de traction à une vitesse transversale de 2 mm / min.

Des microstructures des éprouvettes de traction ont été caractérisées par microscope optique de marque Optika- B350 (Figure 5), trin-oculaire avec grossissement max. X1000, a fin de comprendre le mode de défaillance.

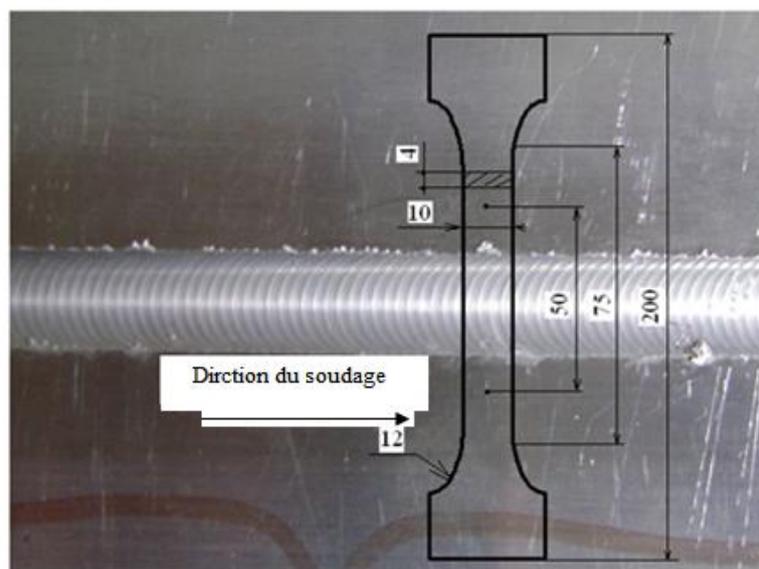


Figure 4 : Découpage d'éprouvettes dans des tôles soudées par FSW



Figure 5: Microscope optique

9. Résultats et discussion

a. Profil de la microdureté et de la microstructure

Plusieurs études ont montrées que le profil de dureté des plaques soudées par le procédé FSW avec différents paramètres de soudage peut être un indicateur direct de la microstructure et les propriétés mécaniques du processus FSW [8].

La figure 6 montre l'évolution des variations de dureté le long de la section transversale de la soudure pour divers paramètres de soudage. En règle générale, le profil type de la microdureté d'un joint soudé FSW est une forme de W. En effet, ce type de profil est caractérisé par deux valeurs minimales de microdureté ($Hv1$) min et ($Hv2$) min. Ces deux points sont situés dans la ZATM. Dans la zone fondue (ZF), la valeur de microdureté augmente par rapport à la ZATM, correspondant au deuxième minimum. Il convient de souligner que la taille de la zone ZF est régie par le diamètre du pion D_p tandis que la zone ZATM est générée par la taille de l'épaulement de l'outil D_{ep} .

En outre, la figure 6 montre que la ZATM est la région la plus faible dans une structure soudée par le procédé FSW. Quelles que soient les paramètres de soudage il y a eu une diminution de la dureté dans la zone affectée thermiquement qui est due au phénomène de restauration. Ce phénomène se caractérise par la recombinaison et le réarrangement des dislocations [9]. Au bord de la zone affectée thermiquement ZAT et la ZATM la structure granulaire est complètement recristallisé. Cette recristallisation a lieu près de la ZATM où une diminution significative de la dureté est détectée.

La figure 6 montre aussi que le couple de soudage (40 mm / min, 1000 rpm) donne une petite valeur de la microdureté (33 HV) dans la ZATM. Ce résultat n'a rien de surprenant, car une petite vitesse de soudage génère une température élevée dans le joint qui crée une soudure à chaud. Par conséquent, il est clair que l'échec des éprouvettes de traction est souvent situé dans la région de la ZATM ou dans une région entre la ZATM et la ZAT. D'autre part, les valeurs de dureté ont été réduites à une vitesse de soudage élevée, car la température de l'outil est réduite ce qui conduit à une soudure à froid.

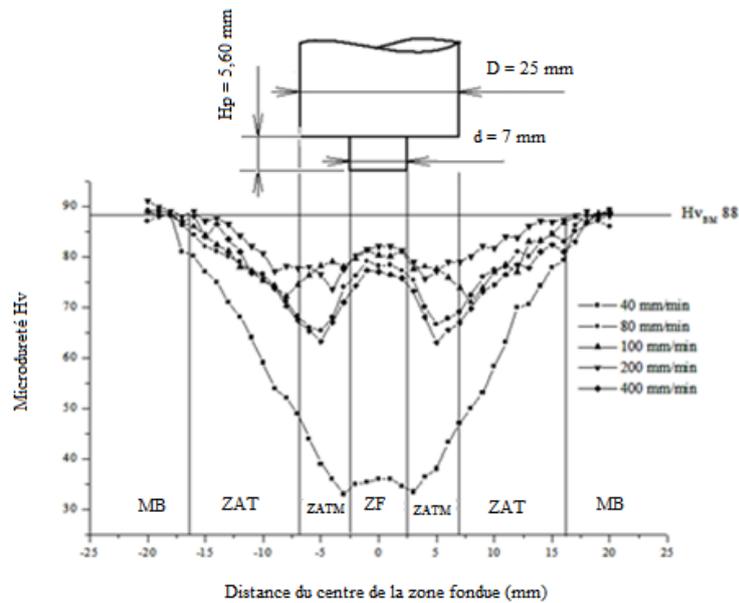


Figure 6 : Variation de la microdureté pour une vitesse de rotation de 1000tr/min

b. Essai de traction

Pour le soudage par friction malaxage FSW, les domaines de soudabilité opératoire se limitent à la phase de soudage et à l'étude des paramètres principaux F_z , V_a et N (Effort axial, vitesse d'avancement et de rotation respectivement). Nous pouvons voir que différents défauts peuvent être observés en fonction du rapport vitesse d'avancement et de rotation.

La figure 7 illustre les éprouvettes haltères adoptées lors de l'essai de traction monotone.

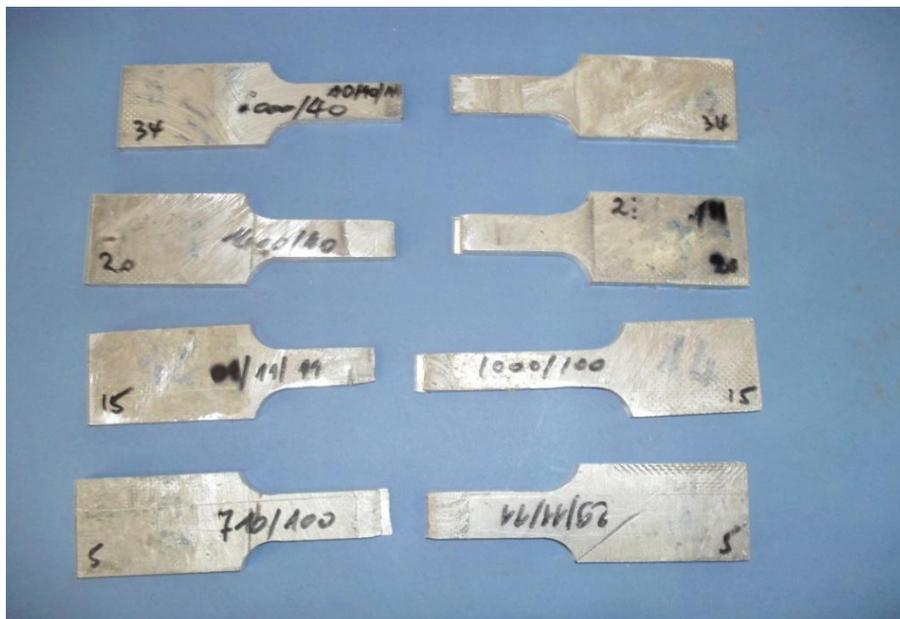


Figure 7 : Types d'éprouvettes utilisées pour les essais de traction

La réalisation d'un essai de traction statique sur nos éprouvettes nous permet de tracer la courbe effort/déformation. Nous dépouillerons ensuite la courbe afin de déterminer les valeurs

classiques (R_e , R_m , $A\%$, E , ...). Enfin, nous établirons la courbe rationnelle pour en déterminer la loi de comportement expérimentale ($\sigma = f(\epsilon)$).

La machine de traction utilisée est à enregistrement électronique (figure 8):

- le déplacement de la traverse se déroule à vitesse constante (1 mm/mn).
- la force appliquée est mesurée à l'aide d'un capteur à jauges extensométriques.
- l'allongement de l'éprouvette est mesuré par un extensomètre à jauges.

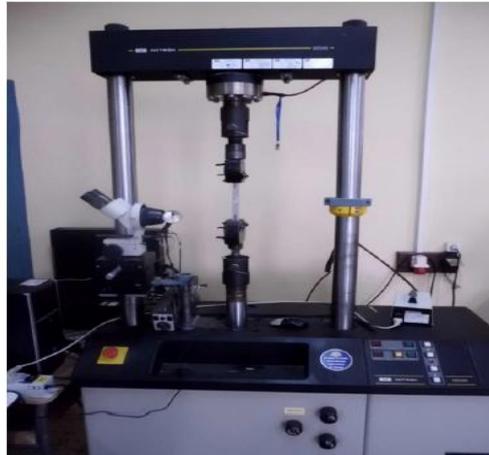


Figure 8 : Machine de traction monotone

Des essais de traction ont été effectués sur des éprouvettes soudées bout à bout permettent de mesurer les propriétés mécaniques globales du joint soudé. Pour les soudures bout à bout dans le cas du procédé FSW, la défaillance est survenue systématiquement dans la transition de la ZATM (coté avance).

La figure 9 illustre l'évolution de la résistance R_m des joints soudés fonction de la déformation en utilisant différentes vitesses de rotation (N) et celles de soudage (V_a). Ces courbes montrent les effets des paramètres de soudage sur la résistance mécanique des joints soudés, qui sont comparés à la valeur de limite d'élasticité du métal de base (155 MPa).

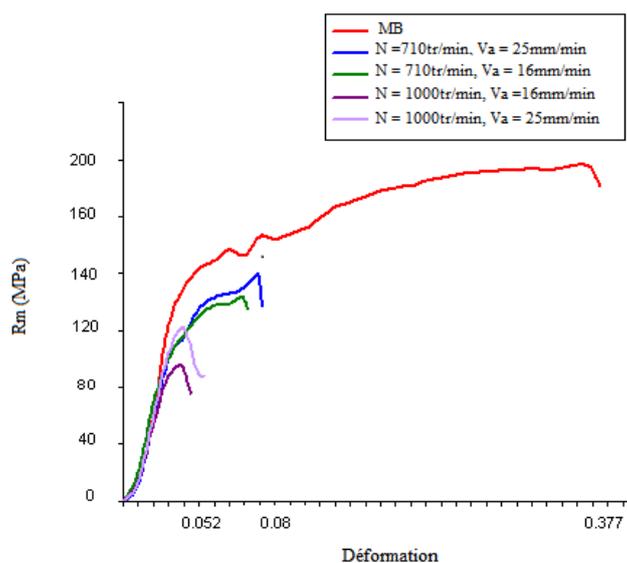


Figure 9 : Courbes de traction des plaques soudées comparées au métal de base

c. Observations au microscope optique

La figure 10 montre les surfaces de rupture pour toutes les configurations de FSW testées dans cette étude.

Il est à noter que les faciès les plus homogènes situées pour des vitesses de rotation de 1000 à 1400 tr / min et des vitesses de soudage de 40 à 200 mm / min.

Mais le choix d'une faible vitesse de soudage conduit à une augmentation du temps de soudage, donc idéal pour l'industrie de prendre la vitesse de soudage comprise entre 100 et 200 mm / min.

Des faciès de rupture pour le régime de vitesse de rotation de 2000tr/min présentent les observations suivantes:

La production de chaleur élevée et un fort mélange à l'épaulement.

- Le matériau est conduit sous l'épaulement à la racine
- Apparition de deux noyaux
- Apparition d'un défaut (trou) de type « wormhole»

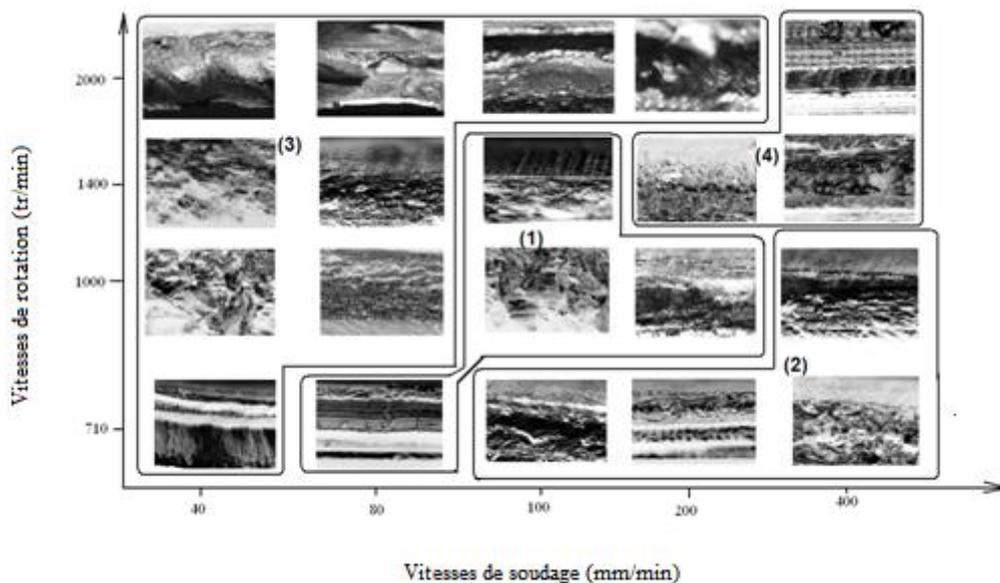


Figure 10 : Surface de rupture de l'alliage FSW 5083 H111

Pour faciès de rupture à une vitesse de soudage élevée 400 mm / min: la couche limite minimale pour le mouvement constant de la matière n'est pas atteinte à cause de manque de pénétration [10].

10. Conclusion

Suite aux difficultés rencontrées dans le soudage par friction malaxage par tous les utilisateurs antérieurs de cette technique à cause de la négligence de l'effort (paramètre très important), l'objectif de notre présent travail est de simuler cet effort uniquement par la profondeur de pénétration de l'épaulement de l'outil.

Il a pour but de corrélérer les paramètres-procédé et les caractéristiques mécaniques et microstructurales des tôles d'aluminium soudées par la technique FSW.

Les résultats obtenus nous ont permis de comprendre mieux encore que la profondeur de pénétration de l'épaulement (absence de capteur de force) joue un rôle primordial sur la qualité de soudage FSW.

L'importance des phénomènes thermiques et mécaniques dépend à la fois de la nature du matériau et du choix des paramètres (géométrie, positionnement et inclinaison de l'outil (1 à 3°), vitesse de rotation et d'avance profondeur de pénétration à la force appliquée du pion et de l'épaulement.

D'après les essais effectués sur l'alliage d'aluminium 5083 H111, la profondeur optimale est $P_{ép}=0,3\text{mm}$ permet d'obtenir des bonnes qualités de soudure sans présence de défauts. Ce résultat est confirmé par des observations au microscope optique.

Références

1. .S. Mishra, Z.Y. Ma, Friction stir welding and processing, Materials Science and Engineering R, Volume 50, Issue 1-2, 2005, p1-78.F. Joly, P. Vasseur, G. Labrosse, Soret instability in a vertical Brinkman porous enclosure. Numer. Heat Transfer, Part A, 39 (2001) 339–359.
2. James, M. James et M. Mahoney. Proc. 1st International on friction stir welding, Thousand Oaks, California, USA, June 1999.
3. Skrotzki, B. Skrotzki and J. Mucken. Proceedings from Materials Solutions Conference, Indianapolis, IN, ASM International, November 2001
4. R. Rai, A. De, H. K. D. H. Bhadeshia and T. DebRoy, Review: friction stir welding tools Science and Technology of Welding and Joining 2011 VOL 16 NO 4 325-342
5. S. Zimmer. Contribution à l'industrialisation du soudage par friction malaxage, Arts et Métiers pari Tech, Thèse soutenue 8 déc. 2009.
6. Lapasset. Frigaard, G. Lapasset et A. Denquin. SF2M, Paris, 2001
7. P. Cavaliere, A. Squillace, F. Panella, Effect of welding parameters on mechanical and microstructural properties of AA6082 joints produced by friction stir welding, journal of materials processing technology, 200 (2008) 364–372
8. T. Saeid, A. Abdollah-zadeh, H. Assadi, F. Malek Ghaini, Effect of friction stir welding speed on the microstructure and mechanical properties of a duplex stainless steel, Materials Science and Engineering A 496 (2008) 262–268
9. P. Edwards and M. Ramulu, Peak temperatures during friction stir welding of Ti–6Al–4V, Science and Technology of Welding and Joining, 2010, 15, pp.468-472
10. A. Tronci, R. McKenzie, R. M. Leal and D. M. Rodrigues, Microstructural and mechanical characterisation of 5XXX-H111 friction stir welded tailored blanks, Science and Technology of Welding and Joining, 2011, 16-5, pp. 433-439