

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Ferhat Abbas- Sétif 1

Institut : Optique et Mécanique de Précision

Département : Technologies des matériaux

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Optique et Mécanique de Précision

Spécialité : mécanique des matériaux

Mémoire de Master

Soudage par friction-malaxage des alliages à durcissement structural

Etudié par : Bouaroudj Rayen

Dirigé Par : Pr. Ouakdi Elhadj

Devant le jury :

Pr. Louahdi Rachid (Président)
MCA. Redjachta Abdelouahab (Examineur)

Soutenue le : 02/07/2023

Sommaire

Remerciements	I
Dédicaces	II
Sommaire	III
Liste des figure	VI
Liste des tableaux	VIII
liste des Abréviations	IX
Résumé.....	IX
Introduction générale.....	1

Chapitre I : Les alliages d'aluminium

I.1	Introduction	3
I.2	Historique de l'aluminium.....	3
I.3	Obtention de l'aluminium.....	3
I.4	Propriétés de l'aluminium	4
I.5	Principaux alliages d'aluminium	4
I.5.1	Les alliages de corroyage	4
I.5.2	Les alliages de fonderie.....	5
I.6	Désignation des alliages d'aluminium.....	6
I.6.1	Désignation des alliages corroyés	6
I.6.2	Désignation des alliages de moulage	6
I.6.3	Désignation des états métallurgiques	6
I.7	Généralité sur la série 6000	7
I.8	L'alliage d'aluminium 6061	9
I.8.1	Propriétés chimiques	9
I.8.2	Propriétés mécaniques	9
I.9	Traitements thermiques des alliages d'aluminium	10
I.9.1	Traitement d'homogénéisation	10
I.9.2	Traitement d'adoucissement	10
I.9.3	Traitement de durcissement structural	10
I.9.3.1	Mise en solution.....	10
I.9.3.2	Trempe.....	11

I.9.3.3	vieillessement	11
I.10	Conclusion	12

Chapitre II : Soudage par friction malaxage

II.1	Introduction	14
II.2	Principaux domaines d'application	14
II.2.1	Applications aérospatiales	14
II.2.2	Applications automobile et ferroviaire	15
II.2.3	Applications du nucléaire	16
II.2.4	Applications navales	16
II.3	Description du procédé	17
II.3.1	Principe général	17
II.4	Les différents types de soudage par friction malaxage	18
II.5	Paramètres du soudage par friction malaxage	19
II.5.1	Vitesse de rotation et d'avance	19
II.5.2	Force verticale exercée par l'outil	20
II.5.3	Angle d'inclinaison de l'outil	20
II.5.4	L'outil de soudage par friction malaxage	21
II.6	Caractéristiques d'un joint de soudure FSW	23
II.6.1	Caractéristiques microstructurales	23
II.6.2	Caractéristique mécanique d'un joint FSW	25
II.6.2.1	Micro dureté	25
II.6.2.2	Résistance à la traction	25
II.7	Défauts rencontrés en FSW	26
II.8	Avantages et limitations du procédé FSW	27
II.9	Conclusion	28

Chapitre III : Procédure expérimentale

III.1	Introduction	30
III.2	Matériau utilisé	30
III.3	Procédé du soudage	30
III.3.1	Préparation des échantillons de soudage	30
III.3.2	Outil de soudage utilisé	31
III.3.3	Fraiseuse	31

III.3.4	Procédure de soudage	32
III.4	Découpage d'éprouvettes	33
III.5	Traitements thermiques	34
III.6	Caractérisation des joints de la soudure	36
III.6.1	Caractérisation microstructurale	36
III.6.1.1	Caractérisation par microscope optique.....	38
III.6.2	Caractérisation mécanique	39
III.6.2.1	Essai de microdureté	39
III.6.2.2	Essai de traction	40
III.6.2.3	Essai de Charpy.....	41
III.7	Conclusion	42

Chapitre IV: Résultats et discussions

IV.1	Introduction	44
IV.2	Soudures des tôles en Al6061.....	44
IV.2.1	Inspection visuelle des joints de soudure	44
IV.2.2	Défauts identifiés via un contrôle visuel	44
IV.2.2.1	Aspect visuel du cordon.....	44
IV.2.2.2	Défauts à l'échelle microstructurale (défaut interne).....	46
IV.3	Caractérisation mécanique.....	47
IV.3.1	Caractérisation à la traction des joints de soudure	47
IV.3.2	Analyse des faciès de rupture sur essais de traction.....	50
IV.3.3	Caractérisation aux chocs (pendule de Charpy).....	51
IV.3.4	Caractérisation de microdureté Hv	52
IV.3.4.1	Etude de Hv pour les joints soudés non traités	52
IV.3.4.2	Etude de Hv pour les Joints soudés traités	54
IV.4	Analyse métallographique de la soudure	55
IV.4.1	Macrographie	55
IV.4.2	Micrographie	56
	Conclusion générale	65
	Références	67

Liste des figure

Chapitre I

Figure I. 1 : Procédé de fabrication de l'aluminium.	3
Figure I. 2 : Partie du diagramme d'équilibre Aluminium-Mg ₂ Si, coupe pseudo binaire.	8
Figure I. 3 : La mise en solution.	12

Chapitre II

Figure II. 1 : Utilisation du procédé FSW pour souder les réservoirs de carburant de ses fusées Delta par la compagnie Boeing.....	15
Figure II. 2: Panneau de fuselage soudé par FSW sur Eclipse 500.....	15
Figure II. 3 : Application du soudage par FSW par points	16
Figure II. 4 : Soudage par FSW trains, (a) Hitachi train Séries 700, (b) Technique de soudage des carrosseries des trains Hitachi	16
Figure II. 5 : a) Bateau en aluminium construit en utilisant FSW, (b) Panneaux	17
Figure II. 6 : Principe général du FSW	17
Figure II. 7 : Etapes du procédé de FSW, (a) étape 1 : la plongée, (b) étape2 : le soudage, (c) étape 3 : extraction.....	18
Figure II. 8 : Configurations de joint de soudure FSW.....	19
Figure II. 9 : Angle d'inclinaison de l'outil.	21
Figure II. 10: Différentes géométries et formes utilisées pour l'épaulement d'un outil FSW.....	22
Figure II. 11: Synthèse des géométries et des formes utilisées pour les pion.....	23
Figure II. 12 : Macrographie d'un cordon de soudure FSW lors du soudage bout à bout de deux plaques d'aluminium.	23
Figure II. 13: Microstructure d'un joint soudé pour un alliage d'aluminium de type 2024.	24
Figure II. 14 : Profil de dureté dans le cordon de soudure.....	25
Figure II. 15 : Exemples de défauts rencontrés en FSW.....	27

Chapitre III

Figure III. 1 : Pièce plate d'aluminium.	30
Figure III. 2: L'outil de soudage utilisé.	31
Figure III. 3: Machine de fraisage utilisé.....	32
Figure III. 4: L'opération de soudage.	32
Figure III. 5: Pièces soudées avec différente vitesse de malaxage.	33
Figure III. 6: Découpe des échantillons sur les plaques soudées.....	34
Figure III. 7: Machine d'électroérosion à fil.	34
Figure (III. 8) : Diagramme d'équilibre Al-Si montrant la position de l'alliage 6061 lors de sa mise en solution.	35
Figure III. 9 : Cycle de traitement thermique utilisé.....	36
Figure III. 10: Four à moufle utilisé.	36
Figure III. 11: Moyens d'enrobage à froid utilisé.....	37
Figure III. 12: Polisseuse de type Mecatech 234 utilisé.	38
Figure III. 13: les pièces après le polissage	38
Figure III. 14: Microscope optique.....	39
Figure III. 15: Duromètre.	40

Figure III. 16: Machine de traction au cours d'essai.	41
Figure III. 17: L'éprouvette normalisée pour l'essai de traction.	41
Figure III. 18: Dispositif de Charpy en fonctionnement (a) et le schéma de fonctionnement (b) : 1) couteau, 2) éprouvette K_V et 3) appuis.	42
Figure III. 19: L'éprouvette normalisée pour l'essai de résilience.	42

Chapitre IV

Figure IV. 1 : Macrographie d'un joint de soudure. $V_r=1400$ tr/min.	44
Figure IV. 2: Défaut de manque de marquage de l'épaulement sur la surface des pièces. $V_a=31,5$ mm/mn, $V_r=1000$ tr/mn.	45
Figure IV. 3: Illustration du manque de marquage de l'empreinte de l'outil lors de sa sortie de la matière. $V_a=31,5$ mm/mn, $V_r=710$ tr/mn.	45
Figure IV. 4: Bavures excessives le long du joint. $V_a=31.5$ mm/min, $V_r=1400$ tr/min.	45
Figure IV. 5: Présence de défauts de surface de type éraillures laissés par le passage de l'épaulement. $V_a=31,5$ mm/mn, $V_r=710$ tr/mn.	46
Figure IV. 6: Soudure comportant deux défauts, défaut tunnel interne et un film d'oxydes.	46
Figure IV. 7: Effet de la vitesse de rotation sur la résistance mécanique du joint de soudure.	47
Figure IV. 8: Courbes de traction de l'alliage brut Al6061 (avant et après traitement).	48
Figure IV. 9: Courbes de traction des éprouvettes traitées après soudage.	49
Figure IV. 10: Histogramme de la résistance pour les différentes vitesses de rotation de l'outil.	50
Figure IV. 11: Faciès de rupture observée après un essai de traction. . $V_a=31.5$ mm/min, $V_r=1000$ tr/min.	50
Figure IV. 12: Variation de l'énergie en fonction de la vitesse de rotation.	51
Figure IV. 13: Microstructure de métal de base montre la présence des précipités.	52
Figure IV. 14: Apparition des pores dans le noyau (image prise par le MEB). $V_a=31.5$ mm/min, $V_r=1000$ tr/min.	53
Figure IV. 15: Influence de V_r sur le profil de dureté des joints soudés, mesurée à une profondeur de 0.5mm au-dessous de la surface de frottement avec l'épaulement de l'outil.	53
Figure IV. 16: Influence de V_r sur le profil de dureté des joints soudés mesurée à une profondeur de 2.5mm au-dessous de la surface de frottement avec l'épaulement de l'outil.	54
Figure IV. 17: Influence de V_r et de traitement thermique sur le profil de dureté des joints soudés à une profondeur de 0.5mm au-dessous de la surface de frottement avec l'épaulement de l'outil.	55
Figure IV. 18: Influence de V_r et de traitement thermique sur le profil de dureté des joints soudés à une profondeur de 2.5mm au-dessous de la surface de frottement avec l'épaulement de l'outil.	55
Figure IV. 19: Observation par microscopie optique des différentes zones de la soudure FSW bout à bout. Paramètres de soudage : $V_r=1400$ tr/min ; $V_a=31.5$ mm/min.	56
Figure IV. 20 : La microstructure du matériau de base, a) avant traitement, b) après traitement.	57
Figure IV. 21: Microstructures des échantillons soudés non traités $V_r=710$ tr/min.	58
Figure IV. 22 : Microstructures des échantillons soudés non traités $V_r=1000$ tr/min.	59
Figure IV. 23: Microstructures des échantillons soudés non traités $V_r=1400$ tr/min.	60
Figure IV. 24: Microstructures des échantillons traités $V_r=710$ tr/min.	61
Figure IV. 25: Microstructures des échantillons traités $V_r=1000$ tr/min.	62
Figure IV. 26: Microstructures des échantillons traités $V_r=1400$ tr/min.	63

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I. 1: Familles d'alliages d'aluminium et type de durcissement associé	5
Tableau I. 2 : Composition chimique de l'alliage 6061	9
Tableau I. 3: Résumé des propriétés mécaniques de l'alliage 6061 corroyé, à l'état brut	9
Tableau I. 4: Résumé des propriétés mécaniques de l'alliage 6061 corroyé, à l'état T6	10

Chapitre III

Tableau III. 1 : Composition chimique de l'alliage Al 6061 étudié.	30
--	----

Chapitre IV

Tableau IV. 1 : Taille moyenne des grains du noyau du joint de soudure ayant subi un recuit et un revenu	49
---	----

Introduction générale

Les alliages d'aluminium de la série 6XXX sont couramment utilisés pour alléger les structures de transport aérien, naval et terrestre. Cependant, ces alliages sont difficiles à souder par les méthodes conventionnelles et le rivetage demeure le principal moyen d'assemblage. Ce processus présente de nombreux inconvénients tels qu'une jonction hétérogène entre les deux tôles, le surcroît de masse ainsi que la concentration de contraintes au niveau des trous, ce qui peut entraîner des dommages importants en termes de résistance à la fatigue.

Le soudage par friction malaxage (Friction Stir Welding) est un nouveau procédé d'assemblage inventé au début des années 90 au sein de l'institut de soudure Britannique TWI. Ce procédé consiste à souder à l'état solide sans apport de matière, **ce qui élimine les défauts liés à la solidification et entraîne des contraintes internes plus faibles que le soudage classique** (soudage laser ou à l'arc). Des alliages dits "difficilement soudables", tels que les alliages d'aluminium de la série 6XXX, peuvent alors être assemblés.

L'objectif principal de notre étude est d'effectuer une série de soudure par le procédé de soudage FSW pour mettre en évidence l'effet des deux vitesses (rotation, avance) et pour comprendre l'évolution des caractéristiques mécaniques et microstructurales du cordon obtenu et voir l'influence du traitement thermique de vieillissement post-soudage afin d'optimiser les paramètres influant sur la qualité des joints. Les essais seront effectués sur l'alliage 6061 à l'aide d'une fraiseuse universelle. L'outil utilisé pour le malaxage est en acier rapide (HSS Co5). De ce fait, notre travail est structuré de la façon suivante :

Dans le premier chapitre, nous présentons des généralités sur les alliages d'aluminium, en mettant l'accent sur les alliages de la série 6XXX, auxquels appartient l'alliage objet de notre étude. Le deuxième chapitre comporte une description du procédé de soudage par friction-malaxage, ses paramètres, ses avantages et inconvénients, ainsi que ses applications. Le troisième chapitre décrit les différentes techniques et méthode expérimentales. Le quatrième chapitre rassemble les résultats expérimentaux obtenus par les différentes techniques utilisées, ainsi que leurs interprétations. Nous achèverons ce travail par une conclusion générale avec la présentation de quelques perspectives.