

**Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique**  
**Université Ferhat Abbas- Sétif 1**  
**Institut : Optique et Mécanique de Précision**  
**Département : Optique et mécanique de précision**  
**Domaine : Sciences et Technologies**  
**Filière : Optique et Mécanique de Précision**  
**Spécialité : Mécanique des matériaux**

## Mémoire de Master

# Effet d'un traitement thermique post-soudage sur le comportement mécanique d'un joint de soudure

**Étudié par : Meriem Bouziane**  
**Dirigé par : Pr Elhadj Ouakdi**

Devant le jury :

**Président : Keskes Boualem**  
**Examineur : Mezouar Rabiaa**

Soutenue le : 30 / 06 /2024

# Sommaire

|                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Introduction Générale.....                                                         | 9  |
| Chapitre I : Les alliages d'aluminium .....                                        | 12 |
| I.1 Introduction : .....                                                           | 13 |
| I.2 Généralités sur les alliages d'aluminium: .....                                | 13 |
| I.2.1 Composition : .....                                                          | 13 |
| I.2.2 Propriétés : .....                                                           | 13 |
| I.2.3 Classification : .....                                                       | 13 |
| I.2.4 Application : .....                                                          | 13 |
| I.2.5 Transformation : .....                                                       | 14 |
| I.3 Aluminium série 5000 : .....                                                   | 14 |
| I.4 Alliages 5086 : .....                                                          | 15 |
| I.5 Influence des éléments d'addition : .....                                      | 15 |
| I.6 Les catégories d'alliages d'aluminium : .....                                  | 16 |
| I.6.1 Les alliages à durcissement structural : .....                               | 16 |
| I.6.2 Les alliages à durcissement par écrouissage : .....                          | 17 |
| I.7 Traitements thermiques des alliages d'aluminium 5086: .....                    | 18 |
| I.7.1 Traitement de durcissement par écrouissage : .....                           | 18 |
| I.7.2 La mise en solution : .....                                                  | 19 |
| I.7.3 La trempe : .....                                                            | 20 |
| I.8 Conclusion : .....                                                             | 20 |
| Chapitre 02 : Soudage par friction malaxage .....                                  | 21 |
| II.1 Introduction : .....                                                          | 22 |
| II.2 Le principe de soudage par friction malaxage FSW : .....                      | 22 |
| II.2.1 Phase de pénétration : .....                                                | 24 |
| II.2.2 Phase de soudage : .....                                                    | 24 |
| II.2.3 Phase de retrait : .....                                                    | 25 |
| II.3 Les différentes configurations possibles pour le soudage FSW: .....           | 26 |
| II.4 Structure générale des assemblages obtenus par FSW (la microstructure): ..... | 27 |
| II.5 Les paramètres : .....                                                        | 29 |
| II.5.1 Les paramètres du procédé : .....                                           | 29 |
| II.5.2 Paramètres d'outil : .....                                                  | 31 |
| II.6 Description et origines des défauts : .....                                   | 33 |

|                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------|----|
| II.7 Avantages et inconvénients du procédé :                                    | 34 |
| II.8 Phénomènes physiques se produisant lors du soudage par friction malaxage : | 35 |
| II.9 Applications :                                                             | 37 |
| II.10 Conclusion :                                                              | 38 |
| Chapitre 03 : Processus expérimentaux.....                                      | 39 |
| III.1 Introduction :                                                            | 40 |
| Matériaux utilisés :                                                            | 40 |
| III.3 Procédé du soudage :                                                      | 40 |
| III.3.1 Préparation des échantillons :                                          | 40 |
| III.3.2 Outil de soudage utilisé :                                              | 41 |
| III.3.3 Machine utilisée :                                                      | 42 |
| III.3.4 Procédure du soudage :                                                  | 42 |
| III.4 Traitement thermique :                                                    | 44 |
| III.5 Caractérisation des joints de la soudure :                                | 44 |
| III.5.1 Caractérisation microstructurale :                                      | 44 |
| III.5.2 Caractérisation par microscope optique :                                | 47 |
| III.5.3 Caractérisation mécanique :                                             | 47 |
| III.6 Conclusion :                                                              | 51 |
| IV.Chapitre 04 : Résultats et discussions .....                                 | 52 |
| IV.1 Introduction :                                                             | 53 |
| IV.2 Soudure des tôles en Al 5086 :                                             | 53 |
| IV.2.1 Inspection visuelle des joints de soudure :                              | 53 |
| IV.2.2 Défauts identifiés via un contrôle visuel :                              | 53 |
| IV.3 Caractérisation mécanique :                                                | 55 |
| IV.3.1 Caractérisation à la traction des joints de soudure :                    | 55 |
| IV.3.2 Caractérisation aux chocs (pendule de Charpy) :                          | 57 |
| IV.3.3 Caractérisation de micro dureté HV :                                     | 58 |
| IV.4 Analyse métallographique de la soudure :                                   | 60 |
| IV.4.1 Macrographie :                                                           | 60 |
| IV.4.2 Micrographie :                                                           | 61 |
| Conclusion Générale .....                                                       | 65 |
| Références .....                                                                | 66 |

## Liste des Figures:

|                                                                                                                                                                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 1. 1:Applications en alliage d'aluminium série 5000. [4].....                                                                                                                                          | 15 |
| Figure 1. 2:Diagramme de recristallisation.[2] .....                                                                                                                                                          | 19 |
| Figure 1. 3:Diagramme d'équilibre hypo- eutectique d'un alliage à durcissement structural de composition C0. [2].....                                                                                         | 19 |
| Figure2. 1:Représentation schématique du principe de soudage par friction-malaxage. [11].                                                                                                                     | 22 |
| Figure2. 2:Génération du cordon de soudure de proche en proche.[11] .....                                                                                                                                     | 23 |
| Figure2. 3:Présentation du soudage par friction-malaxage. [11] .....                                                                                                                                          | 24 |
| Figure2. 4:Schématisation de phase de pénétration. ....                                                                                                                                                       | 24 |
| Figure2. 5:Schématisation de phase de soudage.[11] .....                                                                                                                                                      | 25 |
| Figure2. 6:Schématisation de phase de retrait de l'outil. [11] .....                                                                                                                                          | 26 |
| Figure2. 7:Les différentes configurations de soudage effectuées par FSW : (a) bout à bout, (b) en coin, (c) en T, (d) transparence, (e) transparence multiple, (f) T par transparence, et (g) angle.[14]..... | 26 |
| Figure2. 8:Macrographie d'un cordon de soudure FSW lors du soudage bout à bout de deux plaques d'aluminium.[19] .....                                                                                         | 27 |
| Figure2. 9:Observation microscopique des différentes zones de la soudure FSW 2024-T3/2024-T3 côté AS et côté RS.[11].....                                                                                     | 28 |
| Figure2. 10:Visualisation des paramètres des soudages.[21].....                                                                                                                                               | 31 |
| Figure2. 11:Angle d'inclinaison de l'outil. [25] .....                                                                                                                                                        | 31 |
| Figure2. 12:Schématisation de l'outil FSW et de quelques géométries de pions et d'épaulements.[28].....                                                                                                       | 32 |
| Figure2. 13:Les différentes technologies d'outil existant.[11] .....                                                                                                                                          | 32 |
| Figure2. 14:Exemples de défauts rencontrés en FSW. [28].....                                                                                                                                                  | 34 |
| Figure2. 15:Assemblage de l'avion Eclipse 500 avec le procédé de FSW .[36] .....                                                                                                                              | 37 |
| Figure2. 16:Application du soudage par FSW par points.[36].....                                                                                                                                               | 38 |
| Figure2. 17:Technique de soudage des carrosseries des trains Hitachi. [13].....                                                                                                                               | 38 |
| Figure 3.1:dispositif de fixation de FSW .Figure 3 2::Nettoyage de la surface .....                                                                                                                           | 41 |
| Figure 3.3:pièces plates d'aluminium de 5mm à l'état nétoyé.....                                                                                                                                              | 41 |
| Figure 3.4:l'outil de FSW utilisé.....                                                                                                                                                                        | 41 |
| Figure 3.5:Fraiseuse utilisée.....                                                                                                                                                                            | 42 |
| Figure 3.6:la procédure de soudage .....                                                                                                                                                                      | 42 |
| Figure 3.7:les échantillons découpés.....                                                                                                                                                                     | 43 |
| Figure 3.8:Four à moufle utilisé.....                                                                                                                                                                         | 44 |
| Figure 3.9:Moyens d'enrobage à froid utilisé. ....                                                                                                                                                            | 45 |
| Figure 3.10:Polisseuse de type Mecatech 234 utilisé.....                                                                                                                                                      | 46 |
| Figure 3.11:Les pièces polies pour observation microscopique et pour essais de dureté. ....                                                                                                                   | 46 |
| Figure 3.12:Microscope optique. ....                                                                                                                                                                          | 47 |

|                                                                                                                                                                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 3.13:Machine de traction au cours d'essai.....                                                                                                                                                            | 48 |
| Figure 3.14:Les éprouvettes normalisées pour l'essai de traction..                                                                                                                                               | 48 |
| Figure 3.15:Dispositif de Charpy en fonctionnement (a) et le schéma de fonctionnement (b) :<br>1) couteau, 2) éprouvette KV et 3) appuis. ....                                                                   | 49 |
| Figure 3.16:L'éprouvette normalisée pour l'essai de résilience. ....                                                                                                                                             | 50 |
| Figure 3.17:Duromètre. ....                                                                                                                                                                                      | 51 |
| Figure 4.1:Macrographie d'un joint de soudure. $V_r=1400$ tr/min..                                                                                                                                               | 53 |
| Figure 4.2:Bavures excessives le long du joint. $V_a=10$ mm/min, $V_r=1400$ tr/min .....                                                                                                                         | 54 |
| Figure 4.3:Illustration du manque de marquage de l'empreinte de l'outil lors de sa sortie de la<br>matière. $V_a= 10$ mn, $V_r=1400$ tr/mn.....                                                                  | 54 |
| Figure 4.4:Présence de défauts de surface de type éraillures laissés par le passage de<br>l'épaulement. $V_a= 10$ mm/mn, $V_r=1400$ tr/mn.....                                                                   | 55 |
| Figure 4.5:Courbes de traction de l'alliage brut Al5086.....                                                                                                                                                     | 56 |
| Figure 4.6:Effet du traitement thermique sur la résistance mécanique du joint de soudure. ...                                                                                                                    | 56 |
| Figure 4.7:phénomène de recristallisation .....                                                                                                                                                                  | 57 |
| Figure 4.8:Variation de l'énergie en fonction du temps de traitement thermique .....                                                                                                                             | 57 |
| Figure 4.9:Influence des traitements thermiques sur le profil de dureté des joints soudés,<br>mesurée à une profondeur de 0.5mm au-dessous de la surface de frottement avec l'épaulement<br>de l'outil. ....     | 58 |
| Figure 4.10 : Influence des traitements thermiques sur le profil de dureté des joints soudés,<br>mesurée à une profondeur de 2.5 mm au-dessous de la surface de frottement avec<br>l'épaulement de l'outil. .... | 59 |
| Figure 4.11: Observation par microscopie optique des différentes zones de la soudure FSW<br>bout à bout. Paramètres de soudage : $V_r=1400$ tr/min ; $V_a=10$ mm/min. ....                                       | 60 |
| Figure 4.12: La microstructure du matériau de base, a) avant traitement, b) après traitement.                                                                                                                    | 61 |
| Figure 4.13:Microstructures d'échantillon sans traitement (0min).....                                                                                                                                            | 63 |
| Figure 4.14:Microstructures d'échantillon de traitement de 2heures. ....                                                                                                                                         | 64 |

## Résumé

Dans le cadre de cette recherche, nous avons examiné le comportement mécanique et métallographique des soudures par friction malaxage effectuées sur des plaques en alliage d'aluminium 5086 d'une épaisseur de 5 mm, assemblées bout à bout à l'aide d'une vitesse de rotation 1400 tr/min et une vitesse d'avance de 10 mm/min. Des traitements thermiques post-soudage ont également été réalisés pour améliorer les caractéristiques mécaniques des soudures. Diverses techniques de caractérisation, telles que les essais de traction et de résilience, la microscopie optique et les essais de micro dureté, ont été utilisées. Les résultats démontrent que les échantillons soudés à une vitesse de rotation de 1400 tr/min présentent un équilibre optimal entre les propriétés mécaniques et microstructurales.

**Mots clés :** Soudage par friction malaxage, alliages d'aluminium, traitements thermiques.

## Abstract

As part of this research, we examined the mechanical and metallographic behavior of Friction Stir Welding welds carried out on 5086 aluminum alloy plates with a thickness of 5 mm, assembled end to end using a rotational speed. 1400 rpm and a feed speed of 10 mm/min. Post-weld heat treatments were also carried out to improve the mechanical characteristics of the welds. Various characterization techniques, such as tensile and resilience tests, optical microscopy and micro hardness tests, were used. The results demonstrate that samples welded at a rotational speed of 1400 rpm exhibit an optimal balance between mechanical and microstructural properties.

**Key words:** Friction stir welding, aluminum alloys, heat treatments.