



N° d'ordre :GM/...../2022

MEMOIRE

PRESENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLOME DE : MASTER

Filière : Génie Mécanique
Option : Génie des Matériaux

Thème :

*Etude du procédé de soudage par friction
rotative (RFW) renforcé par particules en céramique*

Soutenue le: 26/06/2022

Par :

- GUEDDOUDJ Fouad
- BOUABDALLAH Messaoud

Devant le jury :

Président : Dr. SAIDANI yamine
Rapporteur : Dr. RAOUACHE Elhadj
Examineur : Dr. KHALFALLAH Fares

2021-2022

Remerciements

*Nous tenons à remercier notre encadreur, **Dr. Raouache Elhadj**, pour ses précieux conseils et son soutien tout au long de la réalisation de ce travail.*

Nous adressons également nos sincères remerciements aux membres du jury pour avoir accepté d'examiner et de juger ce mémoire.

Nous tenons à remercier nos chers parents pour leur patience, leur incessant soutien et leurs innombrables sacrifices depuis notre naissance.

Nous tenons à remercier toutes les personnes qui nous ont aidés à un moment ou à un autre depuis le début de ce long voyage. Les mots ne peuvent exprimer à quel point nous leurs sommes reconnaissant pour tout.

Alors, merci à tous

Enfin, nous aimerions profiter de cette occasion pour remercier tous nos amis et nos collègues.

Dédicaces

« En vérité, le Chemin importe peu, la volonté d'arriver suffit à tout »

Albert Camus

Nous dédions ce modeste travail à :

Ceux qu'on aime le plus au monde, à nos chers parents qui nous ont soutenus dans les moments difficiles avec tout leur amour et leur affection, et qui ont souffert sans plaindre pour nous amener à ce niveau.

***Qu'Allah vous protège et vous accorde une
longue vie***

Tous les membres de nos familles qui nous ont toujours encouragés et soutenus

***Nous vous souhaitons une vie pleine de
bonheur et de réussite, et Qu'Allah vous garde
et vous protège***

Nos chers amis, pour leur aide sans limite et leur présence à nos côtés, leur soutien et leur compréhension

Qu'Allah vous garde et vous protège

Nomenclatures

S	Source de chaleur volumique dans la pièce	
C_f	Coefficient du frottement sur l'épaulement	
F_n	Force de forgeage vertical au déplacement	[kN]
v_w	La vitesse de soudage	[m/s]
$F :$	Force appliquée la Flexion	[kN]
$t :$	Le temps de soudage	[s]
$F :$	Force appliquée la traction	[kN]
$L_0 :$	Longueur initiale	[mm]
$D :$	Diamètre (\emptyset)	[mm]
$E :$	Module de Young	[MPa]
$\Delta L :$	Elongation	[mm]
$Vr :$	La vitesse de rotation.	[tr/min]
$T :$	La température initiale	[°C]
$F_n :$	La force	[N]
$Vg :$	Vitesse d'avance vertical	[m/s]
$HV_{0.2}$	dureté Vickers sous une charge de 200g	[HV]

Liste des figures

Figure 1.1 : Organigramme des procédés de soudage les plus répandus... ..	5
Figure 1.2 : Soudage par diffusion	6
Figure 1.3 : Schéma montrant les principales composantes de l'outillage en soudage par friction 4malaxage (FSW)	7
Figure 1.4 : Soudage par explosion..... ..	8
Figure 1.5 : Soudage par ultrasons : A) schéma du procédé B) machine de soudage.....	9
Figure 1.6 : Illustration schématique du Procédé de soudage par friction linéaire.....	11
Figure 1.7 : Illustration schématique du Procédé de soudage par friction orbitale	12
Figure 1.8 : soudage par friction rotative.....	13
Figure 1.9 : Illustration schématique des différentes zones de la soudure par friction rotative.....	1
Figure 1.10 : Illustration schématique D'un volant de stockage d'énergie dans Un procédé de SFR-EI.	15
Figure 1.11 : Séquences du soudage par friction inertielle.....	16
Figure 1.12 : Caractéristiques des paramètres de soudage par friction inertielle	16
Figure 1.13 : Schéma montrant une alimentation directe par Moteur électrique aligné avec les pièces à souder dans un SFR-ED	17
Figure 1.14 : Schématique présentation du procédé SFR-ED et ses différentes phases.....	18
Figure 1.15 : Le cycle de soudage par friction.....	19
Figure 1.16 : Quelques applications du soudage par friction rotative	21
Figure 2.1 : <i>Bouteille d'alumine AL_2O_3</i>	30
Figure 2.2 : <i>poudre d'alumine AL_2O_3</i>	30
Figure 2.3 : <i>Découpage , Dressage , Perçage</i>	32
Figure 2.4 : Addition AL_2O_3	33
Figure 2.5 : <i>système de soudure par friction rotative</i>	34
Figure 2.6 : <i>photographie du dispositif. A) Thermocouple. B) Ins..tallation de thermocouple sur la pièce rotative</i>	35

Figure 2.7 : <i>coupe transversale et une coupe longitudinale par scie à main.....</i>	36
Figure 2.8 : <i>Enrobage des échantillons.....</i>	36
Figure 2.9 : <i>polisseuse</i>	37
Figure 2.10 : <i>papier abrasif.....</i>	37
Figure 2.11 : <i>échantillons après l'attaque chimique</i>	37
Figure 2.12 : <i>Microscope optique.</i>	38
Figure 2.13 : <i>Micro-d 'uromètre Vickers.....</i>	39
Figure 2.14 : <i>empreinte</i>	39
Figure 2.15 : <i>Machine de traction.....</i>	40
Figure 2.16 : <i>Machine de flexion.....</i>	41
Figure 3.1 : <i>Les échantillons soudés aluminium/aluminium juste après le soudage par friction rotative ...</i>	43
Figure 3.2 : <i>Les sections longitudinales des échantillons soudés.....</i>	44
Figure 3.3: <i>Variations du raccourcissement des joints soudés d'Aluminium 2017A.....</i>	44
Figure 3.4: <i>les mesures de températures enregistrées par une caméra infrarouge.....</i>	45
Figure 3.5 : <i>Variations de température dans la pièce (Aluminium 2017A, l'alumine AL2O3), pendant le processus de soudage.....</i>	46
Figure 3.6 : <i>Profil de la micro-dureté, Vickers.....</i>	47
Figure 3.7 : <i>Courbes de traction pour différents fractions volumiques.....</i>	48
Figure 3.8: <i>Le principe de cet essai.....</i>	48
Figure 3.9 : <i>Éprouvettes après Essai de flexion... ..</i>	49
Figure 3.10 : <i>Coubes de tractions de différentes éprouvettes.....</i>	49

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Combinaisons possibles de matériaux soudables par le soudage par friction.....	21
Tableau 2.1 : composition de l'alliage 2017A en pourcentage massique	29
Tableau 2.2 : Propriétés mécaniques de l'aluminium 2017A.....	30
Tableau 2.3 : Composition chimique de l'alumine (déterminée par XRF).....	31

T ables des matières

Remerciements	
Dédicaces	
Nomenclature	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Table des matières	
Introduction	1

Chapitre 1 : Généralités sur soudage

1.1. Introduction	4
1.2. Définition de soudage.....	4
1.3. Les procédés de soudage	4
1.3.1. Le soudage à l'état solide.....	6
1.3.2. Soudage par diffusion	6
1.3.3. Soudage par friction-malaxage (FSW)	7
1.3.4. Soudage Par Explosion	8
1.3.5. Soudage par ultrason.....	9
1.4. soudage par friction comme technique de soudage à l'état solide	10
1.4.1 Généralités	10
1.4.2. Variantes du procédé de soudage par friction.....	11
1.4.3. Soudage par friction linéaire (SFL)	12
1.4.4. Soudage par friction orbitale (SFO).....	13
1.4.5. Soudage par friction Rotative (SFR).....	13
1.4.5.1. Définition	13
1.4.5.2.les principales étapes d'une soudure typique par un procédé de Friction rotative.	13
1.4.5.3. Microstructure des joints de soudage par friction rotative.....	14

1.5. Les deux principales méthodes de soudage SFR.....	15
1.5.1. Le soudage par friction à entraînement par inertie (SFR-EI)	16
1.5.1.1 Paramètres de soudage par friction inertielle.....	17
1.5.2. Le soudage par friction à entraînement direct (SFR-ED)	18
1.5.2.1. Phases et paramètres de soudage au cours d'un cycle (SFR-ED).....	18
1.5.2.2. Paramètres influents dans le procédé (SFR-ED).....	19
1.6. Combinaisons possibles de matériaux soudables par le soudage par friction	20
1.6.1. Principaux domaines d'application.....	21
1.6.2. Quelques applications du soudage par friction rotative.....	22
1.7. Bibliographie.....	23

Chapitre 2 : Matériaux et procédures expérimentales

2.1	Introduction.....	29
2.2	Partie 1 : Matériaux et équipement utilisés	29
2.2.1	Matériaux utilisés.....	29
2.2.1.1	L'alliage d'aluminium 2017A.....	29
2.2.1.2	L'alumine Al_2O_3	30
2.2.1.3	Préparation des échantillons.....	31
2.2.2	Machine utilisée.....	33
2.2.3	Paramètres du soudage.....	33
2.2.4	Mesures de températures en cours de soudage.....	33
2.3	Partie 2 : techniques de caractérisations.....	34
2.3.1	Caractérisation microstructurale des joints soudés.....	34
2.3.1.1	Préparation des échantillons soudés pour l'observation micrographique.....	34
2.3.1.2	Observations microscopique.....	36
2.3.2	Caractérisation mécanique des joints soudés	37
2.3.2.1	Mesures de micro-dureté Vickers.....	37
2.3.2.2	Essai de traction.....	38
2.3.2.3	Essai de flexion (trois points)	39

2.4Bibliographie.....	41
-----------------------	----

Chapitre 3 : Résultats et discussions

3.1 .Introduction.....	43
3.2 Observations visuel.....	43
3.3 Raccourcissement des joints soudés (brun-off).....	44
3.4 Cycle thermiques.....	45
3.5 Mesures de micro-dureté.....	46
3.6 Essai de traction.....	47
3.7 Essai de flexion.....	48
3.8 Bibliographie	50

Introduction

Le soudage par friction est un procédé de soudage multiple et novateur qui trouve de nombreuses applications dans différentes branches de l'industrie. Les avantages du soudage par friction sont des assemblages de haute qualité, la rapidité du procédé par rapport aux procédés de soudage conventionnels et la possibilité d'une automatisation complète du processus de telle sorte qu'une qualité constante est garantie. De plus, le procédé de soudage par friction offre, dans le cadre de l'environnement, d'importants avantages tels que sans fumées de soudage, sans rayonnement UV ou électromagnétiques. Ainsi, sans métal d'apport ou de gaz de protection.

Ce mémoire est composé de trois chapitres, en plus d'une introduction générale et une conclusion. Les chapitres sont décrits ci- dessous :

Ch. 1 : Procédés de soudage par friction rotative. Ce chapitre fourni une revue bibliographique sur le procédé de soudage par friction rotative, y compris sa définition, son principe et ses modes de fonctionnement.

Ch. 2 : Matériaux et procédures expérimentales. Il décrit la sélection des matériaux utilisés, la préparation des pièces à souder, le montage et le processus expérimental de soudage et les techniques de caractérisation des joints soudés.

Ch. 3 : Résultats et discussion. Les résultats expérimentaux sont illustrés et tracés, puis l'effet de la quantité d'alumine ajoutée sur les propriétés mécaniques des joints est examiné.

Chapitre 1

Généralités sur soudage

Sommaire

1.1. Introduction	4
1.2. Définition de soudage.....	4
1.3. Les procédés de soudage	4
1.3.1. Le soudage à l'état solide.....	6
1.3.2. Soudage par diffusion	6
1.3.3. Soudage par friction-malaxage (FSW)	7
1.3.4. Soudage Par Explosion	8
1.3.5. Soudage par ultrason.....	9
1.4. soudage par friction comme technique de soudage à l'état solide	10
1.4.1 Généralités	10
1.4.2. Variantes du procédé de soudage par friction.....	11
1.4.3. Soudage par friction linéaire (SFL)	12
1.4.4. Soudage par friction orbitale (SFO).....	13
1.4.5. Soudage par friction Rotative (SFR).....	13
1.4.5.1. Définition	13
1.4.5.2.les principales étapes d'une soudure typique par un procédé de Friction rotative.	13
1.4.5.3. Microstructure des joints de soudage par friction rotative	14
1.5. Les deux principales méthodes de soudage SFR.....	15
1.5.1. Le soudage par friction à entraînement par inertie (SFR-EI)	16
1.5.1.1 Paramètres de soudage par friction inertielle.....	17
1.5.2. Le soudage par friction à entraînement direct (SFR-ED)	18

1.5.2.1. Phases et paramètres de soudage au cours d'un cycle (SFR-ED)	18
1.5.2.2. Paramètres influents dans le procédé (SFR-ED).....	19
1.6. Combinaisons possibles de matériaux soudables par le soudage par friction	20
1.6.1. Principaux domaines d'application.....	21
1.6.2. Quelques applications du soudage par friction rotative.....	22
1.7. Bibliographie.....	23

1.1. Introduction

L'assemblage par soudage occupe une place importante dans tous les domaines de l'industrie et de la construction mécanique. Que ce soit pour l'assemblage de bateaux, de trains, d'avions, de fusées, ou encore de voitures, de ponts, de tuyaux, de réservoirs, de tige de forage. La facilité de sa mise en œuvre et le contrôle des propriétés mécaniques, rendent le soudage très indispensable surtout du point de vue économique [1].

1.2. Définition de soudage

Le soudage est l'opération qui consiste à réunir deux ou plusieurs parties constitutives d'un assemblage de façon permanente, de manière à assurer la continuité entre les parties à assembler, avec ou sans emploi d'un produit d'apport[2].

On considère qu'un matériau métallique est soudable, lorsqu'il est possible d'assurer une continuité métallique par la constitution d'un joint soudé qui, par ses caractéristiques locales et les conséquences globales de sa présence, satisfait au mieux les propriétés requises pour l'application souhaitée [2].

1.3. Les procédés de soudage

On estime qu'il y a une quarantaine ou une cinquantaine de procédés de soudage au total. La figure 1.1 présente un organigramme des procédés de soudage les plus répandus.

Les procédés de soudage se subdivisent en deux grands groupes, en l'occurrence les procédés de soudage par fusion et les procédés de soudage par pression.

Dans le cas des procédés de soudage par fusion, les matériaux à assembler sont portés à fusion, avec ou non un métal d'apport ou une atmosphère protectrice par exemple un gaz ou un vide. Les impuretés et les couches d'oxydes doivent être éliminées du bain de fusion.

L'inconvénient du soudage par fusion est qu'à la température de fusion, la plupart des matériaux sont très réactifs de sorte que la contamination par des éléments indésirables est très difficile à éviter. De plus, de nombreux matériaux subissent, à ces températures très élevées, des modifications métallurgiques indésirables telles que la dissolution des carbures ou autres précipités ou la formation de phases intermétalliques fragiles lors du soudage de matériaux dissemblables [3].

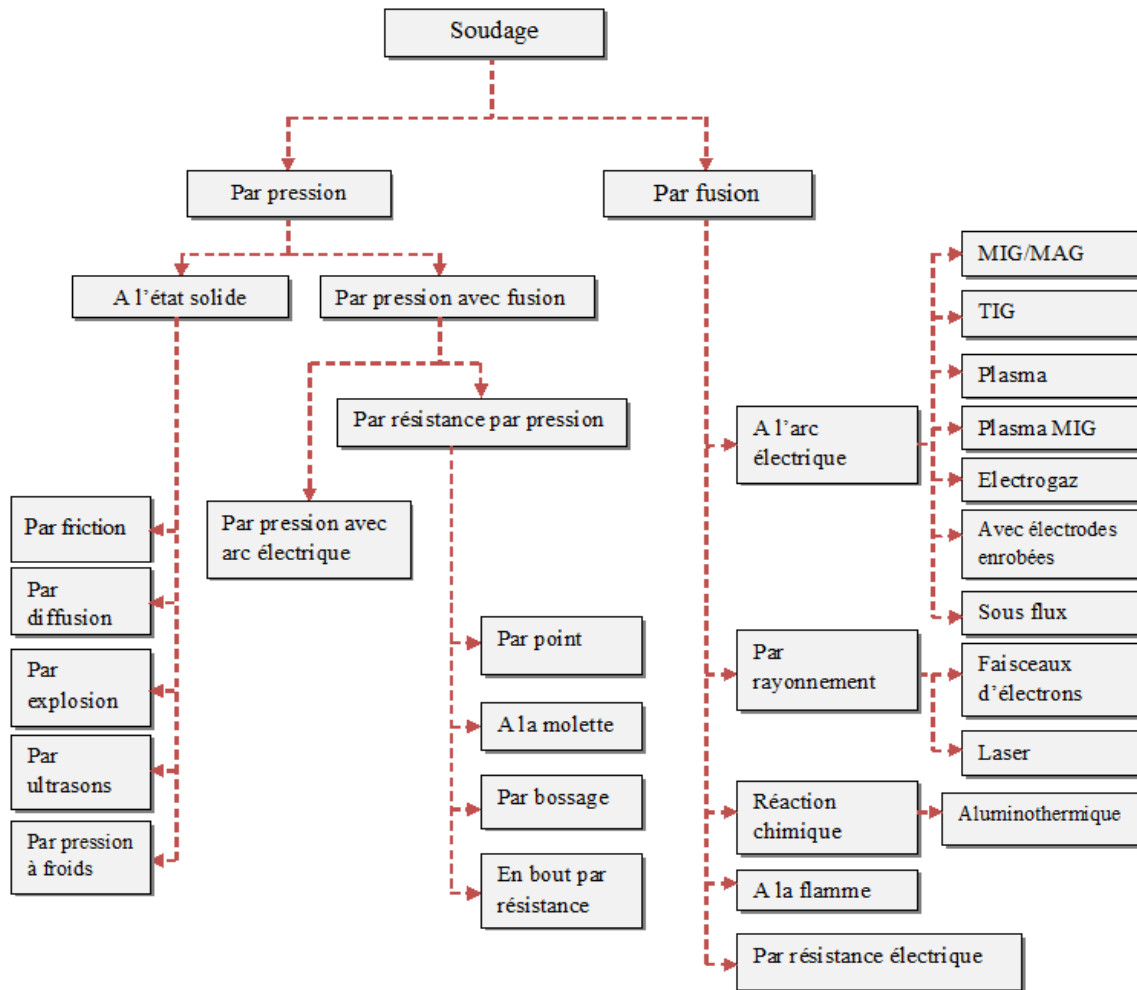


figure 1.1 : Organigramme des procédés de soudage classés sur base de la source d'énergie

[4].

Le procédé le plus courant parmi les procédés de soudage par fusion, est le soudage à l'arc électrique tel que le soudage TIG, MIG/MAG et avec électrodes enrobées.

D'autres procédés de soudage où les matériaux sont amenés à fusion sont par exemple le soudage au laser, le soudage aluminothermique, le soudage oxyacétylénique, etc.

Le deuxième grand groupe de procédés de soudage sont les procédés de soudage par pression. Dans ces procédés, les matériaux à assembler sont pressés l'un contre l'autre, avec ou sans chauffage additionnel des surfaces à souder [3].

Les procédés de soudage par pression peuvent à leur tour être subdivisés en deux sous-groupes: les procédés de soudage en phase solide et les procédés de soudage par pression où les matériaux sont amenés à la fusion. Dans ce dernier groupe, le chauffage peut se faire via un arc électrique tel que le soudage des goujons et le soudage par percussion, ou via une résistance électrique comme le soudage par point et le soudage par bossage [3].

1.4. Le soudage à l'état solide

Le soudage à l'état solide regroupent tous les procédés de soudage où il y a création d'une liaison métallique sans que les matériaux (métaux de base et éventuellement le métal d'apport) n'atteignent ni ne dépassent leur température de fusion respective.

Ces procédés font intervenir la déformation ou la diffusion accompagnée d'une déformation limitée pour produire des joints de haute qualité entre des matériaux similaires ou dissimilaires [5].

L'avantage le plus important du soudage à l'état solide est que les matériaux conservent leurs propriétés originelles. La zone affectée thermiquement est généralement réduite suite aux brefs temps de soudage et aux températures maximales relativement faibles[3].

Le soudage à l'état solide est une technique qui a apporté des solutions à beaucoup de problèmes qui ont persisté avec des techniques de soudage bien plus établies [6]. Certains domaines, tel que l'aéronautique, restants inaccessibles au soudage (par fusion) pour des raisons métallurgiques, notamment la fusion des métaux à assembler et le non contrôle de l'évolution structurale du matériau au voisinage immédiat du lieu de soudure, sont devenus accessibles grâce au développement des techniques de soudage à l'état solide.

1.4.1. Soudage par diffusion

Ce procédé de soudage à l'état solide consiste à se servir du phénomène de diffusion des atomes pour créer une liaison. Il est très utilisé pour effectuer des pièces creuses renforcées à partir de plusieurs tôles. Dans ce cas, on tire au vide à l'inter-tôle et on presse avec une pression de gaz argon par l'extérieur. Cette opération est réalisée à 920 °C [7].

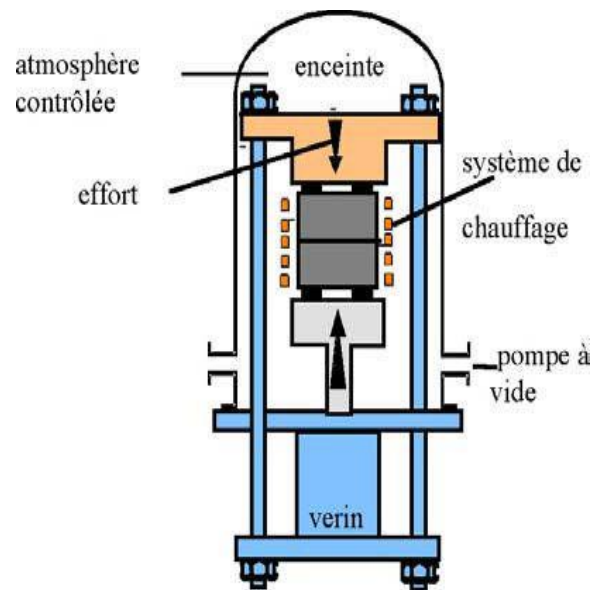


Figure 1.2 : Soudage par diffusion [8].

1.4.2. Soudage par explosion

Cette technique découverte fortuitement en 1957 lors d'essais de formage par explosion, est essentiellement employée pour assembler des métaux de nature différente, par exemple l'aluminium et l'acier [7].

Généralement, il s'agit de profilés pré-soudés qui permettent ces assemblages (exemple: superstructures en aluminium sur un bateau à coque en acier dans le but d'abaisser le centre de gravité) [7].

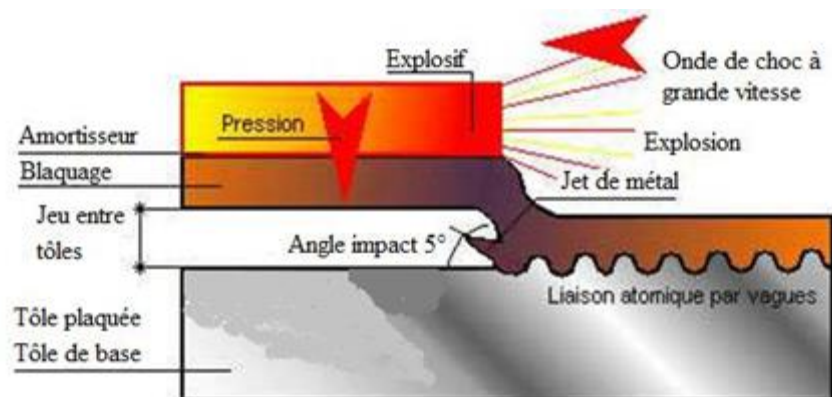


Figure 1.3: Soudage par explosion[7].

Les métaux à assembler sont superposés selon un certain angle et recouverts d'une couche uniforme d'explosif, la combustion rapide (détonation) de celui-ci provoque une fusion en coin qui se propage sur toute la surface mêlant les deux métaux.

Le soudage par explosion est utilisé dans de nombreuses industries :

- Equipement de procédé chimique tel que les récipients sous pression, réacteur, échangeur de chaleur.
- Tuyaux cryogéniques joints de transition.
- Pour la fabrication des matériaux plaqués, le soudage de tubes sur les plaques tubulaires et la fabrication bimétalliques.
- Constriction navale et marine bimétalliques transition joints sont les plus anciennes applications du soudage par explosion.

1.4.3. Soudage par ultrason

Les ultrasons sont des ondes acoustiques de hautes fréquences (20 à 50kHz) qui transmises à un matériau le font vibrer. Il s'agit d'un procédé de soudage à froid en phase solide où les atomes des surfaces à assembler se combinent entre eux sous l'effet de forces d'attraction interatomique [9].

Le transducteur génère des vibrations ultrasoniques qui sont transmises par un transformateur de vitesse amplificateur à une "sonotrode". Les pièces à souder, serrées entre une « enclume » et « la sonotrode », subissent des déformations localisées en qui rompent les pellicules superficielles des zones de contact. L'interpénétration des surfaces de contact s'ensuit. Sous l'effet du frottement à l'interface, la température s'élève, la zone de déformation s'étend et le soudage se produit. Ce procédé est surtout destiné aux pièces de faibles épaisseurs (< 2 mm). Il est à rapprocher dans son mécanisme au soudage par friction [10].

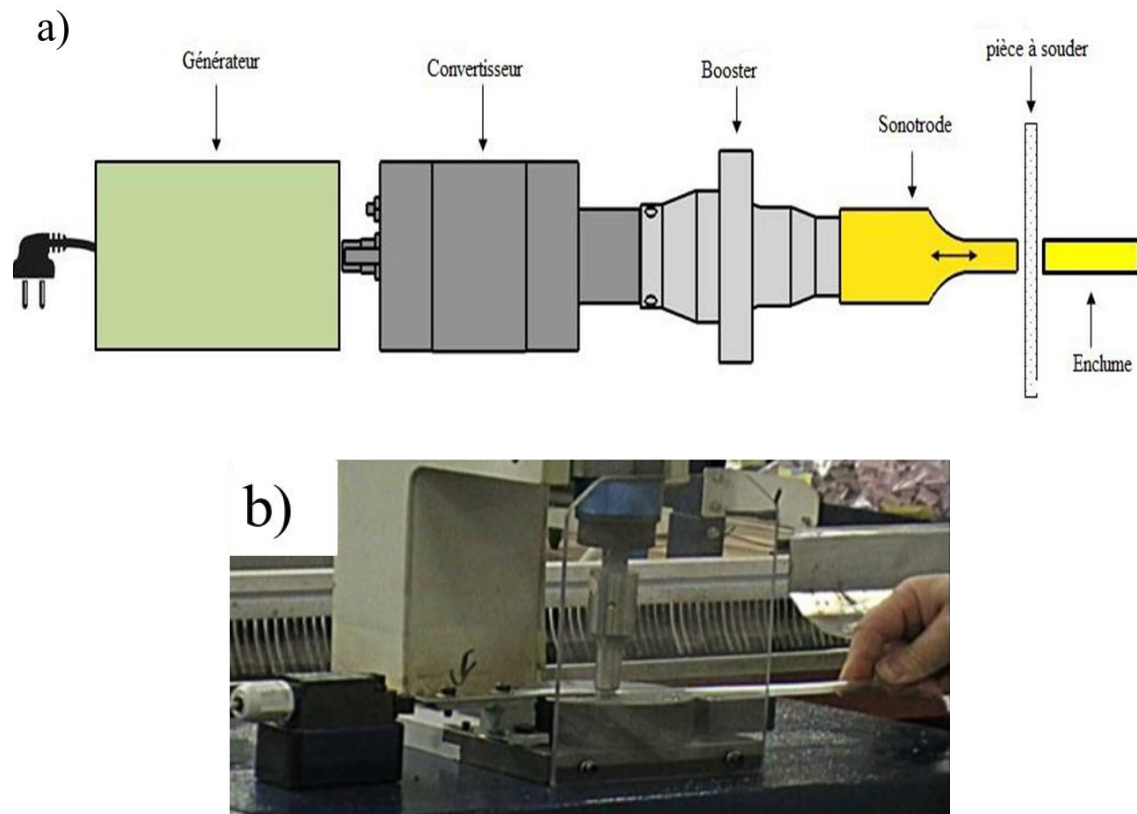


Figure 1.4: Soudage par ultrasons : a) schéma du procédé, b) machine de soudage[10].

1.5. Soudage par friction

1.5.1 Définition

Le soudage par friction est la plus vieille méthode d'assemblage à l'état solide, il est produit sous l'effet d'une haute pression de contact et un mouvement relatif entre les pièces à souder. Sa définition exacte dans la norme C61-89 de la société américaine de soudage (American Welding Society (AWS)) est comme suit [6, 11,12].:

« Le soudage par friction est un procédé d'assemblage à l'état solide qui produit la coalescence de matériaux sous l'effet d'une force compressive de contact appliquée à des pièces en rotation (ou en mouvement relatif) l'une par rapport à l'autre pour produire de la chaleur et un déplacement plastique de la matière au niveau de l'interface »

1.5.2. Principe de soudage par friction

Le soudage par friction repose sur la conversion directe de l'énergie mécanique en énergie thermique pour former la soudure, sans aucun autre apport de chaleur. La chaleur produite par la friction et la déformation viscoplastique des surfaces en contact conduit à la formation d'une liaison métallurgique à l'interface. Dans des conditions normales aucune fusion ne se produit au niveau de cette interface lors du soudage [11, 12].

Le nettoyage des surfaces s'effectue alors par un frottement et/ou une déformation intense localisée conduisant à chasser les impuretés et créer un contact intime entre les matériaux à assembler permettant à la diffusion et aux forces interatomiques de prendre le relais [1].

1.5.2. Variantes du procédé de soudage par friction

Le procédé de soudage par friction possède différentes variantes. Les principales variantes sont :

- Le Soudage par friction-malaxage ;
- Le Soudage par friction rotative ;
- Le soudage par friction linéaire ;
- Le soudage par friction Orbitale.

a- Soudage par friction-malaxage (FSW)

Dans ce procédé, un flux de chaleur génère grâce à la friction entre un outil en rotation et les matériaux à assembler (figure I.5). L'outil est muni d'un épaulement et d'un pion qui permet de malaxer et drainer les matériaux. Une pression est exercée pour que la puissance totale mécanique soit suffisamment grande. Cette puissance se transforme en chaleur et augmente la température des matériaux, d'une part grâce à la friction et, d'autre part, grâce aux déformations plastiques subies par ceux-ci [9].

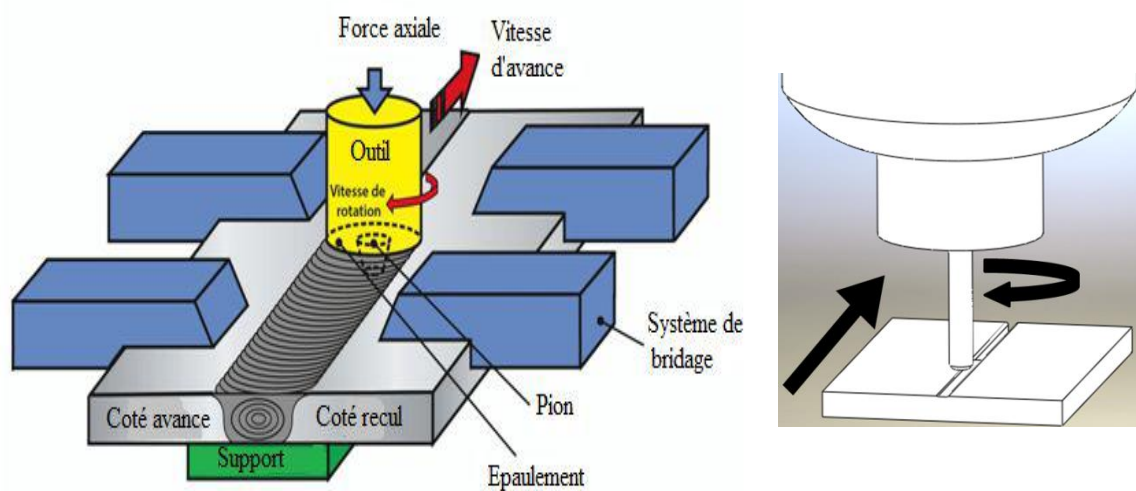


Figure 1.5: Schéma montrant les principales composantes de l'outillage en soudage par friction malaxage (FSW) [8].

b- Soudage par friction Rotative (SFR)

Le soudage par friction rotative est un procédé de soudage par friction où les pièces à souder sont tournées l'une contre l'autre sous l'action d'un effort axial, afin de produire la chaleur nécessaire à l'assemblage (figure 1.6) [13].

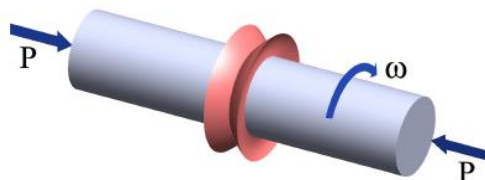


Figure 1.6 : Procédé de soudage par friction rotative [14].

c- Soudage par friction linéaire (SFL)

Plus récent que le procédé de SFR, il a été développé pour appliquer les propriétés bénéfiques du soudage par friction rotative aux composants n'ayant pas une symétrie axiale [15].

Dans le procédé SFL, deux pièces sont pressées l'une contre l'autre et soumises à un mouvement de vibration relatif entre elles. Les deux actions simultanées produisent une friction au niveau de l'interface et par conséquent un échauffement suffisant pour produire la plastification. Les oscillations sont arrêtées au début de cette plastification après homogénéisation, et la force de

pression appliquée est soit maintenue constante ou augmentée. Durant le refroidissement du matériau plastifié, les deux parties sont liées par la formation d'une soudure (figure I.7) [6].

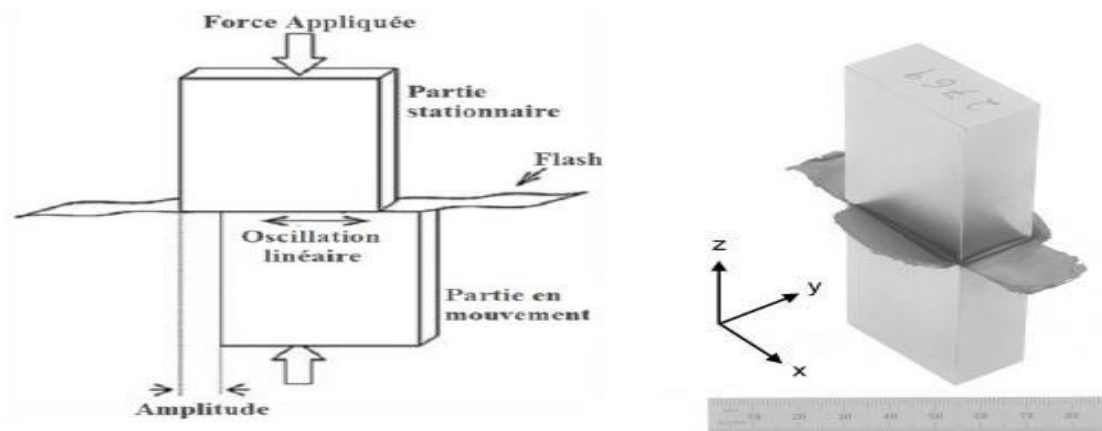


Figure 1.7: Illustration schématique du Procédé de soudage par friction linéaire [6].

Il existe un grand nombre de paramètres à contrôler lors du procédé de SFL. Ces paramètres ont un impact significatif sur les propriétés finales de la soudure. Parmi les plus importants : la Fréquence et l'amplitude de l'oscillation et la pression de friction [16].

d- Soudage par friction orbitale (SFO)

C'est une autre méthode de soudage par friction qui convient particulièrement à la liaison de composants de section non circulaire. Dans cette technique aucune des deux pièces à souder ne tourne autour de son axe central, mais un mouvement orbital est appliqué et à l'instant de l'arrêt, les deux parties sont rapidement alignées (figure I.8)[17].

Il est pratiquement reconnu que des soudures de haute qualité sont produites par ce procédé. Une qualité attribuée à l'homogénéité de la vitesse au niveau de l'interface, qui induit une vitesse de génération de chaleur uniforme. Bien que cela procure un avantage précieux, et qu'en plus, le procédé est applicable à n'importe quelle forme géométrique des sections des composants à souder.

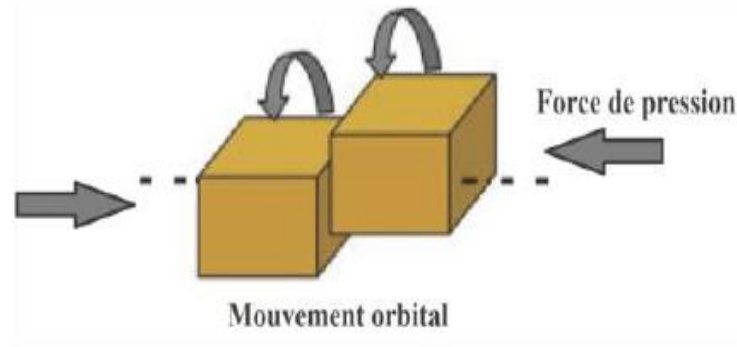


figure 1.8: Illustration schématique du Procédé de soudage par friction orbitale, Adaptée de [17].

1.6. Procédé de soudage par friction rotative

1.6.1. Principe

La figure 1.9 montre les étapes principales d'une soudure typique par un procédé de friction rotative.

Dans l'exécution du procédé de soudage par friction rotative, une pièce immobile est maintenue en contact avec une autre pièce en rotation sous l'effet d'une pression constante ou en augmentation graduelle jusqu'à ce que l'interface atteigne la température de soudage. Une fois suffisamment chauffée, une pression axiale met les deux pièces dans un contact intime. A ce moment-là, la diffusion atomique opère et permet de donner lieu à une liaison métallurgique entre les deux matériaux [12].

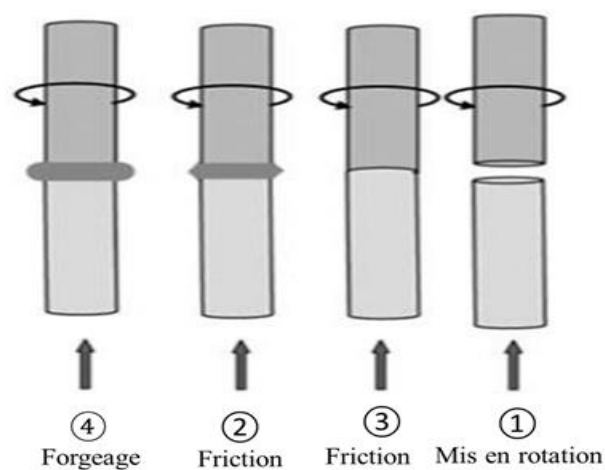


Figure 1.9: soudage par friction rotative [8]

La vitesse de rotation, la pression axiale et le temps de soudage sont les principales variables contrôlées pour produire la combinaison nécessaire de chaleur et de pression permettant de réaliser la soudure. Ces paramètres sont ajustés de sorte que l'interface soit chauffée et portée à un niveau de plastification permettant au soudage de prendre place.

La machine de soudage par friction rotative ressemble à un tour équipé d'un embrayage et d'un frein ainsi qu'un dispositif permettant d'exercer la pression axiale. Elle est constituée de deux parties, une partie fixe et une autre mobile, maintenant chacune des deux pièces à souder.

1.6.2 Les méthodes de soudage par friction rotative

a- Le soudage par friction rotative à entraînement direct (SFR-ED)

Dans cette méthode, qui est appelée aussi soudage par friction rotative conventionnelle, un moteur tournant à une vitesse constante est utilisé pour alimenter la soudure en énergie (figure I.11). Cette technique est, généralement, la plus rencontrée et c'est la méthode que nous avons utilisée dans la présente étude [18, 19].

Phases du procédé SFR-ED

Deux phases principales caractérisent le cycle de soudage (figure 1.12) [18,19] :

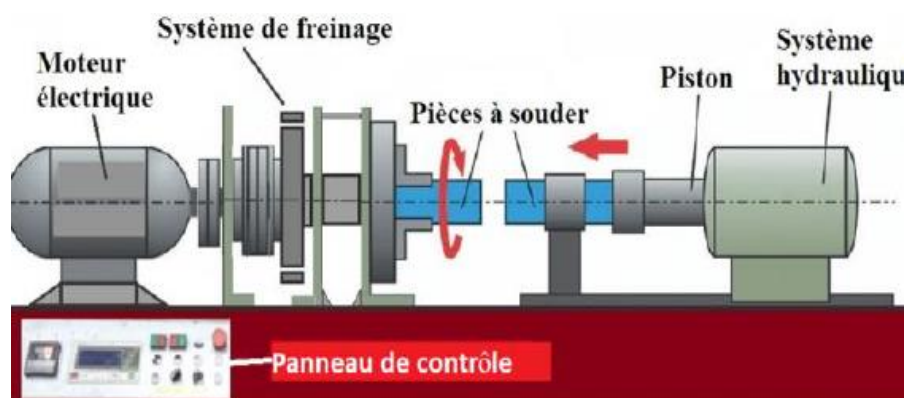


Figure 1. 10: Schéma montrant une alimentation directe par moteur électrique aligné avec les pièces à souder dans un SFR-ED[20].

1- La phase de friction : durant laquelle la chaleur est générée.

Cette phase peut être subdivisée en quatre phases :

Phase d'accostage : Où la pièce tournante est mise en contact avec la pièce fixe. La Force axiale appliquée augmente jusqu'à la valeur préétablie et le couple de friction augmente graduellement vers une valeur maximale.

Phase de transition : A cette phase, la température de l'interface atteint la température de soudage et le métal se trouve à un état plastique. Une couche ramollie à l'interface traduit le début du raccourcissement. Durant cette phase, le couple de friction diminue jusqu'à une valeur d'équilibre et reste constant durant toute la phase qui suit.

Phase d'équilibre : Elle est caractérisée par la stabilité de la température moyenne et la formation d'un bourrelet autour du joint.

Phase de décélération : Où la vitesse de rotation décroît jusqu'à s'annuler. Elle est caractérisée par l'augmentation de la valeur du couple de friction, qui atteint une valeur maximale (couple maximal terminal), avant de décroître vers zéro et par un raccourcissement axial accru [21].

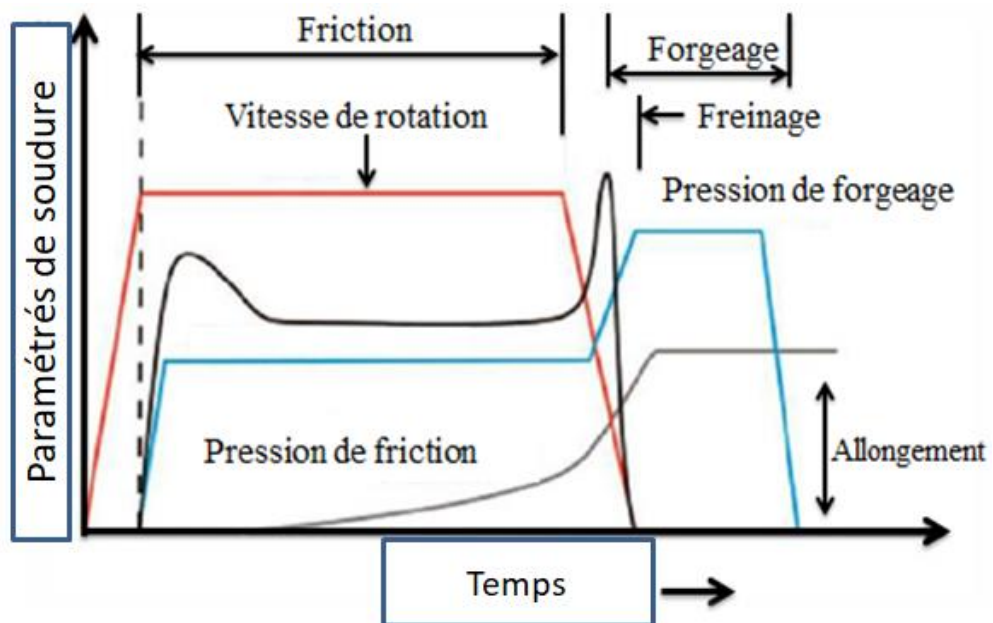


figure 1.11: Différentes phases et paramètres du procédé SFR-ED [16].

2- La phase de forgeage : durant laquelle une pression de forgeage est appliquée pour lier les pièces de façon intime.

Facteurs influents dans le procédé SFR-ED

D'un point de vue quantitatif, le processus de soudage par friction rotative à entraînement direct est très bien compris à travers des études empiriques réalisées sur divers matériaux.

Cinq facteurs qualitatifs influencent la qualité de la soudure par friction rotative [12].

acteurs relèvent du procédé de soudage : la vitesse relative des surfaces,
la pression appliquée, et
La température de l'interface.

acteurs relèvent du matériau : Les propriétés du matériau,
Les conditions de surface.

b- Le soudage par friction rotative inertielle (SFRI)

Cette méthode, qui appelé parfois soudage par accumulation d'énergie, se caractérise par le fait que la partie rotative est solidaire à un volant (figure I.13).

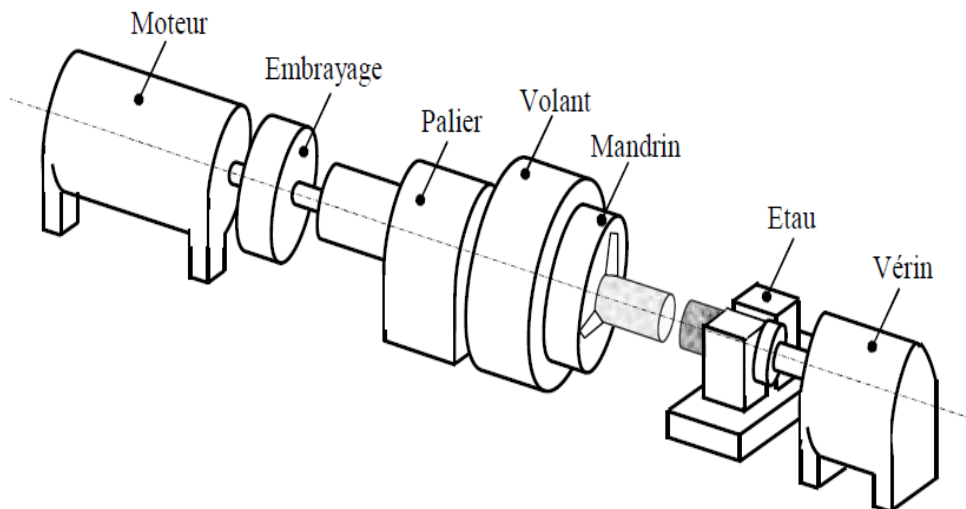


Figure 1.12: Séquences du soudage par friction inertielle [22].

Dans cette opération, l'ensemble de la partie mobile est entraîné par un moteur jusqu'à atteindre la vitesse voulue avant d'interrompre l'alimentation. L'énergie emmagasinée sous une forme cinétique, dont la quantité dépend du moment cinétique du volant et de sa vitesse, est restituée au système.

A l'instant de l'interruption de l'entraînement du moteur les deux parties, fixe et mobile, sont mises en contact sous l'effet d'une pression, maintenue constante durant tout le processus de soudage.

La pression appliquée conduit à la réduction de la vitesse jusqu'à l'arrêt complet.

Durant la fin de la phase de décélération, juste avant l'arrêt de la rotation ou à son arrêt complet, la pression Peut être augmentée donnant lieu à un soudage à deux phases (friction et forgeage) [23,24](figure I.14)

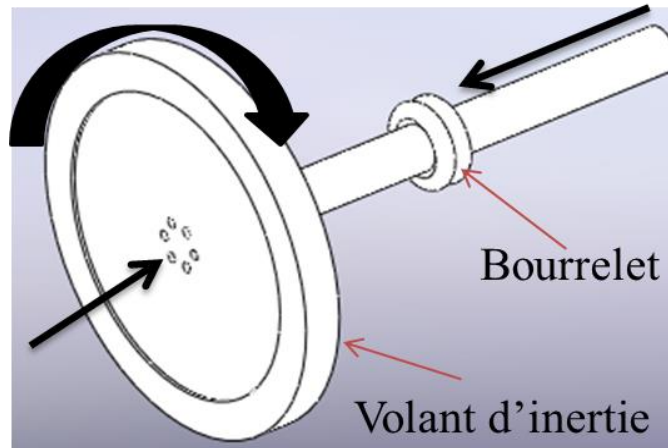


Figure 1.13: Illustration schématique d'un volant de stockage d'énergie dans un procédé de SFRI[6].

Paramètres de soudage par friction inertielle

- La masse et les dimensions du volant d'inertie,
- La vitesse de lancement ou la vitesse de départ du cycle,
- L'effort de friction et de forgeage,
- Le temps de forgeage.

Les évolutions des différentes paramètres au cours du procédé SFRI sont présentées sur la (figure I.15).

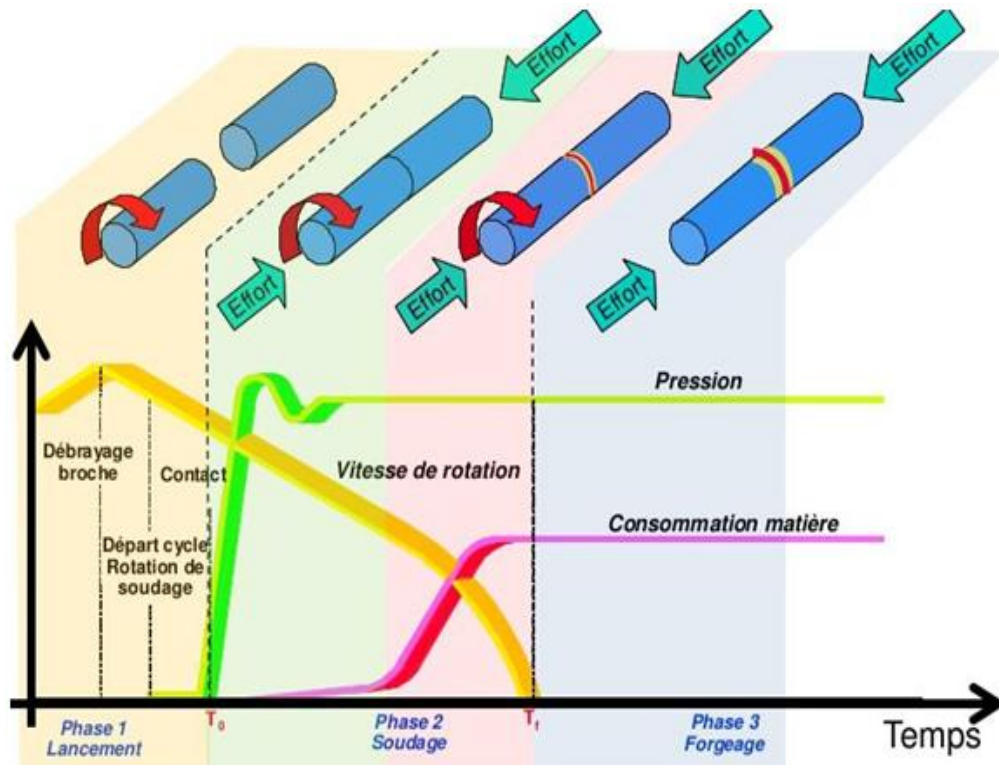


Figure 1.14: Caractéristiques des paramètres de soudage par friction inertielle [25,26].

1.6.3. Microstructure des joints de soudage par friction rotative

En règle générale, la soudure (ou le joint) produite par le soudage par friction rotative peut être divisée en deux zones (figure I.10) [26, 27, 28] :

- Zone de contact (zone de déformation plastique sévère) : C'est la zone où le frottement se produit et où des fragments des matériaux sont transférés d'une surface à l'autre. Cette zone a une structure de grain très fine due à une déformation intense et une recristallisation complète. La vitesse de rotation est le paramètre principal qui contrôle la structure de cette zone.
- Zone affectée thermiquement (ZAT) : c'est la région exposée à une température relativement élevée pendant le soudage. Cette région est divisée en trois zones différentes, classées par ordre de proximité de la zone de contact. (figure I.10)

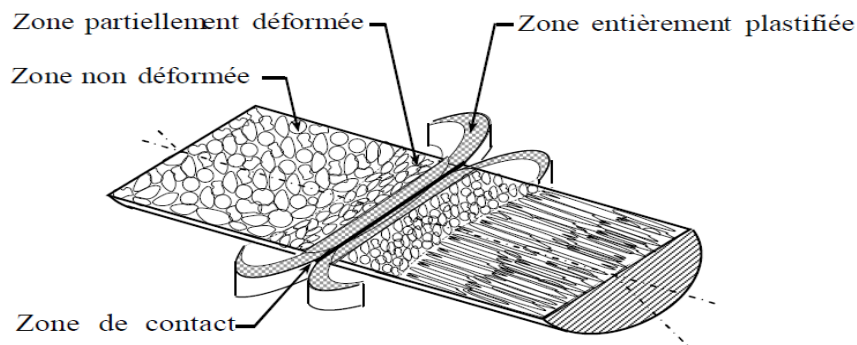


Figure 1.15: Illustration schématique des différentes zones de la soudure par friction rotative [11,29].

- ✓ Zone entièrement plastifiée (zone de recristallisation dynamique) : Dans cette zone, Les grains subissent une déformation plastique considérable, mais ne participent pas au processus de frottement ni au transfert de la matière. Les grains dans cette zone sont fins et la densité de dislocations est extrêmement augmentée en raison de la température suffisamment élevée.
- ✓ Zone partiellement déformée : La température et le degré de déformation plastique sont inférieurs à ceux apparus dans la zone précédente. Les grains deviennent plus gros par rapport à ceux de la zone entièrement plastifiée.
- ✓ Zone non déformée : Dans cette zone, en fonction de la température maximale, les matériaux ne subissent pas de transformation de phase ou de déformation plastique. La croissance des grains peut avoir lieu dans cette zone.

1.6.4. Analyse thermique du procédé de soudage par friction rotative

Dans le soudage par friction, la température dans la zone de soudure augmente brusquement en raison des frottements extrêmes et du travail plastique de l'aluminium pièce en très peu de temps. Pour calculer le profil de température, l'analyse de transfert de chaleur a été entreprise en réchauffant le frottement, génération de chaleur à l'interface, génération de chaleur par la déformation plastique et perte de chaleur dans l'environnement [30].

Modèle de génération de chaleur par friction

En partant de l'hypothèse que la distribution des forces reste constante, la chaleur de frottement a été déduite par l'analyse suivante méthode. Tout d'abord, un micro-anneau qui a un rayon intérieur r et une largeur dr dans la surface de frottement a été défini comme dans la (figure 2.1) .

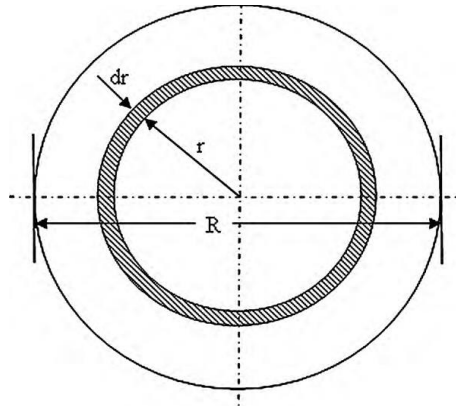


Figure 1.16 : Croquis de l'interface de friction

La pression constante agissant sur toute la surface est donnée par p . L'aire du micro anneau est :

$$dA = (2\pi r)dr \quad (1)$$

Transformer l'équation de pression en une caractérisation différentielle de la zone dA , l'équation suivante est obtenue pour la force différentielle, dF , agissant sur l'aire dA . $dF = p dA = 2\pi p r dr$

$$(2)$$

Puisque dF est équivalent à la force normale égale et opposée agissant sur dA , la force de frottement différentielle, dF_f , peut être spécifiée comme :

$$dF_f = \mu dF = 2\mu\pi p r dr \quad (3)$$

Où, μ est le coefficient de frottement.

On sait que la vitesse tangentielle, v_T en tout point de l'élément est le même,

$$v_T = r\omega \quad (4)$$

Où, ω est la vitesse angulaire.

La puissance différentielle qui s'exerce pour faire tourner la zone annulaire dA est :

$$dP = dF_f \cdot v_T = 2\mu\pi p r^2 \omega dr \quad (5)$$

Par conséquent, en intégrant l'Eq. (4) par rapport à r , la définition pour la génération de puissance de chauffage par friction est obtenue comme

$$P = \int_0^R 2\mu\pi p r^2 \omega dr = \frac{2}{3} \mu\pi p \omega R^3 \quad (6)$$

Le flux de chaleur (Q) généré par le frottement au niveau de l'espace annulaire est donné par $Q(r) = \frac{dP}{dA} = \mu pr\omega$ (7)

1.6.5. Combinaisons possibles de matériaux soudables par le soudage par friction

Le procédé de soudage par friction rotative s'applique à un grand nombre de matériaux semblables et dissemblables ainsi que le montre le tableau I.1 présente, de ce fait, par rapport aux soudages par étincelage et à l'arc, un avantage substantiel.

Métaux Et alliages	Alu- minium	Aciers inoxydables	Aciers spéciaux	Aciers coulés	Alu- minium non alloyé	Alu- minium alloyé	Alu- minium alloyé à base de Mg	Alu- minium alloyé à base de Zn	Alu- minium alloyé à base de Cu	Alu- minium alloyé à base de Ni	Alu- minium alloyé à base de Fe	Alu- minium alloyé à base de Si	Alu- minium alloyé à base de Mn
Aluminium	■	■	□	□	■	□	■	□	▲	■	□	■	■
Alliages d'Al	□	▲	□	□	●	□	□	□	▲	□	□	■	
Acier inoxydable	□	□	□	▲	▲	□	□	□	□	□	▲		
Acier spécial	□	■	□	□	■	□	□	□	□	▲			
Acier coulé	▲	□	□	□	□	□	□	□	▲				
Alu-Mg	□	■	□	■	□	□	□	■					
Alu-Zn	■	□	□	□	□	□	□						
Alu-Cu	□	■	□	■	■	■							
Alu-Ni	▲	■	■	■	■								
Alu-Fe	□	■	■	■									
Alu-Si	▲	■											
Alu-Mn	■												

Bonne soudabilité ■

Soudable ▲

Soudure délicate ●

Impossible ou non essayé □

Tableau 1 .1: Combinaisons possibles de matériaux soudables par le soudage par friction rotative [9,25, 31].

1.6.6. Principaux domaines d'application

En raison de ses larges possibilités d'applications, il n'est pas étonnant que le soudage par friction rotative soit souvent utilisé dans des secteurs divergents, tel que :

- L'industrie automobile (soupapes, axes, ...).
- L'industrie électrique (raccords, électrodes, ...),
- Les forages (raboutage de tubes, ...),
- L'aéronautique et aérospatial (turbines, ...),

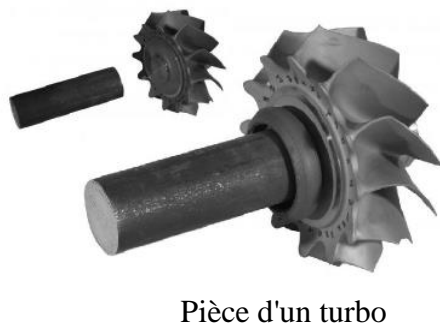
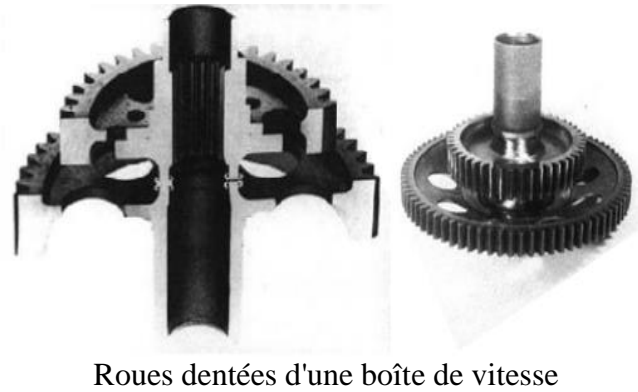
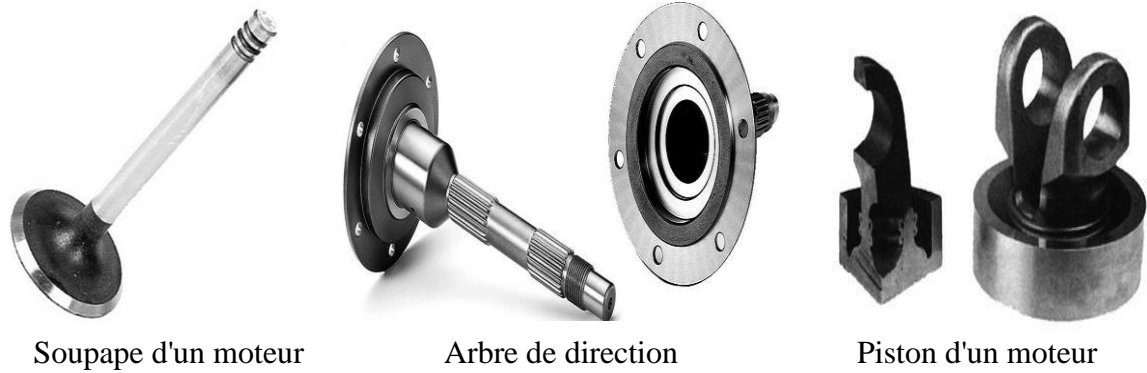


Figure 1.17: Quelques applications du soudage par friction rotative [3]

1.8 Bibliographie

- [1] M. Gerard, Soudage-diffusion hétérogène assisté par friction malaxagecas du couple Al/Fe. Thèse de doctorat - Ecole Centrale de Nantes (2010).
- [2] G. Merry, Soudage et soudabilité métallurgique des métaux. Technique de l'ingénieur M715 (1994).
- [3] F. Koen, Soudage par friction. Site web : [Http://www.bil-ibs.be/fr/soudage-par-friction](http://www.bil-ibs.be/fr/soudage-par-friction)
- [4] F. Koen, Le soudage par friction, un procédé de soudage multiple et innovateur, (Traduction : M.C. Ritzen), (2011)
- [5] R.Dixon, Introduction to solid-state welding, in fundamentals of solid-state welding, in Welding, Brazing, and Soldering, ASM Handbook Vol. 6 (1993).
- [6] W . Cai, G. Daehn, A. Vivek, J. Li, H. Khan, RS. Mishra, M. Komarasamy, A State of the art review on solid state Metal joining. J. Manuf. Sci. Eng. 141(3) (2018) : 031012
- [7] B. Anglade, H. Horisio Molinaro, S. Lavernhe, Technique de réalisation de châssis micro-soudés : le soudage. Ecole Normal Supérieure Paris-Saclay (2017).
- [8] Site web : Soudage-Coupage (SYMOP). [Http://www.irs.fr](http://www.irs.fr).
- [9] Site web : Soudage. <https://fr.wikipedia.org/wiki/Soudage>.
- [10] F. Pichot, F. Corpace, Conception et fabrication des moteurs aéronautiques. Groupe SAFRAN (SNECMA) (2014).
- [11] M. Kimura, K. Suzuki, M. Kusak, K. Kaizu,. Effect of friction welding condition on joining Phenomena and mechanical properties of friction welded joint between 6063 aluminium alloy And AISI 304 stainless steel. J Manuf Process 26(2017):178–187.
- [12] J.W. Elmer, D.D. Kautz, Fundamentals of Friction Welding in fundamentals of solid-state Welding, in Welding, Brazing, and Soldering, ASM Handbook Vol. 6 (1993).
- [13] D.D. Kautz, Fundamentals of Friction Welding, Welding Fundamentals and Processes , ASM Handbook Vol. 06A (2011) : 179-185.
- [14] W. Li, S. Shi, F. Wang, Z. Zhang, T. Ma and J. Li , Numerical simulation of friction welding processes based on ABAQUS environment, Journal of Engineering Science and Technology Review 5 (3) (2012) : 10-19.
- [15] U. Raaba,, S. Levin, L. Wagner, C. Heinze, Orbital friction welding as an alternative process for Blisk manufacturing, Journal of Materials Processing Technology215 (2015) 189–192.

- [16] W. Li, A. Vairis, M. Preuss, T. Ma, Linear and rotary friction welding review, *International Materials Reviews* 61(2) (2016) :71-100.
- [17] J.A. Sbalchiero, D. Martinazzi, G.V.B. Lemos, A. Reguly, F.D. Ramos, Replacement of gas metal arc welding by friction welding For joining tubes in the hydraulic cylinders industry. *Mater Res* 21(4) (2018).
- [18] A. Hausi, S. Fukushima, J. Kinugawa, Experimental studies on friction welding Phenomena, *Transactions of national institute for metals Japan*, 10(4) (1968) : 53-71.
- [19] W. Li, F. Wang, Modeling of Continuous Drive Friction Welding of Mild Steel, *Mat. Sci. Eng. A*, 528 (18) (2011) : 5921-5926.
- [20] G. Sayegh, R. Cazes, Possibilités et perspectives du soudage par friction applications –Évolution de la Technique et perspectives. *Soudage et techniques Connexes* (1981) : 152-160.
- [21] A.E. Paduan, N.F. Piorino, A.C. Ying, D. S. Euclides Castorino, Experimental determination of temperature during rotary friction welding of AA1050 aluminum With AISI 304 stainless steel. *J aerosp Technol Manage* 4(1) (2012) : 61–67,
- [22] R. Cazes, Procédés de soudage: Principes généraux et critères de choix. *Techniques de l'ingénieur. Génie mécanique*. B7700 (1995).
- [23] M. Ashfaq, N. Sajja, H.K. Rafi, K.P. Rao, Improving strength of stainless steel/aluminum alloy Friction welds by modifying faying surface design. *J Mater Eng Perform* 22(2) (2013) : 376–383.
- [24] s. Kallee, D. Nicholas, Friction and Forge Welding Processes for the Automotive Industry. *SAE Technical Paper No. 0148-7191* (1999).
- [25] T.V Stotler, et al, Friction welding, *Welding processes – Part 2, Vol 3, Welding Handbook, 9 Ed., American Welding Society (AWS)* (2007) : 184-209.
- [26] P. J. Withers, M. Preuss, Simulation of rotational welding operations, *Metals process simulation. ASM Handbook Vol. 22B* (2010) : 432-442.
- [27] P. Rombaut, Joining of dissimilar materials through rotary friction welding, *Thèse de Master, Université Gent, Belgique* (2011).
- [28] M. B. Uday, , M. N. Ahmad Fauzi, H. Zuhailawati, A. B. Ismail, Advances in friction welding process: a review, *Science and Technology of Welding and Joining* 15(7) (2010) : 534-558.

- [29] U. Caligulu, M. Acik, Z. Balalan, N. Kati, The Effects of Process Parameters for Joining of AISI 1010-Cu Alloys by Friction Welded, *International Journal of Steel Structures* 15(4) (2015) : 1-9.
- [30] L. Fu, L. Duan, *Welding Journal* 77 (1998) 202–207.
- [31] R. Cazes, Soudage par friction. *Techniques de l'ingénieur B7745 v1* (1996).
-

Chapitre 2

Matériaux et procédures expérimentales

Sommaire

2.1	Introduction.....	29
2.2	Partie 1 : Matériaux et équipement utilisés	29
2.2.1	Matériaux utilisés.....	29
2.2.1.1	L'alliage d'aluminium 2017A.....	29
2.2.1.2	L'alumine Al_2O_3	30
2.2.1.3	Préparation des échantillons.....	31
2.2.2	Machine utilisée.....	33
2.2.3	Paramètres du soudage.....	33
2.2.4	Mesures de températures en cour de soudage.....	33
2.3	Partie 2 : techniques de caractérisations.....	34
2.3.1	Caractérisation microstructurale des joints soudés.....	34
2.3.1.1	Préparation des échantillons soudés pour l'observation micrographique.....	34
2.3.1.2	Observations microscopique.....	36
2.3.2	Caractérisation mécanique des joints soudés	37
2.3.2.1	Mesures de micro-dureté Vickers.....	37
2.3.2.2	Essai de traction.....	38
2.3.2.3	Essai de flexion (trois points)	39
2.4	Bibliographie.....	41

2.1 Introduction

Ce chapitre décrit le travail expérimental réalisé, et il est composé de trois parties. La première partie présente les matériaux qui ont été utilisés dans cette étude. Dans la deuxième partie la procédure de préparation des échantillons soudés est présentée en détail. Dans la troisième partie, les techniques de caractérisations mécaniques.

2.2 Partie 1 : Matériaux et équipement utilisés

2.2.1 Matériaux utilisés

2.2.1.1 L'alliage d'aluminium 2017A

L'aluminium 2017A est également un alliage à durcissement structural, c'est à dire qu'il tire ses propriétés mécaniques de la taille et de la distribution des précipités qu'il contient. Il s'agit d'un alliage très répandu de la série 2XXX (Al-Cu et Al-Cu-Mg). Les teneurs en cuivre des alliages de cette série sont comprises entre 2.6 et 6.3%, et quand ils en contiennent, leurs teneurs en magnésium varient de 0.5 à 1.5%. Le durcissement structural de ces alliages qui est dû à la précipitation de forme transitoire des composés d'équilibre $CuAl_2$ et $CuMgAl_2$, leur confère d'excellentes propriétés mécaniques. L'addition de silicium et de manganèse à des teneurs inférieures à 0.8%, favorise la formation de composé quaternaire qui par dispersion améliorent les propriétés de la matrice. Par contre, la présence de fer est souvent nuisible, car à cause de la formation de Cu_2FeAl_7 , le fer diminue la quantité de cuivre nécessaire au durcissement structural [1]. Ils comportent également des éléments d'alliage secondaire comme le chrome, le zinc, le titane, etc. Qui jouent également un rôle dans les propriétés des alliages de cette série.

Les tableaux 3.1 et 3.2 illustrent la composition chimique et les propriétés de l'aluminium 2017A.

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Zr + Ti
0.20-0.80	≤ 0.70	3.5-4.5	0.4-1.0	0.4-1.0	≤ 1.0	≤ 0.25	< 0.25

Chaque autre	Total autre	Al
≤ 0.05	≤ 0.25	Reste

Tableau 3.1 : composition de l'alliage 2017A en pourcentage massique [2]

\emptyset (mm)	Rm (Mpa)	$Rp_{0.2}$ (Mpa)	A(% <i>mini</i>)
$\emptyset \leq 55$	≥ 400	≥ 250	10

Tableau 3.2 : Propriétés mécaniques de l'aluminium 2017A [2].

2.2.1.2 L'alumine Al_2O_3

L'alumine aussi appelée oxyde d'aluminium, celui-ci est un composé chimique. On le trouve à l'état naturel le minerai qui la contient (la bauxite) où elle est mélangée avec de l'oxyde de fer. D'autre part, certaines pierres précieuses contiennent de l'alumine. C'est notamment le cas des rubis et des saphirs. L'alumine ou oxyde d'aluminium de formule Al_2O_3 est le plus abondant oxyde métallique de la croûte terrestre après la silice. Elle existe sous forme hydratée le minerai.

L'alumine, est une poudre blanche de masse moléculaire 102 très stable. C'est un oxyde réfractaire, car sa température de fusion est très élevée (2054 °C).

Remarque : l'alumine que nous utiliserons sera sous forme de poudre. Figure 3.2 [3].



Figure 2.1: Bouteille d'alumine Al_2O_3 **Figure 2.2 :** poudre d'alumine Al_2O_3

Tableau 2.3 présente la composition chimique d'alumine utilisée.

Composés	Na ₂ O	CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃
Alumine	0.14	0.15	0.24	0.52	98.95

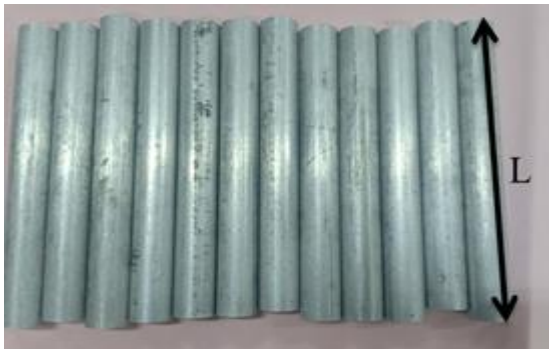
Tableau 2.3 :Composition chimique de l'alumine (déterminée par XRF).

3.Préparation des échantillons

Étape 1 : découpage, dressage et parçage :

Avant d'entamer les processus de soudage par friction rotative, les tiges utilisés **2017A** sont découpées à des échantillons de longueur de 70 mm et de diamètre 12mm .Les extrémités des échantillons ont été polies et nettoyées.

Découpage



Dressage



Perçage

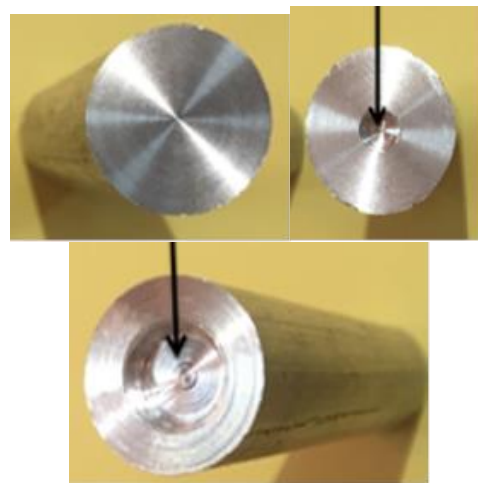
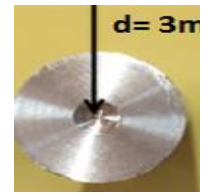
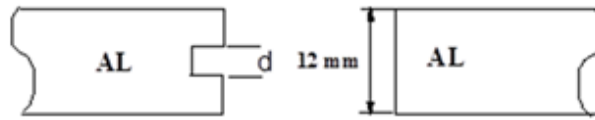


Figure 2.3:Découpage, Dressage, Perçage

Etape 2: Addition Al_2O_3 :

Les fractions volumiques sont calculées comme suit :



Diamètres :

$$\begin{cases} d_0 = 0 \\ d_1 = 3\text{mm} \\ d_2 = 5\text{mm} \end{cases}$$

Surface de contact : $\frac{\pi d^2}{4}$

Fraction volumique d'aluminium :

100% $\rightarrow \frac{\pi d^2}{4}$

X_i % $\rightarrow \frac{\pi d_i^2}{4}$

Echantillon : $d_0 = 0 \Rightarrow X_0 = 0\%$

Echantillon : $d_1 = 3 \text{ mm} \Rightarrow X_1 = 6.25 \%$

Echantillon : $d_2 = 5 \text{ mm} \Rightarrow X_2 = 17.36\%$

Avant le soudage nous additionnons des particules d' Al_2O_3 à différents fractions volumiques dans l'interface des joints à travers des trous pré-perçés comme indique la figure.

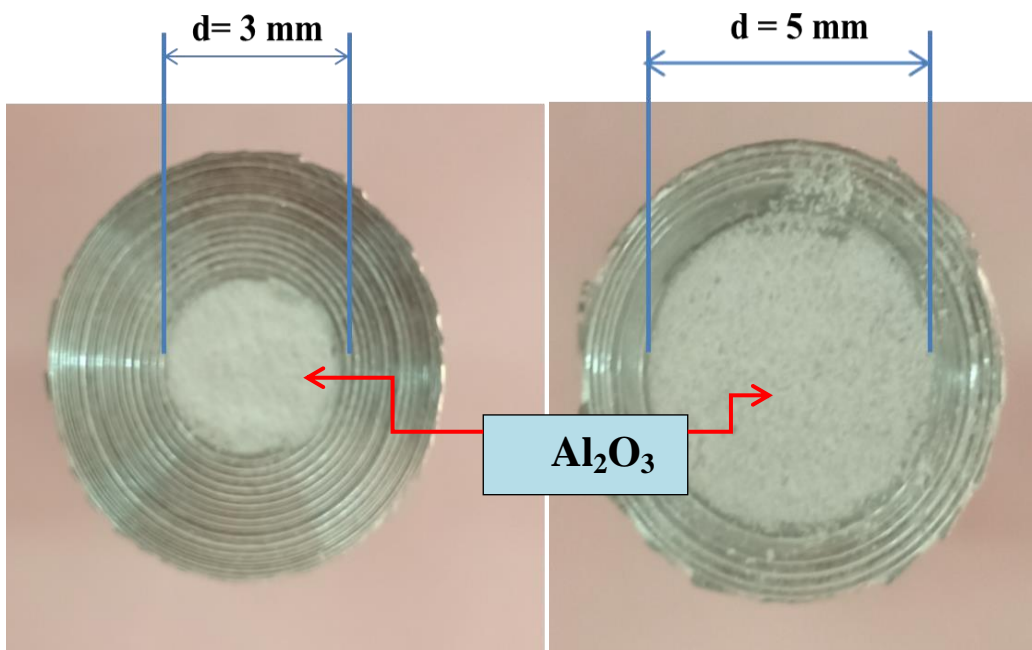


Figure2.4: Addition Al_2O_3

2.2.2 Machine utilisée

La machine utilisée dans notre étude est une fraiseuse universelle PMO UF 1.5 (figure 3.5) installée au sein de laboratoire du génie mécanique (département de Génie mécanique, Université de Bordj Bou Arreridj).

2.2.3 Paramètres du soudage

Le soudage par friction rotation est réalisé sur des barres rondes de diamètre 12 mm et de longueur 70 mm. Les principaux paramètres étudiés sont les suivants :

- 1- Vitesse de rotation 1400 tr/min,
- 2- Temps de friction 40 s (phase d'échauffement),
- 3- Temps de forgeage 10 s (phase de forgeage),
- 4- La vitesse de déplacement est 63 mm/min.



Figures 2.5 : système de soudure par friction rotative

2.2.4. Mesures de températures en cour de soudage

Afin de calculer la température maximale pendant le soudage, il est nécessaire d'effectuer des mesures de température pour de nombreuses conditions de soudage différentes. Nous utilisons un thermocouple Figure 2.6.a pour calculer la température, donc il est installé sur la pièce rotative comme décrit dans la figure 2.6.b.



Figure 2.6 : photographie du dispositif. A) Thermocouple. B) Installation de thermocouple sur la pièce rotative.

2.3. Partie 2 : techniques de caractérisations

2.3.1. Caractérisation microstructurale des joints soudés

2.3.1.1. Préparation des échantillons soudés pour l'observation micrographique

- a) Découpage
- b) L'enrobage
- c) Le polissage
- d) L'attaque chimique

A) découpage : nécessaire si les pièces à analyser sont de grande dimension. Les outils (Tronçonneuse, scie, a fil). nous avons fait une coupe transversale et une coupe longitudinale scie à main .figure 2.7

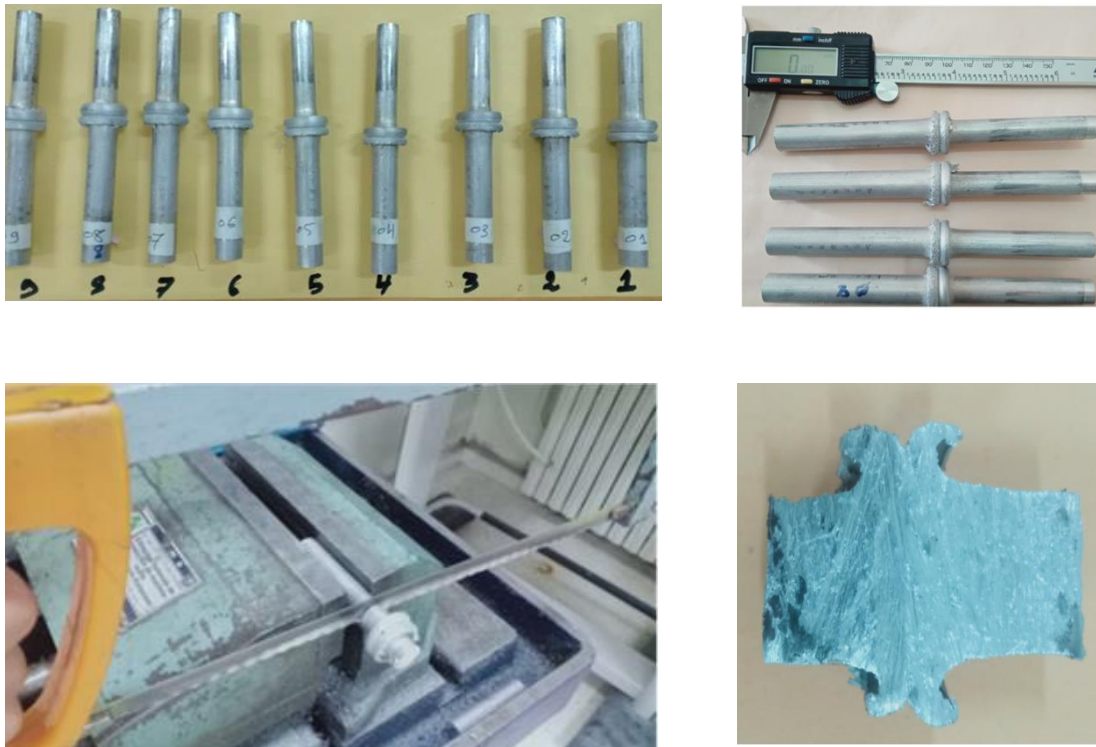


Figure 2.7: coupe transversale et une coupe longitudinale par scie à main

B) l'enrobage : Par la suite, on effectue un enrobage au moyen de résine, afin de permettre une manipulation plus aisée de l'échantillon et d'assurer la planéité de la surface lors du polissage.



Figure 2.8: Enrobage des échantillons.

C) Polissage :

Le polissage proprement dit a pour buts principaux l'obtention d'une surface plane de rugosité minimale, mais également l'élimination de la couche superficielle de l'échantillon

dont la microstructure pourrait être non-représentative du matériau (couches d'oxydes, écrouissage provenant de la découpe, ...). On dresse donc la surface découpée à la meule, puis aux papiers émeri (figure2.9). (= papiers recouverts de poudre abrasive (SiC) et de granulométrie décroissante (typiquement de 150 à 15 μ m)) sous eau, en veillant à ne pas échauffer l'échantillon. L'utilisation de l'eau permet également d'éliminer les produits de l'abrasion (figure2.10.).



Figure2.9 : polisseuse

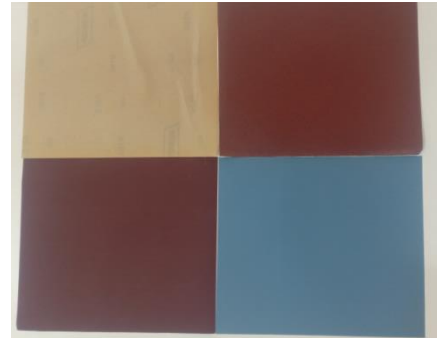


Figure2.10 : papier abrasif

D) l'attaque chimique :

L'attaque chimique elle provoque une dissolution différentielle des cristaux suivant leur orientation, des phases suivant leur nature ou une attaque spécifique aux joints de grains. Pour nos échantillons, nous utiliserons principalement le Killer.

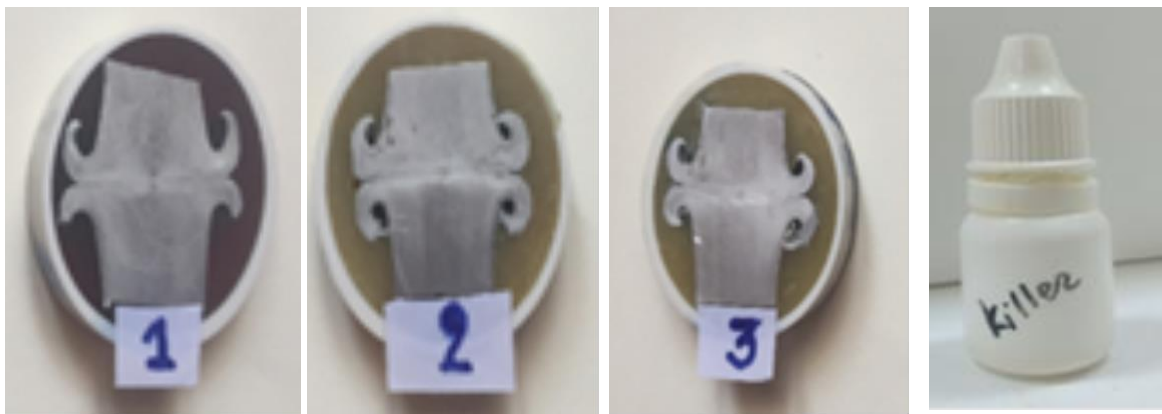


Figure2.11: échantillons après l'attaque chimique

2.3.1.2. Observations microscopique

La microscopie optique est une méthode d'étude micrographique standard en science des matériaux. Il est en effet possible de trouver des microscopes de ce type dans n'importe

quel laboratoire, et des connaissances dans ce domaine sont donc indispensables pour l'Ingénieur en Science des Matériaux. Nous avons utilisé principalement le Killer comme réactif chimique. Les observations métallographiques permettent principalement de renseigner sur l'état de la structure et la grosseur des grains. Pour notre étude ces observations sont réalisées à l'aide d'un microscope optique en réflexion d'objectifs x10, x 20, x100 x200, x 500 et x1000,(Fig.2.12).

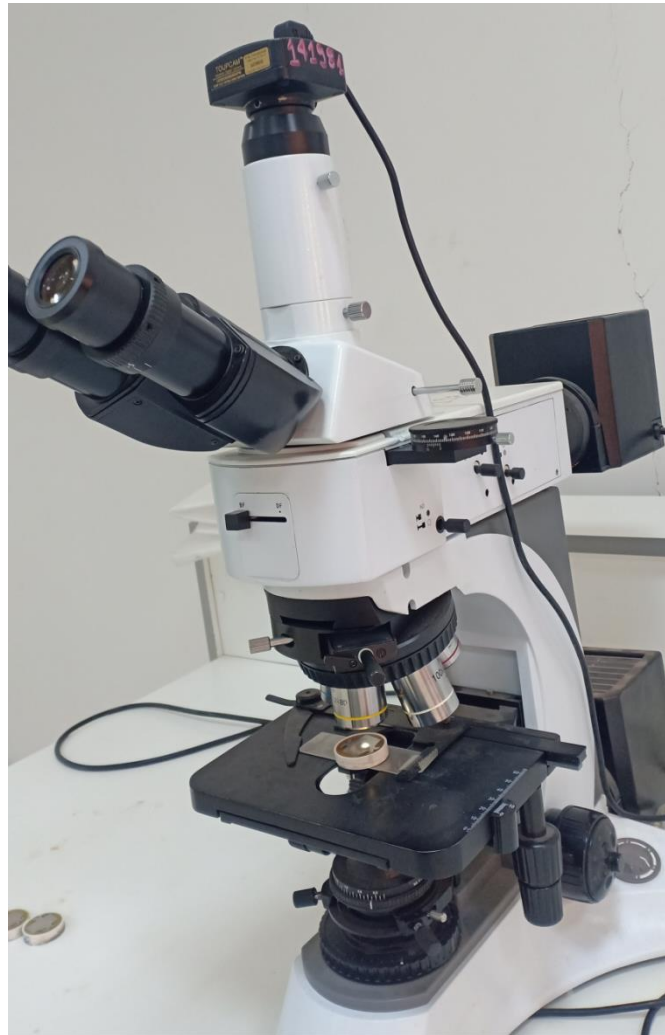
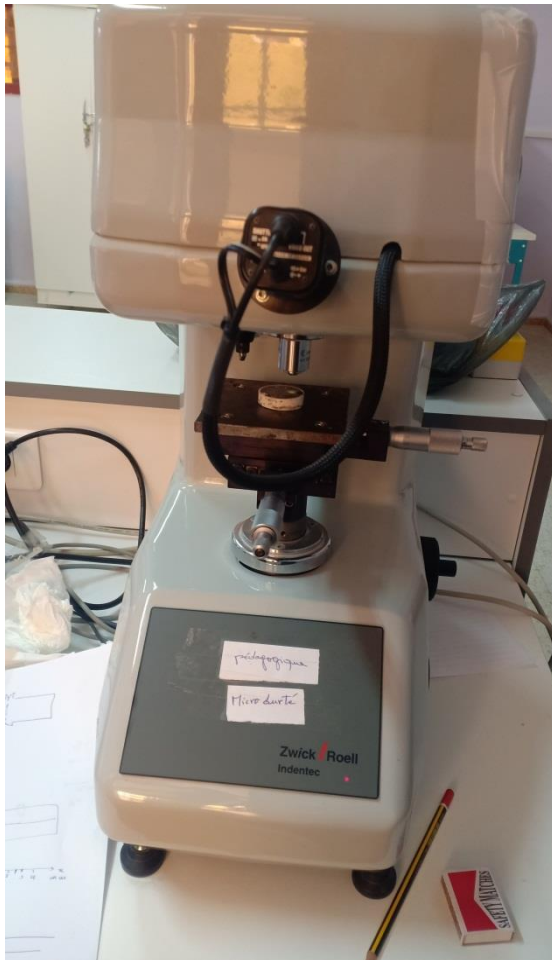


Figure 2.12 : Microscope optique.

2.3.2. Caractérisation mécanique des joints soudés :

2.3.2.1. Mesures de micro-dureté Vickers

Après l'enrobage et le polissage, les sections longitudinales des échantillons soudés sont placés sur la table d'un micro-duremètre de type ZWICK ROELL INDENTC. (Figure 2.13) les mesures de micro-dureté Vickers ($HV_{0.2}$) ont été prises sous une charge de 200g pour l'aluminium et Période de temps 10s.



Ligne de mesure

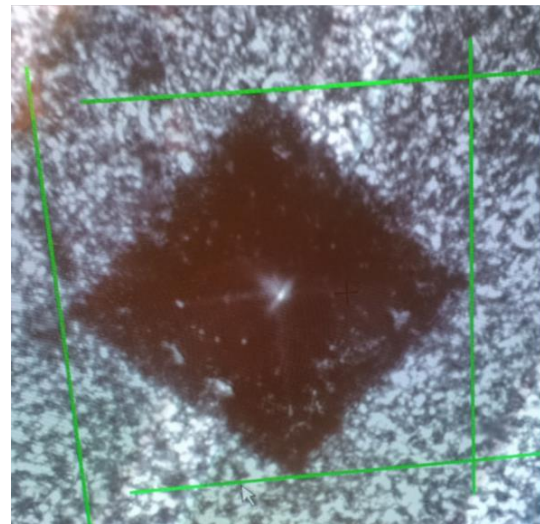
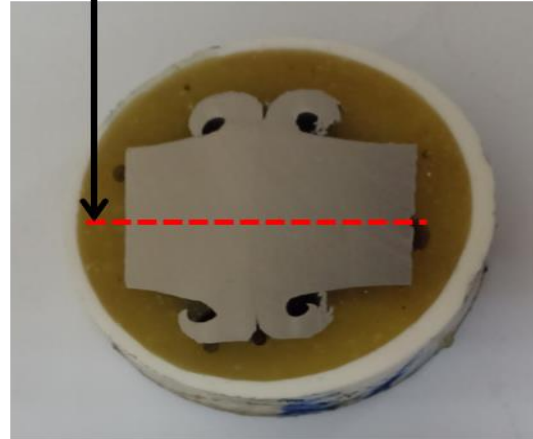


Figure2.13: Micro-d 'uromètre Vickers

Figure2.14 :empreinte

2.3.2.2. Essai de traction

Les essais sont réalisés sur une machine universelle de traction de marque W310a été utilisée (Fig2.15). On applique progressivement et lentement(sans choc) à des éprouvettes soudées, de forme et de dimensions normalisées, un effort de traction croissant dont l'intensité varie de 0 à F.



Figure 2.15 : Machine de traction

2.3.2.3. Essai de flexion (trois points)

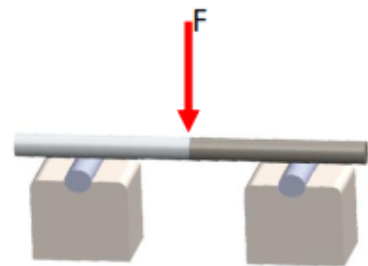
L'essai de flexion consiste à exercer sur une éprouvette de forme cylindrique ou parallélépipède (plates) de force verticale, qui va la déformer progressivement puis la courber.

La résistance à la flexion 3 points est donnée par la formule :

$$\sigma_F = \left(\frac{F_{max} \cdot L}{\pi \cdot r^3} \right) \cdot 1000$$

Avec :

- F_{max} = La charge maximale
- L : La distance entre les supports (mm)
- r : Le rayon de l'éprouvette (mm)



Les essais de flexion 3 points sont réalisés par une machine d'essais universelle asservie de type Cybertronic (figure 2.16). Qui présente les caractéristiques suivantes :

- Modèle : E160-01N
- Capacité 250-15 KN
- Echelle 1
- Max pression 288.88-17.33 bar
- Elastique en ,458J
- Surface de piston 86,54 cm



Figure 2.16 : Machine de flexion

3.4 Bibliographie

- [1].Bailon, J.P .Dorlot, J.M., « Des matériaux » troisième édition. Presses Internationales Polytechnique».
- [2]. Métaux détail (MDS). <http://www.métaux-détail.com>. (03 mai 2018).
- [3].Dehrib Sabrina, memoire de magister, universite mouloud mammeri de tizi ouzou, 2015.
-

Chapitre **3**

Résultats et discussions

Sommaire

3.1	Introduction.....	43
3.2	Observations visuel.....	43
3.3	Raccourcissement des joints soudés (brun-off).....	44
3.4	Cycle thermiques.....	45
3.5	Mesures de micro-dureté.....	46
3.6	Essai de traction.....	47
3.7	Essai de flexion.....	48
3.8	Bibliographie	50

3.1 Introduction

Ce chapitre présente les résultats de notre travail, ainsi que leurs interprétations et discussion. On commence par l'observation micrographique des joints, puis nous présentons les résultats de caractérisation par différents essais et techniques de caractérisation.

3.2 Observations visuel :

(La figure 3.1) montre des échantillons soudés aluminium/aluminium juste après le soudage par friction rotative. Il est clair que le bourrelet de soudure a une forme asymétrique.

Les sections longitudinales des échantillons soudés sont montrées sur (la figure 3.2). On remarque que le bourrelet est formé dans les deux parties, et on note aussi que la taille du bourrelet change d'un échantillon à un autre.



Figure 3.1 : Les échantillons soudés aluminium/aluminium juste après le soudage par friction rotative.

a) Fraction volumique $Al_2O_3 = 0\%$ b) Fraction volumique $Al_2O_3 = 6,25\%$ Fraction volumique $Al_2O_3 = 17,36\%$

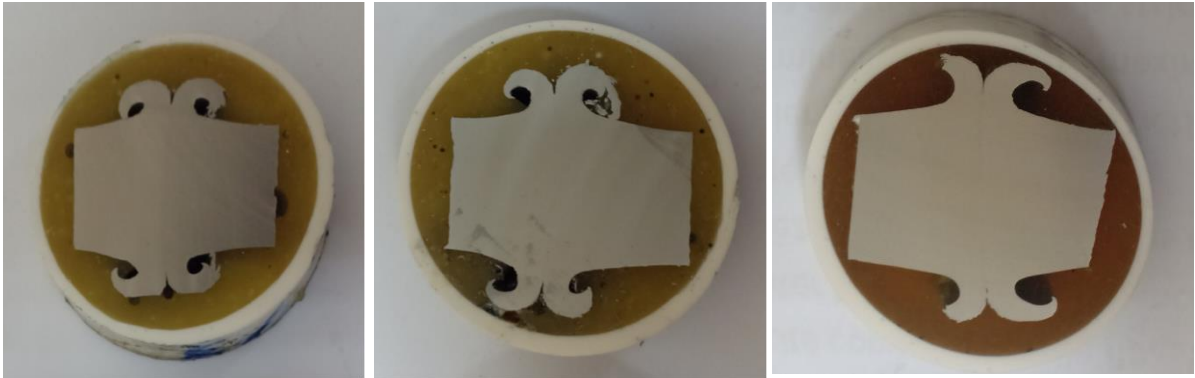


Figure 3.2 : Les sections longitudinales des échantillons soudés

3.3 Raccourcissement des joints soudés (burn-off)

Le raccourcissement (en anglais, the burn-off), qui égale à la différence entre la somme des longueurs des deux pièces à souder et la longueur de l'échantillon résultant, a été mesuré pour tous les échantillons soudés. [1] La figure 3.3 montre les variations du raccourcissement des joints d'aluminium 2017A. On remarque la quantité de matière consommée (ou le raccourcissement) au cours du processus de soudage, et aussi la variation des paramètres de soudage (Fractions volumiques) affectent directement la quantité de chaleur générée lors du soudage et par conséquent les propriétés des joints.

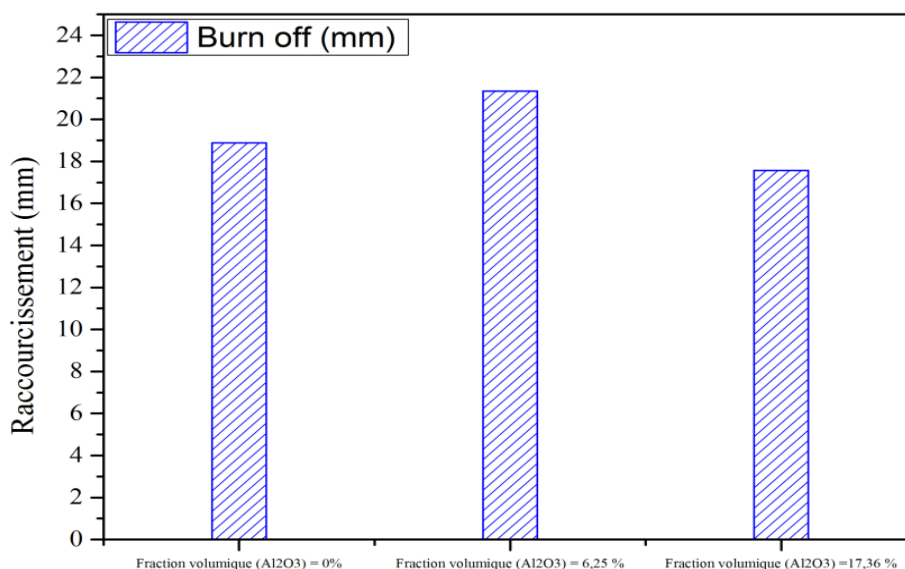


Figure 3.3 : Variations du raccourcissement des joints soudés d'Aluminium 2017A

4.4 Cycle thermiques

La figure 3 montre les mesures de températures enregistrées par une caméra infrarouge pour toutes les essais. Les mesures de températures enregistrées au point loin de la zone de soudage de 15 mm de distance comme indique la (figure3.4). Pendant le processus de soudage, les variations de température dans les pièces, ont été enregistrés à une vitesse de rotation fixée (1400 Rpm). Nous observons que, la température atteint sa valeur maximale dans la phase de friction (Temps de friction égale à 40 s). Au-delà cette zone la valeur maximale de la température est diminuée [2] D'autre part nous constatons que, la température maximale dans le cas de la fraction volumique 17.36%.

- On a noté aussi que, plus la vitesse d'avance augmente, la température du joint augmente jusqu'à la température de 450 °C.

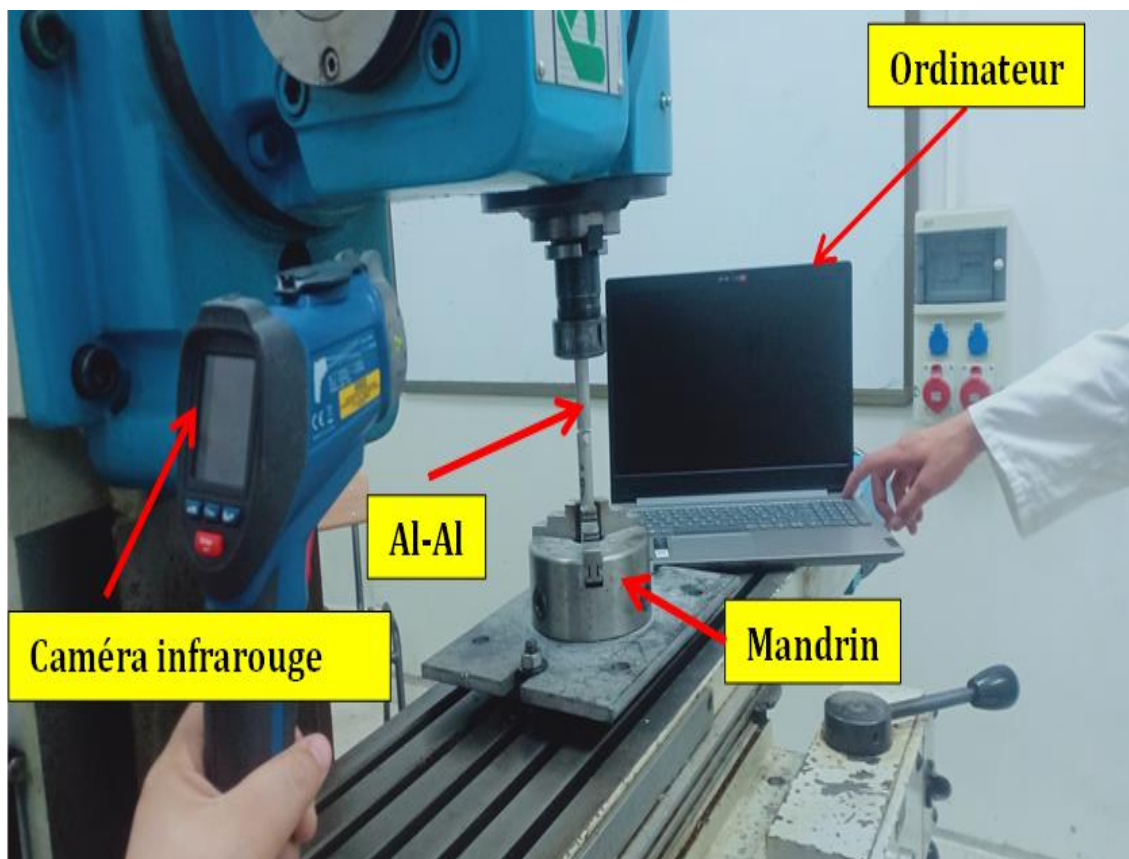


Figure 3.4 : les mesures de températures enregistrées par une caméra infrarouge

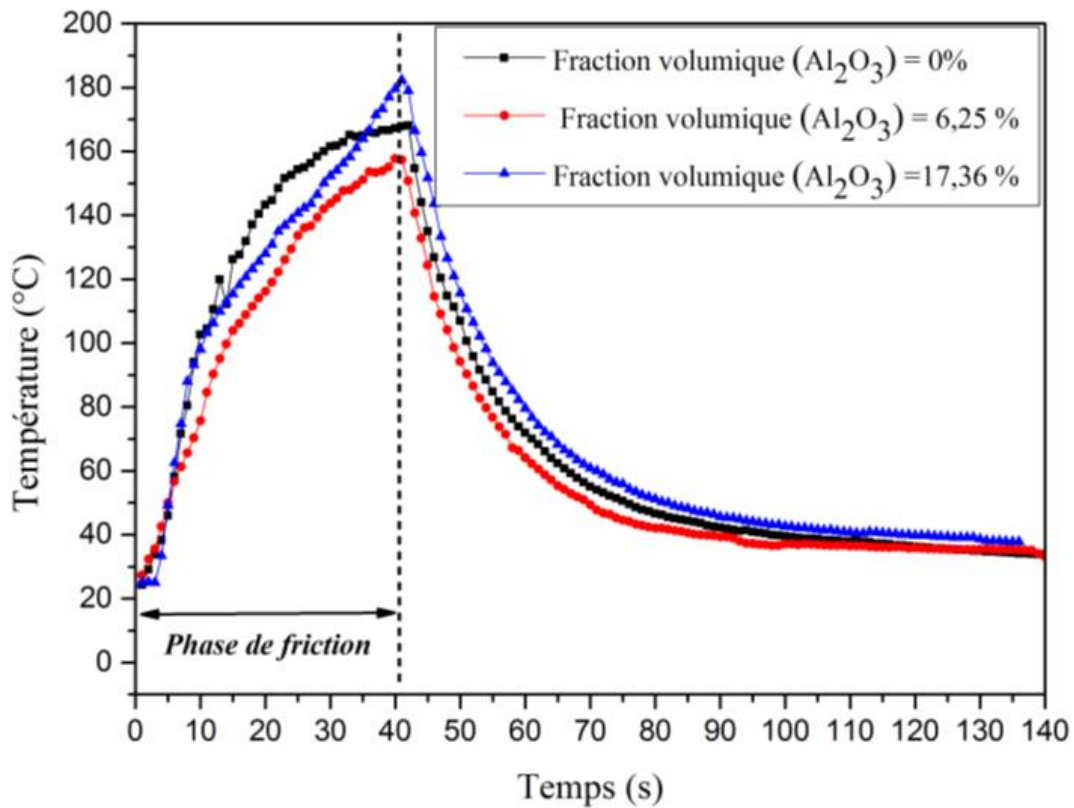


Figure 3.5 : Variations de température dans la pièce (Aluminium 2017A, l'alumine Al_2O_3), pendant le processus de soudage.

3.5 Mesures de micro-dureté

L'essai de dureté est l'approche habituelle pour déterminer les propriétés des différentes zones du joint soudé et de connaître la limite de chaque zone dans le joint soudé [3], mais l'information obtenue est parfois très limitée [4-5]. La variation de la dureté à travers le joint de soudure suivant la direction longitudinale dépend de l'emplacement des mesures, il peut être divisé en trois zones. La zone à dureté élevée qui correspond à la zone déformée plastiquement (ZATM), la zone non affectée, dont la dureté est presque égale à la dureté du métal de base, la zone affectée par la chaleur (ZAT), dont les valeurs de la dureté varient en fonction de la variation des fractions volumiques [6]. Des mesures de microdureté Vickers ont été effectuées sur des échantillons de vitesse d'avance 63 mm/min et de vitesse de rotation 1400 rpm, de la soudure afin de déterminer la résistance de la trois zones microstructurales dans l'aluminium étudié, comme le montre la figure 3.6). On a pu constater une dureté maximale de l'échantillon à une fraction volumique 6.25% de 242.4HV a été obtenu près de l'interface de soudure dans l'aluminium qui ne contient pas d'alumine

Al_2O_3 . Globalement la dureté de la partie rotative est plus élevée par rapport à celle de la partie fixe (*sans alumine*). Seulement des valeurs variables dans la zone centrale du joint soudé.

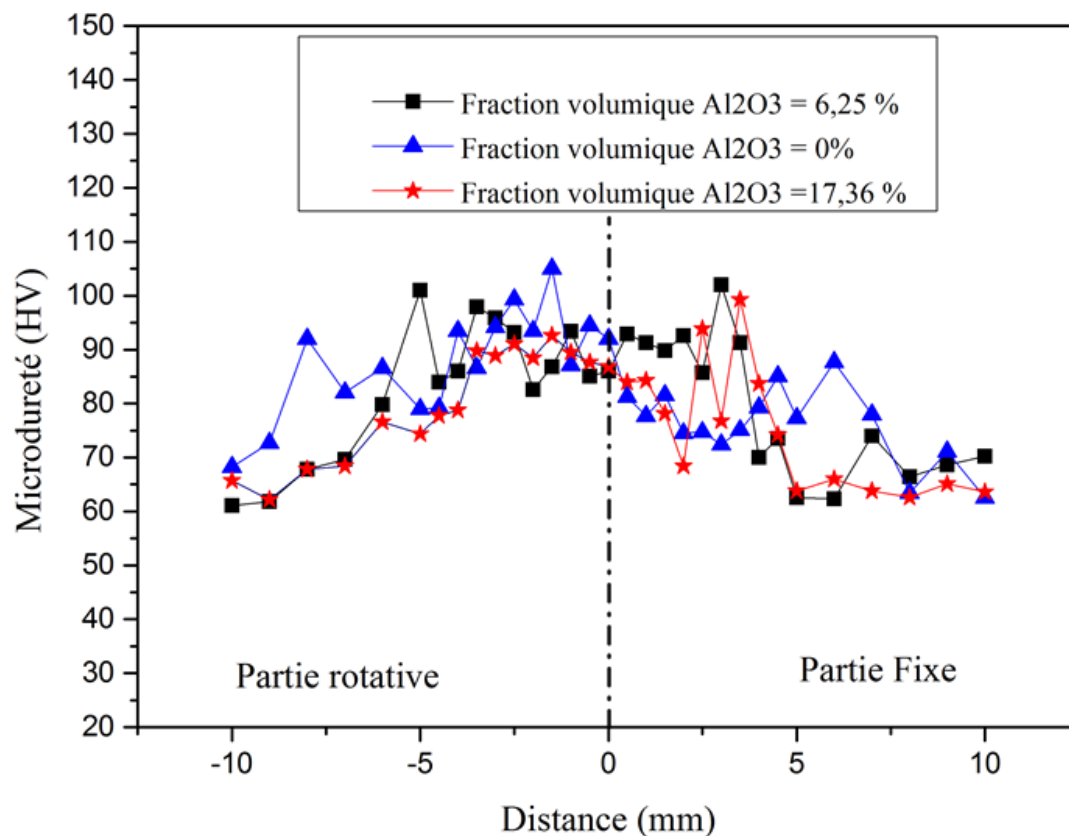


Figure 3.6: Profil de la micro-dureté, Vickers

3.6 Essai de traction

La figure 4.7 représente les résultats de l'essai de traction que nous avons effectué sur des éprouvettes soudées par friction rotative. Les éprouvettes ont toutes rompues dans la zone fondue ce qui implique qu'il n'y a pas de discontinuité dans les propriétés mécaniques au niveau de la soudure. On peut donc considérer la soudure comme homogène [7].

Une comparaison entre les courbes qui représentent chaque paramètre est illustré dans (la figure 3.7) a été faite en raison de qualifier la qualité de soudage. Il est constaté que pour tous les courbes, la limite d'élasticité est presque identique. La fraction volumique 6.25% présente une meilleure caractéristique mécanique avec une charge 16.62 kN. Tandis que l'échantillon à une fraction volumique 0% possède une charge de 14.19 kN.

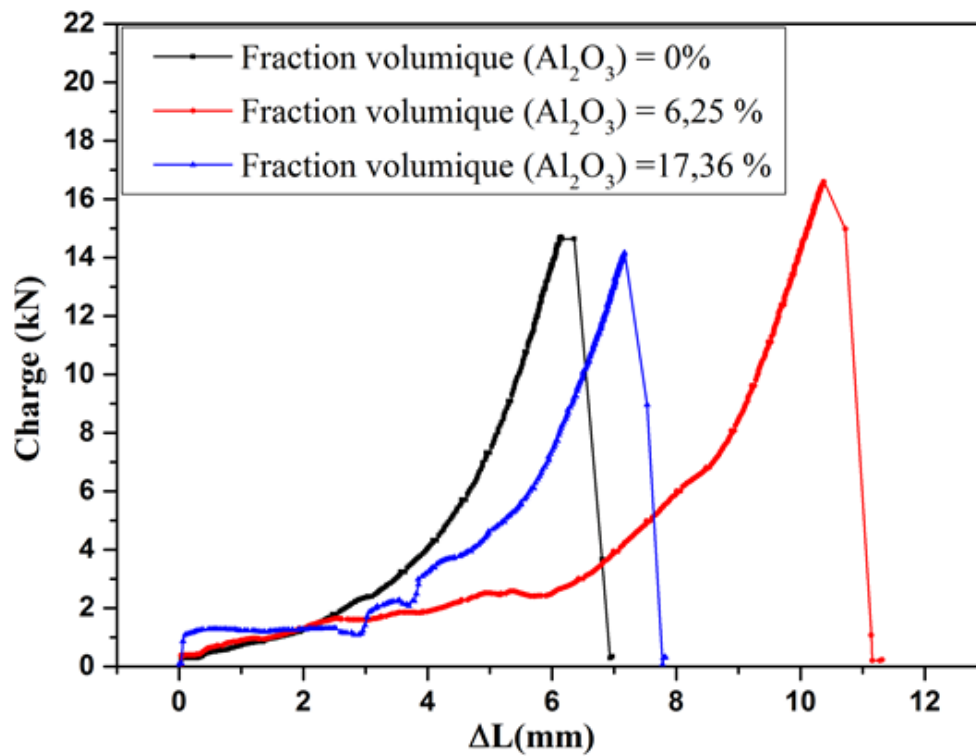


Figure 3.7 : Courbes de traction pour différents fractions volumiques

3.7 Essai de flexion

Pour tester les joints soudés, des essais en flexion 3 points ont été réalisés. Les conditions d'essais sont identiques. La distance entre les appuis est de 100 mm. Le principe de cet essai est représenté sur (la figure 3.8)

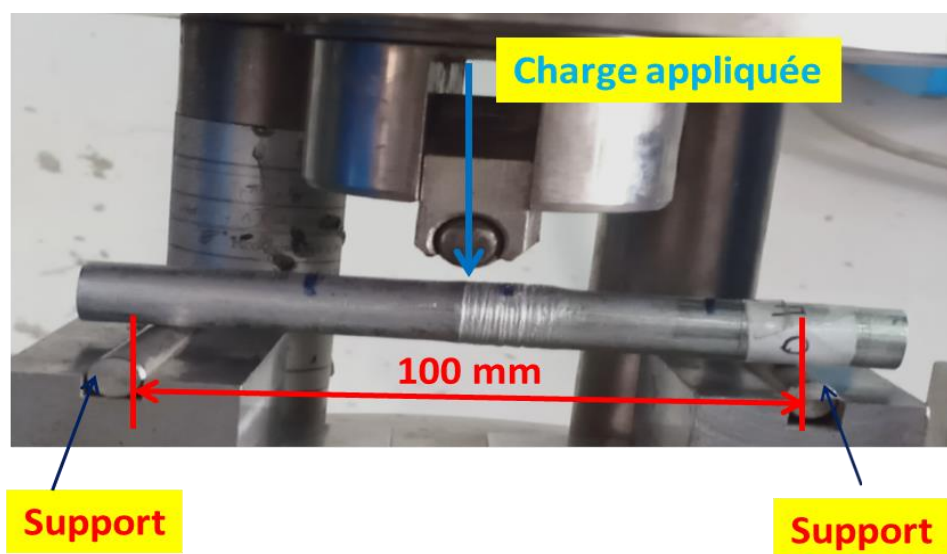


Figure 3.8 : Le principe de cet essai

Au cours du processus de caractérisation mécanique, nous avons utilisé un test de flexion. Le test de flexion est une méthode simple et très utile pour évaluer la résistance à la flexion des joints soudés par friction. La (figure 3.9) montres les échantillons apparaissent après le test

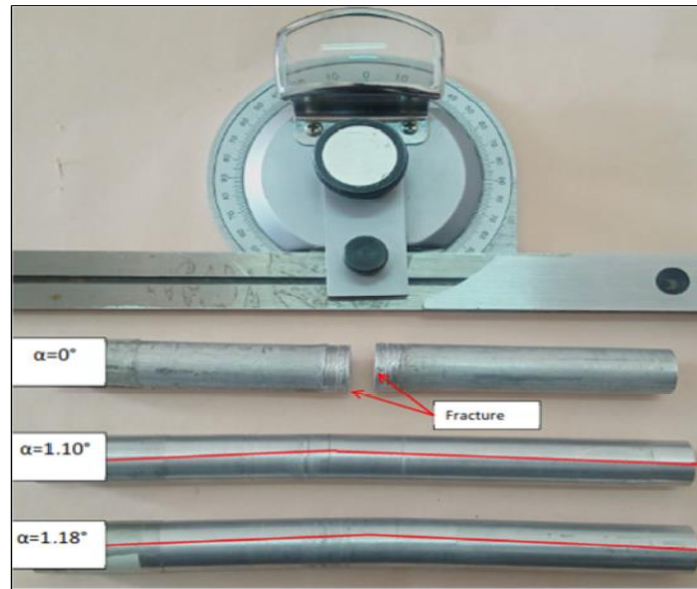


Figure 3.9 : *Éprouvettes après Essai de flexion*

L'essai de flexion ne permet généralement pas d'atteindre la rupture des matériaux ductiles. La (figure 3.10) montre les courbes qui expriment la force max en fonction du temps. De ce point de vue, nous pouvons expliquer que les échantillons 02 et 03 n'ont pas d'atteindre la rupture, mais se sont seulement déformés à des angles différents, comme le montre La (figure 3.9).

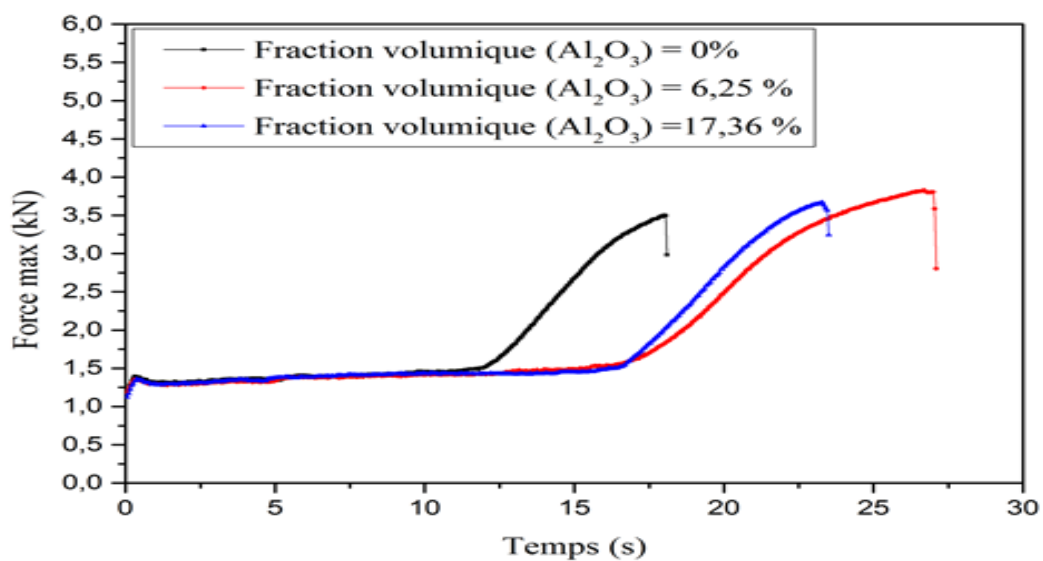


Figure 3.10 : *Coubes de tractions de différentes éprouvettes*

4.8 Bibliographie

- [1] *khalfallah fares , soudage par friction de l'acier avec du céramique thèse doctorat, Université mohamed khider-biskra, 05 /03/2020 .*
- [2] *Boukraa.m , aissni.m,zitouni.a, modélisation thermique du problème de soudage par friction malaxage fsw dans un système de coordonnées mobile ,2013.*
- [3] z. Boumerzoug, z. Boumerzoug, c. Derfouf, t. Baudin, effect of welding on microstructure and mechanical properties of an industrial low carbon steel, *engineering*, 2, 502-506. (2010).
- [4] r.g. Thiessen, i.m. Richardson, j. Sietsma, physically based modelling of phase transformations during welding of low-carbon steel, *materials science and engineering a* 427 (2006) 223-231.
- [5] these doctorat raouacheelhadj
- [6] *thèse doctorat dameleddine batna*
- [7] kaid mustapha , these doctorat simulation numérique du comportement thermomécanique du soudage par fsw, *Universite djillali liabes de sidi bel abbes, 2020*],
-

Conclusion

L'objectif de ce travail expérimental est d'étudier l'effet d'addition des particules d'Alumine (Al_2O_3) sur le procédé de soudage par friction rotative. Des joints similaires d'Aluminium 2017 A.

Le bourrelet est formé dans les deux parties, et aussi la taille du bourrelet change d'un échantillon à un autre.

La quantité de matière consommée (ou le raccourcissement) au cours du processus de soudage, et aussi la variation des paramètres de soudage (Factions volumiques) affectent directement la quantité de chaleur générée lors du soudage et par conséquence les propriétés des joints.

On a noté aussi que, plus la vitesse d'avance augmente, la température du joint augmente jusqu'à la température de 450 °C.

On a pu constater une dureté maximale de l'échantillon à une fraction volumique 6.25% de 242.4HV a été obtenu près de l'interface de soudure dans l'aluminium qui ne contient pas d'alumine Al_2O_3 . Globalement la dureté de la partie rotative est plus élevée par rapport à celle de la partie fixe (*sans alumine*). Seulement des valeurs variables dans la zone centrale du joint soudé.

La fraction volumique 6.25% présente une meilleure caractéristique mécanique avec une charge 16.62 kN.

Aucune rupture des matériaux ductiles lors du test de flexion mais se sont seulement déformés à des angles différents.

Résumé :

Dans ce travail expérimental, des joints similaires en aluminium Al2017 A renforcés avec des particules d'alumine (Al_2O_3) ont été développés par soudage par friction rotative. Les particules d'alumine ont été ajoutées à l'interface des joints en les plaçant dans des trous de différents diamètres percés dans la pièce fixe, et ceci dans le but d'étudier l'effet des variations des fractions volumiques des particules ajoutées sur les propriétés mécaniques des joints résultants.

En général, les résultats des essais de traction et de micro-dureté ont révélé que les propriétés mécaniques des joints renforcés par des particules d' Al_2O_3 ont été améliorées par rapport au joint soudé sans addition d' Al_2O_3 .

Mots clés : Soudage par friction rotative, Joints similaires, Alliages d'aluminium Al2017 A, Particule d'Alumine (Al_2O_3).

Abstract :

In this experimental work, similar weld joints of Al2017A aluminum alloy reinforced with alumina (Al_2O_3) particles were developed by rotary friction welding. The alumina particles were added at the interface of the joints by placing them in holes of different diameters drilled in the fixed part, with the aim of studying the effect of variations in the volume fractions of the added particles on the mechanical properties of the resulting joints.

Generally, the results of the tensile and micro-hardness tests revealed that the mechanical properties of the joints reinforced with Al_2O_3 particles were improved compared to friction welded joint without Al_2O_3 addition.

Keywords : Rotary friction welding, Similar joints, Al2017 A aluminum alloys, Alumina (Al_2O_3) particle.

ملخص :

في هذا العمل التجريبي ، تم تطوير وصلات متماثلة من الألمنيوم Al2017 A مقواة بجزيئات الألومينا (Al_2O_3) عن طريق اللحام بالاحتكاك الدوراني. و قد تمت إضافة جزيئات الألومينا إلى واجهة الوصلات بوضعها في ثقب بأقطار مختلفة محفورة في الجزء الثابت، و ذلك بهدف دراسة تأثير التغيرات في النسب الحجمية للجزيئات المضافة على الخواص الميكانيكية للوصلات الناتجة.

بشكل عام، فقد أظهرت نتائج اختبارات الشد والصلابة المجهرية بأن الخواص الميكانيكية للوصلات المقواة بجزيئات Al_2O_3 قد تحسنت مقارنة مع الوصلة الملحومة بدون إضافة هذه الجزيئات.

كلمات مفتاحية : لحام الاحتكاك الدوراني ، الوصلات المتشابهة، الألمنيوم Al2017 A، جسيمات الألومينا (Al_2O_3).