

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DES SCIENCES
DEPARTEMENT PHYSIQUE
N° : Ph/MAT/08/2020



DOMAINE : Sciences de la matière
FILIERE : Physique
OPTION : Physique des Matériaux

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Par: DJAIDJA Latifa

Intitulé

Caractérisation des joints

Acier inoxydable/Cuivre soudés par friction

Soutenu le /09 /2020 devant le jury composé de:

Dr. ALLALI Djamel	Université de M'sila	Président
Dr. KHALFALLAH Fares	Université de M'sila	Rapporteur
Dr. RAOUACHE Elhadj	Université de Bordj Bou Arreridj	Co-Rapporteur
Dr. BENDERRADJI Razik	Université de M'sila	Examineur

Année universitaire : 2019/2020



Dédicace

*T*out d'abord, Dieu merci

*J*e dédie ce Modeste travail :

À la mémoire de mon père qui nous a quitté il y'a 22 ans.

À ma chère maman, la personne qui a beaucoup sacrifié pour moi.

Sans elle, je n'aurais eu la volonté d'atteindre ce niveau. Que Dieu puisse la garder éternellement heureuse. Merci du fond du cœur.

À mes frères (Nabil, Adel, Bilal, Ayman) et ma sœur (Siham).

À la femme de mon frère et au mari de ma sœur.

À mes petits poussins (Rassill, Mohammed Iyad, Abrar, Adem).

À mon grand-père, ma grand-mère et tous les membres de la famille.

À tous mes amis et aux étudiants de Master 2 – Physique des Matériaux.

Latifa



R *emerciement*

Louange à ALLAH le miséricordieux qui nous a donné la volonté, la santé et la patience pour finir ce modeste travail

Toute ma gratitude va vers mon encadreur, monsieur : KHALFALLAH Fares, maître de conférences à l'Université Mohamed Boudiaf - M'sila, pour ses orientations, ses conseils, ses remarques judicieuses ornées d'encouragements, et sa patience.

Je remercie aussi mon co-encadreur, monsieur : RAOUACHE Elhadj, maître de conférences à l'Université de Bordj Bou Arreridj, pour m'avoir fait bénéficier de son expérience et de ses précieux conseils.

Je tiens aussi à remercier les membres du jury, monsieur : ALLALI Djamel et monsieur : BENDERRADJI Razik, maîtres de conférences à l'Université de M'sila, pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant de lire et de juger ce mémoire.

Toute ma reconnaissance à Mr. BRIKI Ameer et à Mr. ZITOUNI Kamel, ingénieurs de labo de génie mécanique - Université de Bordj Bou Arreridj, pour leur aide précieuse

J'adresse également mes sincères remerciements à tous les enseignants de Département de Physique à l'Université Mohamed Boudiaf - M'sila.

Table des matières

	Page
Dédicace.....	i
Remerciements.....	ii
Table des matières.....	iii
Liste des figures.....	v
Liste des tableaux	vii

Introduction générale.....	1
-----------------------------------	----------

Chapitre I : Bibliographie – Le soudage par friction rotative Acier inoxydable austénitique – Cuivre

Partie 1 : Le procédé de soudage par friction rotative	3
I-1.1. Introduction	3
I-1.2. Définition du soudage	3
I-1.3. Classifications des procédés de soudage	4
1. Procédés de soudage avec fusion (en phase liquide)	4
2. Procédés de soudage sans fusion (en phase solide)	4
I-1.4. Soudage par friction.....	4
1. Définition.....	4
2. Procèdes de soudage par friction.....	6
I-1.5. Soudage par friction rotative.....	6
1. Définition.....	6
2. Principe de soudage par friction rotative.....	7
3. Processus de soudage par friction rotative.....	7
4. Modes de soudage par friction rotative	9

5. Domaine d'application du soudage par friction rotative	12
6. Les avantages et les limites du soudage par friction rotative.....	14
Partie 2 : Soudage par friction rotative Acier inoxydable austénitique – Cuivre	15
I-2.1. Les aciers inoxydables austénitiques.....	15
I-2.2. Le cuivre pur	15
I-2.3. Analyse de la littérature.....	17
Références bibliographiques.....	20

Chapitre II : Matériaux et procédure expérimentale

II.1. Introduction	23
II.2. Matériaux utilisés.....	23
II.3. Procédé de soudage par friction rotative acier inoxydable AISI 316L – Cuivre...	24
II.4. Caractérisation mécanique des joints soudés.....	27

Chapitre III : Résultats & Discussions

III.1. Introduction.....	29
III.2. Apparence des échantillons AISI 316L/Cu soudés par friction rotative.....	29
III.3. Apparence des interfaces des joints AISI 316L/Cu	29
III.4. Effet de la vitesse de rotation.....	30
1. sur le raccourcissement des joints soudés.....	30
2. sur les variations de la température au cours du soudage.....	31
3. sur la résistance à la traction des joints soudés.....	32
Références bibliographiques.....	36

Conclusion générale.....	95
---------------------------------	-----------

Liste des figures

		Page
Figure I.1	Principaux procédés de soudage avec fusion	5
Figure I.2	Classification des procédés de soudage par friction.....	6
Figure I.3	Principe de soudage par friction rotative	7
Figure I.4	Variations du couple de frottement pendant la phase de friction	8
Figure I.5	Interaction des surfaces pendant la phase de friction	9
Figure I.6	Processus du soudage par friction rotative à entraînement direct	10
Figure I.7	Variations des paramètres du soudage par friction rotative à entraînement direct.....	10
Figure I.8	Processus du soudage par friction rotative inertielle	11
Figure I.9	Variations des paramètres du soudage par friction rotative inertielle...	12
Figure I.10	Quelques applications industrielles du soudage par friction rotative ...	13
Figure I.11	Connecteurs bimétalliques fabriqués par soudage par friction rotative	13
Figure I.12	Joint AISI 304/Cuivre soudé par friction rotative	17
Figure I.13	Relation entre la résistance à la traction des joints AISI 304/Cuivre et : (a) la pression de friction et (b) le temps de friction	18
Figure I.14	Joint AISI 304L/Cuivre soudé par friction rotative après le test de traction	18
Figure I.15	Variations de la température pendant la phase de friction sous : (a) une pression de friction de 30 MPa et (b) une pression de friction de 90 MPa.....	19
Figure II.1	Pièces AISI 316L et Cuivre à souder par friction rotative.	25
Figure II.2	Procédé de soudage par friction rotative acier inoxydable AISI 316L – Cuivre	25
Figure II.3	Machine de polissage utilisée.	27

Figure II.4	Machine hydraulique d'essais universelle, 50kN de type WP 310.....	28
Figure III.1	Echantillons acier inoxydable AISI 316L/cuivre soudés par friction rotative.	29
Figure III.2	Sections longitudinales des échantillons acier inoxydable AISI 316L/cuivre soudés par friction rotative.	30
Figure III.3	Variations du raccourcissement des joints acier inoxydable AISI 316L/cuivre.	31
Figure III.4	Variations de température dans la pièce d'AISI 316L pendant le processus de soudage.	32
Figure III.5	Joints soudés acier inoxydable AISI 316L/cuivre : (a) avant de après les tests de traction et (b) après les tests de traction.	33
Figure III.6	Fractographie des échantillons soudés acier inoxydable AISI 316L/cuivre après les tests de traction.	33
Figure III.7	Variations de la résistance à la traction et de la température maximale en fonction de la vitesse de rotation.	34

Liste des tableaux

		Page
Tableau I.1	Exemples de désignations des aciers inoxydables	16
Tableau II.1	Composition chimique de l'acier inoxydable AISI 316L (déterminée par Spectrométrie de fluorescence des rayons X (XRF)).....	23
Tableau II.2	Propriétés physiques et mécaniques de l'acier inoxydable AISI 316L.	23
Tableau II.3	Composition chimique du cuivre Cu/c2 (déterminée par XRF).	24
Tableau II.4	Propriétés physiques et mécaniques du cuivre Cu/c2.....	24
Tableau II.5	Paramètres de soudage par friction rotative AISI 316L – Cuivre.....	26

*I*ntroduction **G**énérale

Introduction

L'assemblage est un processus essentiel pour une large gamme d'industries modernes. Dans l'histoire, le soudage a été considéré comme une technique d'assemblage très utilisée dans l'industrie automobile, le nucléaire, l'aérospatiale, Cependant, le développement d'une excellente soudure est techniquement difficile, notamment dans le cas des assemblages hétérogènes ou dissimilaires. Les recherches actuelles sur le soudage des matériaux dissimilaires suggèrent que le soudage par friction est la meilleure méthode pour assembler des matériaux dissimilaires tels que les alliages d'aluminium et les aciers ou le cuivre et les aciers inoxydables, en raison des avantages techniques, économiques et environnementaux qu'il offre.

Le soudage par friction a été développé à la fin du XIX^e siècle, mais il était rarement utilisé au début du siècle dernier. Après la Seconde Guerre mondiale, ce procédé fut appliqué sous sa forme industrielle en Union Soviétique (vers 1954), puis en Grande-Bretagne et aux États-Unis quelques années plus tard.

Le soudage par friction est un procédé de soudage à l'état solide (les températures de fusion des matériaux à souder ne sont jamais atteintes) dans lequel un joint est produit entre deux pièces par l'effet de la chaleur de friction générée au niveau de leurs surfaces mises en mouvement. En fonction du mouvement des pièces à souder, le soudage par friction est classé en deux groupes. Dans le premier groupe, qui comprend le soudage par friction rotative (SFR), la chaleur est générée par un mouvement relatif entre les deux surfaces. Dans le deuxième groupe, la chaleur est générée par un mouvement relatif entre un outil et les surfaces des pièces à souder (soudage par friction malaxage (SFM)).

Le soudage par friction rotative, qui est la plus ancienne technique d'assemblage par friction, est utilisé pour assembler deux pièces dont l'une au moins à une symétrie de révolution (tige ou tube). Ce procédé met en œuvre l'effet thermique généré dans le plan de contact, par la rotation rapide sous la pression des pièces à souder l'une contre l'autre.

Le soudage par friction rotative est utilisé dans plusieurs domaines de l'industrie en

raison de ses avantages, tels que l'économie des matériaux (l'absence de fusion), la faible durée de production et la faible zone affectée thermiquement. Les facteurs (les paramètres de soudage) qui affectent la qualité des joints soudés par friction rotative sont : la vitesse de rotation, le temps de soudage et la pression appliquée.

Les demandes croissantes des industries modernes nécessitent des matériaux caractérisés par la légèreté, la rigidité et la résistance élevées, la bonne résistance à la corrosion et à l'usure à haute température. Ces tendances nécessitent l'assemblage de plusieurs métaux ou alliages similaires et dissimilaires. En particulier, les aciers inoxydables austénitiques sont assemblés avec d'autres métaux ou alliages métalliques en raison de leurs applications dans divers domaines industriels tels que les industries nucléaires, chimiques et pétrochimiques. Parmi les différents procédés de soudage, le soudage par friction rotative est l'une des techniques qui sont utilisées pour l'assemblage des aciers inoxydables avec d'autres métaux tels que le cuivre.

Le but principal de notre travail est d'étudier le comportement thermique et les caractéristiques mécaniques des joints Acier inoxydable (AISI 316L) / Cuivre soudés par friction rotative.

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

Chapitre 1 : Bibliographie – Le soudage par friction rotative Acier inoxydable austénitique – Cuivre. Ce chapitre présente une revue bibliographique portant sur le procédé de soudage par friction rotative, en passant par sa définition, son principe et ses modes opérationnels. Il couvre également une brève littérature sur le soudage par friction rotative Acier inoxydable austénitique – Cuivre.

Chapitre 2 : Matériaux et procédure expérimentale. 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.

Chapitre 3 : Résultats et discussion. Les résultats expérimentaux sont illustrés et tracés, puis l'effet de la vitesse de rotation sur les propriétés des joints est examiné.

*C*hapitre *1*

Bibliographie - Le soudage

par friction rotative

Acier inoxydable austénitique - Cuivre

Partie 1 : Le procédé de soudage par friction rotative

I-1.1. Introduction

Les recherches sur l'assemblage des matériaux ont une longue histoire dans diverses industries. Ainsi, les chercheurs ont utilisé plusieurs méthodes de soudage, notamment le soudage à l'arc, le soudage aux gaz, le soudage par friction, etc. Les caractéristiques les plus importantes qui ont une influence sur le choix de ces méthodes sont :

- La conception et les spécifications du produit,
- La vitesse du soudage,
- Le temps du soudage,
- Le coût du soudage,
- Les applications et la résistance de l'assemblage.

Les données de plusieurs recherches suggèrent que le soudage par friction est une méthode adéquate pour l'assemblage de plusieurs types des matériaux.

I-1.2. Définition du soudage

Le soudage est un processus d'assemblage consiste à réunir deux ou plusieurs pièces, de manière à assurer la continuité de la matière entre les parties à assembler. L'assemblage s'effectue par action d'une énergie calorifique ou mécanique générée par divers modes. On utilise souvent le terme "soudure ou joint" pour désigner le résultat de l'opération du soudage [1].

Il existe deux cas de soudage :

- Le soudage autogène : Le joint de soudage est de même nature que les pièces à souder.
- Le soudage hétérogène : Le joint est de nature différente des pièces à souder

I-1.3. Classifications des procédés de soudage

Il y a plusieurs moyens pour obtenir l'assemblage par soudage. Dans la majorité des cas, il est obtenu par fusion locale, par diffusion ou par déformation. Les procédés de soudage sont nombreux et peuvent être classés suivant la façon de transfert l'énergie.

1. Procédés de soudage avec fusion (en phase liquide)

Dans l'industrie, le procédé le plus utilisé pour assembler des matériaux similaires est le soudage par fusion [2]. Les principaux types de soudage par fusion sont (figure I.1) :

- Le soudage à l'arc électrique ;
- Le soudage aux gaz (TIG, MIG, ..) ;
- Le soudage par résistance ;
- Le soudage plasma ;
- Le soudage par faisceaux d'électrons ;
- Le soudage par faisceaux laser ;
-

2. Procédés de soudage sans fusion (en phase solide)

Les procédés de soudage à l'état solide regroupent tous les procédés où il y a création d'une soudure sans que les matériaux à souder atteignent leur température de fusion. Le chauffage des surfaces s'effectue par un frottement et/ou une déformation intense localisée, ce qui conduit à chasser les impuretés et à créer un contact intime entre les matériaux à assembler [4]. Les principaux types de soudage à l'état solide sont :

- Le soudage par diffusion ;
- Le soudage par friction ;
- Le soudage par ultrason ;
- Le soudage par explosion ;

I-1.4. Soudage par friction

1. Définition

Le soudage par friction est un procédé de soudage à l'état solide (ou mécanique) pouvant produire des soudures de haute qualité entre deux matériaux similaires ou dissimilaires. Les pièces à souder par friction sont forcées de se frotter les unes contre les autres, générant de la chaleur à l'interface. L'augmentation de la température dans la surface de contact, sans atteindre la température de fusion, adoucit les matériaux de chaque côté de

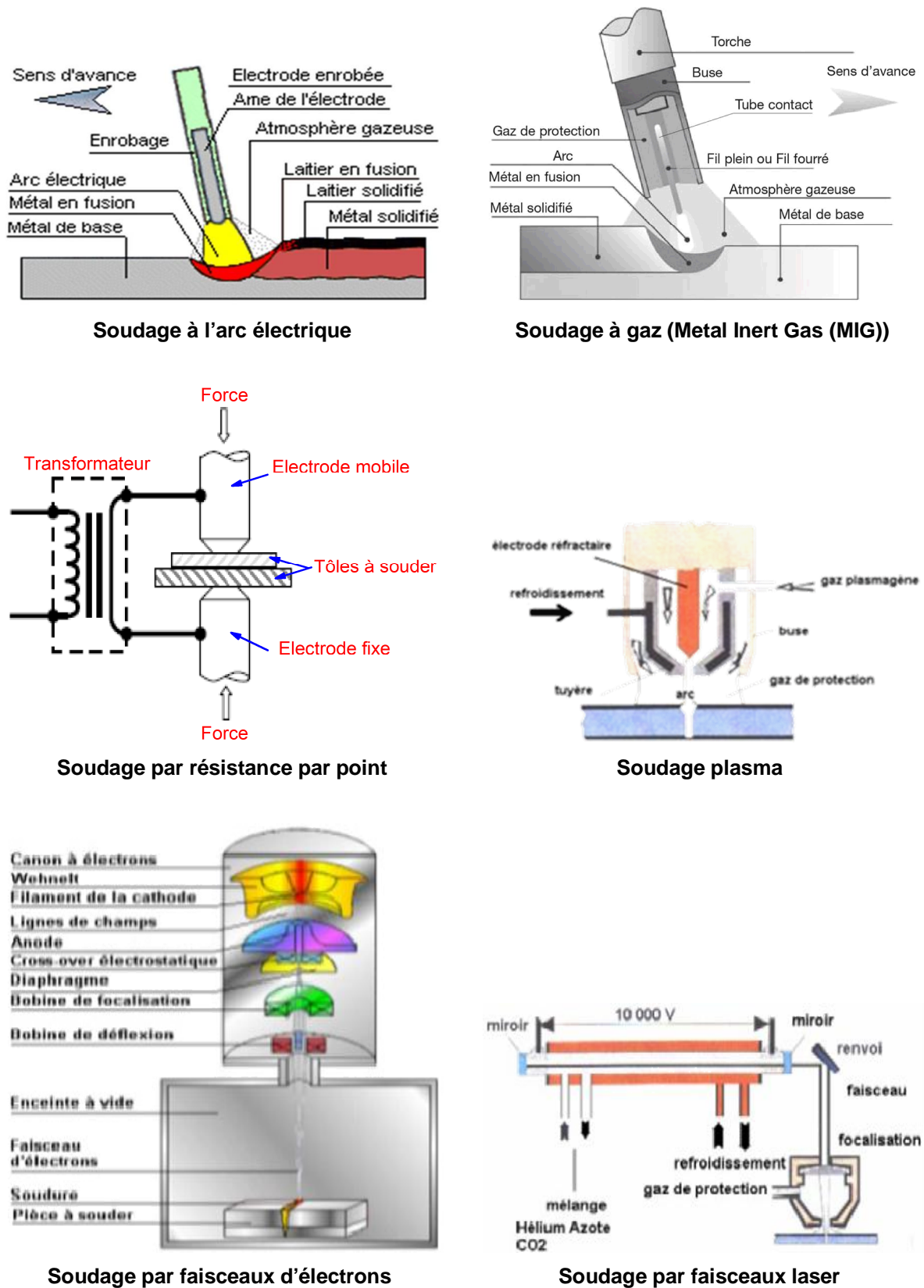


Figure I.1. Principaux procédés de soudage avec fusion [2, 3, 4].

l'interface de frottement. Le frottement est arrêté quand la température désirée est atteinte, et les pièces qui deviennent plastiques sont pressées l'une contre l'autre pour former une soudure solide [5].

2. Procédés de soudage par friction

La figure I.2 présente les principaux procédés de soudage par friction. On peut distinguer deux familles des procédés de soudage par friction, ceux avec rotation des pièces à souder et ceux sans rotation des pièces à souder.

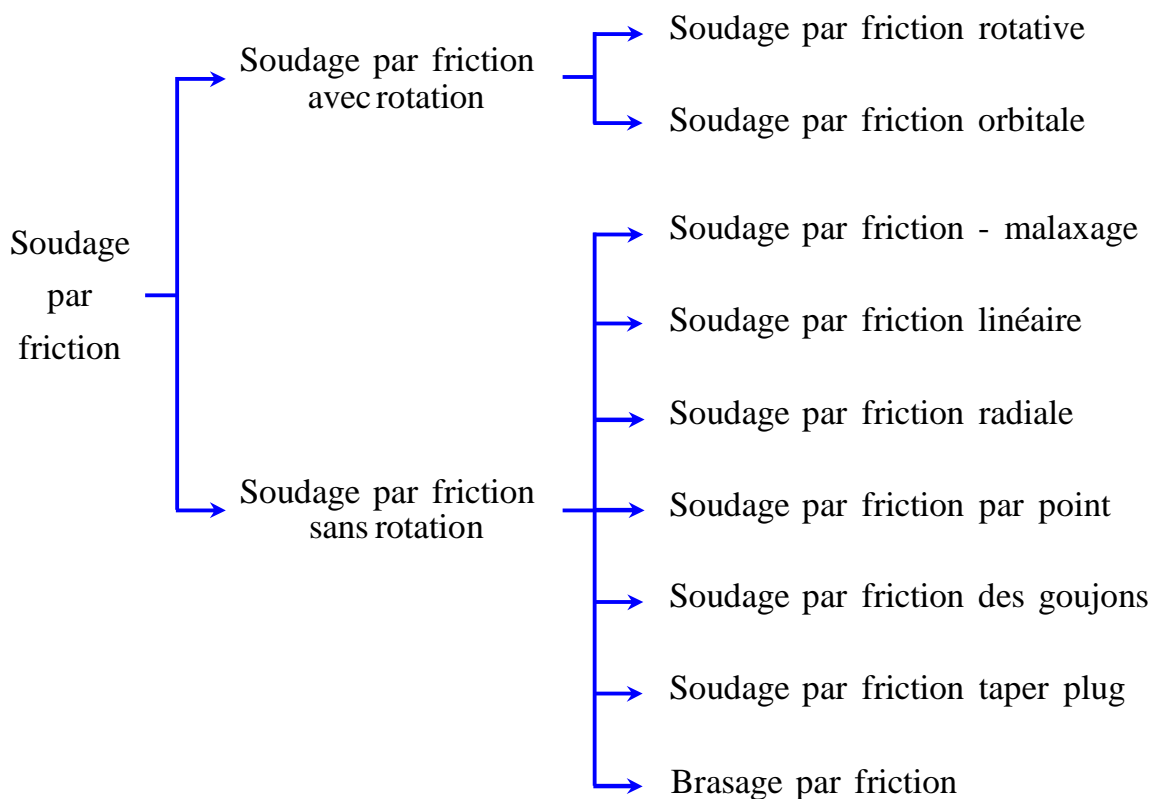


Figure I.2. Classification des procédés de soudage par friction [6].

I-1.5. Soudage par friction rotative

1. Définition

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'une force axiale, afin de produire la chaleur nécessaire à l'assemblage [7].

2. Principe de soudage par friction rotative

Le principe du soudage par friction est présenté sur la figure I.3, supposons que deux pièces doivent être soudées bout à bout, une est fixée, tandis que l'autre est mise en rotation à une vitesse constante. Quand les deux pièces sont mises en contact, la force de friction provoque un couple résistant (ou couple de frottement), et l'énergie qui en résulte transformée en chaleur dans la surface de contact. La chaleur générée augmente la température des pièces rapidement jusqu'à la température de soudage (température de forgeage). Ensuite, la pièce en rotation est arrêtée, et une force de forgeage axiale est appliquée afin de réaliser un joint solide entre les deux pièces [8].

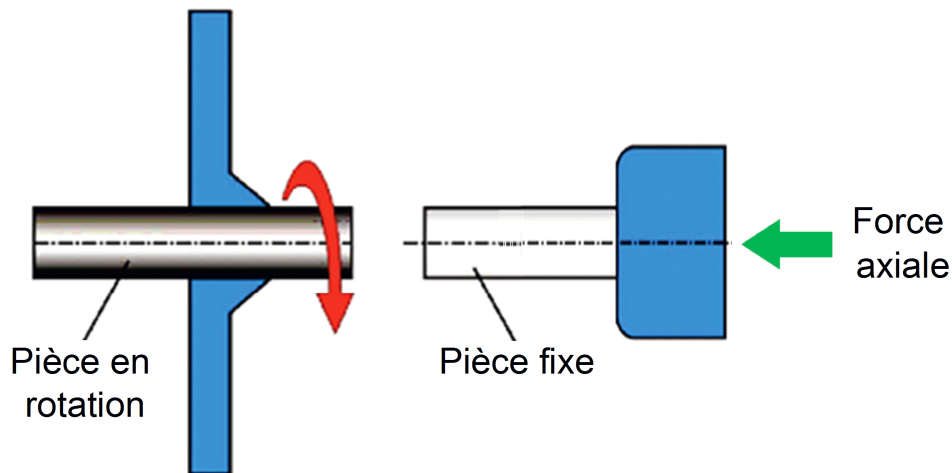


Figure I.3. Principe de soudage par friction rotative [9].

3. Processus de soudage par friction rotative

Le processus de soudage par friction rotative comporte deux phases :

✚ Phase de Friction

La figure I.4 représente les variations dans le temps du couple résistant pendant la phase de friction. Les variations du couple divisent cette phase en quatre stades Distincts [6] :

Stade I : Ce stade commence lorsque les deux pièces entrent en contact et commencent à se frotter l'une contre l'autre. Il correspond au début du cycle de soudage pendant lequel il se produit un frottement sec entre les deux surfaces. Les aspérités des deux surfaces grippent et

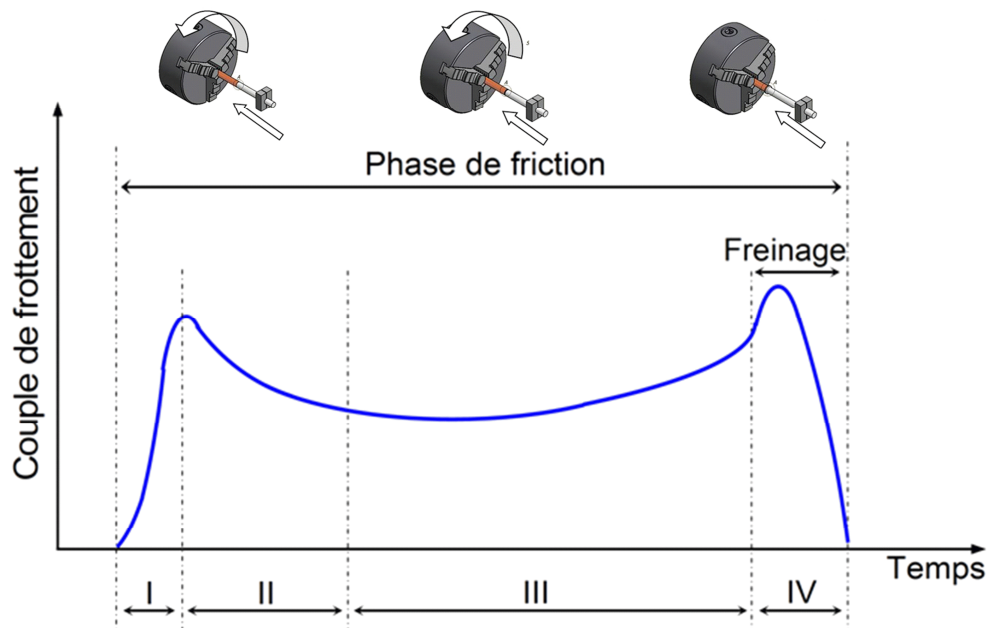


Figure I.4. Variations du couple de frottement pendant la phase de friction [6].

s'arrachent en fragments plus ou moins gros et nombreux suivant les valeurs de la vitesse de rotation et de la force axiale appliquée. Le couple de frottement, et par suite la température de l'interface, augmente rapidement à cause du grippage, jusqu'à une valeur maximale appelée couple maximum initial. L'augmentation de la température provoque l'adoucissement et l'écoulement plastique des fragments de l'interface.

Stade II : Ce stade est transitoire, il commence lorsque le couple commence à diminuer après la valeur maximale initiale et se termine lorsque il atteindrent une valeur d'équilibre presque constante. La couche plastique à l'interface commence à être expulsée vers la périphérie sous l'effet des forces radiales (d'inertie) et des forces axiales. La matière expulsée commence à former d'un bourrelet autour l'interface (figure I.5).

Stade III : C'est un stade d'équilibre. La température de la couche interfaciale permet d'échauffer, par conduction et activation interne, le métal adjacent et conduit à une consommation (croissance du bourrelet) de matière régulière dans le temps.

Stade IV : C'est le stade de décélération, commence lorsque le freinage est appliqué pour arrêter la pièce en rotation. Durant ce stade, la couche plastifiée se déplace de nouveau vers la périphérie des pièces contribuant à la croissance du bourrelet au fur et à mesure que la vitesse de rotation diminue.

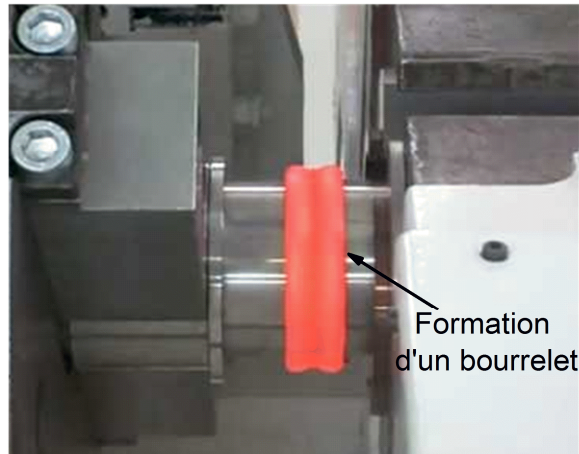


Figure I.5. Interaction des surfaces pendant la phase de friction [10].

✚ Phase de Forgeage

Le forgeage commence dès l'arrêt de la pièce tournante. Une force axiale est maintenue à un niveau suffisant pour conduire au forgeage à chaud du matériau de l'interface.

4. Modes de soudage par friction rotative

Selon la fonction dont on exécute la friction, on distingue deux modes de soudage par friction rotative :

✚ Soudage par friction à entraînement direct (Direct Drive Friction Welding)

Le soudage par friction à entraînement direct (ou entraînement continu) consiste à réaliser la soudure sur une machine à entraînement direct, c'est-à-dire que le moteur fournit directement le couple de frottement pendant la phase de friction.

L'opération de soudage par friction à entraînement direct se déroule comme les figures I.6 et I.7 montrent.

Les paramètres essentiels du soudage par friction à entraînement direct sont:

➤ Phase de friction :

- La vitesse de rotation (tr/min),
- La pression de friction (MPa),
- Le temps de friction (s : seconde).

➤ **Phase de forgeage :**

- La pression de forgeage (MPa),
- Le temps de forgeage (s : seconde).

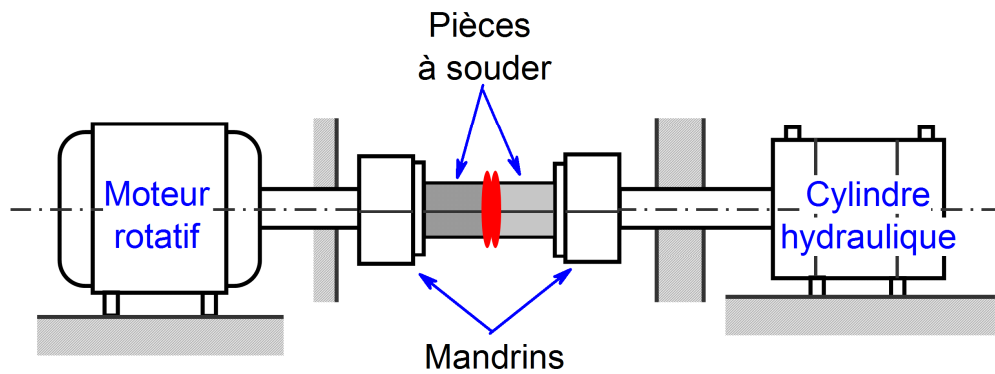


Figure I.6. Processus du soudage par friction rotative à entraînement direct [11].

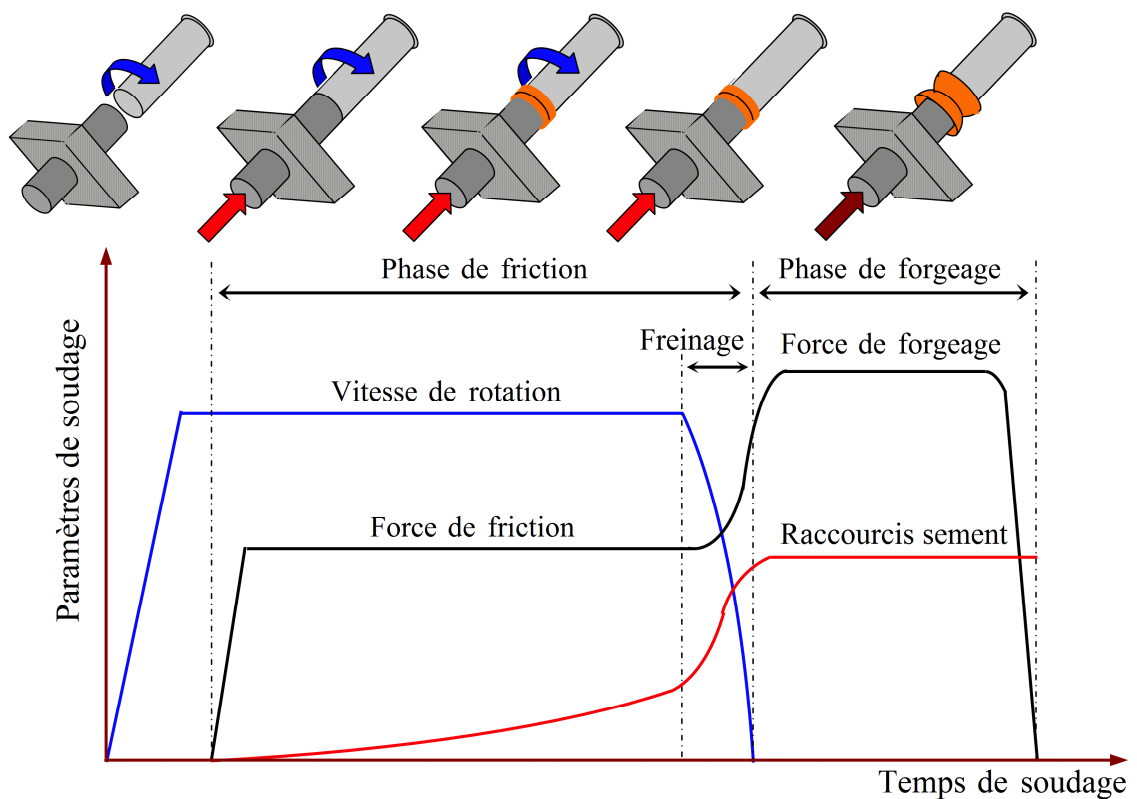


Figure I.7. Variations des paramètres du soudage par friction rotative à entraînement direct [6].

✚ Soudage par friction inertielle (Inertia Friction Welding).

Le soudage par friction inertielle ou par accumulation d'énergie consiste à relier une des pièces à souder à un volant d'inertie entraîné par un moteur. Le volant d'inertie est accéléré jusqu'à une vitesse donnée pour stocker l'énergie requise, puis le moteur d'entraînement est désengagé et les deux pièces sont assemblées par friction sous une pression axiale (pression de friction). L'énergie cinétique emmagasinée dans le volant rotatif est dissipée sous forme de chaleur, par frottement à l'interface de soudure, à mesure que la vitesse du volant diminue. Une augmentation de la pression appliquée (pression de forgeage) peut être appliquée avant que le volant s'arrête complètement, et maintenue pendant un temps donné après la fin de la rotation. La vitesse de rotation critique du volant d'inertie est choisie de sorte que l'énergie cinétique transformée soit au moins égale à l'énergie totale nécessaire à un cycle complet de soudage. La figure I.8 montre l'opération du soudage par friction inertielle.

Les paramètres de soudage par friction inertielle sont essentiellement (figure I.9) :

- La masse et les dimensions du volant d'inertie,
- La vitesse de lancement ou la vitesse de départ du cycle (tr/min),
- La pression de friction et de forgeage (MPa),
- Le temps de soudage (s : seconde).

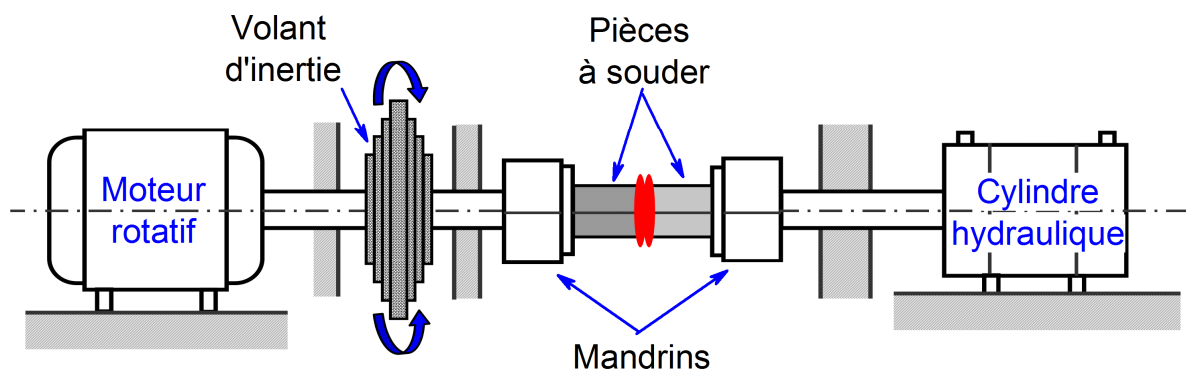


Figure I.8. Processus du soudage par friction rotative inertielle [11].

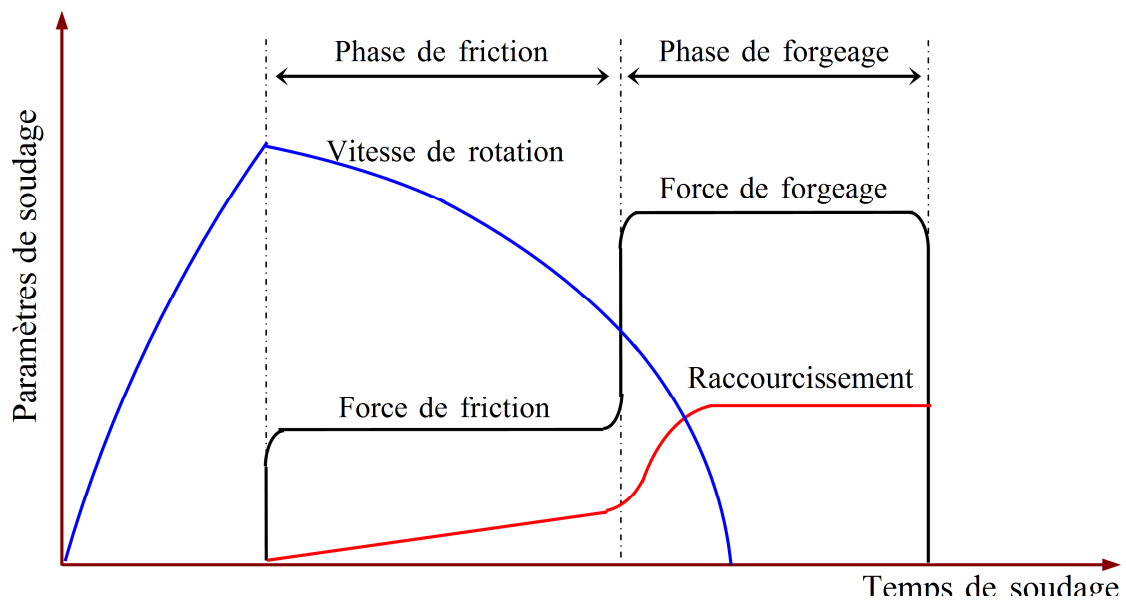


Figure I.9. Variations des paramètres du soudage par friction rotative inertielle [6].

5. Domaine d'application du soudage par friction rotative

Les applications du procédé de soudage par friction sont nombreuses et divers, par exemple :

✚ L'aviation et la navigation spatiale :

- Le soudage des boulons à crochet (figure I.10-a),
- La fabrication de tiges de piston légères (figure I.10-b),
- La fabrication des éléments de boîtes de vitesse (figure I.10-c).

✚ La pétrochimie :

- Le soudage des brides des valves hydrauliques (figure I.10-d),
- Le soudage des tiges de forage.

✚ L'industrie automobile :

- La fabrication des stabilisateurs,
- La fabrication des soupapes,
- La fabrication des pompes à eau.
-

De plus, le soudage par friction permet d'assembler des matériaux qui ne pouvant être assemblé avec des procédés conventionnels (soudage par fusion) (figure I.11).

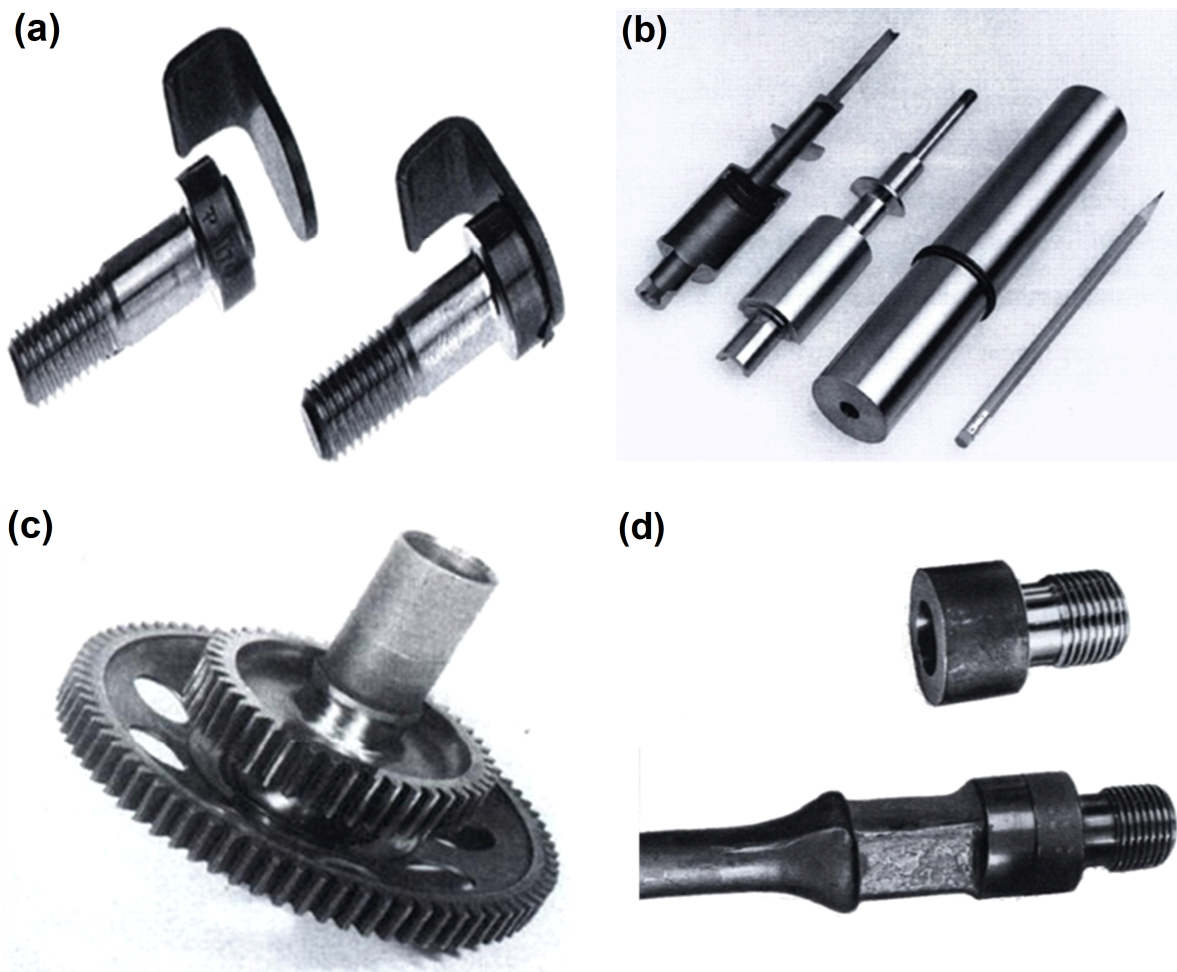


Figure I.10. Quelques applications industrielles du soudage par friction rotative [6].



Figure I.11. Connecteurs bimétalliques fabriqués par soudage par friction rotative [6].

6. Les avantages et les limites du soudage par friction rotative

Les avantages du soudage par friction rotative sont:

- Le développement des joints de haute qualité et de bonne structure métallurgique,
- Le processus de soudage ne nécessite aucune préparation spéciale des pièces à souder,
- Le procédé de soudage est plus rapide que les procédés de soudage conventionnels (par fusion),
- Le développement de faibles déformations après le soudage, en raison de court temps de soudage et de faible température,
- La possibilité de souder des matériaux dissimilaires.
- Le procédé est écologique, sans gaz, ni fumées ou rayonnements. .

Les limites du soudage par friction sont:

- Une des pièces à souder doit avoir un axe de symétrie pour pouvoir être entraînée en rotation autour de cet axe.
- Le soudage par friction ne peut pas être appliqué sur des matériaux ayant un très faible coefficient de friction comme la fonte grise, le bronze et le laiton

Partie 2 : Soudage par friction rotative Acier inoxydable austénitique – Cuivre

I-2.1. Les aciers inoxydables austénitiques

Les aciers inoxydables sont largement utilisés dans divers domaines dans des applications pratiques telles que les industries nucléaires, chimiques et pétrochimiques [12]. Les aciers inoxydables sont identifiés comme les alliages à base de fer contenant de 8 à 25 % de nickel et de 12 à 30 % de chrome.

En général, il existe plusieurs types d'aciers inoxydables (tableau I.1), notamment [13, 14] :

- Les aciers inoxydables ferritiques : : contiennent de 12 à 20 % de chrome (et super-ferritiques qui : contiennent > 20 % de chrome),
- Les aciers inoxydables martensitiques : contiennent de 12 à 18 % de chrome et des teneurs en carbone variables de 0,1 à 1 % environ,
- Les aciers inoxydables austénitiques : contiennent des teneurs en chrome égales ou supérieures à 17 % et des proportions de nickel au moins 8 % ,
- Les aciers inoxydables à durcissement par précipitation,
- Les aciers inoxydables austéno-ferritiques.

Les aciers inoxydables austénitiques représentent le plus grand groupe d'aciers inoxydables et sont largement utilisés dans le système de traitement des liquides et les machines hydrauliques en raison de leur excellente résistance à la corrosion, de leur bonne usinabilité, de leur faible coût et de leur soudabilité [15]. Les aciers austénitiques affichent de relativement faibles caractéristiques mécaniques de résistance (R_e minimal de l'ordre de 180 à 240 N/mm²), qui peuvent être très sensiblement améliorées par écrouissage et, surtout par addition d'azote (de l'ordre de 0,12 à 0,22 %) [13].

I-2.2. Le cuivre pur

Le cuivre est l'un des plus anciens métaux de l'histoire de la métallurgie, il possède une combinaison unique de propriétés, notamment une conductivité électrique et thermique élevée et une grande résistance à la corrosion.

Tableau I.1. Exemples de désignations des aciers inoxydables [16].

Aciers inoxydables	Désignation symbolique	Désignation numérique	Ancienne norme NF	Nuance USA approchante
ferritiques	X2CrMoTi 29-4	1.4592	Z2CDT29-04	S44735
	X3CrTi17	1.4510	Z4CT17	430 Ti
	X6Cr13	1.4000	Z6C13	403
	X6Cr17	1.4016	Z8C17	430
	X6CrMo17-1	1.4113	Z8CD17-1	430F
martensitiques	X12Cr13	1.4006	Z12C13	410
	X17CrNi16-2	1.4057	Z15CND16-2	431
	X105CrMo17	1.4125	Z100CD17	440C
austénitiques	X2CrNi18-09	1.4307	Z2CN18-10	304L
	X5CrNi18-10	1.4301	Z6CN18-09	304
	X2CrNiMo17-12-2	1.4404	Z2CND17-12	316L
	X5CrNiMo17-12-2	1.4401	Z6CND17-11	316
	X6CrNiTi18-10	1.4541	Z6CNT18-10	321
	X6CrNiNb18-10	1.4550	Z6CNNb18-10	347
à durcissement par précipitation	X7CrNiAl17-7	1.4568	Z8CNA17-7	631 (17-7PH)
	X8CrNiMoAl15-7-2	1.4532	Z8CNDA15-7	632 (15-7PH)
	X5CrNiCuNb16-4	1.4542	Z6CNU17-4	630 (17-4PH)
austéno-ferritiques	X2CrNiN23-4	1.4362	Z2CN23-4	—
	X3CrNiMoN22-5-3	1.4462	Z3CND27-5-3	S 31803
	X2CrNiMoCuN25-6-3	1.4507	Z2CNDUW25-7-4	—
	X3CrNiMoN27-5-2	1.4460	Z5CND 27-05	—

En générale, on distingue deux types principaux de cuivre pur, l'un avec 0,02 à 0,06 % d'oxygène (sous forme de Cu_2O) et l'autre sans oxygène [17].

Selon AFNOR, il y'a deux nuances de cuivre sans oxygène [18] :

- **Cuivre pur (Cu ≥ 99,95 %) :** nuance Cu/c1 ou C10100 (selon la désignation ASTM (American Society for Testing and Materials))
- **Cuivre extra-pur (Cu ≥ 99,99 %) :** nuance Cu/c2 ou C10200.

I-2.3. Analyse de la littérature

Dans le but d'examiner l'effet des paramètres du processus sur les propriétés des joints acier inoxydable austénitique – Cuivre, plusieurs chercheurs ont étudié expérimentalement le soudage par friction rotative Acier inoxydable austénitique – Cuivre.

Afin de démontrer l'effet de la pression et de temps de friction, Sahin [19] a étudié les propriétés mécaniques et métallurgiques des joints en acier inoxydable austénitique 304 – cuivre soudés par friction rotative (figure I.12). Il a conclu que la méthode de soudage par friction rotative peut être convenablement adoptée pour réaliser des soudures solides entre différents aciers et métaux. De plus, il a remarqué que la résistance des joints a augmenté jusqu'à un maximum, puis a diminué à nouveau à mesure que le temps de friction et la pression de friction augmentaient (figure I.13). Ainsi, il a noté qu'un court temps de friction ne pouvait pas générer une chaleur suffisante pour obtenir un joint solide, et un temps de friction trop long entraîne une formation excessive de la couche des composés intermétalliques à cause de l'augmentation de la température à l'interface du joint, et produit des soudures de faible résistance.

Dans un autre travail, Sriram et al. [20] ont réalisé un soudage par friction rotative de cuivre avec l'acier inoxydable austénitique 316 et avec l'acier inoxydable austénitique 316L. Après les mesures de la micro-dureté aux interfaces des joints soudés, les auteurs ont remarqué que la dureté du côté cuivre était élevée à la zone près de l'interface par rapport à la zone de métal de base. La raison étant la formation de composés d'oxyde de cuivre. Dans le côté acier inoxydable, la dureté est faible au niveau de la zone du joint par rapport à la zone de métal de base.



Figure I.12. Joint AISI 304/Cuivre soudé par friction rotative [19].

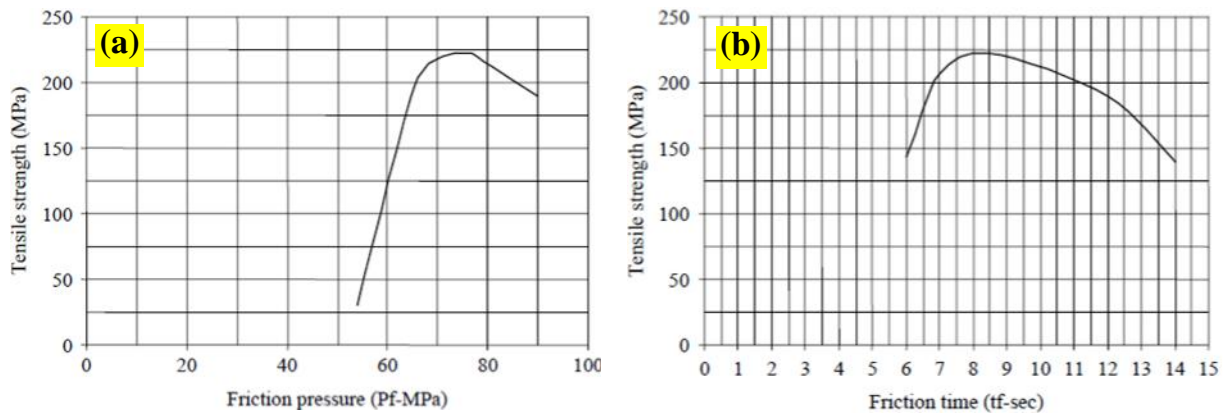


Figure I.13. Relation entre la résistance à la traction des joints AISI 304/Cuivre et :
(a) la pression de friction et (b) le temps de friction [19].

Shanjeevi [21] a examiné la soudabilité par friction rotative du cuivre avec l'acier inoxydable austénitique 304L, et il a évalué la résistance à la traction des joints soudés. Les résultats ont montré que la plupart des joints sont fracturés au côté cuivre (figure I.14). Cela est dû à la ductilité élevée du cuivre en comparaison avec l'acier inoxydable.



Figure I.14. Joint AISI 304L/Cuivre soudé par friction rotative après le test de traction [21].

Une étude récente sur le soudage par friction de l'acier inoxydable austénitique 304 avec le cuivre, a été rapportée par Kimura et al. [22]. Elle a démontré l'effet des paramètres de soudage et les propriétés de la surface de contact sur la résistance et le comportement thermique des joints. Les résultats ont montré que la température maximale du soudage et la résistance du joint ont diminué avec l'augmentation en pression de friction (figure I.15). De plus, les auteurs ont indiqué que les joints acier inoxydable/cuivre devaient être réalisés avec une faible pression de friction et que la surface de contact du côté cuivre doit être polie juste avant le processus de soudage.

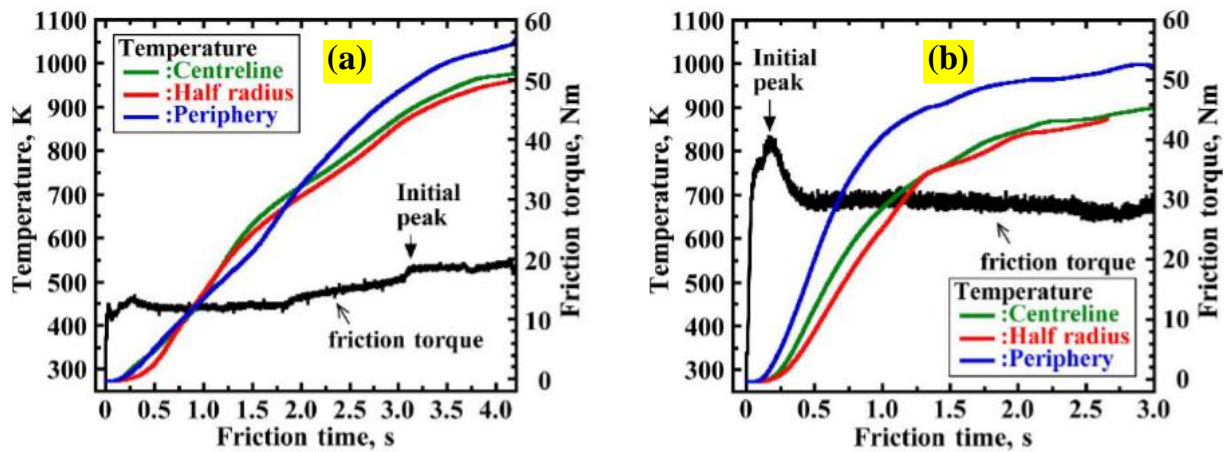


Figure I.15. Variations de la température pendant la phase de friction sous : (a) une pression de friction de 30 MPa et (b) une pression de friction de 90 MPa [22].

Dans le but d'optimiser le soudage par friction acier inoxydable – cuivre, Vairamani et al. [23] ont étudié le soudage par friction de l'acier inoxydable austénitique 304 avec le cuivre, et ils ont conçu les expériences par la méthodologie des surfaces de réponses (MSR) afin d'obtenir une résistance maximale des joints soudés. La MSR est une collection des techniques mathématiques et statistiques utiles pour concevoir un ensemble d'expériences, développer un modèle mathématique, analyser la combinaison optimale des paramètres d'entrée et exprimer graphiquement les valeurs [24]. Les chercheurs ont trouvé une corrélation (relation empirique) entre les paramètres de soudage et la résistance à la traction des joints, et ils ont conclu que la vitesse de rotation avait une plus grande influence sur la résistance des joints que les autres paramètres de soudage.

Bibliographie

1. Cazes, R., *Procédés de soudage: Principes généraux et critères de choix*. Techniques de l'ingénieur. Génie mécanique, 1995. (B7700) : p. 1- 6.
2. Helal, Y., *L'effet de soudage par friction sur la microstructure et les propriétés mécaniques d'un joint soudé composé d'un alliage d'aluminium industriel et un acier*, 2017. Thèse de Doctorat en Sciences – Génie mécanique, Université Mohamed Khider-Biskra-Algérie.
3. Larbi Cherif, M., *Comportement mécanique d'assemblages soudés par point*, 2016. Mémoire de Master – Maintenance industrielle, Université Abou Bekr Belkaid-Tlemcen-Algérie.
4. Bouzaroura, A., *Contrôle non destructif et destructifs du cordon de soudage à l'arc électrique des tubes en acier S355JR de canalisations d'eau du Barrage oued Atmania à Ain Kercha*, 2014. Mémoire de Master – Mécanique des Matériaux, Université Badji Mokhtar-Annaba-Algérie.
5. Rombaut, P., *Joining of dissimilar materials through rotary friction welding*, 2011. Thèse de Master en Ingénierie - Génie Electromécanique, Université Gent, Belgique.
6. Khalfallah, F., *Soudage par friction de l'acier avec du céramique*, 2020. Thèse de Doctorat en Sciences – Métallurgie, Université Mohamed Khider-Biskra-Algérie.
7. Kautz, D. D., *Fundamentals of Friction Welding*, Welding Fundamentals and Processes, Vol 06A, ASM Handbook, ASM International, 2011. p. 179-185.
8. Samene, A. et Harem, M., *Optimisation des paramètres de procédé du soudage par friction rotative*, 2017. Mémoire de Master – Génie mécanique, Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi-Bordj Bou Arreridj-Algérie.

-
9. Alves, E. P., Piorino, F. and Ying An, N. C., *Welding of AA1050 aluminum with AISI 304 stainless steel by rotary friction welding process*, Journal of Aerospace Technology and Management, 2010. 2(3) : p. 301–306.
 10. Image électronique, Available from: <https://i.ytimg.com/vi/jShvC-8Hy98/hqdefault.jpg>
 11. Attallah, M. M. and Preuss, M., *Inertia friction welding (IFW) for aerospace applications*. Welding and Joining of Aerospace Materials, 2012 : p. 25–74.
 12. Ramirez, A. J., Benati, D. M. and Fals, H. C., *Effect of Tool Offset on Dissimilar Cu-AISI 316 Stainless Steel Friction Stir Welding*. In Proceeding of the 21st International Offshore and Polar Engineering Conference, USA, 2011. 8: p. 548–551.
 13. Murry, G., *Aciers. Généralités*. Techniques de l'ingénieur. Génie mécanique, 1993. (M300) : p. 1- 29.
 14. Murry, G., *Aide-mémoire : Métallurgie - Métaux • Alliages • Propriétés*, 2010. Dunod, Paris. p. 281.
 15. Chiu, K. Y., Cheng, F. T. and Man, H. C., *Laser Cladding of Austenitic Stainless Steel using NiTi Strips for Resisting Cavitation Erosion*. Materials Science and Engineering: A, 2005. 402 (1-2) : p. 126–134.
 16. Dupeux, M., *Aide-Mémoire : Science des matériaux*, 2008. Dunod, Paris. p. 193, 194.
 17. Arnaud, D., Barbery, J., Biais, R., Fargette B. Et Naudot P., *Propriétés du cuivre et de ses alliages*. Techniques de l'ingénieur. Génie mécanique, 1985. (M430) : p. 1- 45.
 18. Barbery, J., *Données numériques sur le cuivre et ses alliages corroyés*. Techniques de l'ingénieur. Génie mécanique, 1988. (M433) : p. 1- 68.
 19. Sahin, M., *Joining of stainless steel and copper materials with friction welding*. Industrial Lubrication and Tribology. 2009, 61 (6) : p. 319–324.
 20. Sriram., R. and Ramadoss, R., *A Study on Mechanical and Metallurgical Properties of Friction Welded Dissimilar Materials*. International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology . 2015, 3 (11) : p. 32–38.
-

-
21. Shanjeevi, C., *Friction Welding of Austenitic Stainless Steel with Copper Material*, Austenitic Stainless Steels - New Aspects, Borek, W., Tanski, T. and Brytan, Z., IntechOpen, 2017. p. 171–186.
 22. Kimura, M., Ohara, K., Kusaka, M., Kaizu, K. and Hayashida, K., *Effects of tensile strength on friction welding condition and weld faying surface properties of friction welded joints between pure copper and austenitic stainless steel*. Journal of Advanced Joining Processes, 2020, 2 : 100028. <https://doi.org/10.1016/j.jajp.2020.100028>
 23. Vairamani, G., Kumar, T. S., Malarvizhi, S. and Balasubramanian, V., *Application of response surface methodology to maximize tensile strength and minimize interface hardness of friction welded dissimilar joints of austenitic stainless steel and copper alloy*. Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2013, 23 (8) : p. 2250–2259.
 24. Sahin, M., *Optimizing the parameters for friction welding Stainless steel to copper parts*, Materials and Technology. 2016, 50 (1) : p. 109–115.

*C*_{hapitre} *2*

Matériaux et procédure expérimentale

II.1. Introduction

Le but de ce travail est de souder par friction rotative des tiges en Acier inoxydable 316L (AISI 316L) avec des tiges en Cuivre (Cu). Ce chapitre décrit le travail expérimental réalisé, et il est composé de trois sections. La première section présente les matériaux qui ont été utilisés dans cette étude, notamment l'acier inoxydable (AISI 316L) et le cuivre extra-pur Cu/c2. Dans la deuxième section la procédure de préparation des échantillons soudés est présentée en détail. Dans la troisième section, la technique de caractérisation mécanique (essai de traction) est expliquée.

II.2. Matériaux utilisés

🚧 Acier inoxydable austénitique AISI 316L

L'inox AISI 316L est un acier inoxydable austénitique amagnétique avec une excellente résistance à la corrosion. On l'appelle aussi *inox marin* ou encore *acier chirurgical*, l'inox AISI 316L est la deuxième forme la plus courante d'acier inoxydable après l'inox AISI 304. Cet acier convient parfaitement pour des pièces en contact prolongé avec la peau, il est utilisé dans des applications particulières telles que les équipements chimiques, de cuisson, cryogéniques et sous pression, les équipements chirurgicaux des hôpitaux et les équipements marins. Les tableaux II.1 et II.2 illustrent la composition chimique et les propriétés de l'inox 316L.

Tableau II.1. Composition chimique de l'acier inoxydable AISI 316L (déterminée par Spectrométrie de fluorescence des rayons X (XRF)).

Matériau	C	Cr	Mn	Mo	Ni	P	N	Si	Cu	Fe
AISI 316L	0.04	16.4	1,94	2.6	11.65	0.07	0.09	0.68	—	66.53

Tableau II.2. Propriétés physiques et mécaniques de l'acier inoxydable AISI 316L

Matériau	Densité (poids spécifique) kg/m ³	Point de fusion °C	Conductivité thermique W/m.°K	Module D'élasticité GPa	Résistance à la traction (MPa)	Dureté (Hv)
AISI 316L	7980	1400	15	200	460 - 680	160 - 200

✚ *Cuivre extra-pur Cu/c2*

Comme était expliqué dans le premier chapitre de ce mémoire, le cuivre Cu/c2 (ou C10200) est un cuivre sans oxygène possède une excellente conductivité thermique et électrique (grâce à l'absence d'oxygène) et une bonne soudabilité. Avec son taux d'impuretés très faible (<0,01 %), il est parfaitement adapté aux exigences élevées de l'industrie électronique, des supraconducteurs à basse température et des applications sous vide. Les tableaux II.3 et II.4 illustrent la composition chimique et les propriétés du cuivre Cu/c2.

Tableau II.3. Composition chimique du cuivre Cu/c2 (déterminée par XRF).

Matériau	Si	Cu
Cu/c2	0.1	99.9

Tableau II.4. Propriétés physiques et mécaniques du cuivre Cu/c2

Matériau	Densité (poids spécifique) kg/m ³	Point de fusion °C	Conductivité thermique W/m.°K	Module D'élasticité GPa	Résistance à la traction (MPa)	Dureté (Hv)
Cu/c2	8940	1084	391	115	235	70

✚ *Préparation des pièces à souder*

Des tiges commerciales en acier inoxydable AISI 316L et en cuivre, de 12 mm de diamètre ont été utilisées à cette étude. Les tiges ont été usinées au tour pour obtenir des spécimens d'une longueur de 80 mm (figure II.1).

Pour le bon déroulement du procédé de soudage, les faces de contact des deux spécimens à souder ont été pré-usinées, polies et nettoyées afin d'obtenir une surface lisse et pour réduire l'effet des contaminants (la graisse, les oxydes, ...).

II.3. Procédé de soudage par friction rotative acier inoxydable AISI 316L – Cuivre

Le soudage par friction rotative acier inoxydable AISI 316L – Cuivre a été effectuée à l'aide d'une fraiseuse verticale (figure II.2).

Un mandrin supplémentaire était installé sur la table de la machine afin de fixer une des

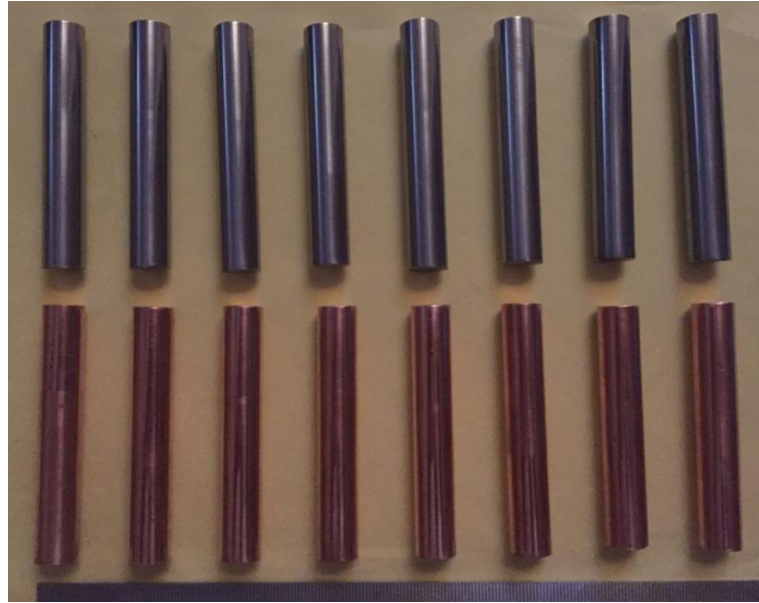


Figure II.1. Pièces AISI 316L et Cuivre à souder par friction rotative.

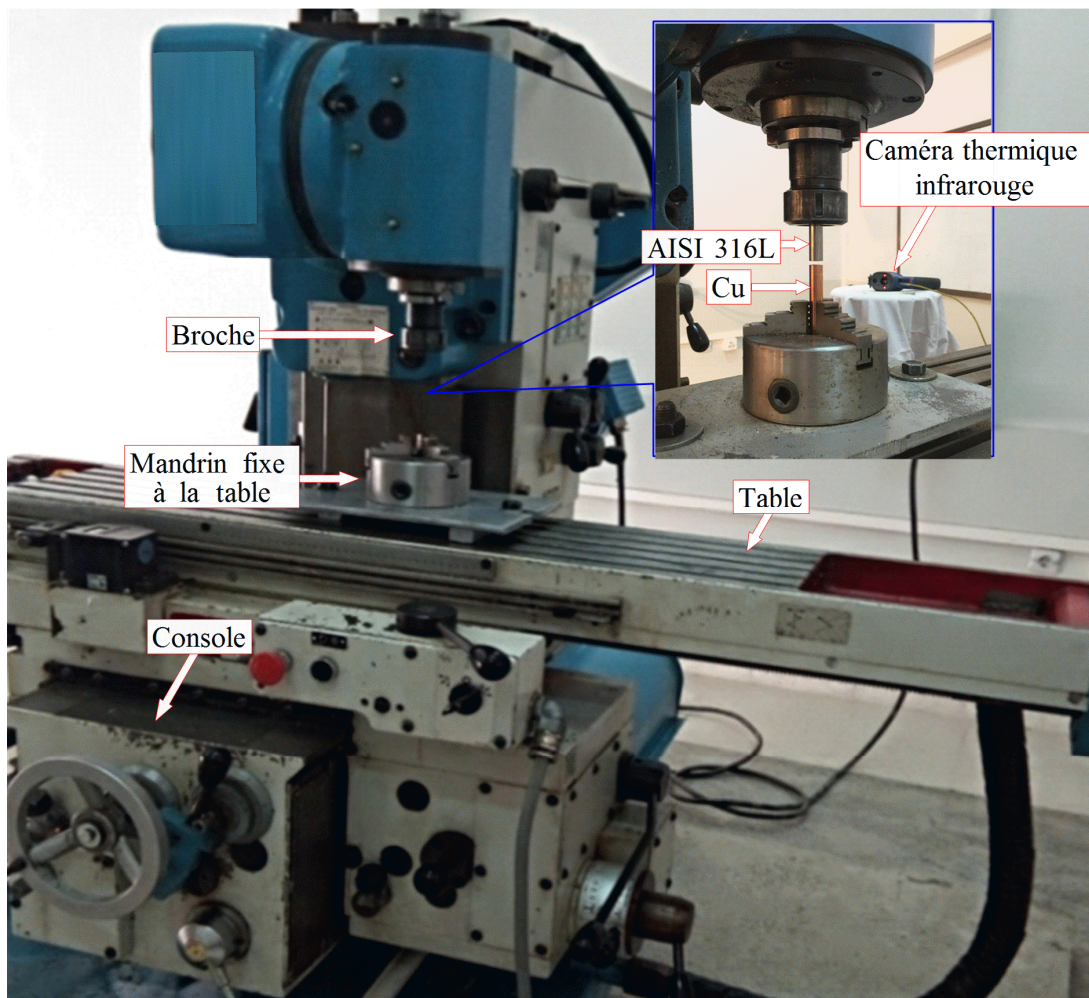


Figure II.2. Procédé de soudage par friction rotative acier inoxydable AISI 316L – Cuivre

pièces à souder (pièce fixe), pendant le processus de soudage, tandis que l'autre pièce (pièce rotative) était fixée à la broche. Dans notre travail, la pièce fixe est la tige de cuivre et la pièce rotative est la tige d'acier inoxydable.

Pour générer la chaleur de soudage, une pression axiale est appliquée sur la pièce fixe en forme de glissement vertical de la console. Un glissement vertical automatique à vitesse constante est choisi afin de garantir une pression axiale constante et identique pour toutes les expériences de soudage. Au cours du processus de soudage, les variations de la température dans la pièce rotative, près de l'interface du joint, sont enregistrées à l'aide d'une caméra thermique infrarouge (Modèle : FI 638TI) (figure II.2).

Les expériences de soudage sont menées à différents paramètres tels que la vitesse de rotation, la vitesse de glissement vertical de la console et le temps de soudage. Seul l'effet de la vitesse de rotation sur les caractéristiques des joints AISI 316L/Cu est étudié, ce qui signifie que les autres paramètres de soudage ont été maintenus constants (tableau II.5).

Tableau II.5. Paramètres de soudage par friction rotative AISI 316L – Cuivre

Paramètres de soudage	Unité	Echantillon soudé N°			
		01	02	03	04
Vitesse de rotation	Tr/min	710	1000	1400	2000
Vitesse de glissement vertical de la console	mm/min	63	63	63	63
Temps de soudage	sec	40	40	40	40

Pour chaque vitesse de rotation sélectionnée, trois (03) échantillons identiques ont été préparés :

- Deux (02) échantillons désignés pour effectuer les essais de traction.
- Une (01) échantillon pour l'observation de l'interface du joint.

Une fois le processus de soudage terminé, les échantillons soudés désignés pour l'observation de l'interface du joint, sont sectionnés à certaine taille comprenant l'interface de soudure et les matériaux de base. Puis, les parties résultantes sont divisées longitudinalement, et les sections résultantes sont enrobées dans une résine spéciale,

puis polis en utilisant différents types des papiers abrasifs et pâte diamanté (taille 1 μm). La figure II.3 montre la machine de polissage utilisée.

II.4. Caractérisation mécanique des joints soudés

Pour évaluer la résistance des joints AISI 316L/Cu soudés par friction rotative, des essais de traction ont été réalisés.

Essai de traction

L'essai de traction est l'un des essais les plus courants pour déterminer la résistance des joints soudés. Les essais de traction ont pour objectif d'examiner l'effet des paramètres de soudage sur la résistance des joints AISI 316L/Cu.

Pour effectuer le test de traction, les bourrelets des soudures sont retirés par l'usinage des échantillons soudés sur un tour. Les éprouvettes du test de traction sont préparées sous forme des tiges de diamètre 12 mm et de longueur de calibre 80 mm.

Les essais de traction sont effectués à l'aide d'une machine hydraulique d'essais universelle, de type WP 310 (figure II.4). La machine est d'une charge maximale de 50 KN, et la vitesse de traction appliquée pendant les essais est de 2 mm/min.



Figure II.3. Machine de polissage utilisée.

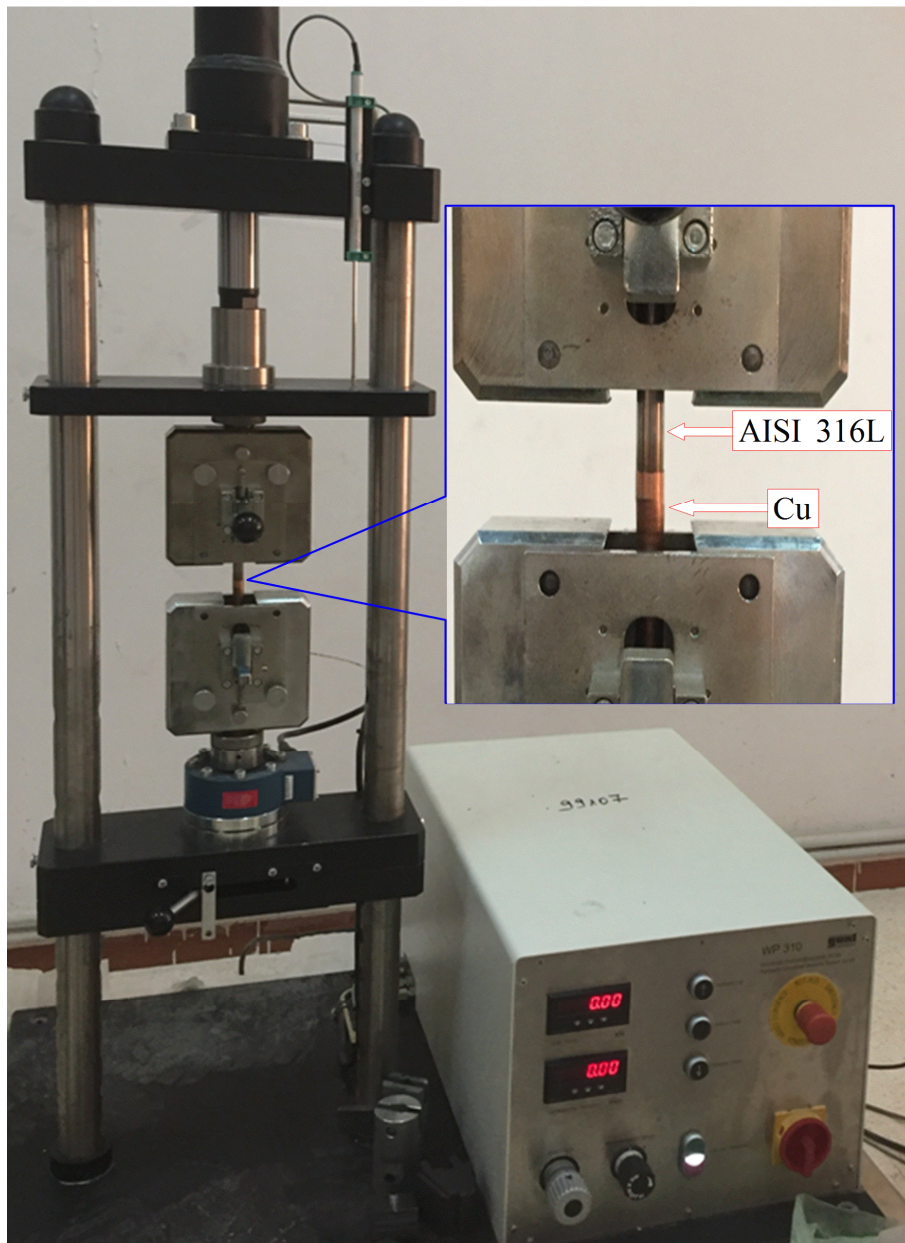


Figure II.4. Machine hydraulique d'essais universelle, 50kN de type WP 310.

*C*_{hapitre} 3

Résultats

&

discussions

III.1. Introduction

Ce chapitre se concentrera sur l'effet de la vitesse de rotation sur le comportement thermique et la résistance à la traction des joints AISI 316L/Cu soudés par friction rotative.

III.2. Apparence des échantillons AISI 316L/Cu soudés par friction rotative

La figure III.1 montre les échantillons soudés acier inoxydable AISI 316L/cuivre. Il est clair que le bourrelet de soudure a une forme asymétrique, du fait que le cuivre est plus malléable que l'acier inoxydable.



Figure III.1. Echantillons acier inoxydable AISI 316L/cuivre soudés par friction rotative.

III.3. Apparence des interfaces des joints AISI 316L/Cu

Les sections longitudinales des 4 échantillons soudés sont montées sur la figure III.2. On remarque que le bourrelet est uniquement formé de cuivre, ce qui indique que la partie d'acier inoxydable n'a pas été consommée au cours du processus de soudage.

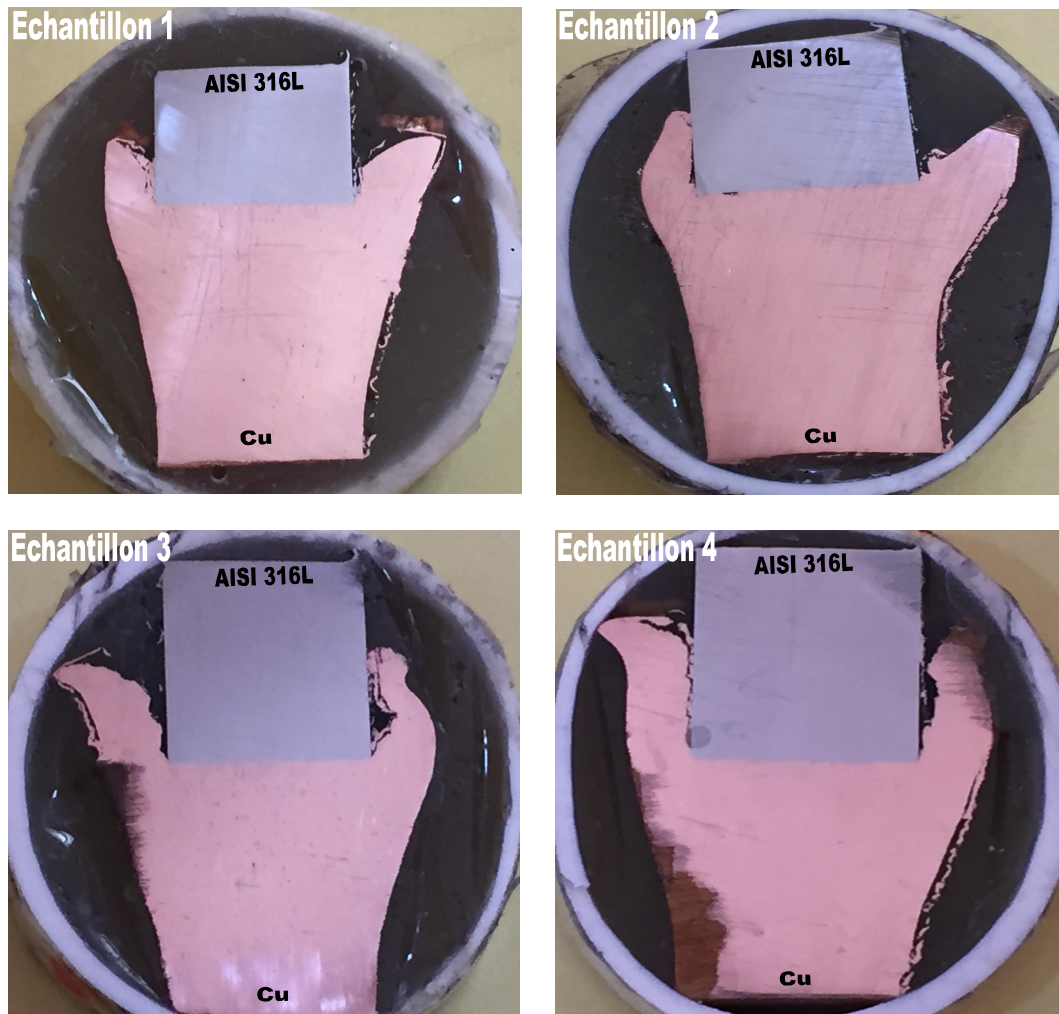


Figure III.2. Sections longitudinales des échantillons acier inoxydable AISI 316L/cuivre soudés par friction rotative.

III.4. Effet de la vitesse de rotation

1. sur le raccourcissement des joints soudés

La variance de la taille et de la forme des bourrelets d'un échantillon à l'autre (figure II.2) est due principalement à l'effet des variations de la vitesse de rotation sur la quantité de matière consommée (ou le raccourcissement) au cours du processus de soudage. 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 résultante.

La figure III.3 montre les variations du raccourcissement des joints acier inoxydable AISI 316L/cuivre soudés par friction rotative. En général, le raccourcissement n'est pas un

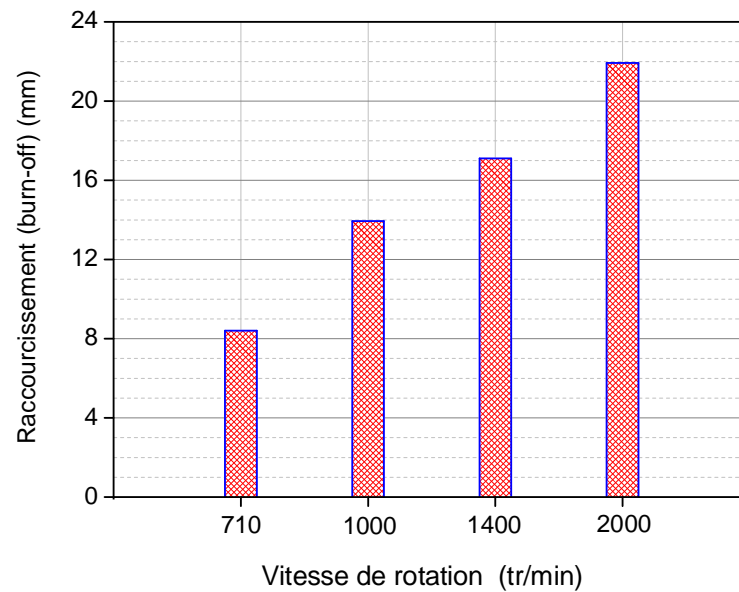


Figure III.3. Variations du raccourcissement des joints acier inoxydable AISI 316L/cuivre.

critère pour évaluer la qualité du joint soudé, mais c'est une bonne estimation de l'apport de chaleur pendant le processus de soudage. Plus il y a de chaleur générée, plus la quantité de matière consommée ou le raccourcissement, est importante. Il est clair sur la figure III.3 que l'augmentation en vitesse de rotation affecte directement la quantité de chaleur générée lors du soudage.

2. sur les variations de la température au cours du soudage

La figure III.4 montre les variations de température dans la pièce d'acier inoxydable au cours du processus de soudage, enregistrées à différentes vitesses de rotation. Les courbes ont des formes similaires, augmentation rapide jusqu'à atteindre un maximum, puis une diminution. La partie d'augmentation rapide correspond à la phase de friction, au cours de laquelle la chaleur de soudage est générée par l'effet de frottement entre les surfaces des deux pièces. La propagation axiale de la chaleur le long des pièces à souder conduit à une augmentation rapide de la température des matériaux. La fin de cette phase qui correspond à l'arrêt de la rotation et par conséquent à l'arrêt de la génération de chaleur, conduisant à la diminution de la température des matériaux soudés.

Selon les courbes de la figure III.4, les variations de la température dans la pièce d'acier inoxydable des échantillons 1, 2, 3 et 4 ont atteint le maximum respectivement de 347.8 °C, 430 °C, 515.8 °C et 583 °C. L'augmentation de la température maximale avec

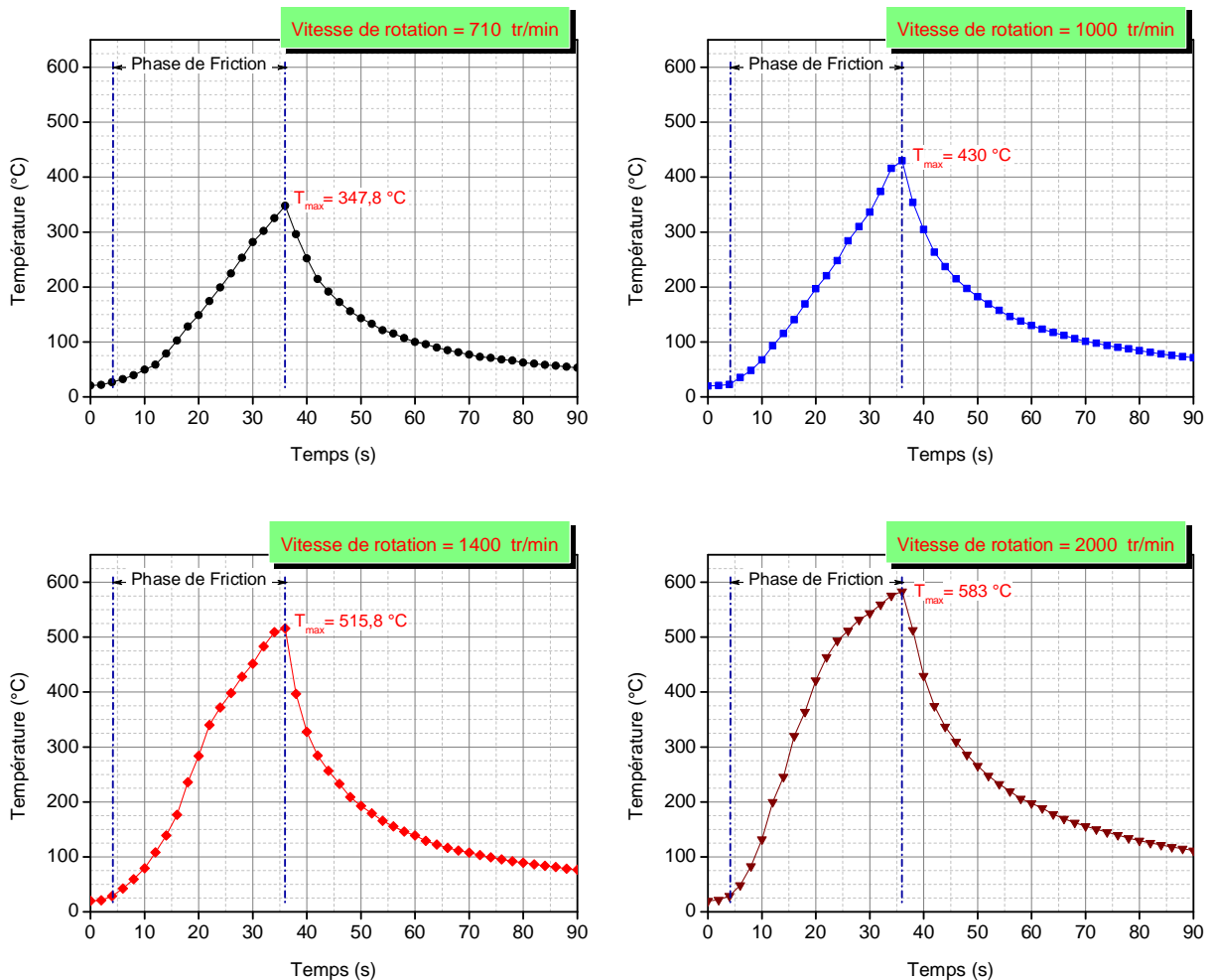


Figure III.4. Variations de température dans la pièce d'AISI 316L pendant le processus de soudage.

l'augmentation de la vitesse de rotation est due en principe à l'augmentation de la quantité de chaleur générée avec l'augmentation de la vitesse de rotation.

3. sur la résistance à la traction des joints soudés

Dans le but d'évaluer la qualité de soudures réalisées, des essais de traction ont été effectués sur les échantillons soudés par l'action des forces croissantes jusqu'à la rupture.

La figure III.5 montre les échantillons soudés acier inoxydable AISI 316L/cuivre, avant et après les tests de traction. Il était évident que tous les échantillons soudés étaient fracturés à l'interface du joint.

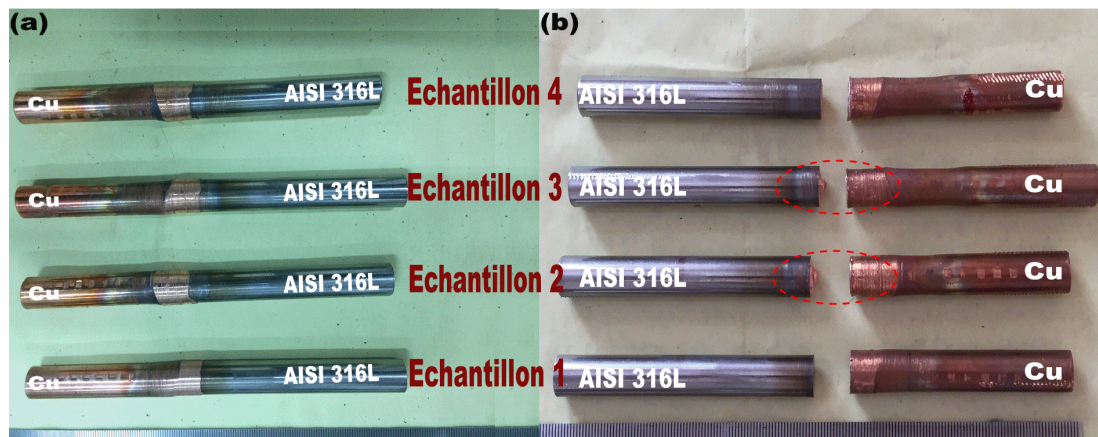


Figure III.5. Joints soudés acier inoxydable AISI 316L/cuivre : (a) avant de après les tests de traction et (b) après les tests de traction.

La figure III.6 montre les fractographies des échantillons soudés après les tests de traction. L'inspection à l'œil nu montre que les faciès de rupture de l'échantillon 1 sont lisses, ce qui indique la faiblesse de la soudure de cet échantillon. D'autre part, les faciès des échantillons 2 et 3 montrent l'aspect d'une rupture ductile dans la région centrale du joint. Alors que les faciès de l'échantillon 4 montrent l'aspect d'une rupture fragile.

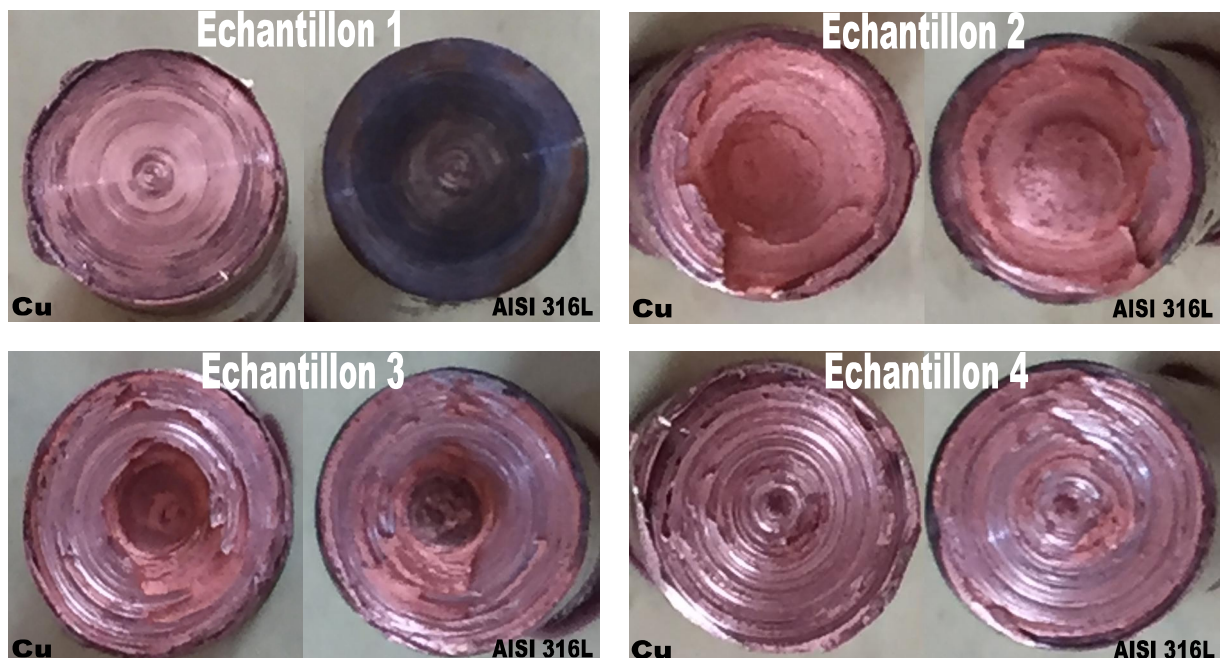


Figure III.6. Fractographie des échantillons soudés acier inoxydable AISI 316L/cuivre après les tests de traction.

La figure III.7 montre les variations de la résistance à la traction et de la température maximale en fonction de la vitesse de rotation. Il est clair que la résistance des joints acier inoxydable AISI 316L/cuivre et la température maximale dépendent de la vitesse de rotation. La résistance des joints a augmenté avec l'augmentation de la vitesse de rotation et de la température maximale jusqu'à un maximum, puis elle a diminué à nouveau à mesure que la vitesse et la température augmentent. La dégradation de la résistance des joints soudés à haute vitesse de rotation est due au fait que la génération excessive de la chaleur (augmentation de la température maximale) entraîne la formation de la couche des composés intermétalliques [1, 2, 3]. De plus, les variations de la résistance à la traction sont en bonne correspondance avec la morphologie des faciès de rupture de la figure III.6.

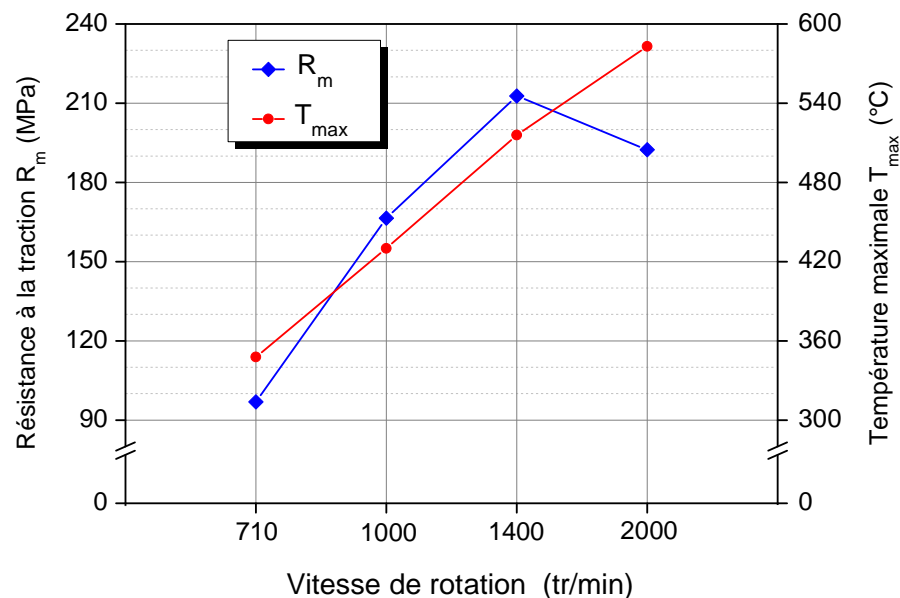


Figure III.7. Variations de la résistance à la traction et de la température maximale en fonction de la vitesse de rotation.

Bibliographie

1. Sahin, M., *Joining of stainless steel and copper materials with friction welding*. Industrial Lubrication and Tribology. 2009, 61 (6) : p. 319–324.
2. Sahin, M., *Optimizing the parameters for friction welding Stainless steel to copper parts*, Materials and Technology. 2016, 50 (1) : p. 109–115.
3. Maalekian, M., *Friction welding – critical assessment of literature*, Science and Technology of Welding and Joining. 2007, 12 (8) : p. 738–759.

Conclusion **G**énérale

Conclusion

L'objectif de ce travail est d'étudier les caractéristiques des joints acier inoxydable AISI 316 L/cuivre soudés par friction rotative. Le processus de soudage a été réalisé au moyen d'une fraiseuse verticale et l'effet de la vitesse de rotation sur les propriétés des joints a été étudié.

L'étude réalisée a conduit aux résultats suivants :

- Le procédé de soudage par friction rotative est très efficace pour assembler deux métaux dissimilaires tels que l'acier inoxydable AISI 316L et le cuivre.
- La vitesse de rotation a des effets très remarquables sur les propriétés des joints soudés.
- Le comportement thermique des joints soudés est fortement lié aux variations de la vitesse de rotation, de sorte que la température maximale et la quantité de chaleur générée pendant le soudage augmentent avec l'augmentation de la vitesse de rotation.
- Les variations de la vitesse de rotation affectent également la résistance des joints soudés. Les résultats des tests de traction ont montré que 1400 tr/min est la vitesse optimale pour obtenir des joints à haute résistance (212,76 MPa).
- Une génération excessive de chaleur lors du soudage à grande vitesse de rotation (2000 tr/min) est susceptible d'entraîner la formation d'une couche de composés intermétalliques et de dégrader la qualité des joints.

Résumé :

Ce travail expérimental vise à étudier l'effet des variations des paramètres de soudage par friction rotative sur le comportement thermique et les propriétés mécaniques des joints dissimilaires Acier inoxydable/Cuivre. Pour atteindre cet objectif, un processus de soudage par friction rotative de tige en acier inoxydable AISI 316L avec des tiges en cuivre a été réalisé, en utilisant une fraiseuse comme machine de soudage par friction rotative, avec changement de la vitesse de rotation, et le mesure des changements de température des joints pendant le processus de soudage. Après le soudage, les joints ont été soumis à des essais de traction pour évaluer leur résistance mécanique. Les résultats expérimentaux ont montré l'existence d'une forte relation entre la vitesse de rotation et le comportement thermique des joints Acier inoxydable/Cuivre, et que leur résistance est affectée par les variations de vitesse de rotation.

Mots clés : Soudage par friction rotative, Cuivre, acier inoxydable AISI 316L, effet de la vitesse de rotation, mesure de la température, résistance à la traction.

Abstract :

This experimental work aims to study the effect of variations of rotary friction welding parameters on the thermal behavior and mechanical properties of dissimilar joints stainless steel/copper. To achieve this objective, a rotary friction welding process of AISI 316L stainless steel rods with copper rods was carried out, using a milling machine as the rotary friction welding machine, with changing the rotational speed, and measuring the temperature changes of the joints during the welding process. After welding, the joints were subjected to tensile tests to evaluate their mechanical strength. The experimental results showed a strong relationship between the rotational speed and the thermal behavior of the joints, and the strength of the joints is also affected by the changes of the rotational speed.

Keywords: Rotary friction welding, Copper, AISI 316L stainless steel, rotational speed effect, temperature measurement, tensile strength.

ملخص:

يهدف هذا العمل التجريبي إلى دراسة تأثير تغيرات معلمات لحام الاحتكاك الدوراني على السلوك الحراري و الخصائص الميكانيكية لوصلات غير المتشابهة فولاذ مقاوم للصدأ/نحاس. من أجل تحقيق هذا الهدف، تم إجراء عملية لحام احتكاك دوراني لقضبان من الفولاذ المقاوم للصدأ AISI 316L مع قضبان من النحاس، و ذلك باستعمال آلة خراطة كآلة لحام احتكاك دوراني، مع تغيير سرعة الدوران و قياس تغيرات درجة حرارة الوصلات أثناء عملية اللحام. بعد اللحام أخضعت الوصلات لاختبارات الشد لتقييم قوتها الميكانيكية. أظهرت النتائج التجريبية وجود علاقة قوية بين سرعة الدوران و السلوك الحراري للوصلات، و كذلك تأثر قوة الوصلات بتغيرات سرعة الدوران.

كلمات مفتاحية : لحام الاحتكاك الدوراني ، النحاس ، الفولاذ المقاوم للصدأ AISI 316L ، تأثير سرعة الدوران ، قياس درجة الحرارة ، قوة الشد.
