



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Genie Mécanique

MÉMOIRE DE MASTER

Domaine : Sciences et Techniques

Filière : Métallurgie

Spécialité : Génie Métallurgique

Réf. : Entrez la référence du document

Présenté et soutenu par :
AISSAOUI Seif eddine

Le : Septembre 2020

Réalisation d'une machine de soudage par friction rotation

Jury :

Dr. Messaoudi Salim	MAA	Université de Biskra	Président
Dr. Benzine Haroune Rachid	MCB	Université de Biskra	Examineur
Pr. Boumerzoug Zakaria	Pr	Université de Biskra	Rapporteur

Année universitaire : 2019 – 2020

Dédicaces

Je dédie ce travail de recherche à mes parents et à ma famille

Remerciement

Je remercie vivement mon encadreur, professeur Boumerzoug Zakaria qui m'a proposé ce thème de recherche et aussi sa disponibilité durant toute cette année universitaire.

Je remercie les membres de jury qui ont accepté d'expertiser mon travail de recherche.

Je remercie le personnel du Hall de technologie, son responsable Guettala Ismaine pour toutes les facilités et les aides techniques.

Je remercie mes enseignants de la filière métallurgie qui ont contribué à ma formation.

Enfin, je remercie toutes les personnes qui m'ont aidé dans mon travail de recherche

TABLE DES MATIERES

Introduction Générale.....	1
----------------------------	---

CHABITER I : SOUDAGE PAR FRICTION

1. INTRODUCTION AU SOUDAGE.....	3
2. Types de procédés de soudage.....	3
3 . Soudage par frictio.....	4
4 . Type de soudage par friction.....	4
1.4.1 Soudage par friction-malaxage (FSW).....	4
1.4.2 Soudage par friction en rotation(RFW).....	6
a. Définition.....	6
b. Principe de soudage par friction en rotation.....	8
c. Mécanismes de soudage par friction rotative.....	10
d. Les paramètres de soudage par friction rotative.....	12
5. Aspect métallurgique du soudage par friction rotative.....	15
6. Soudabilité des métaux non semblables.....	17
7. Conclusion partielle.....	18
8. Bibliographie.....	19

Chapitre II: Machines de soudage par friction en rotation

1.Introduction.....	22
2. Machine de soudage par friction rotative simplifiée.....	22
3. Machine pour le soudage par friction à entraînement direct.....	24

3.1. Principe.....	24
3.2. Machine de soudage par friction à entraînement.....	25
3.3. Paramètres de soudage par friction à entraînement direct.....	26
4. Caractéristiques de quelques machines.....	27
5. Autre dispositif du soudage par friction.....	31
6. Principaux domaines d'application.....	33
7. Conclusion partielle.....	36
8. Bibliographie.....	37

Chapitre III:

1. Introduction.....	39
2. Description des machines réalisées.....	39
2.1 Machine de soudage par friction rotative.....	40
2.1.1 Partie fixe.....	40
2.1.2 Partie mobile.....	41
3 . Les capteurs des mesures de charge et de la vitesse de rotation.....	41
4. Mode de fonctionnement.....	42
Conclusion générale.....	44

Liste des figures

Figure I. 1 : Organigramme des procédés de soudage les plus répandus.....	3
Figure I.2 : Classification des procédés de soudage en fonction d'énergie.....	4
Figure I.3 : Schéma montrant les principales composantes de l'outillage en soudage par friction malaxage (FSW).....	5
Figure I.4 : Soudage par friction ; a) schéma d'une machine de soudage par friction en rotation, b) exemple de soudage pour la fabrication des vérins hydraulique.....	6
Figure I.5. Illustration d'un brevet sur le soudage par friction rotative par BEVINGTON (1891).....	8
Figure I.6 : Principe de soudage par friction ; a) Les deux pièces sont clamées et une des pièces est mise en rotation, b) Les pièces sont mises en contact l'une de l'autre avec la force de friction F_1 : la température augmente dans la surface de contact, c) La partie en rotation est freinée et la force de forgeage F_2 est exercée.....	9
Figure I-7 : Principe du soudage par friction rotative.....	10
Figure I.8. Variations du couple de frottement pendant la phase de friction....	11
Figure I.9. Interaction des surfaces pendant la phase de friction.....	11
Figure I.10 : Le cycle de soudage par friction les paramètres de soudage par friction rotative.....	13
Figure I.11 : Macrographie de deux éprouvettes soudées par friction. (a) Acier A60/Acier A60 (N=1400tr/min, t=30s). (b) Al 2017A/Al 2017 (N=1400 tr/min, t=30s).....	13
Figure I.12. Illustration schématique des différentes zones de la soudure par friction rotative.....	16

Figure I.13 : Microstructure du joint soudé (Cuivre/aluminium) par friction rotative.....	16
Figure I.14 : structures métallographiques du joint soudé (Acier/ acier) par friction rotation.....	17
Figure I.15: Bourrelet et les deux zones affectées	17
Figure II.1 Machine de soudage par friction rotative simplifiée.....	22
Figure II.2. Principe simplifié du soudage par friction rotative.....	23
Figure II.3. Séquences du soudage par friction à entraînement direct.....	25
Figure II.4. Illustration d'une machine de soudage par friction à entraînement direct.....	26
Figure II.5. Caractéristiques des paramètres de soudage par friction à entraînement direct.....	27
Figure II.6 : Exemple d'une machine de soudage par friction rotative.....	29
Figure II-7: Mode de fixation des deux pièces. (a) la pièce en rotation au mandrin. (b) la pièce est fixe à la poupée mobile.....	29
Figure II.8 : Chronologie d'une opération de soudage.....	30
Figure II.9: Atelier de production de tiges de forage (Chine).....	30
Figure II.10 : La machine de soudage par friction dans l'atelier.....	31
Figure II.11 : Principe de fonction de soudage par friction.....	31
Figure II.12 Dispositif de soudage par friction (a)Image photographique, (b) Schéma de principe.....	32
Figure II.13 . Soudage acier avec l'aluminium.....	33
Figure II.14 : Pièce d'un turbo.....	34
Figure II.15 : Partie d'une boîte de vitesse.....	34
Figure II.16 : Partie d'un amortisseur: tub hydraulique: le soudé à une pièce compressée.....	34
Figure II.17: Partie d'un cric tube à double paroi est soudé en une fois.....	34
Figure II.18 : Production de boulons piston.....	35

Figure II.19 : Soudage de tiges de à crochet.....	35
Figure II.20: Soudage des roues dentées d'une boîte de vitesse.....	35
Figure II.21 : Fixation d'une bride à une valve hydraulique.....	35
Figure II.22 : Piston d'un moteur diesel.....	36
Figure II.23 : Remplacement de pièce forgées ou coulées par des profilés standards soudés par friction.....	36
Figure II.24 : Arbres de transmission soudés par friction.....	36
Figure III. 1: vue globale de la machine de soudage par friction rotative.....	39
Figure III. 2: Partie I de la machine de soudage.....	40
Figure III. 3: Partie II de la machine de soudage.....	41
Figure III. 4: Position des capteurs de la vitesse de la force.....	42
Figure III. 5 . Fixation des métaux à souder.....	42
Figure III.6. Mise du couvercle de protection.....	43
Figure III. 7 . Enlèvement de deux métaux soudés.....	43

Liste des Tableaux

Tableau I.1 Valeurs de pression utilisées pour le soudage par friction rotative de quelques matériaux métalliques.....	14
Tableau I.2 Ordres de grandeur d'efforts de friction en fonction du matériau.....	14
Tableau I.3 : Soudabilité des métaux et alliages les plus couramment utilisés en soudage par friction.....	18
Tableau II.1 : Caractéristiques de quelques machines à souder par friction pilotée.....	28
Tableau III.1: Les caractéristiques du moteur électrique.....	40

Introduction générale

Parmi ce nombre important de types de soudage, on a le soudage par friction. Le soudage par friction est obtenu par l'échauffement de deux pièces pressées et en mouvement l'une par rapport à l'autre. Les avantages du soudage par friction sont des assemblages de haute qualité, la rapidité du procédé par rapport aux procédés de soudage conventionnels. le soudage par friction soit souvent utilisé dans des secteurs divergents, tel que l'industrie automobile (soupapes, axes, ...), industrie électrique (raccords, électrodes, ...), forage (rabotage de tubes, ...),aéronautique et aérospatial (turbines, ...),

Le soudage par friction rotation est parmi ce nombre les types de soudage par friction. Le principe du soudage par friction rotation est obtenu lorsque deux axes ou deux tubes sont soudés bout à bout par la rotation de l'une des deux pièces et qui est mise en contact avec la pièce fixe.

Pour réaliser de type de soudage, il faut avoir une machine qui provoque la rotation de lune des deux pièces et de la mettre en contact avec l'autre pièce qui doit être immobile. Pour cette raison; nous avons décidé de réaliser une machine de soudage par friction rotation en utilisant les moyens disponibles.

Pour aboutir à notre objectif; nous avons pris une machine qui a été déjà réalisé par un autre étudiant master (dirigé par le professeur Boumerzoug Zakaria) mais qui manque certaines accessoires et qui sont nécessaires pour son bon fonctionnement.

Le mémoire rédigé est composé de trois chapitres :

- Le chapitre 1 traite le principe et les différents types de soudage par friction
- Le chapitre 2 présente le principe fonctionnement des machines utilisées dans le soudage par friction rotation.
- Le chapitre 3 est consacré à la description de la machine réalisé et le test de soudage effectué.

Enfin, une conclusion générale qui rassemble les points essentiels de ce mémoire.

Chapitre I

Soudage par friction

Chapitre I : Soudage par friction

1. Introduction

Le soudage est une technique d'assemblage permanent qui établit une continuité de nature entre les pièces soudées. Le terme soudure est utilisé pour désigner l'alliage reliant les pièces à assembler formé par la fusion des bords à assembler, avec ou sans adjonction d'un produit d'apport. La soudure peut donc être le résultat du seul mélange des matériaux de base (les matériaux à souder) ou du mélange des matériaux de base et d'un produit d'apport. Dans ce chapitre, on présente les deux types de soudage par friction et surtout le soudage par friction rotation.

2-Types de procédés de soudage

On note qu'il existe plusieurs types de procédés de soudage. La figure I.1 présente ces différents procédés et qui sont divisés en deux groupes (par fusion et par pression)

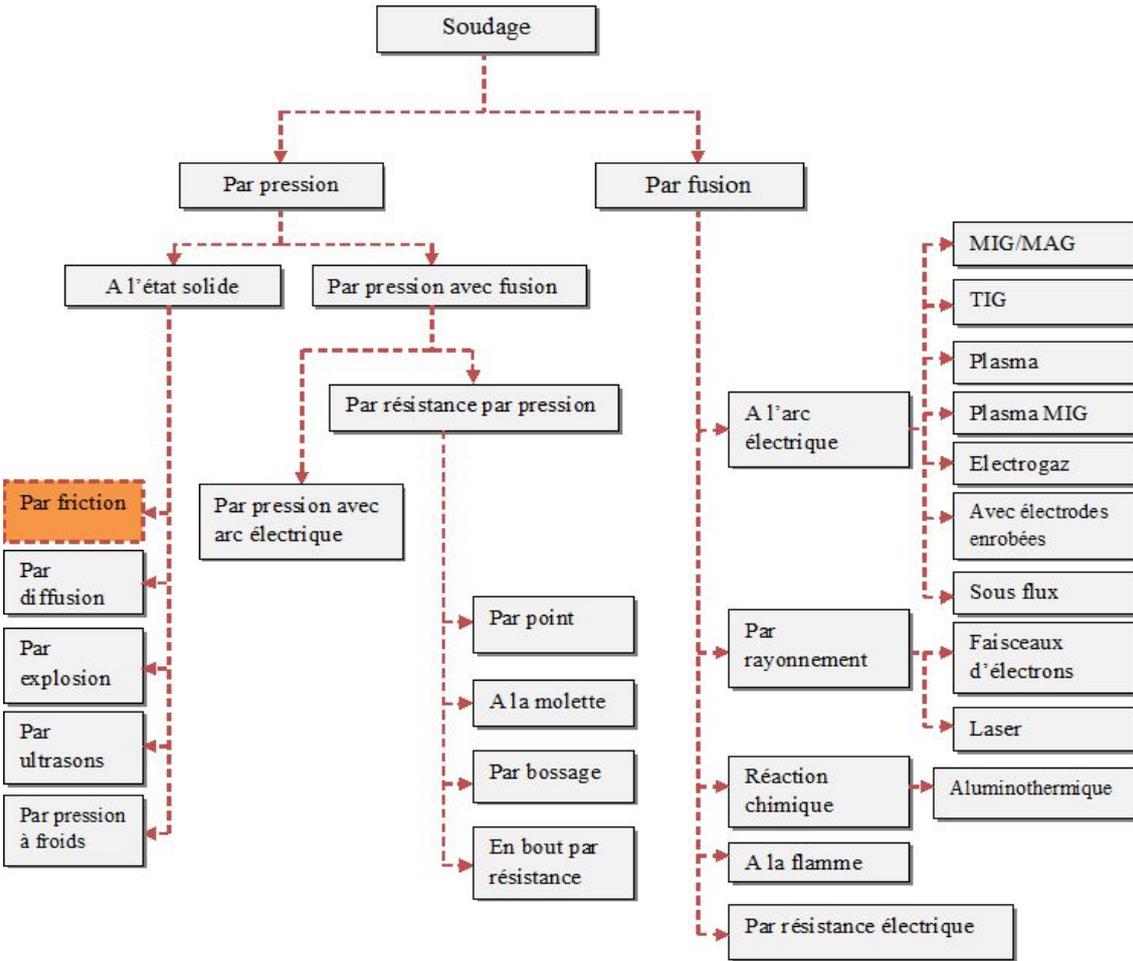


Figure I. 1 : Organigramme des procédés de soudage les plus répandus .

On peut aisément classer aussi ces procédés en fonction des énergies mises en œuvre comme il a été présenté dans la Figure I.2.

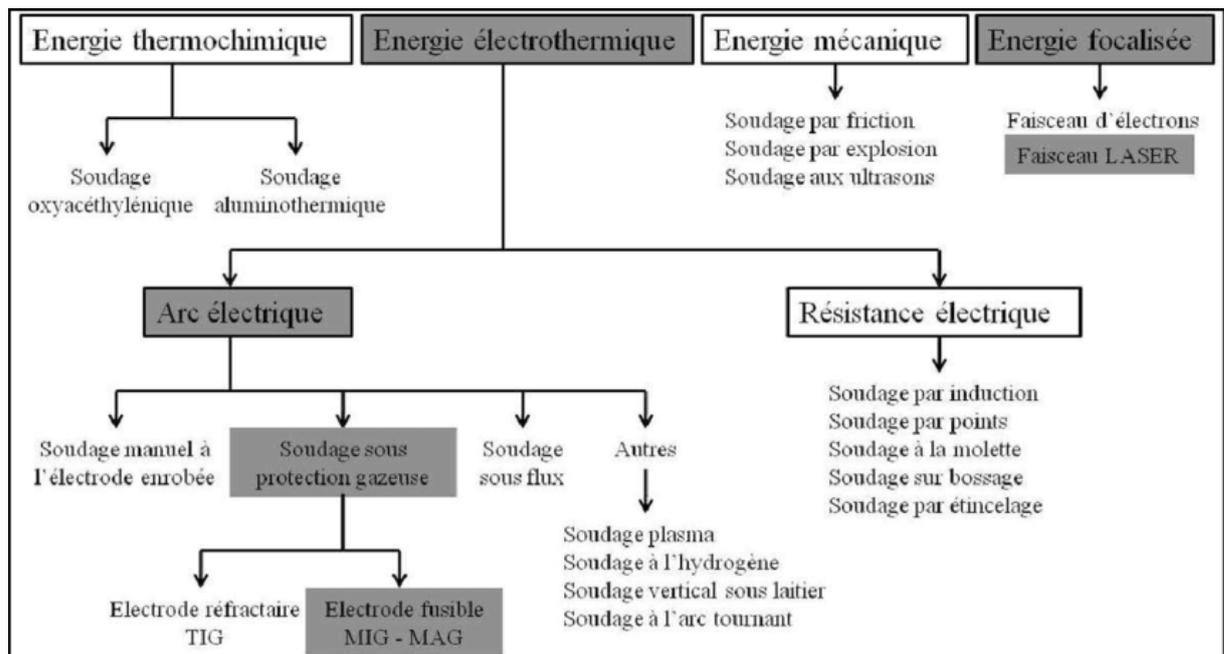


Figure I.2 : Classification des procédés de soudage en fonction d'énergie [1].

3- Soudage par friction

Parmi ce nombre important de types de soudage, on a le soudage par friction. Le soudage par friction semble né d'un principe physique remonte à plusieurs siècles: « le frottement, sous une pression, entre deux objets provoque un réchauffement ». 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[2]. On note aussi que le soudage par friction est divisé aussi en d'autres types de soudage.

4- Type de soudage par friction

4.1. Soudage par friction-malaxage (FSW)

Le soudage par friction malaxage, présenté dans la figure I. 3, on a un outil en rotation qui génère un flux de chaleur grâce à la friction de celui-ci avec les matériaux à assembler. L'outil est muni d'un épaulement et d'un pion qui permet de malaxer et drainer les métaux. Une pression est exercée pour que la puissance totale mécanique soit suffisamment grande.

Cette puissance se transforme en chaleur et élève la température des matériaux, d'une part grâce à la friction et, d'autre part, grâce aux déformations plastiques subies par ceux-ci. L'outil est incliné d'un angle de 0.5 à 5 degré par rapport à la verticale [3].

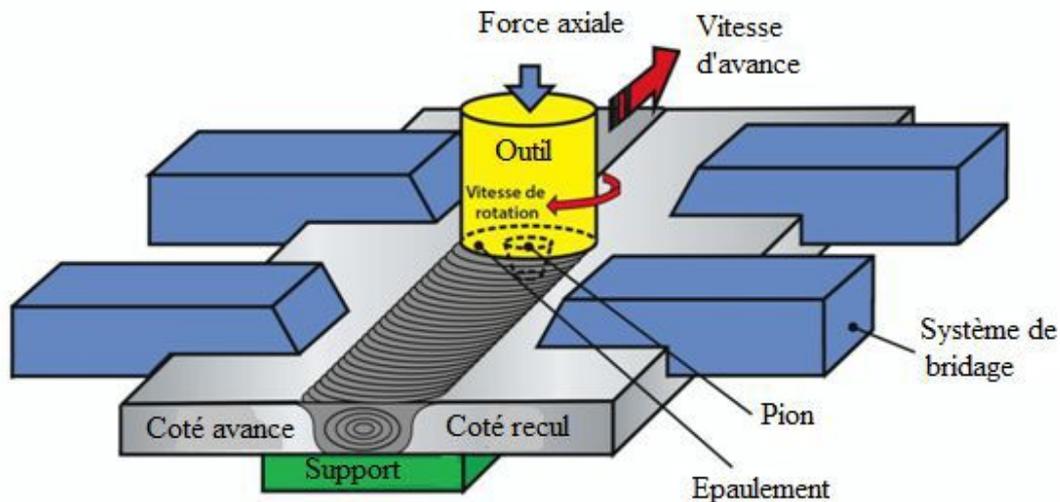


Figure I.3 : Schéma montrant les principales composantes de l'outillage en soudage par friction malaxage (FSW) [4].

Les avantages du soudage par friction sont :

- Assemblages de haute qualité ayant une bonne structure métallurgique comme le matériau n'est pas porté à fusion.
- Pas de préparation spéciale des pièces.
- Le procédé de soudage est beaucoup plus rapide que les procédés de soudage conventionnels.
- Peu de déformations après soudage en raison des temps de soudage courts et des faibles températures maximales.
- Possibilité d'assembler des pièces de sections fortement différentes à condition de prendre certaines mesures de précaution.
- Economique: le soudage par friction permet de réaliser d'intéressantes économies sur le coût des pièces soudées (économie en temps, en matériau).
- Des matériaux dissemblables peuvent être assemblés, comme l'aluminium ou le cuivre à de l'acier.

- Très bonne reproductibilité et possibilités d'automatisation.
- Métaux d'apport pas nécessaires
- Soucieux de l'environnement: pas de gaz de protection, pas de fumées de soudage ou rayonnement.
- Moins de bruit: les soudures ne doivent pas être meulées
- Pas de nécessité de soudeurs agréés [2].

4.2- Soudage par friction en rotation

a- Définition

Le soudage par friction est obtenu par l'échauffement de deux pièces pressées et en mouvement l'une par rapport à l'autre. Le mouvement relatif entraîne un échauffement de l'interface jusqu'à plastification locale du matériau, puis soudage par diffusion atomique. Un flux de chaleur est généré par conversion de l'énergie mécanique en énergie thermique. La qualité de la liaison ainsi obtenue est supérieure à celle des matériaux utilisés. La figure I.4 présente une machine de soudage par friction utilisée dans les ateliers de confection mécanique [5].

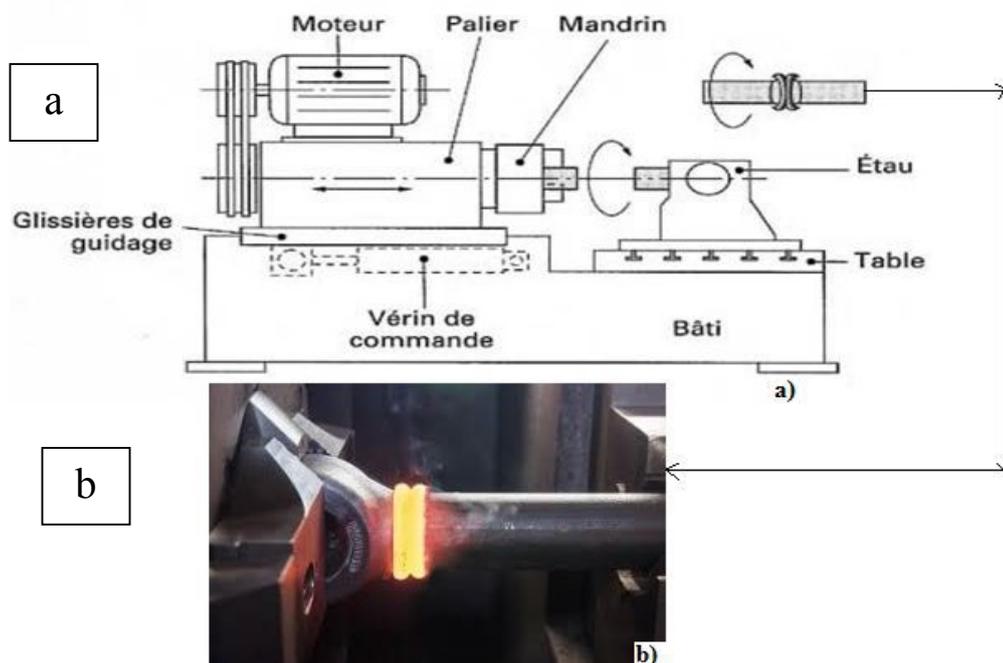


Figure I.4 : Soudage par friction ; a) schéma d'une machine de soudage par friction en rotation, b) exemple de soudage pour la fabrication des vérins hydraulique [3].

On note que la qualité de la soudure dépend de plusieurs paramètres : la vitesse de rotation, le temps de friction, et la pression exercée. L'avantage d'un tel procédé est qu'il n'y a pas de métal d'apport et qu'il permet de souder des matériaux hétérogènes, de plus, sa mise en œuvre est assez facile [3].

b-Principe de soudage par friction en rotation

Bevington a probablement été le premier à exploiter le soudage par friction rotative. En 1891, il obtint un brevet dans lequel le concept d'utilisation de la chaleur de friction pour le procédé de soudage était appliqué (Figure II.5). Cependant, ce n'est pas avant les années 1950 que ce concept a été plus largement envisagé et a atteint la faisabilité commerciale. Le soudage par friction a été mis sur le marché pour la première fois en Russie entre 1956 et 1957 environ, grâce aux efforts de Chudikov, qui a démontré avec succès la possibilité de réaliser des soudures bout à bout de haute qualité entre des tiges métalliques [6].

En 1959, Vill et d'autres chercheurs russes ont commencé à définir plus systématiquement les paramètres de soudage en analysant la répartition de l'énergie dans des tiges d'acier soudées par friction. Aux années 1960, la société américaine de fonderies et de machines (American Machine and Foundry Company) a introduit le processus de soudage par friction dans le monde occidental, en rapportant un premier travail expérimental avec une discussion des caractéristiques de base du processus. Ensuite, Cheng (1962) a étudié de manière analytique la répartition de la température pendant le soudage de tubes métallique similaires, ainsi que pour la première fois dissimilaires. Hazlett (1962) et Gupta (1963) ont rapporté, en première fois, les propriétés mécaniques des soudures par friction de plusieurs combinaisons métalliques. Au cours de la même période, les instituts de soudage d'Europe occidentale (Royaume-Uni et en Allemagne de l'Ouest) ont été mené des recherches sur le soudage par friction [6].

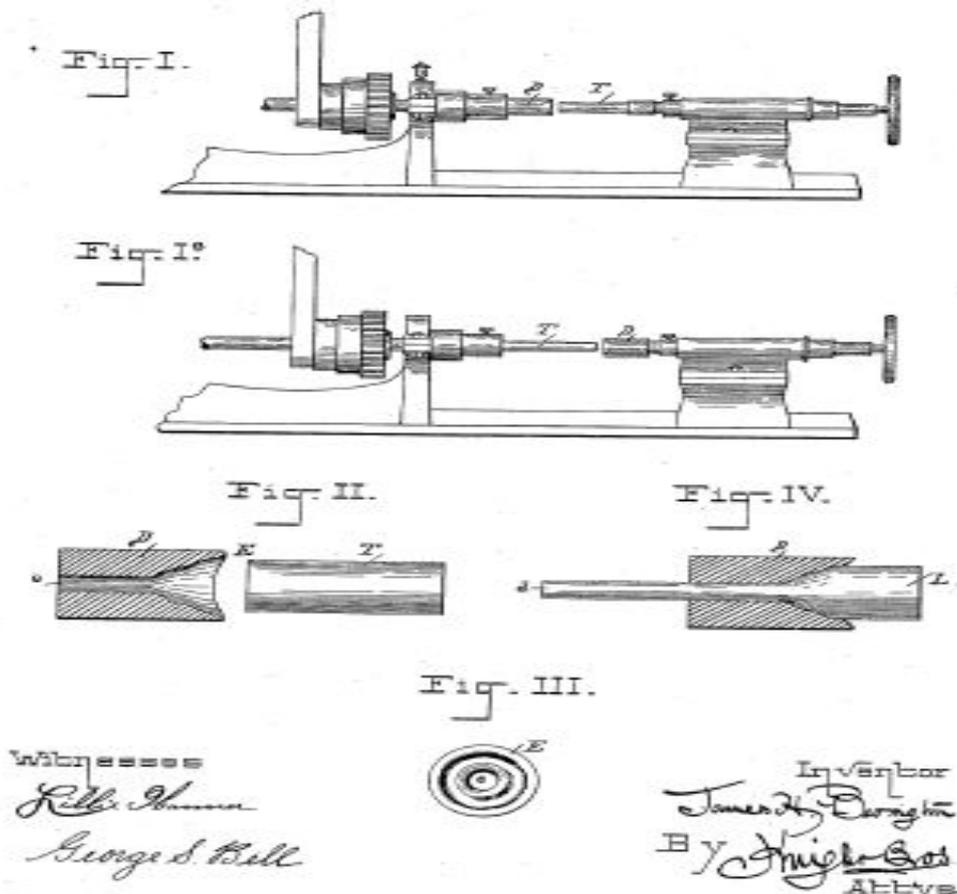


Figure I.5. Illustration d'un brevet sur le soudage par friction rotative
 par BEVINGTON (1891) [8].

Le principe du soudage par friction rotation est présenté dans les figures II.6 et 7. Supposons que deux axes ou deux tubes doivent être soudés bout à bout. Une des pièces est bloquée, tandis que l'autre est mise en rotation contre l'autre à une vitesse constante à l'aide d'un moteur (soudage par friction en continu). Quand les deux pièces sont mises en contact l'une de l'autre, les forces de friction provoquent un couple de résistance. L'énergie qui en résulte, est transformée en chaleur dans la surface de contact. La chaleur générée augmente la température en un court laps de temps jusqu'à la température de soudage (température de forgeage). La pièce en rotation est ensuite détachée du mandrin, freinée jusqu'à l'arrêt total. Une force de forgeage axiale est exercée afin de réaliser une soudure entre les deux pièces. Durant la phase d'échauffement et la phase de soudage, une quantité de métal plastique est refoulée, sous l'action de la force de pression axiale de telle sorte que l'ébarbure caractéristique du soudage par friction se forme [1].

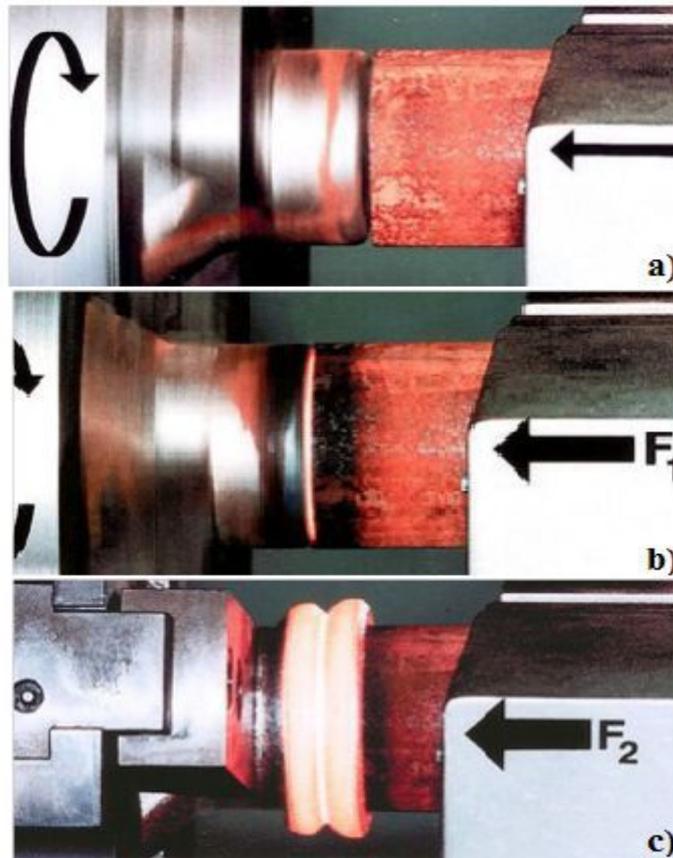


Figure I.6 : Principe de soudage par friction ; a) Les deux pièces sont clamées et une des pièces est mise en rotation, b) Les pièces sont mises en contact l'une de l'autre avec la force de friction F_1 : la température augmente dans la surface de contact, c) La partie en rotation est freinée et la force de forgeage F_2 est exercée [2].

Les principales étapes du procédé de soudage par friction rotation sont schématisées dans la figure I.7 .Supposant que deux axes ou deux tubes doivent être soudés bout à bout. Une des pièces est bloquée, tandis que l'autre est mise en rotation contre l'autre à une vitesse constante à l'aide d'un moteur quand les deux pièces sont mises en contact l'une à l'autre, les forces de friction provoquent un couple de résistance [3]. L'énergie qui en résulte est transformée en chaleur dans la surface de contact. La chaleur générée augmente la température en un court laps de temps jusqu'à la température de soudage (température de forgeage). La pièce en rotation est ensuite détachée du mandrin freiné jusqu'à l'arrêt total [3].

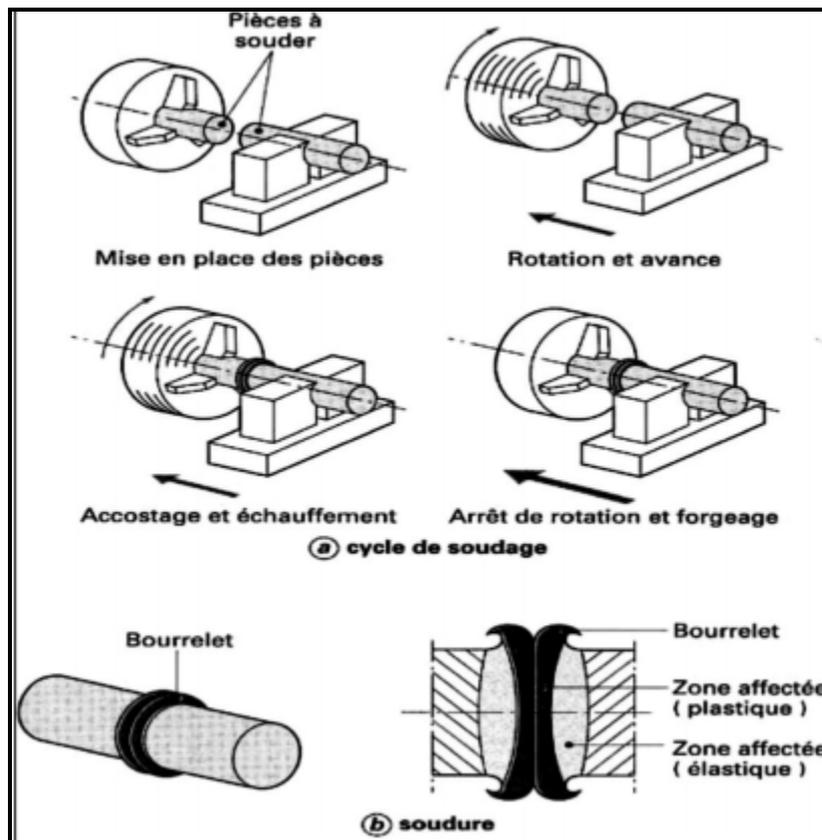


Figure I-7 : Principe du soudage par friction rotative [5].

c. Mécanismes de soudage par friction rotative

Le mécanisme de soudage par friction rotative comporte essentiellement deux phases : la phase de friction et la phase de forgeage.

1- Phase de Friction

La figure I.8 représente les variations dans le temps du couple résistant (ou de frottement) pendant la phase de friction. Les variations en couple résistant (ou de frottement) divisent la phase de friction en quatre stades distincts : le stade de frottement sec des deux surfaces préalablement préparés, le stade de transition ou de diminution du couple de frottement, le stade d'autorégulation et enfin le stade de décélération.

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.

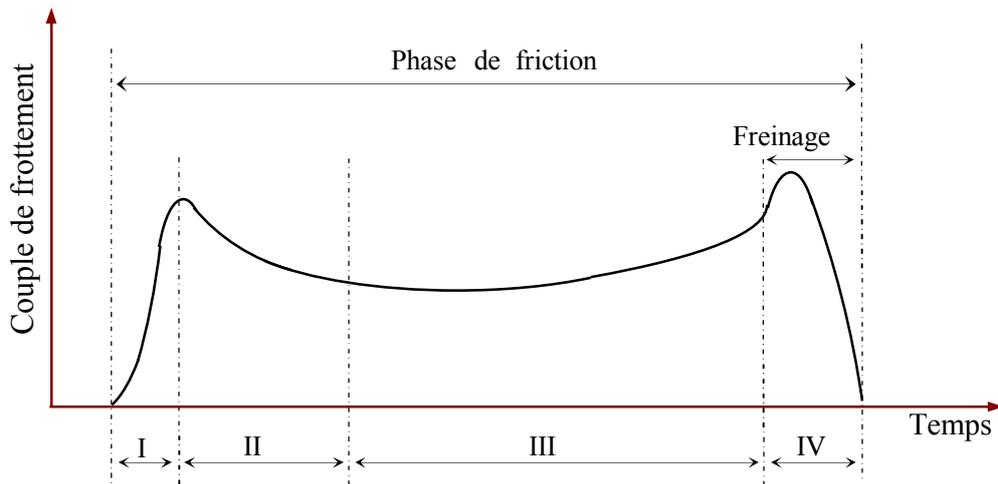


Figure I.8. Variations du couple de frottement pendant la phase de friction [6].

Les aspérités des deux surfaces grippent et s'arrachent mutuellement comme l'indique la figure II.9.(a, b). Les fragments arrachés sont plus ou moins, gros et nombreux suivant les valeurs de la vitesse de rotation et de la force axiale. Les débris creusant des larges sillons dans la surface tendre, conduisant à la destruction de la couche écrouie figure II.9.c. 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 [10].

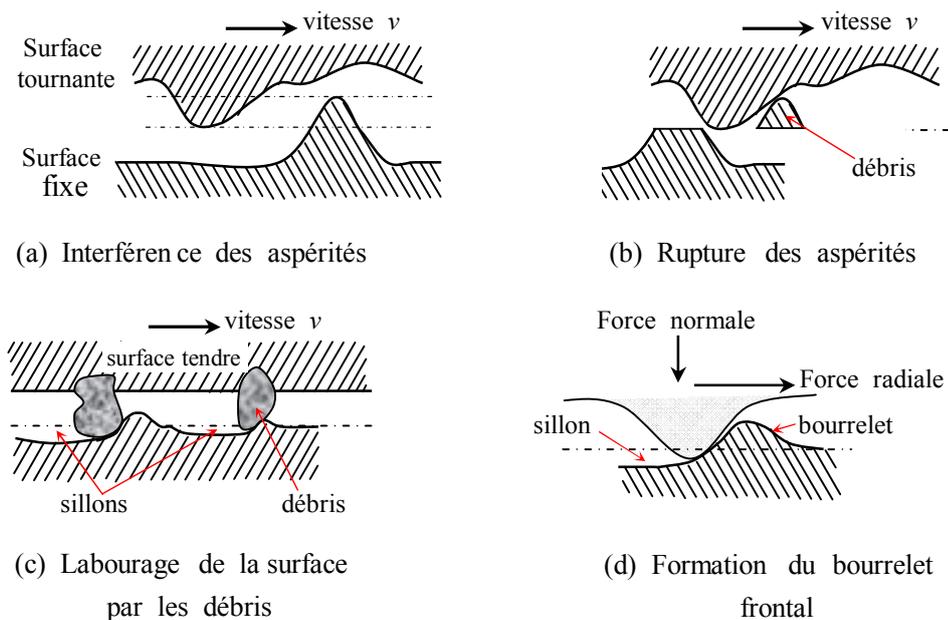


Figure I.9. Interaction des surfaces pendant la phase de friction [10].

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 d'inertie (radiales) et de contact (normales) (figure II.9.d). La matière expulsée commence à former une spirale (ou un bourrelet) autour l'interface [12].

Stade III : C'est un stade d'équilibre ou d'autorégulation du couple de frottement. De plus, le taux de raccourcissement axial et la force axiale restent constants pendant cette période. La température de la couche interfaciale permet d'échauffer, par conduction et activation interne, le métal adjacent et conduit à une consommation de matière régulière dans le temps [10,12].

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 l'augmentation du volume du bourrelet au fur et à mesure que la vitesse diminue [13].

2- Phase de forgeage

Le forgeage est commencé dès l'arrêt de la pièce tournante. Une poussée axiale est maintenue à un niveau suffisant pour conduire au forgeage à chaud du matériau de l'interface et à son refoulement (bourrelet). Ni l'effort, ni la durée de forgeage ou de refoulement n'ont une liaison avec la friction. Ils ne dépendent que des conditions métallurgiques relevant de la nature des matériaux. La pression permet de chasser le métal oxydé chargé d'impuretés, de réduire la structure à gros grains obtenue à haute température et de disperser les inclusions pour éviter la formation des zones de ruptures préférentielles (zone de discontinuités).

d. Les paramètres de soudage par friction rotative

Les paramètres influant sur la qualité de ce type d'assemblage sont :

- Le temps de soudage.
- La pression exercée entre les pièces.
- La vitesse de rotation relative
- La consommation de matière.

La figure I.10 schématise les courbes de variation de ces paramètres lors du soudage par friction rotative.

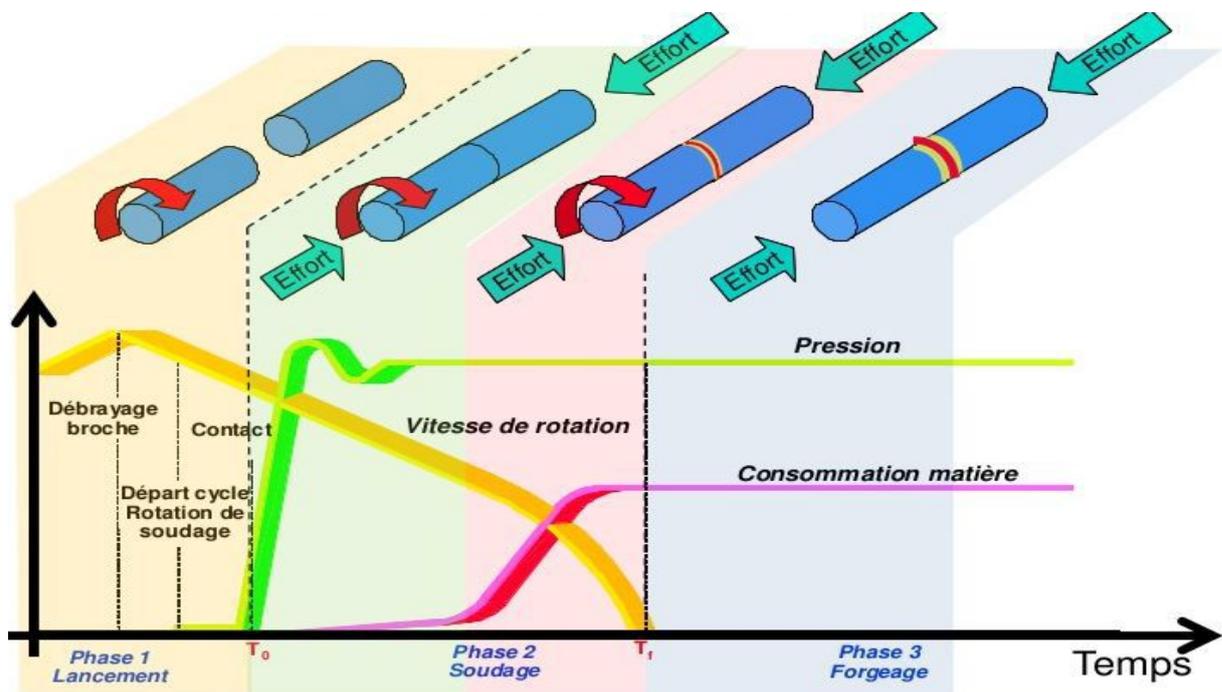


Figure I.10 : Le cycle de soudage par friction les paramètres de soudage par friction rotative [8].

La figure I.11 montre la forme des pièces après soudage par friction rotative après utilisation de deux vitesses de rotation différentes.

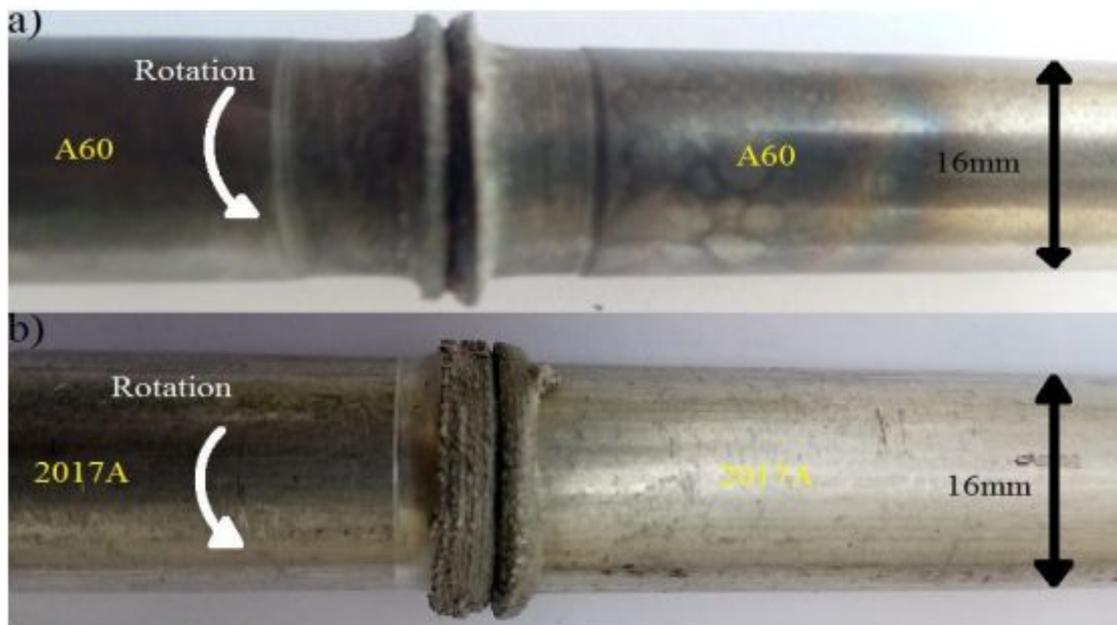


Figure I.11 : Macrographie de deux éprouvettes soudées par friction. (a) Acier A60/Acier A60 ($N=1400\text{tr/min}$, $t=30\text{s}$). (b) Al 2017A/Al 2017 ($N=1400\text{ tr/min}$, $t=30\text{s}$) [18].

Le tableau I.1 rassemble quelques valeurs de pression utilisées pour le soudage par friction rotative de quelques matériaux métalliques.

Tableau I.1 Valeurs de pression utilisées pour le soudage par friction rotative de quelques matériaux métalliques [14].

Métal	Pression de frottement (N/mm ²)
Acier doux	5500
Acier à moyen carbone	7000
Alliages d'aluminium	8000
Alliage de Nickel (Nimonic alloys 80/20 Ni/Cr)	14000

Le tableau I.2 donne des ordres de grandeur d'efforts de friction en fonction du matériau. [11].

Tableau I.2 Ordres de grandeur d'efforts de friction en fonction du matériau [11].

Matériaux	Effort unitaire de Friction (daN/mm ²)	Effort unitaire de Forgeage (daN/mm ²)	Effort maximal pour barre de Ø 20 mm (daN)
Acier doux	3,5 à 6	8 à 12	3 800
Acier mi-dur	5 à 8	10 à 20	6 300
Aciers rapides et spéciaux	8 à 16	20 à 35	11 000
Aciers inoxydables et réfractaires	8 à 12	20 à 40	12 500
Alliage d'aluminium	1 à 3	3 à 6	2 000

On note aussi que la durée de soudage sur une barre de 25 mm de diamètre doit être comprise entre 5 et 7 secondes. Ceci peut être obtenu avec une vitesse de surface de 75 à 600 m / min, ce qui correspond à environ 1000 tr / min. Des vitesses plus élevées peuvent donner une meilleure résistance aux chocs et sont donc souhaitables pour les sections creuses et les alliages à haute résistance à chaud [14].

La vitesse pour l'acier doux est choisie sur la base du diamètre du stock et est donnée par l'expression [14]:

$$Nd = (1, 2 \text{ à } 6, 0) 10^4$$

où n est le nombre de tours par minute et d le diamètre de la pièce en mm.

5. Aspect métallurgique du soudage par friction rotative

En règle générale, le joint de soudure obtenu par le soudage par friction rotative comporte deux principales zones (figure I.12) [17,15] : Zone de contact, et Zone affectée thermiquement (ZAT)

- 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 le paramètre principal est 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.
 - Zone entièrement plastifiée (zone de recristallisation dynamique) : Dans cette zone, Les grains subis une déformation plastique considérable, mais ne participe pas au processus de frottement ni de 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 subis pas de transformation de phase ou de déformation plastique. La croissance des grains peut avoir lieu dans cette zone.

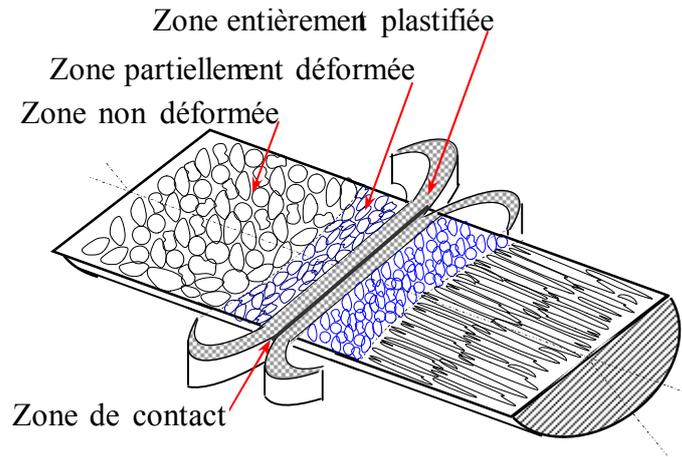


Figure I.12. Illustration schématique des différentes zones de la soudure par friction rotative [16].

La figure I.13 montre une pièce soudée (cuivre / aluminium) et la microstructure du joint soudé (Cuivre/aluminium) par friction rotative.

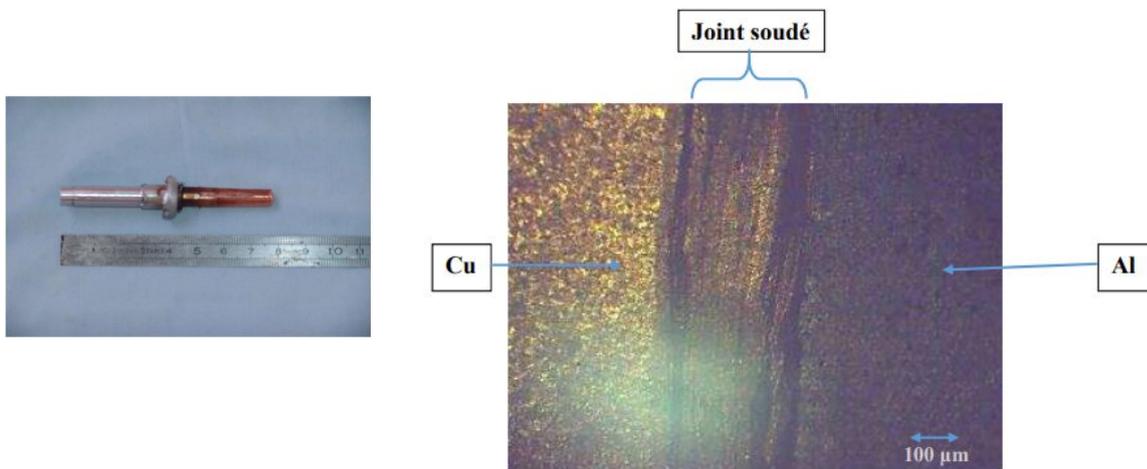
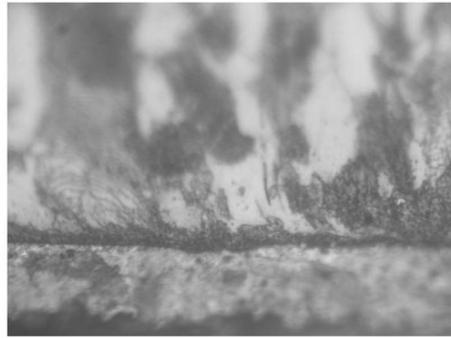


Figure I.13 : Microstructure du joint soudé (Cuivre/aluminium) par friction rotative [9].

La figure I.14 montre la structures métallographiques du joint soudé (Acier/ acier) par friction rotation.



Acier/acier (x 200)

Figure I.14 : structures métallographiques du joint soudé (Acier/ acier) par friction rotation [19].

D'autre part, on peut trouver les zones affectées par cette classification (Zone de déformation plastique et élastique) comme il est montré dans la figure I.15

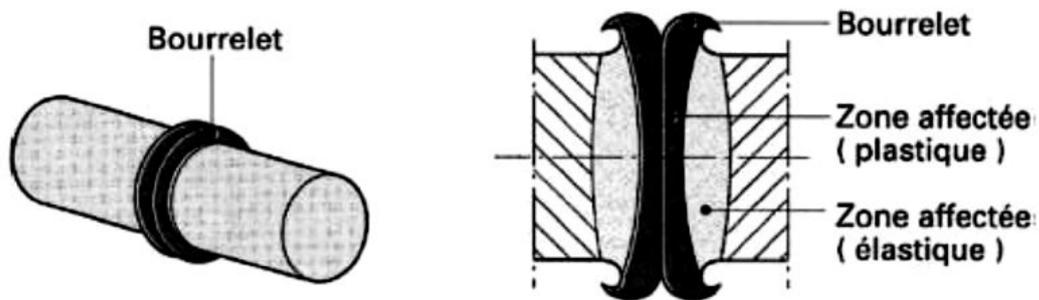


Figure I.15: Bourelet et les deux zones affectées .

6. Soudabilité des métaux non semblables

Le procédé de soudage par friction s'applique à un grand nombre de matériaux semblables et dissemblables comme le montre le tableau I.3. Il présente, de ce fait, par rapport aux soudages par étincelage et à l'arc, un avantage capital.

Tableau I-3 : Soudabilité des métaux et alliages les plus couramment utilisés en soudage par friction [5]

Métaux et alliages	Aluminium	Alliages d'aluminium	Bronze	Cuivre	Magnésium	Monel	Nickel	Nimonic	Aciers	Aciers coulés	Aciers spéciaux	Aciers inoxydables	Titane
Aluminium	■	■	□	■	□	□	■	□	■	□	□	■	■
Alliages d'Al	■	■	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
Bronze	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
Cuivre	■	□	□	□	□	□	□	□	■	□	□	■	□
Magnésium	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
Monel	□	□	□	□	□	■	□	□	□	■	□	■	□
Nickel	■	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	■
Nimonic	□	□	□	□	□	□	□	■	■	■	□	■	□
Aciers	■	□	□	■	□	□	□	■	■	■	■	■	□
Aciers coulés	□	□	□	□	□	■	□	■	■	■	■	■	□
Aciers spéciaux	□	□	□	□	□	□	□	□	■	■	■	■	□
Aciers inoxydables	■	□	□	■	□	■	□	■	■	■	■	■	□
Titane	■	□	□	□	□	□	■	□	□	□	□	□	■

- Bonne soudabilité
- Soudabilité
- Soudure délicate
- Impossible

Conclusion partielle

Le soudage par friction est un procédé multiple et innovateur qui a de nombreuses applications dans différentes branches de l'industrie, permet d'assembler des pièces avec une facilité de mise en œuvre remarquable et de matériaux ne pouvant être assemblés avec des procédés conventionnels. Ce procédé mérite donc d'être étudié et exploité dans le domaine industriel car il est bien économique comme il a été mentionné par les spécialistes de ce procédé.

Références bibliographiques

1. Perry, N., *Etude et développement des flux solides en vue d'application en soudage TIG appliqué au titane et ses alliages ainsi qu'aux aciers inoxydables*, 2000, Ecole Centrale de Nantes (ESN).
2. <https://www.bil-ibs.be/fr/soudage-par-friction>
3. Helal, Y., thèse « *L'effet de soudage par friction malaxage sur la microstructure et les propriétés mécaniques d'un joint soudé composé d'un alliage d'aluminium industriel et un acier* ». Université Mohamed Khider; Biskra (2017).
4. « *Soudage-Coupage* » (SYMOP). <http://www.irs.fr>. (24 avril 2018).
5. Cazes, R., *soudage par friction (10/02/1996)*. *Techniques de l'ingénieur*
6. . Withers, P. J. et Preuss M., *Simulation of rotational welding operations, Metals process simulation, Vol 22B, ASM Handbook, ASM International, 2010, p. 432-442.*
7. Bevington, J. H., *Spinning Tubes Mode of Welding the Ends of Wire, Rods, etc. and Mode of Making Tubes, Patent 1208, U.P.N. British Patent Office, United Kingdom, 1891*
8. Pichot, F. ; Corpace, F., *Conception et fabrication des moteurs aéronautiques (27/03/2014)*. Groupe SAFRAN (SNECMA).
9. Mohammed L., *Mémoire de master, Université de Biskra, 2019.*
10. Guidara, M., *Modolisation et identification des paramètres de soudage par friction, 2002, Université de Sfax.*
11. R. CAZE, *Le soudage par friction, Techniques de l'Ingénieur, Traité génie mécanique – Volume B7 745.*
12. Uday, M. B, Ahmad Fauzi M. N., Zuhailawati H. et Ismail A. B., *Advances in friction welding process: a review, Science and Technology of Welding and Joining 2010 VOL 15 NO 7 534-558.*

13. *Pinheiro, G. A., Olea C. A. W., dos Santos J. F. et Kainer, K. U., Microstructural and Mechanical Behavior of Friction Welds in a High Creep Resistance Magnesium Alloy. Advanced Engineering Materials, (2007). 9(9), 757*
14. *<http://fr.bestarticleonline.com>*
15. *Johnson, C. A. et al, Friction welding, Welding processes, Vol 2, Welding Handbook, American Welding Society (AWS), 1997, p. 740-762*
16. *Caligulu, U., Acik M., Balalan Z. et Kati N., The Effects of Process Parameters for Joining of AISI 1010-Cu Alloys by Friction Welded, International Journal of Steel Structures 15(4): 1-9 (2015)*
17. *Rombaut, P., Joining of dissimilar materials through rotary friction welding, 2011, Université Gent.*
18. *BaariI A., Mémoire de master, Université Kasdi Merbah Ouargla*
19. *Silem M. et Saidani H., Mémoire de master, Université Mohamed Boudiaf - M'Sila*

Chapitre II

Machines de soudage par friction en rotation

Chapitre II: Machines de soudage par friction en rotation

Introduction :

Le soudage par friction rotation nécessite une machine particulière pour réaliser des soudures de certaines pièces. Dans ce chapitre , on présente le principe fonctionnement des machines utilisées le soudage par friction rotation .

2. Machine de soudage par friction rotative simplifiée

Les principaux composants d'un poste de soudage par friction, comme illustré à la figure II.1 sont :

1. Tête entraînée
2. dispositifs de serrage,
3. mécanismes de rotation et de retournement,
4. contrôles,
5. Mécanisme de freinage.

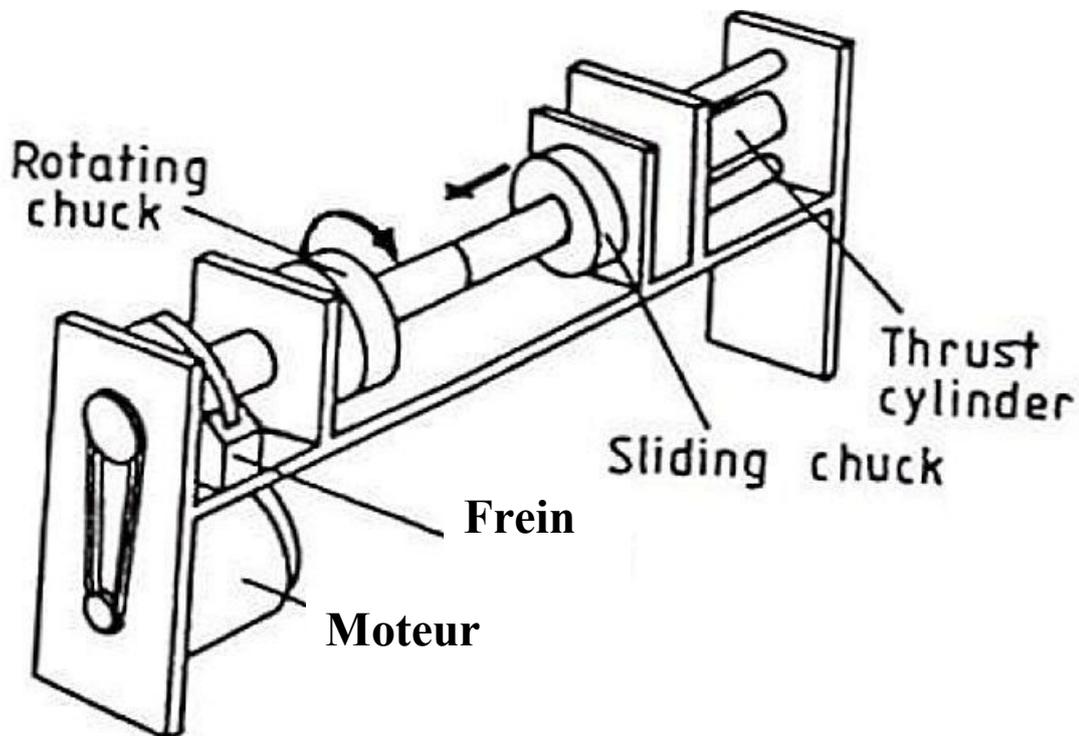


Figure II.1 Machine de soudage par friction rotative simplifiée[1].

L'une des pièces à souder est maintenue fermement dans la tête à centrage automatique et l'autre dans un mandrin de centrage monté sur une broche rotative entraînée par un moteur, généralement par l'intermédiaire d'un variateur de vitesse.

Les mandrins rotatifs doivent être bien équilibrés, avoir une grande résistance et fournir un bon pouvoir de préhension. Les mandrins à pinces répondent bien à ces exigences et sont par conséquent les plus fréquemment utilisés.

Le mécanisme de préhension des mandrins doit être rigide et résister à la poussée appliquée. Des mâchoires de préhension dentelées sont recommandées pour une fiabilité de serrage maximale.

Les tentatives d'utilisation du tour pour le soudage par friction n'ont pas eu beaucoup de succès car elles manquaient de rigidité de la structure et de préhension efficace. Un tour n'est pas conçu pour les besoins d'endurance pour le soudage par friction, pas plus qu'il n'est fourni avec un désengagement rapide du processus. De plus, pour régler le problème de freinage, un moment d'inertie bas est requis dans les pièces en rotation.

Les machines de soudage par friction sont nécessaires pour contrôler avec précision trois variables: la poussée axiale, la vitesse de rotation et le degré de déflexion. Les aciers au carbone non alliés et faiblement alliés nécessitent une pression de forge de $15 - 30 \text{ N / mm}^2$, tandis que les aciers au tungstène requièrent plage de $225 \text{ à } 400 \text{ N / mm}^2$. Ces dernières valeurs sont comparables à la pression utilisée dans le soudage par étincelage. Lorsque le taux d'application de la pression par un système hydraulique s'avère faible, il est remplacé par un système pneumatique[1]. La figure II.2. simplifie le principe de soudage par friction rotative.

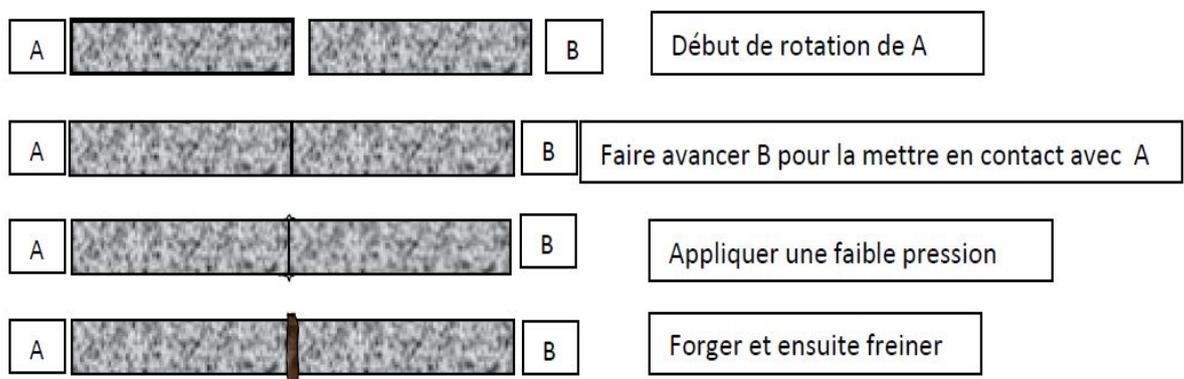


Figure II.2. Principe simplifié du soudage par friction rotative

On note qu'il existe deux modes de soudage par friction rotative, selon la fonction dont ont exécuté la friction : le soudage par friction à entraînement direct (ou soudage piloté) (Direct Drive Friction Welding), le soudage par friction inertielle (Inertia Friction Welding). C'est pourquoi, la conception de la machine varie d'une machine à une autre. Dans ce chapitre on présentera en détail la machine qui fonctionne selon le mode d'entraînement direct.

3.Machine pour le soudage par friction à entraînement direct

3,1.Principe

Le soudage par friction à entraînement direct 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 d'échauffement. Les différentes phases d'une opération de soudage à entraînement direct sont les suivantes (Figure II.3) :

- Mise en marche du moteur, la broche étant débrayée et freinée.
- Mise en place des pièces dans les mandrins et fermeture de ces derniers (Figure II.3.a).
- Démarrage du cycle automatique qui comprend les séquences suivantes :
 - L'embrayage de la broche et la mise en rotation uniforme de la pièce (2).
 - L'accostage des pièces (1) et (2) sous un effort axial (F_1) (Figure II.3.b). Les pièces deviennent en contact par leurs aspérités en formant une surface rigoureusement perpendiculaire à l'axe de rotation.
 - Le frottement intense, par l'application de F_1 , provoque une élévation de température ou échauffement (ou conversion de l'énergie mécanique en énergie calorifique) (Figure II.3.c). Le couple de frottement est pratiquement constant avec une consommation régulière de la matière en fonction du temps, donnant lieu à la formation du bourrelet. La chaleur diffuse de façon globale est symétrique de part et d'autre du plan de friction jusqu'à atteindre des conditions favorables au forgeage.
 - La rotation est interrompue par débrayage et freinage simultané du mandrin tournant. Le forgeage commence par l'application d'un effort F_2 approprié (Figure II.10.d). Le bourrelet subit une nouvelle et définitive augmentation de volume.

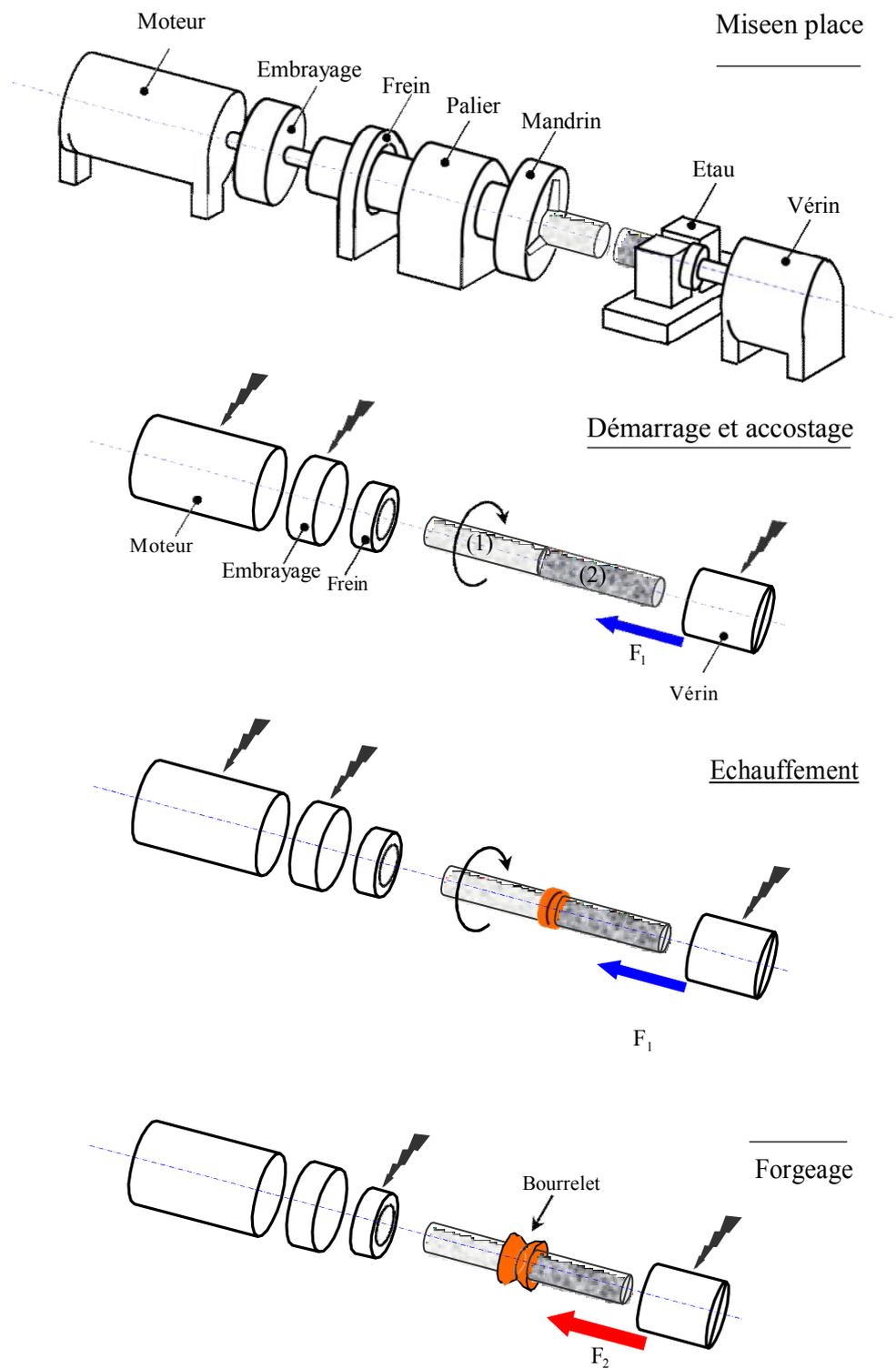
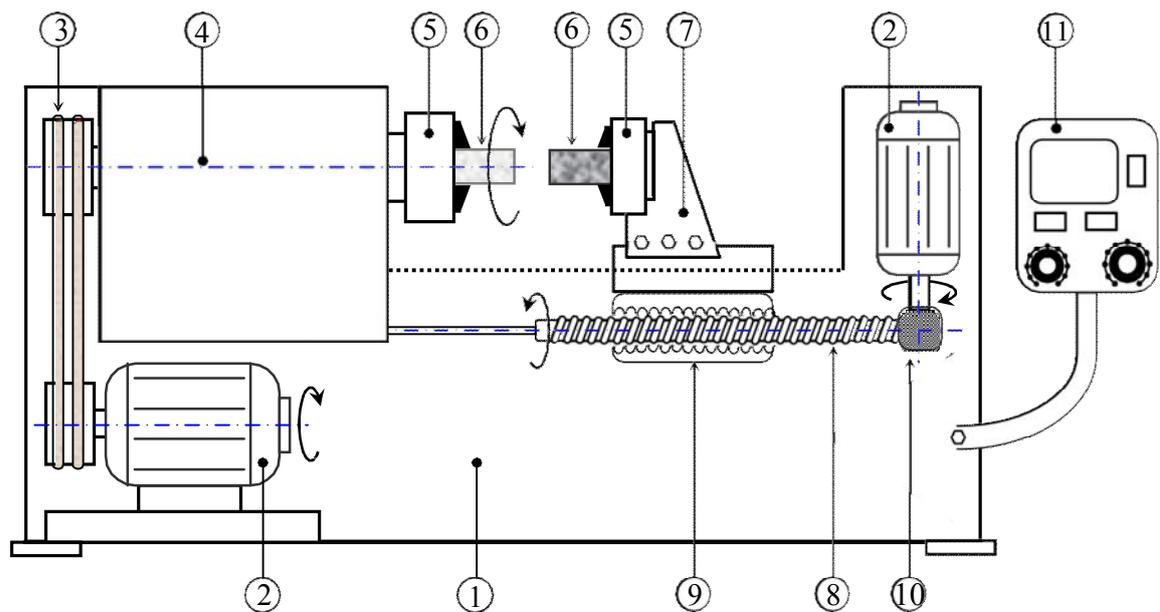


Figure II.3. Séquences du soudage par friction à entraînement direct [9].

3.2. Machine de soudage par friction à entraînement direct

Une machine de soudage par friction à entraînement direct combine essentiellement (figure II.4):

- Broche : son rôle est de recevoir le mandrin tournant auquel elle transmet le couple de friction provenant du moteur par l'intermédiaire d'un embrayage et d'un frein.
- Mandrins : La tenue des pièces est primordiale dans le processus de soudage par friction.
- Commandes du cycle :
 - La rotation : par un moteur électrique
 - Les efforts : par un vérin électrique (ou hydraulique), afin de réaliser un processus de soudage avec divers cycles d'efforts.



- | | |
|-------------------------------|--------------------------|
| (1) Bâti | (7) Support mobile |
| (2) Moteur | (8) Arbre vis sans fin |
| (3) Courroies de transmission | (9) Bloc écrou |
| (4) Palier (broche) | (10) Réducteur à roue |
| (5) Mandrins |) |
| (6) Pièces à souder | (11) Panneau de commande |
| |) |

Figure II.4. Illustration d'une machine de soudage par friction à entraînement direct [2].

3.3. Paramètres de soudage par friction à entraînement direct

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

- Pour la phase de friction :
 - La vitesse de rotation « ω » : mesurée par « tr/min » (tour par minute),
 - La force (ou la pression) de friction « F_1 » (ou « P_1 »: mesurée par « Newton » (ou par MPa dans le cas de la pression),

- Le temps (ou la durée) de friction « t_1 » : mesuré par « seconde ».
- Pour la phase de forgeage :

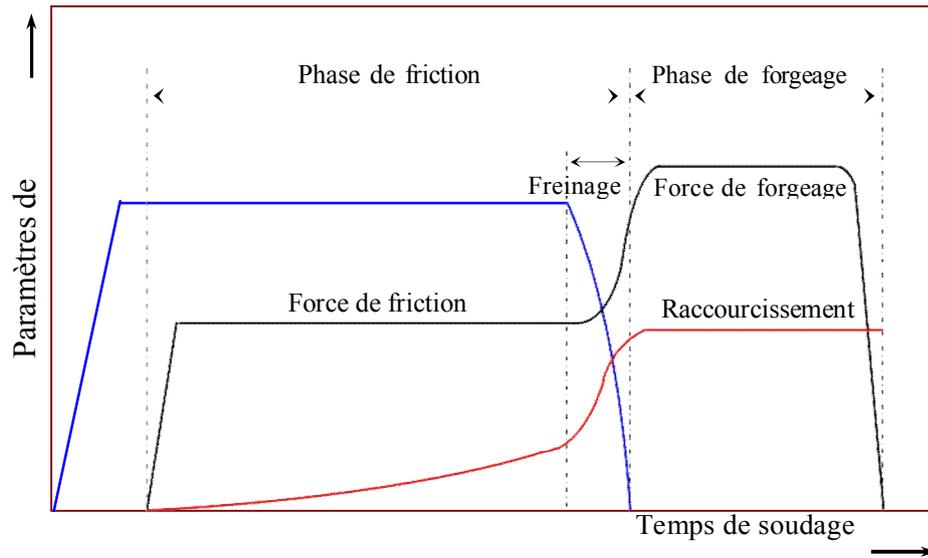


Figure II.5. Caractéristiques des paramètres de soudage par friction à entraînement direct [3,4].

- La force (ou la pression) de forgeage « F_2 » (ou « P_2 » : mesurée par « Newton » (ou par Pa dans le cas de la pression),
- Le temps (ou la durée) de forgeage : « t_2 » : mesuré par « seconde ».

4. Caractéristiques de quelques machines

En général, une machine de soudage par friction se caractérise en première approche par l'effort maximal qu'elle peut produire au forgeage. Ce paramètre fournit, en effet, une indication de la taille de machine ainsi que de sa capacité. On admet que, en soudage d'aciers peu alliés, l'effort unitaire moyen de forgeage est de 8 à 12 daN/mm² (Tableau II.1). Cela permet de déduire :

- la section maximale pleine ou tubulaire soudable par la machine ;
- la puissance et la vitesse de broche pour une section pleine correspondante.

Le tableau 1 fournit les caractéristiques de quelques machines à souder par friction pilotée. Il existe actuellement sur le marché des équipements allant de quelques centaines de newtons à 200 000 daN et plus.

Tableau II.1 : Caractéristiques de quelques machines à souder par friction pilotée [5]

Effort maximal en forgeage (daN)	3000	6000	12000	25000	50000	100000	200000
Capacité maximale sur acier mi-dur (*) (mm ²)	200	400	800	1600	3200	6400	13000
Diamètre de barre correspondant (mm)	16	22,5	32	46	64	90	129
Vitesse de rotation nominale de broche (**) (tr/min)	3000 et 1500	3000 et 1500	2200 et 1100	1460 et 730	1200 et 900	1000 et 500	350 et 700
Puissance du moteur de broche (kW)	11	14,7	22	29,5	51,5	73,6	89

avec :

(*) La capacité minimale (effort minimal et vitesse maximale) peut être 1/10 ou 1/20 de la capacité maximale.

(**) Sur machines de production, la vitesse est ajustable par modification du rapport d'entraînement.

De plus, on considère :

- les machines standards d'emploi général ;
- les machines spécifiques adaptées à un travail particulier.

Dans chacun de ces domaines, les machines peuvent se distinguer par leur cinématique de principe et par la disposition relative de leurs éléments. Une machine à friction combine essentiellement une broche tournante et une commande d'avance produisant un effort, l'ensemble étant supporté par le bâti. Dans la figure II.6 on représente un autre schéma d'une machine de soudage par friction rotative.

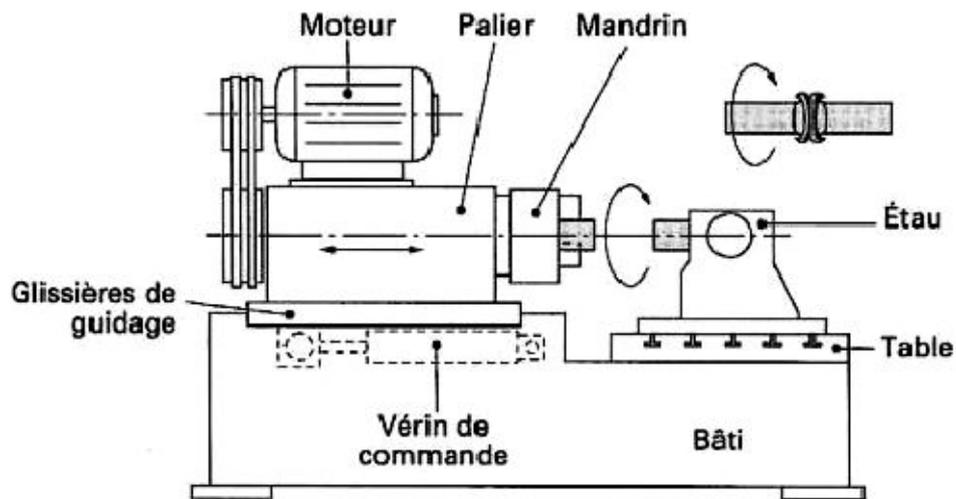


Figure II.6 : Exemple d'une machine de soudage par friction rotative .

La figure II.7 montre le mode de fixation des deux pièces pour effectuer le soudage par friction rotative.



Figure II.7: Mode de fixation des deux pièces. (a) la pièce en rotation au mandrin. (b) la pièce est fixe à la poupée mobile.[6]

La chronologie et les étapes lors du procédé de soudage comportent quatre étapes majeures (Figure II.8.) :

- (a)- Une des pièces est mise en rotation puis débrayée, elle continue de tourner par inertie
- (b)- Les deux pièces sont mises en contact sous l'effet d'un effort de pression constant. La rotation diminue librement (freinage), les pièces s'échauffent localement (frottement)

(c)- Sous l'effet de la chaleur et de l'effort, les pièces se déforment (l'ensemble se raccourci).
La vitesse de rotation continue de diminuer.

(d)- Lorsque la pièce a entièrement décéléré, les pièces refroidissent pendant que l'effort en maintenu constant [6].

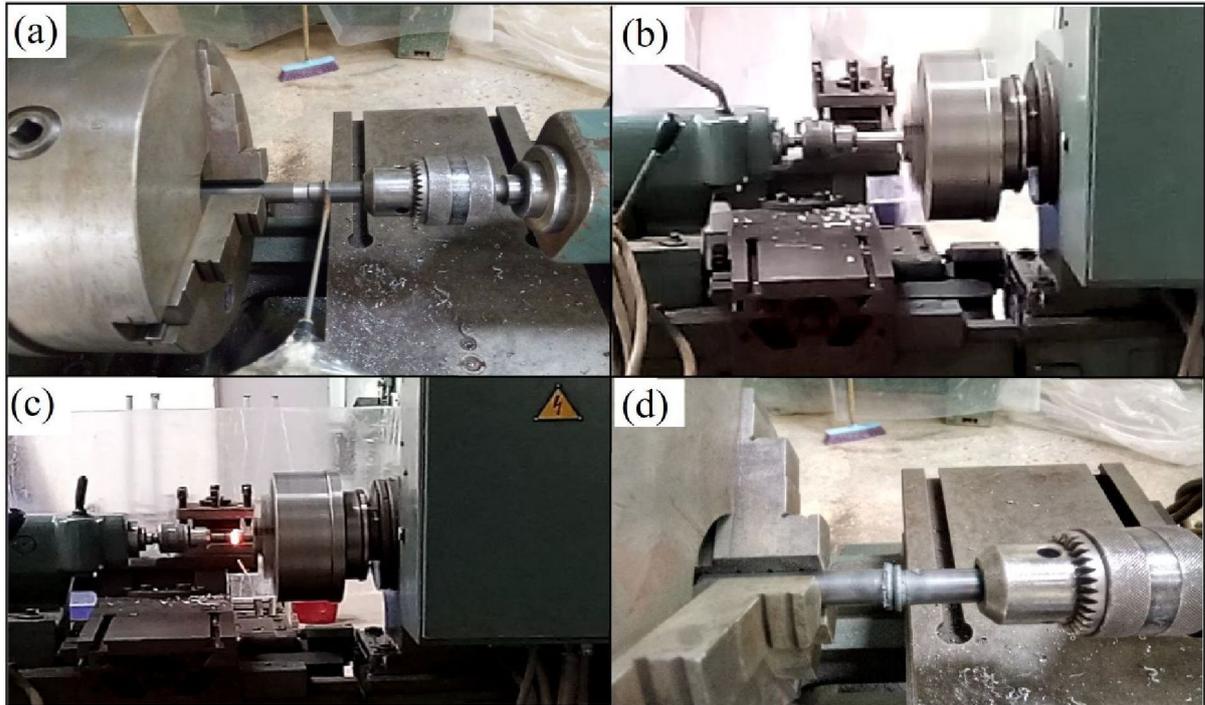


Figure II.8 : Chronologie d'une opération de soudage [6].

La figure II.9 présente une machine à souder par friction de 600t, qui est le premier équipement de soudage pour tubes de grand diamètre en Chine, peut traiter des tuyaux d'un diamètre allant jusqu'à 300mm [7].



Figure II.9: Atelier de production de tiges de forage (Chine) [7].

Cette machine de soudage par friction travaille en fonction du principe de soudage par friction inertielle. Elle est capable de détecter intelligemment les paramètres de soudage et de chauffer le point de contact des 2 pièces à une vitesse étonnante. Après avoir atteint la température souhaitée, la machine réalise le soudage des deux parties d'une manière stable et fiable (Fig.II.10 et 11) .



Figure II.10 : La machine de soudage par friction dans l'atelier [7].

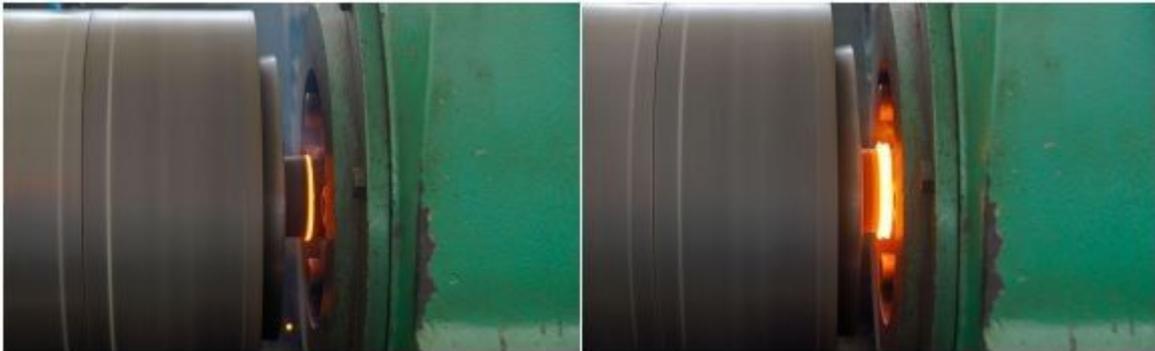


Figure II.11 : Principe de fonction de soudage par friction [7].

Cependant, on peut aussi classer les machines selon leurs puissances. Il existe essentiellement deux types de machines:

- (i) machines de faible puissance avec des puissances nominales de l'ordre de 12 W / mm^2 , et
- (ii) Machines à haute puissance avec $35 \text{ à } 115 \text{ W / mm}^2$ du matériau soudé.

5. Autre dispositif du soudage par friction

Certains opérateurs utilisent une perceuse d'atelier pour réaliser le soudage par friction rotative comme le montre la figure II.12 réalisé à l'institut d'optique et de mécanique de précision (IOMP) de Sétif.

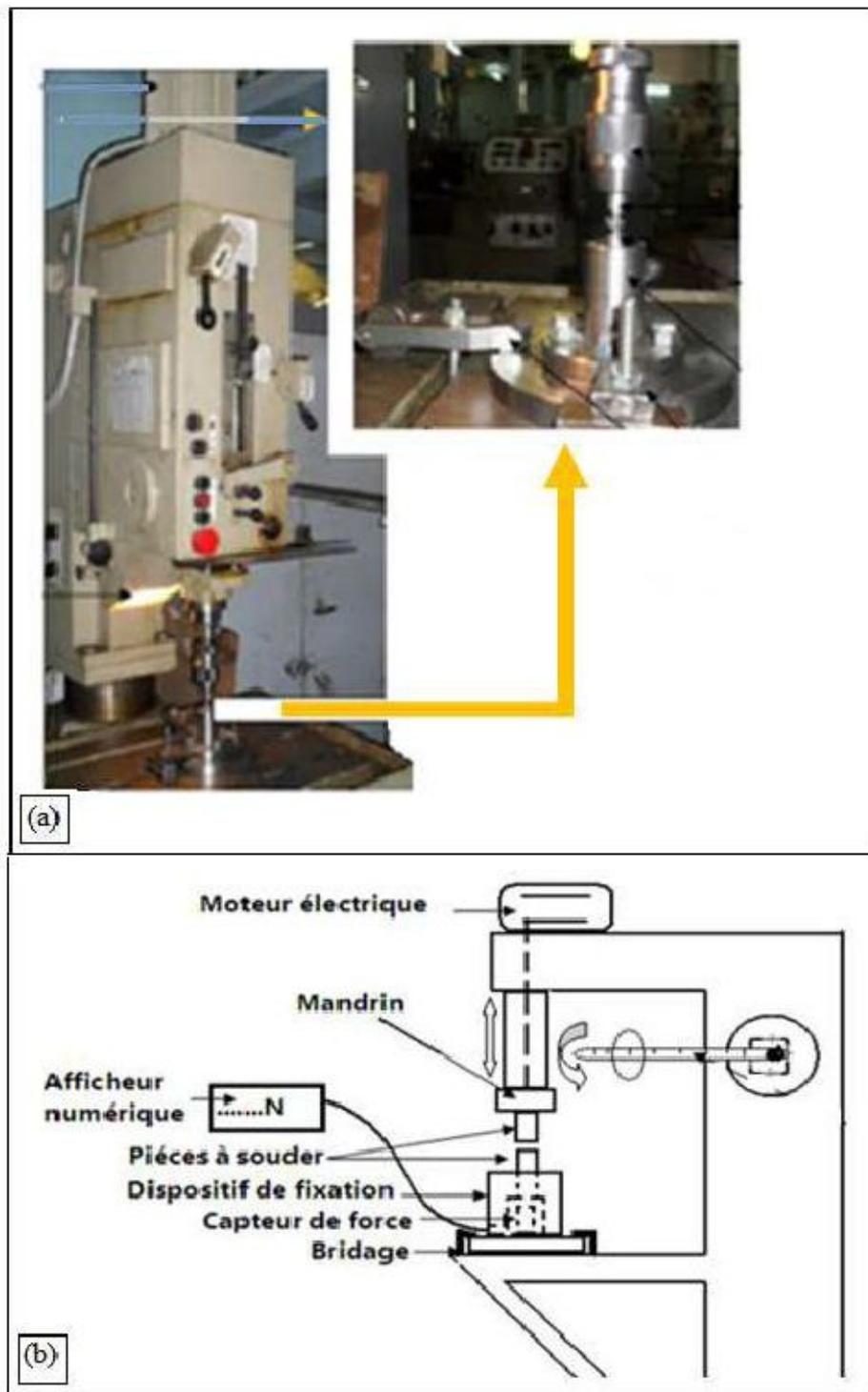


Figure II.12 Dispositif de soudage par friction,
(a) Image photographique, (b) Schéma de principe [8]

A partir de ce dispositif, des pièces ont été soudées (Figure II.13).



Figure II.13 . Soudage acier avec l'aluminium[8].

6. Principaux domaines d'application

En raison de ses larges possibilités d'applications, il n'est pas étonnant que le soudage par friction soit souvent utilisé dans des secteurs divergents, tel que l'industrie automobile (soupapes, axes, ...), industrie électrique (raccords, électrodes, ...), forage (raboutage de tubes, ...),aéronautique et aérospatial (turbines, ...), Soudabilité (Facilement soudable : aciers, inox, monel, aluminium, titane ; Difficilement soudable : bronze, cuivre, ... ; Joints hétérogènes : aluminium-cuivre, ...).

6.1.Domaine de l'automobile

Le soudage par friction rotation est utilisé pour la production de pièces dans l'industrie automobile comme des stabilisateurs, des soupapes, des tiges de piston, des pompes à eau,(Fig.II. 14-17).



Figure II.14 : Pièce d'un turbo [9].



Figure II.15 : Partie d'une boîte de vitesse[9].



Figure II.16 : Partie d'un amortisseur: tube hydraulique: le soudé à une pièce compressée [9]. tube à double paroi est soudé



Figure II.17: Partie d'un cric en une fois [9].

6.2. Domaine l'industrie aéronautique et du spatial

Le procédé de soudage par friction rotation peut être utilisé pour de nombreuses applications. Il est ainsi utilisé dans l'aviation et la navigation spatiale pour le soudage de boulons à crochet (figure II.18), pour la fabrication de tiges de piston légères (figure II.19) ou pour des éléments de boîtes de vitesse (figure II.20).



Figure II.18 : Production de boulons [9].



Figure II.19 : Soudage de tiges de piston à crochet [9].

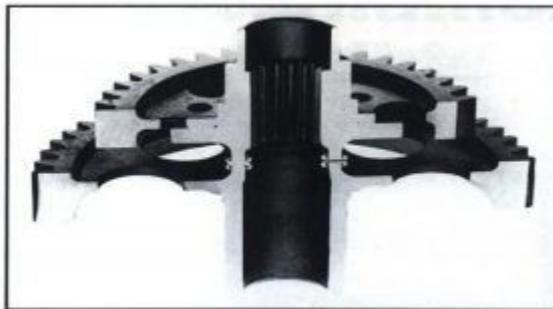


Figure II.20: Soudage des roues dentées d'une boîte de vitesse [9].

6.3. Domaine de l'industrie pétrolière

Le soudage par friction est également utilisé dans la pétrochimie, par exemple pour le soudage de brides à des valves hydrauliques (Figure II. 21) ou pour le soudage de tiges de forage. Les soudures par friction sont suffisamment fortes pour résister aux couples élevés durant le forage.



Figure II.21 : Fixation d'une bride à une valve hydraulique [9]

6.4. Domaine de l'agriculture

Le soudage par friction est également très utilisé lors de la production d'éléments pour trucks, véhicules agricoles (Figures II-22 et II-23), camions et engins agricoles par exemple les tiges à des yeux de tige (Figure II-24). Une économie notable en coût peut être réalisée par le remplacement de pièces complètement forgées par de petites pièces forgées soudées à des barres ou des tubes [10]



Figure II.22 : Piston d'un moteur diesel [9].

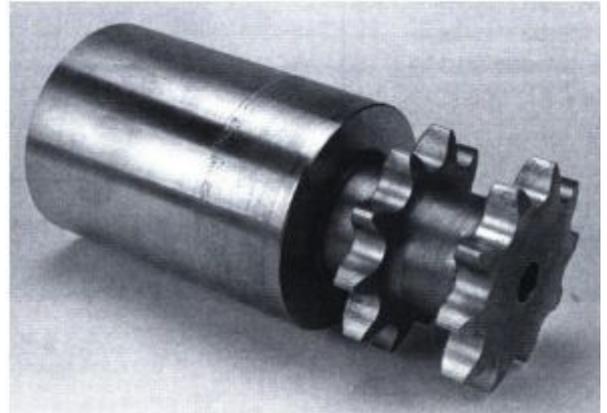


Figure II.23 : Remplacement de pièces forgées ou coulées par des profilés standards soudés par friction [9].

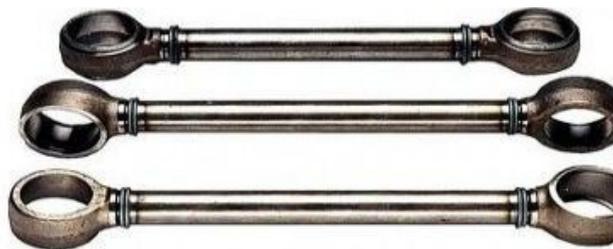


Figure II.24 : Arbres de transmission soudés par friction [10].

7. Conclusion partielle

Le soudage par friction permet d'assembler des matériaux ne pouvant être assemblés avec des procédés conventionnels, par exemple : le titane au cuivre. Cette possibilité permet de faire des économies par une conception judicieuse de telles pièces: des pièces en un matériau très onéreux peuvent être remplacés par des pièces soudées où les matériaux onéreux ne sont utilisés que localement où c'est nécessaire[6]. Les machines de soudage par friction ont le même principe mais elles diffèrent en modes.

Références bibliographiques

1. Document online téléchargé à partir du site suivant :
<http://fr.bestarticleonline.com>
2. Khalfallah . F, Thèse de doctorat, Université de Biskra, 2020.
3. Withers, P. J. et Preuss M., Simulation of rotational welding operations, Metals process simulation, Vol. 22B, ASM Handbook, ASM International, 2010 , p. 432-442.
4. Selvamani S. T., Some studies on friction welding of carbon steels, 2015, Université Anna,
5. Caze R., Le soudage par friction, Techniques de l'Ingénieur, Traité génie mécanique – Volume B7 745.
6. Baari A. Mémoire de master, Université Kasdi Merbah Ouargla,
7. <http://www.forage-video.com/manufacturing>. (28 avril 2018).
8. Demouche M.; Etude de l'influence des paramètres de soudage par friction sur la qualité des joints soudés thèse de doctorat; Université de Setif; 2019
9. Faes K., (IBS) : soudage par friction (traduction : M.C. Ritzen-IBS.BIL), <http://www.bil-ibs.be/fr/soudage-par-friction>. (12 avril 2018).
10. 6. KUKA Industries FRICTION WELDING GERMANY 2016. (24 avril 2018). Document online :
<http://www.kuka.com/fr/technologies/2016/07/soudage-par-friction> .

Chapitre III
Description de la machine
de
soudage réalisée

Chapitre III: Description de la machine de soudage réalisée

1.Introduction

Dans ce chapitre, on présente la machine de soudage par friction rotation et qui a été réalisée dans le cadre de ce mémoire de master. Des échantillons soudés par cette machine ont été aussi présentés

2. Description de la machines réalisée

La figure III.1 montre une vue générale de la machine de soudage par friction rotative et qui a été réalisée dans le cadre de ce mémoire de master.



Figure III. 3: vue globale de la machine de soudage par friction rotative

On note que cette machine de soudage par friction rotative est composée de deux grandes parties :

2.1. Partie I

Cette partie I est composée principalement d'un moteur électrique fixé sur le bâti de la machine (Figure III.2). La partie rotative du moteur contient un mandrin de fixation du premier échantillon (ou première pièce à souder).

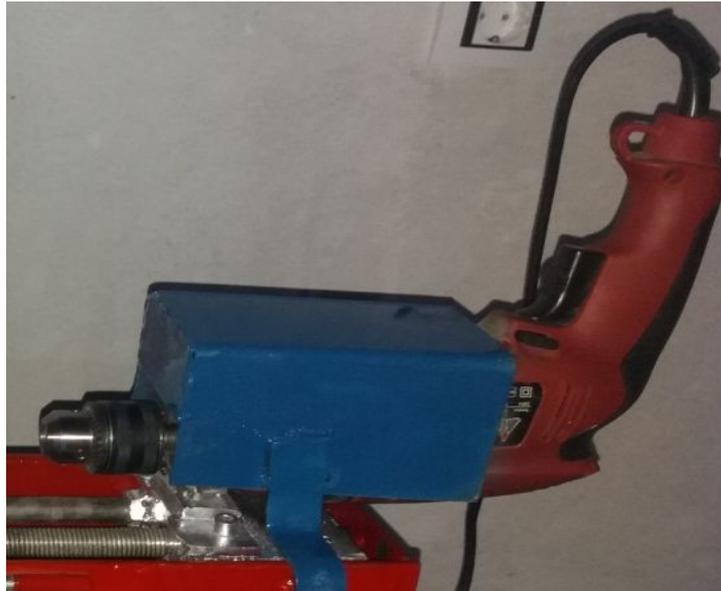


Figure III. 4: Partie I de la machine de soudage

On note que le moteur électrique est un moteur d'une perceuse car il a une puissance mécanique afin de résister au frottement élevée lors du soudage.

Les caractéristiques de ce moteur sont rassemblées dans le tableau III.1

Tableau III.1 Les caractéristiques du moteur électrique.

La marque	Voltage	Fréquence	Puissance	Vitesse de rotation
CROWN	220-230 V	50/60 Hz	810 W	2500 T/m

2.2. Partie II

Cette partie II de la machine est celle qui porte le deuxième échantillon (ou deuxième pièce à souder) et qui est fixée pour éviter sa rotation (Figure III.3). Elle contient un deuxième mandrin mais qui glisse afin de permettre de faire avancer la deuxième pièce à souder vers la première pièce à souder (en rotation).

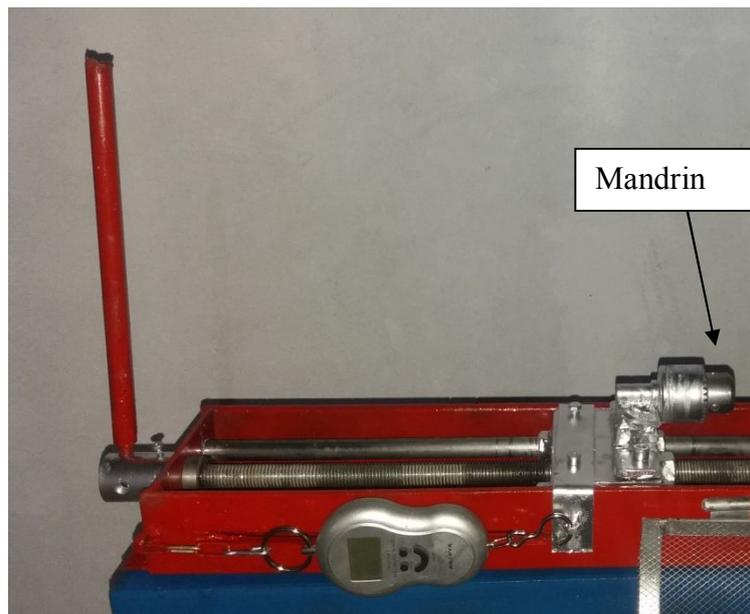


Figure III. 3: Partie II de la machine de soudage

3. Le capteurs des mesures de charge

Il est important de mentionner que les deux paramètres qui influent sur la qualité de soudage, sont la vitesse de rotation et la force appliquée lors du soudage. Pour cette raison, un capteur de la force appliquée a été placé dans la machine pour mieux contrôler cet effort appliqué (Figure III.4).

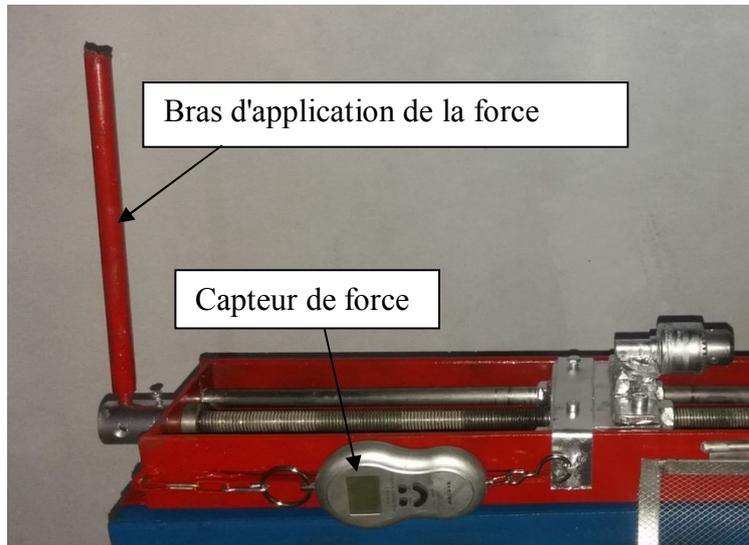


Figure III. 4: Position des capteurs de la vitesse de la force.

4. Mode de fonctionnement

Le mode de fonctionnement consiste à suivre les étapes suivantes :

1- Fixation des métaux à souder (Fig III.5) :



Figure III. 5 . Fixation des métaux à souder

2- Mise du couvercle de protection (Fig.III.6)



Figure III.6. Mise du couvercle de protection

- 3- Mise en rotation du moteur électrique:
- 4- Déplacement de la première pièce vers la deuxième pièce qui est en rotation afin de les souder ensemble.
- 5- Arrêt du moteur électrique
- 6- Enlèvement des deux pièces soudées (Fig III.7) :



Figure III. 7 . Enlèvement de deux métaux soudés.

Conclusion Générale

Le but de ce mémoire était de réaliser une petite machine de soudage par friction rotative.

La machine réalisée est composée principalement des éléments suivants :

- Partie mobile contenant principalement un moteur électrique pour provoquer la rotation de la première pièce à souder avec la deuxième.
- Partie fixe pour fixer la deuxième barre fixe.
- Un capteur de force pour mesurer la force appliquée lors du soudage.

On a essayé de maîtriser au moins un des paramètres qui contrôle le procédé de soudage par friction rotative qui est la force d'application pendant le frottement par l'ajout d'un capteur de force.

. Un test de soudage a été aussi effectué sur deux fils d'aluminium

Enfin; nous pouvons dire que ce travail réalisé est le suivi d'un travail déjà entamée l'année passé et qui a été amélioré durant ce travail de master.

Perspectives :

Il sera intéressant si on maîtrise d'autres paramètres de soudage par friction rotative comme le contrôle de la vitesse de rotation.

Résumé

L'objectif de ce mémoire est de réaliser une machine de soudage par friction rotation. Nous avons pu maîtriser l'effort appliqué pour provoquer le frottement et le soudage des deux pièces. Deux barres d'aluminium ont été soudées par cette machine.

ملخص

الهدف من هذه المذكرة هو إنجاز آلة لحام احتكاك متخصصة في اللحام عن طريق الاحتكاك الدوراني، لقد تم التحكم أيضاً في ضغط في الاحتكاك الذي يولد اللحام. تمت بنجاح عملية لحام معدن الألمنيوم بالآلة المنجزة.

Abstract

The objective of this dissertation was to make a welding machine by friction rotation. We mastered the applied force which causes the friction and the welding of the two work-pieces. Two bars of aluminum were welded.