



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

MÉMOIRE DE MASTER

Domaine : Sciences et Techniques

Filière : Métallurgie

Spécialité : Génie Métallurgique

Réf. : Entrez la référence du document

Présenté et soutenu par :

Rania Khelfa

Le :

SOUDAGE PAR DIFFUSION A L'ETAT SOLIDE DES MATERIAUX DISSIMILAIRES

Jury :

Dr. Fatima Zohra Lemmadi	MCB	Université de Biskra	Présidente
Dr. Salim Messaoudi	MAA	Université de Biskra	Examineur
Pr. Boumerzoug Zakaria	Pr	Université de Biskra	Rapporteur

Année universitaire : 2019 - 2020

DÉDICACES

Je dédie ce travail de recherche à mon père, ma mère, et mes frères.

REMERCIEMENTS

Après avoir rendu grâce à dieu le tout puissant et le miséricordieux. Je tiens à remercier vivement mon encadrant, professeur Mr. Zakaria Boumerzoug qui m'a suivi tout au long de cette période et m'a orienté pour ce travail de recherche.

Par ailleurs je remercie les membres de jury pour avoir bien voulu examiner et juger ce travail.

Enfin, je remercie tout le personnel que j'ai contacté et qui m'a aidé durant la réalisation de mon projet.

ملخص

غالبًا ما تتطلب الصناعة الخفة والأداء الجيد للمنتج. من أجل ذلك تم تخصيص هذه المذكرة لدراسة لحام الفولاذ الكربوني مع الألمنيوم بتقنية الانتشار في الحالة الصلبة عند 600 درجة مئوية لمدة 15, 20, 25 و30 دقيقة في جو مناسب. تم تحليل وصلة اللحام بتقنيتين هما الفحص المجهرى والبصري وقياس الصلادة. بعد اللحام تشكلت اطوار جديدة في منطقة التفاعل مما تسبب في تغير في الصلابة في هذه المنطقة.

Résumé

L'industrie demande souvent la légèreté et les bonnes performances des produits. Cette étude a été consacrée pour étudier le soudage de l'acier au carbone avec l'aluminium par la technique de diffusion à l'état solide à 600 ° C pendant 15, 20, 25 et 30 minutes sous atmosphère appropriée. La caractérisation du joint de soudage a été effectuée par deux techniques et qui sont la microscopie optique et la microdureté. Des nouvelles phases se sont formées au niveau de la zone de réaction et qui ont provoqué un changement de la dureté dans cette zone.

Abstract

The industry often demands lightness and good product performance. This study was consecrated to study the welding of carbon steel with aluminum by solid state diffusion technique at 600 °C during 15, 20, 25, and 30 minutes under appropriated atmosphere. The characterization of the welding joint was carried out by two techniques, which are optical microscopy and microhardness. New phases have formed in the reaction zone, which cause a change in hardness in this zone.

SOMMAIRE

SOMMAIRE

Introduction générale.....	1
Chapitre I. Soudage des matériaux dissimilaires.....	2
I.1. But du soudage des matériaux dissimilaires.....	2
I.2. Application industrielle.....	2
I.3. Définition du soudage.....	3
I.4. Les différents procédés de soudage.....	3
Chapitre II. Soudage par diffusion à l'état solide des matériaux dissimilaires.....	11
II.1. La diffusion.....	11
II.1.1 Mécanisme de déplacement des atomes.....	11
II.1.2 Coefficient de diffusion (Lois de Fick).....	12
II.2. Le soudage par diffusion.....	13
II.3. Processus de diffusion dans les matériaux.....	15
II.4. Les étapes de soudage par diffusion.....	16
II.5. Exemple de soudage par diffusion.....	16
II.6. Les matériaux dissimilaires soudés par diffusion.....	20
Chapitre III. Matériaux et Méthodes Expérimentales.....	21
III.1. Matériaux étudiés.....	21
III.2. Technique de soudage.....	21
III.3. Préparation métallographique.....	23
III.4. Techniques de caractérisation.....	24

Chapitre IV. Résultats et interprétation	28
IV.1. Observation macroscopique.....	28
IV.2. Observation microscopique.....	28
IV.3. Mesure de microdureté.....	36
Conclusion générale	38
Références bibliographiques	39

INTRODUCTIN GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les aciers et l'aluminium sont utilisés dans des différents domaines de la production industrielle moderne, profitant en particulier de la résistance des aciers et de la faible masse volumique de l'aluminium.

Le soudage est le moyen pour bénéficier des bonnes propriétés des deux métaux, et on a plusieurs méthodes pour souder ces deux métaux dissimilaires ; parmi lesquelles le soudage par diffusion à l'état solide.

Notre objectif est d'étudier le joint soudé par diffusion de l'acier à bas carbone avec l'alliage d'aluminium en utilisant les techniques de caractérisation suivantes :

- Microscopie optique;
- Microdureté.

Le mémoire est composé de quatre chapitres :

- Chapitre I Soudage des matériaux dissimilaires.
- Chapitre II Soudage par diffusion à l'état solide des matériaux dissimilaires.
- Chapitre III Matériaux et méthodes expérimentales.
- Chapitre IV Résultats et interprétation.

En fin une conclusion générale qui résume l'essentiel du travail réalisé.

Chapitre I

Soudage des matériaux dissimilaires

Chapitre I. Soudage des matériaux dissimilaires

Introduction :

Dans ce chapitre on présente le but du soudage des matériaux dissimilaires, leurs applications industrielles, et les différents procédés de soudage.

I.1. But du soudage des matériaux dissimilaires

Le soudage des matériaux dissimilaires est effectué généralement pour obtenir des pièces ayant des propriétés plus au moins différentes, destinés pour la fabrication des composants qui nécessitent d'assembler différentes caractéristiques, notamment l'assemblage entre deux matériaux de classe différente comme les céramiques avec les métaux.

I.2. Application industrielle

Un assemblage est une collection de pièces fabriquées, réunies par jonction, pour réaliser l'une des nombreuses fonctions principales. Ces fonctions principales peuvent être divisées en trois catégories: structurelles, mécaniques et électriques. Dans les assemblages structurels, la fonction principale consiste à supporter des charges statiques ou dynamiques, ou les deux. Les exemples sont les bâtiments, les ponts et les cellules d'aéronefs commerciaux ou les navettes spatiales. Dans les assemblages mécaniques, la fonction première, bien qu'apparente souvent structurelle, est de créer ou de permettre certains mouvements ou séries de mouvements souhaités par l'interaction des composants. Des exemples sont les moteurs, les liaisons, les actionneurs et les trains d'engrenages. Il ne fait aucun doute que de tels assemblages doivent être capables de supporter des charges et, par conséquent, doivent être structurellement sains, mais les charges supportées sont secondaires au but de créer ou de permettre un mouvement [1].

I.3. Définition du soudage

Le soudage est une opération qui consiste à assurer la liaison permanente de deux ou plusieurs parties constitutives de nature identique ou différente, soit par chauffage, soit par pression. Le soudage peut être effectué avec ou sans métal d'apport. Le soudage se présente sous deux aspects :

a) Le soudage homogène

Lorsque le métal d'apport et le métal de base sont de nature identique. Dans ce procédé le métal des pièces à assembler participe à la constitution du joint au même titre que le métal d'apport. Donc c'est une opération de " fusion localisée " de deux pièces de même nature. Le métal de base se dilue dans le métal d'apport. La température de soudage est donc nécessairement supérieure à la température de fusion des pièces à assembler [2].

b) Le soudage hétérogène

Lorsque le métal de base et le métal d'apport sont de nature différente. Dans ce procédé, les pièces à assembler ne sont pas portées à la température de fusion et ne participent pas à la constitution du joint. Ce rôle est uniquement rempli par le métal d'apport, dont la température de fusion est plus basse et qui assure, en se solidifiant, une liaison métallique entre les surfaces à assembler [2].

I.4. Les différents procédés de soudage

Selon l'état du métal pendant le soudage on distingue deux grandes classes ; le soudage par pression et le soudage par fusion [2].

I.4.1. Soudage par fusion

On sait que cette classe a plusieurs procédés et techniques mais on va citer les principaux procédés pour les métaux dissimilaires.

I.4.1.1. Soudage oxyacétylénique

Le soudage OA (Oxygène et acétylène) est un procédé d'assemblage thermique qui s'applique aux tôles et aux tubes de même matière dont l'épaisseur reste inférieure ou égale à 2 mm Les étapes du procédé sont :

- On mélange deux gaz, l'oxygène et l'acétylène ;
- On enflamme le mélange ;
- On obtient alors, après réglage une flamme qui nous permet de souder, comme il est illustré dans la (Fig.I.1) [3].

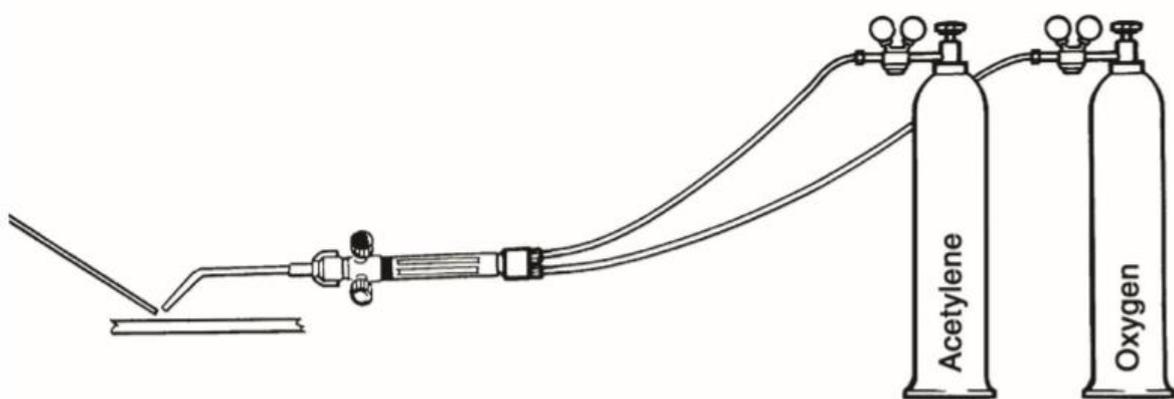


Figure I.1. Composition d'une installation de soudage oxyacétylénique [4].

I.4.1.2. Soudage à l'arc électrique

La source d'énergie est l'arc électrique qui jaillit entre le métal à souder et le métal d'apport qui est une électrode. Dans ce procédé on peut citer

- A-** Soudage en atmosphère inerte (T.I.G) ;
- B-** Soudage avec électrode enrobée ;
- C-** Soudage avec fil électrode sous protection gazeuse (M.I.G, M.A.G) ;
- D-** Soudage avec fil électrode sous flux en poudre [2].

I.4.1.3. Le soudage laser

Le brasage au laser est généralement utilisé pour les applications de scellement plutôt que pour celles nécessitant une résistance mécanique complète de la soudure.

Ce processus nécessite que les métaux à souder soient orientés dans une soudure d'angle, ou une configuration de soudure par recouvrement qui permet un faible espace entre les matériaux qui seront remplis de matériau de brasage. Le matériau de brasage est fondu dans cet espace à l'aide d'un laser. Ce laser chauffe le matériau de brasage jusqu'à son point de fusion mais reste suffisamment froid pour ne pas fondre sous l'effet des métaux soumis (Fig.I.2).

Ce processus offre une excellente résistance à la corrosion par rapport aux autres techniques d'assemblage [5].



Figure I.2. Le soudage laser [6].



Figure I.3. Pièce soudée au laser [6].

Remarque

La soudure crée des joints métalliques en appliquant une chaleur concentrée sur le joint pour fondre et fusionner les métaux ensemble. Le brasage, en revanche, implique des températures nettement plus basses et n'entraîne pas la fusion de métaux de base [5].

I.4.1.4. Soudage par plasma

Le procédé de soudage par plasma utilise un gaz de plasma interne et un gaz de protection externe, comme il est illustré dans la (Fig.I.4), le gaz plasmagène circule autour d'une électrode centrée rétractée, généralement en tungstène. Le gaz de protection traverse la buse de gaz externe. Un arc plasma est considérablement plus droit et plus concentré que, par exemple, un arc TIG, ce qui signifie que le procédé est moins sensible aux variations de longueur d'arc [4].

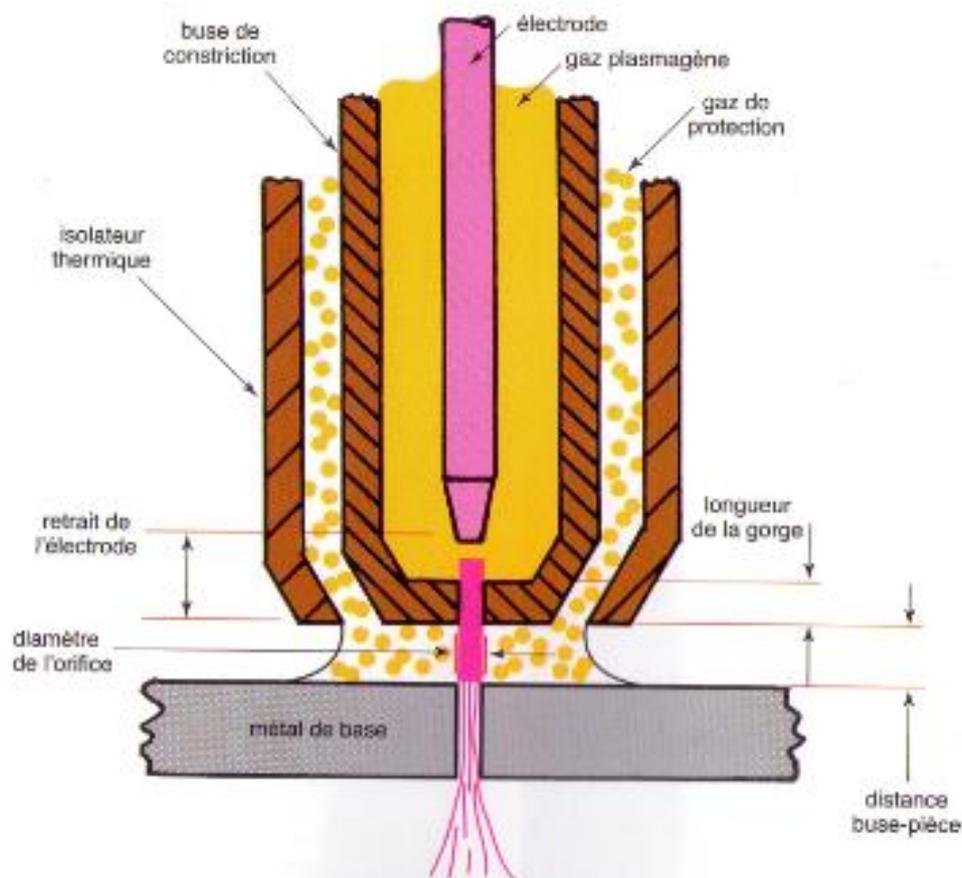


Figure I.4. Vue en coupe d'une torche plasma [7].

I.4.1.5. Soudage par ultrasons

Les pièces à souder sont placées dans la position voulue, la partie inférieure étant fixée dans l'enclume. Au-dessus des pièces se trouve l'ensemble vibrant. Au bout de cet ensemble se trouve la sonotrode. La sonotrode est appuyée progressivement contre la pièce du dessus. Quand la force d'appui dépasse une valeur prédéfinie (la force dite de trigger) la presse se bloque et les vibrations commencent ; et cela est montré dans la (Fig.I.5) [8].

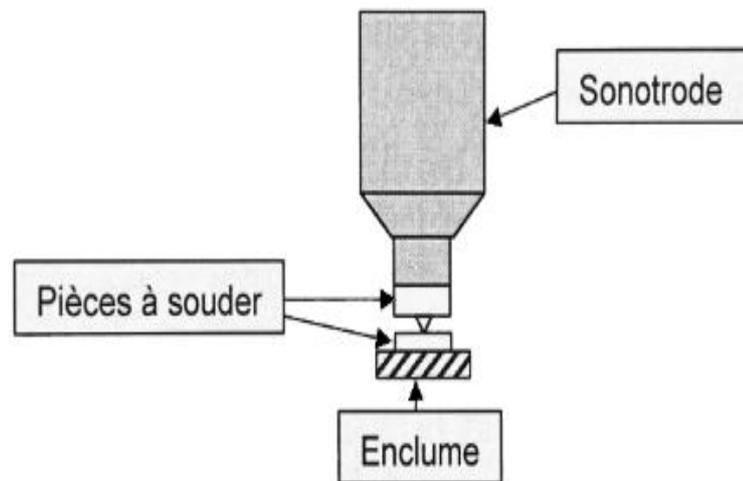


Figure I.5. Ensemble sonotrode - Pièce - Enclume [8].

I.4.2. Soudage par pression

Les principaux procédés de cette classe sont :

I.4.2.1. Le soudage par résistance

Le procédé de soudage par résistance génère de la chaleur grâce à la résistance au courant électrique traversant les pièces assemblées au moment du soudage. Les pièces font partie intégrante du circuit électrique. Comme le montre la (Fig.I.6). La résistance de contact, en particulier sur les surfaces de contact, chauffe localement la zone de soudure, ce qui entraîne la fusion et la formation d'un point de soudure. Pour que le processus fonctionne correctement, la résistance de contact doit être plus élevée au point de soudure que partout ailleurs. Deux électrodes en cuivre ou en alliage de cuivre assurent le passage de courant vers le joint de soudure et appliquent une pression, par serrage, pour améliorer le contact [9].

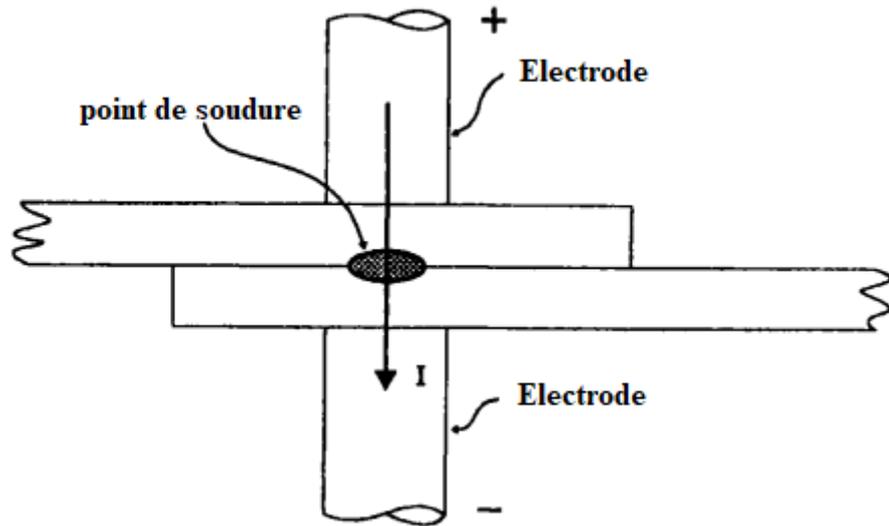


Figure I.6. Le soudage par résistance [10].

I.4.2.2. Soudage par friction

Le soudage par friction est une liaison à l'état solide qui produit une liaison sous la force de compression d'une pièce rotative sur une autre pièce fixe [11]. La chaleur est générée à l'interface de la soudure lors du frottement entre deux matériaux, (Fig.I.8).

Enfin, le côté métallique à l'interface de la soudure commence à s'écouler élastiquement et forme un raccourcissement axial [12]. Lorsqu'une certaine quantité de forgeage s'est produite, la rotation s'arrête et la force de compression est maintenue ou légèrement augmentée pour consolider la soudure. Certains des paramètres opérationnels importants dans le soudage par friction sont le temps de friction, la pression de friction et la vitesse de rotation [13].

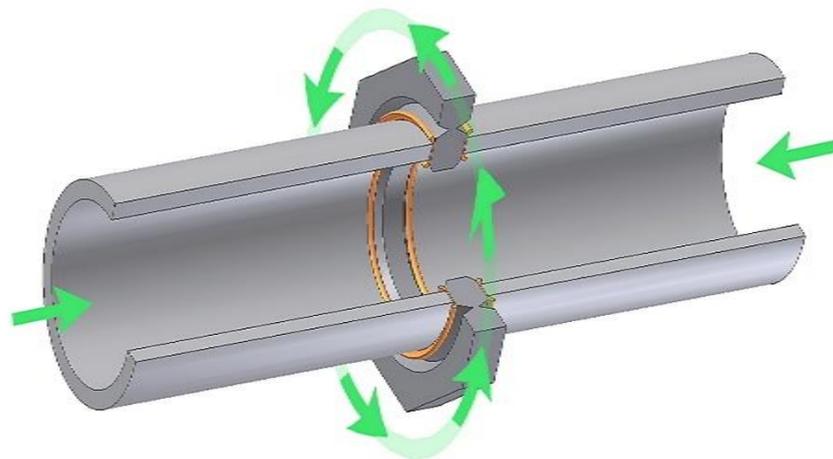


Figure I.7. Soudage par friction de tuyaux avec disque intermédiaire rotatif [14].

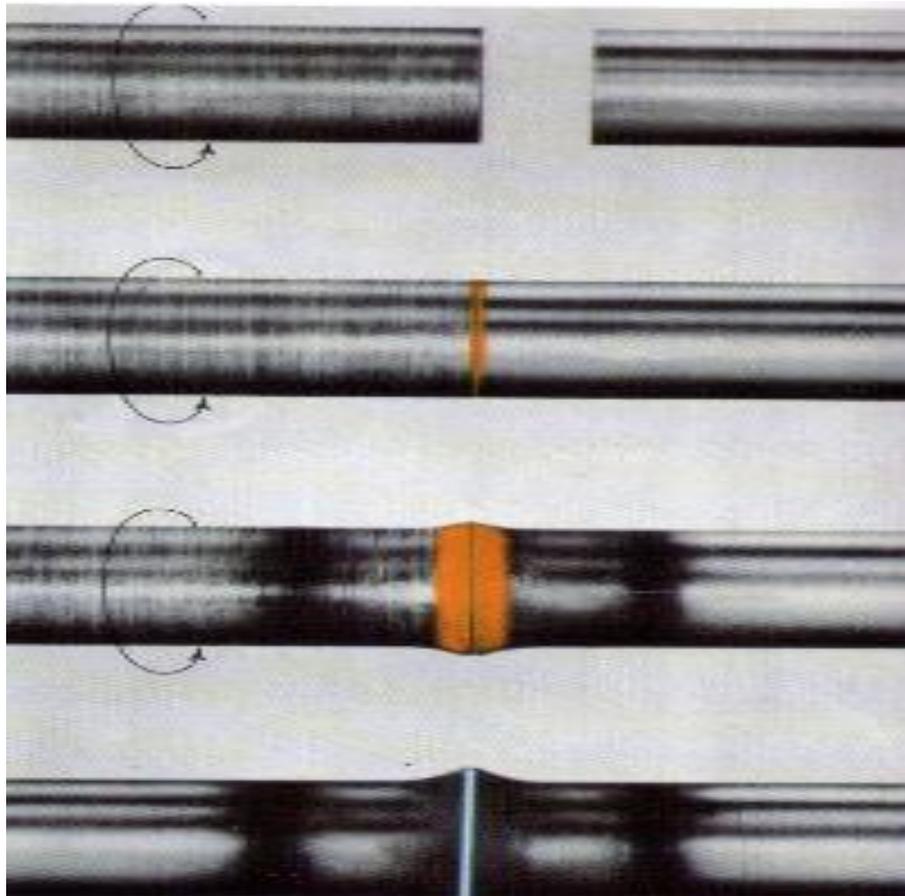


Figure I.8. Différentes étapes lors du soudage par friction de deux barres en acier doux [7].

I.4.2.3. Soudage par diffusion

Le soudage par diffusion est un procédé de soudage à l'état solide qui permet la fabrication de composants complexes : pièces multi-matériaux (moules et outils), échangeurs de chaleur (réacteur ASTRID, pétrole). Le procédé consiste à appliquer sous vide, une pression à chaud pendant un temps donné sur un empilement de pièces dont les surfaces ont été correctement préparées. Il en résulte l'établissement de la continuité de la matière à travers des interfaces. Les paramètres importants sont donc la température T , la pression P , le temps t et l'état de surface [15].

Le soudage par diffusion peut être utilisé pour de nombreux matériaux tels que le titane, le nickel et les alliages d'aluminium, y compris pour l'assemblage de différents types

de métaux ainsi que pour la liaison de métaux à des non-métaux. Cependant, les résultats sont souvent améliorés en incorporant une couche intermédiaire entre les deux couches externes différentes [4]. La (Fig.I.9) montre deux pièces soudées par diffusion à l'état solide.

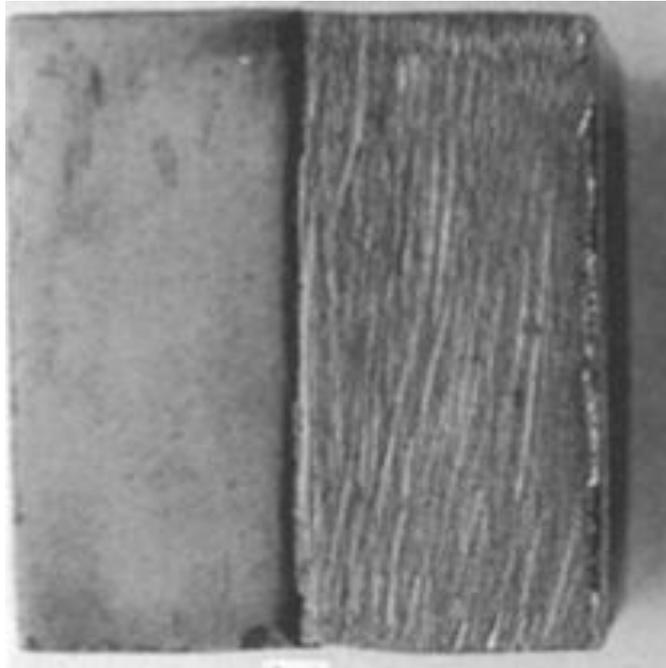


Figure I.9. Soudage par diffusion a l'état solide [16].

Chapitre II

**Soudage par
diffusion à l'état
solide des matériaux
dissimilaires**

Chapitre II. Soudage par diffusion à l'état solide des matériaux dissimilaires

Introduction

Depuis la première conférence sur le collage par diffusion organisée à Cranfield en juillet 1987, des recherches approfondies ont été entreprises sur le collage par diffusion céramique-métal. Une grande importance a été accordée à la conception du joint afin de compenser l'effet des différences de coefficient de dilatation thermique entre les matériaux, facteur qui contribue à la résistance limitée obtenue dans de nombreux systèmes liés à la diffusion [17].

II.1. La diffusion

II.1.1. Mécanisme de déplacement des atomes

Ce sont des phénomènes de diffusion, c'est-à-dire de migration des atomes ou des molécules dans les matériaux solides ou liquides, qui déterminent la cinétique d'un grand nombre de transformations de phases. Dans ce paragraphe, nous étudierons plus spécifiquement la diffusion à l'état solide. La diffusion est un phénomène de transfert atomique ou moléculaire activé thermiquement. Les phénomènes de diffusion s'observent pratiquement dans tous les solides [18].

Pour qu'un atome, ou un segment de molécule, situé au voisinage d'une lacune, puisse se déplacer, il faut qu'il ait l'énergie suffisante pour écarter légèrement les atomes ou les segments de molécules adjacents de leur position d'équilibre. Le phénomène de diffusion implique donc le passage d'une barrière d'énergie potentielle (Fig.II.1). C'est un processus qui est favorisé (activé) par une élévation de température et par une faible énergie de liaison [18].

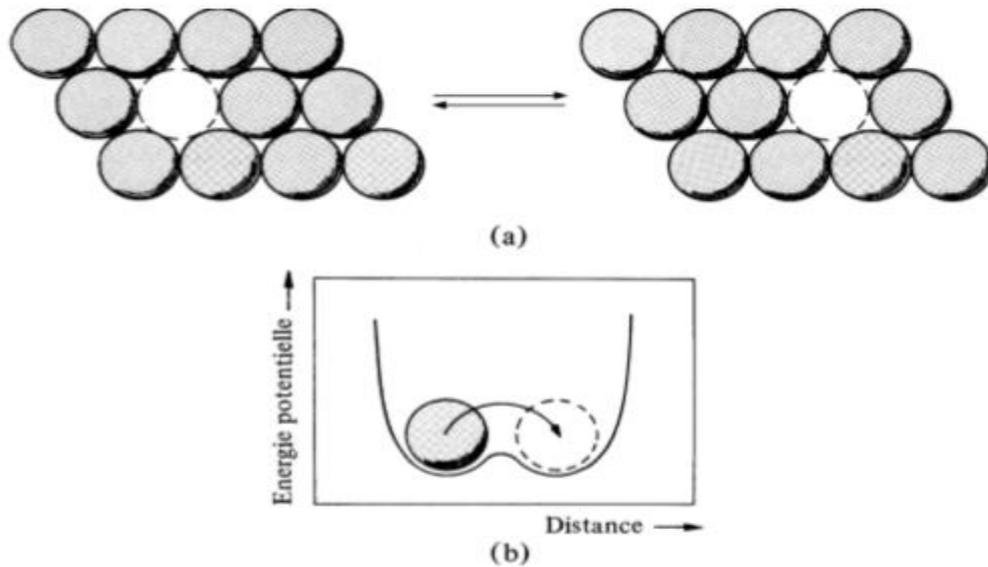


Figure II.1. (a) Représentation schématique du déplacement aléatoire et réversible d'un atome au voisinage d'une lacune dans le réseau cristallin. (b) Variation de l'énergie potentielle durant la translation de l'atome [18].

II.1.2. Coefficient de diffusion (Lois de Fick)

Lorsqu'il existe, dans une phase, un gradient de concentration, la mobilité des atomes ou des molécules entraîne un flux de matière dans la direction du gradient, ce qui tend à diminuer l'enthalpie libre du système et à égaliser les concentrations. Il existe une relation simple entre le nombre J d'atomes ou de molécules traversant par unité de temps (flux) une section unitaire perpendiculaire à l'axe des x , et le gradient de concentration (dc/dx) selon l'axe x . C'est la première loi de Fick qui s'exprime par :

$$J = -D \left(\frac{dc}{dx} \right)$$

Cette loi spécifie que le flux J [m^2/S] est proportionnel au gradient de concentration dc/dx [m^{-4}]. À noter que la concentration se mesure en atomes ou en molécules par m^3 [m^{-3}]. Le facteur de proportionnalité est le coefficient de diffusion D [m^2/S]. Le signe négatif a été introduit pour tenir compte que le flux et le gradient de concentration sont de sens opposé (le flux se fait généralement vers la concentration la plus faible). Le coefficient de diffusion est une mesure de la mobilité des atomes, il est directement proportionnel à la fréquence de saut ν (T), et on peut écrire par analogie avec l'équation :

$$D = D_0 \exp \left(- \frac{Q}{RT} \right)$$

Où :

D = Diffusivité, le coefficient de diffusion à la température T ;

D_0 = Constante de proportionnalité;

Q = énergie d'activation pour la diffusion;

T = température d'activation;

R = constante de Boltzmann.

La variation de D avec la température est représentée à la (Fig.II.2) pour les phases solides. Dans la plupart des cas, l'augmentation de D avec la température résulte à la fois d'une élévation de l'énergie thermique et de la concentration en lacunes. L'accélération de la diffusion dans les joints de grains et à la surface résulte d'une augmentation de la concentration en volumes vides dans ces régions perturbées de la structure cristalline. On note également que la pente de la droite donnant la variation logarithmique de D en fonction de $1/T$ permet de calculer l'enthalpie d'activation Q , tandis que l'ordonnée à l'origine permet de calculer D_0 [18].

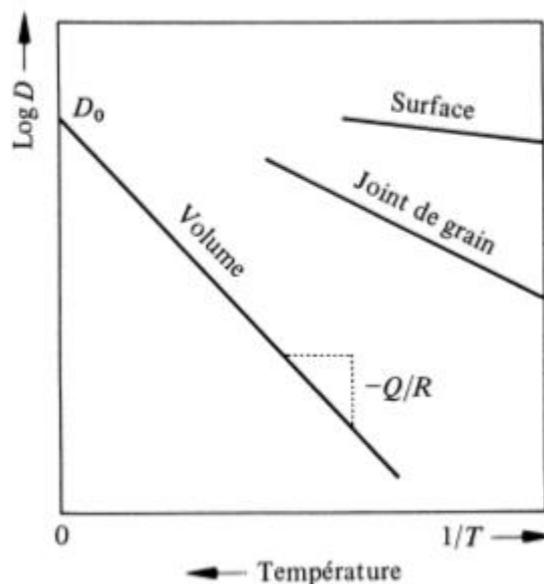


Figure II.2. Variation du coefficient de diffusion D en échelle logarithmique en fonction de $1/T$ dans un matériau polycristallin [18].

II.2. Le soudage par diffusion

Le soudage par diffusion est une méthode de jonction dans laquelle le mécanisme principal de formation de joints est la diffusion à l'état solide. La coalescence des surfaces de diffusion en fusion est obtenue par l'application d'une pression à une température élevée. Aucune fusion et une déformation macroscopique limitée ou un mouvement relatif de différentes parties ne se produisent pendant la liaison. Un métal d'apport (aide à la diffusion) peut ou ne peut pas être utilisé entre les

surfaces de contact [19]. Cela a impliqué l'intérêt comme moyen de joindre la céramique et des succès ont été obtenus en contrôlant la microstructure des interfaces formées. La première condition pour la liaison par diffusion est de créer un lien intime entre deux surfaces à joindre à l'échelle atomique qui entre en contact intime. De plus, pour que la connexion soit bonne, il faut qu'il y ait suffisamment de diffusion entre les matériaux dans un délai raisonnable. La pression peut être appliquée par pression à chaud ou isostatique à chaud sur un couple de diffusion. La (Fig.II.3) montre des illustrations des processus au cours d'une liaison par diffusion métal / céramique à l'état solide [20].

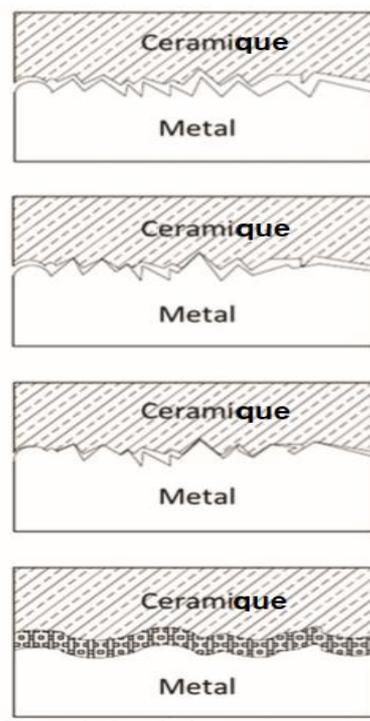


Figure II.3. Séquence des processus lors du collage par diffusion métal-céramique par diffusion [21].

Les principaux paramètres qui contrôlent le processus de soudage par diffusion sont la température, le temps et la pression [22]. Le paramètre de température est le paramètre le plus important, un léger changement de température entraînera un changement significatif de la cinétique du processus par rapport aux autres paramètres [23]. La température choisie est typiquement comprise entre 0,5 et 0,8 de la température de fusion absolue du composant ayant le point de fusion le plus bas [24]. Par conséquent, les défauts liés à la fusion sont évités dans le processus de soudage par diffusion [20, 25, 26].

II.3. Processus de diffusion dans les matériaux

La diffusion peut se dérouler selon quatre mécanismes :

1. Echange de lieux entre deux atomes adjacents (Fig.II.4a). Cela impliquerait une dépense d'énergie importante, car chaque atome doit se déplacer sur une distance de deux diamètres atomiques et la distorsion locale du réseau qui en résulte serait sensible. Par conséquent, ce mécanisme devrait être exclu.

2. Mouvement des atomes interstitiels (Fig.II.4b). L'atome situé sur le site de réseau 1 se déplace vers l'interstice 2. Son mouvement ultérieur se fera par les interstices 5, 4, 5 et 6. Pour que cela se produise, une quantité d'énergie appréciable doit être transmise à l'atome. Par conséquent, ce mécanisme peut exister dans des solutions solides où un atome interstitiel est beaucoup plus petit qu'un atome du métal-mère.

3. Echange circulaire de quatre atomes (Fig.II.4 d). Maintenant, quatre atomes à la fois se déplacent autour d'un anneau. Il est fort probable que ce mécanisme existe dans les métaux à réseau serré.

4. Mouvement des lacunes (Fig.II.4c). Maintenant, les espaces libres dans le réseau changent de place avec des atomes adjacents. Le mouvement des lacunes est dans une direction opposée à celle des atomes. En occupant la lacune en 7, l'atome 2 libère de la place pour l'atome 5 et cet atome peut désormais se déplacer sur le site précédemment occupé par l'atome 5, laissant ainsi une lacune [27].

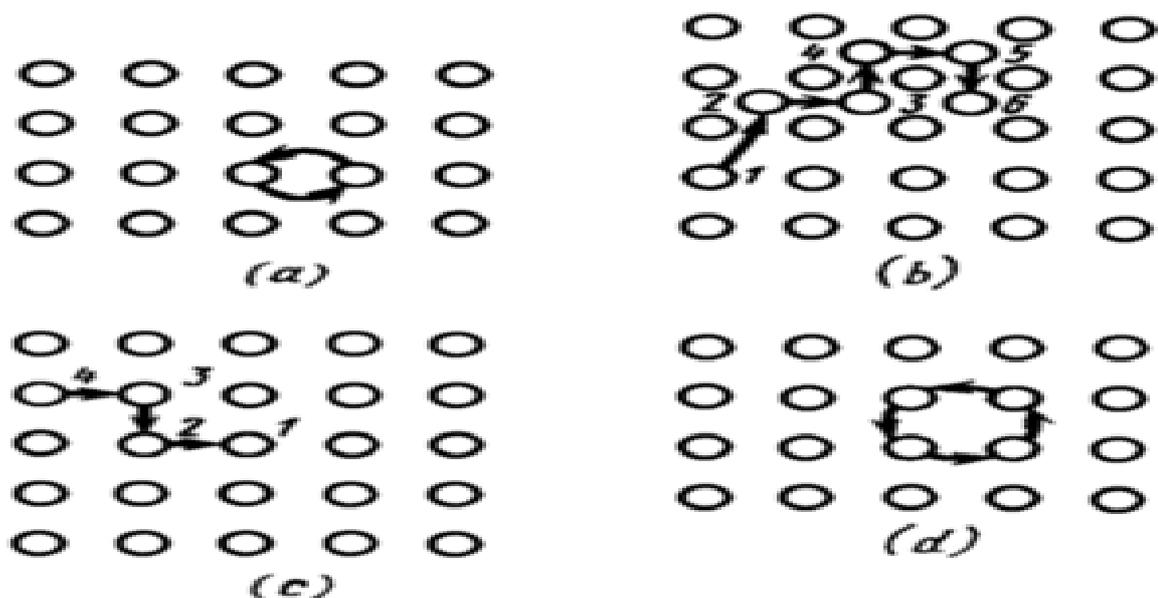


Figure II.4. Les différents mécanismes de diffusion [27].

II.4. Les étapes de soudage par diffusion

Pour créer un lien de diffusion, il est essentiel de respecter les exigences suivantes :

1. Les surfaces de contact doivent être soigneusement nettoyées et un contact direct entre elles doit être assuré.
2. Les matériaux doivent être chauffés à une température favorisant la diffusion sur les surfaces de contact dans un intervalle de temps spécifié.
3. L'atmosphère autour du joint doit protéger le matériau contre l'oxydation ou la contamination, ou les deux. Pour créer un lien par diffusion, les pièces à assembler sont placées dans une chambre vide, les pièces sont chauffées à la température spécifiée, une charge de compression est appliquée pendant un intervalle de temps spécifié.

Une fois la soudure terminée, elle est maintenue dans une chambre ou dans l'air pour le refroidissement. La valeur optimale du vide varie en fonction des propriétés des matériaux. Si le vide n'est pas suffisant, les matériaux ont tendance à s'oxyder. Si le vide est trop élevé, le débit de l'équipement est réduit et le coût des soudures augmente. Les surfaces de contact doivent être usinées de manière à assurer un contact maximal. Lors du choix d'une méthode de préparation de surface au degré de rugosité souhaité. La température de liaison doit être choisie de manière à ce que les processus de déformation plastique et de diffusion puissent se dérouler à un rythme élevé. Elle se situe approximativement entre 0,5 et 0,7 T_f (où T_f est le point de fusion). Pour les métaux à haute température et les métaux réfractaires, le chiffre peut être légèrement supérieur. La pression de liaison doit être suffisante pour que les aspérités sur les surfaces de contact soient écrasées et pour obtenir un contact maximal. Il peut être calculé ou déterminé par essais, en fonction du type de matériaux à assembler. Lorsque des matériaux différents doivent être assemblés, le choix de la pression de collage est décidé par le plus faible des deux matériaux [27].

II.5. Exemple de soudage par diffusion

II.5.1. Soudage d'alumine avec l'aluminium par diffusion

Pour le soudage par diffusion le four utilisé est à l'intérieur d'une chambre hermétique avec une batterie de refroidissement externe, ce qui a permis de fonctionner sous vide ou sous atmosphère contrôlée. La pression est exercée sur les échantillons au moyen d'un système de pression de deux pistons situés au-dessus et en dessous du tambour (Fig.II.5) [16].

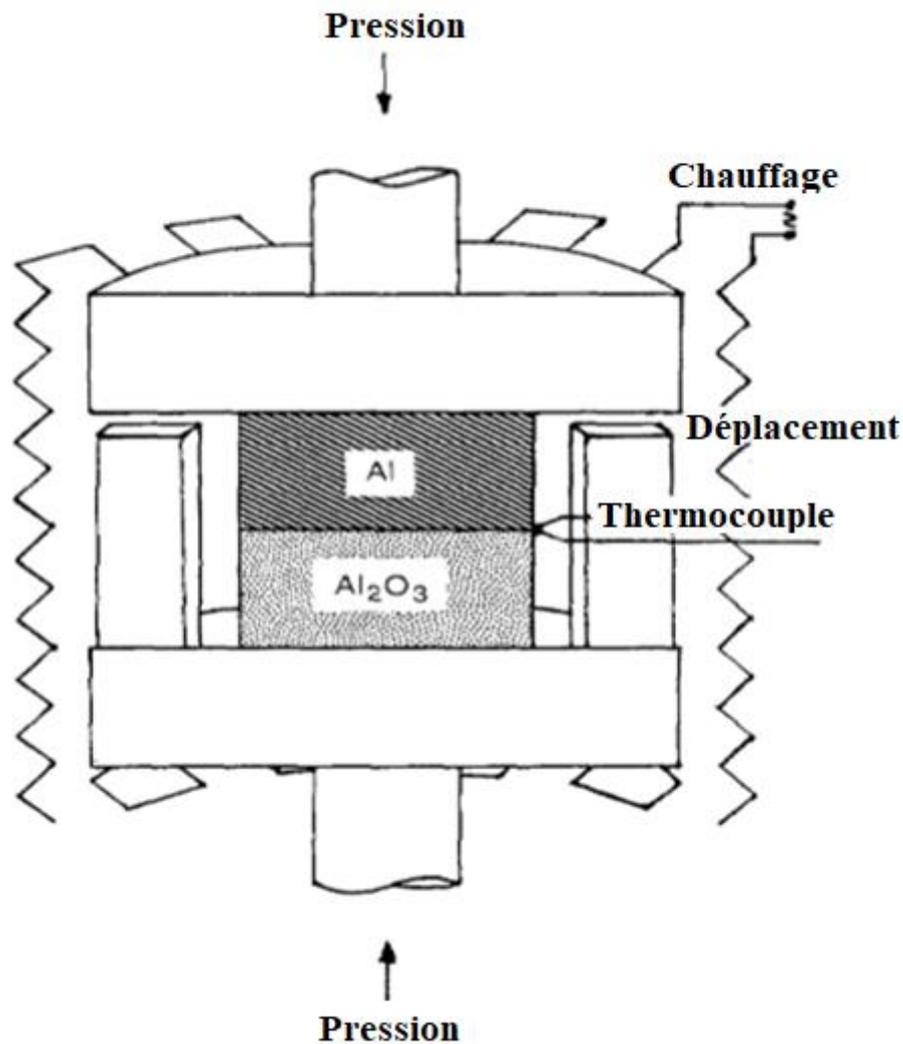


Figure II.5. Dispositif expérimental utilisé dans le processus de soudage [16].

Les matériaux suivants ont été utilisés: alliage d'aluminium 2014: (3,32% Cu-0,91% Mn- 0,79% Si). La surface de contact a été attaquée avec une solution d'acide fluorhydrique (20%) dans l'eau pendant 1 min, ce qui a augmenté la porosité de surface en dissolvant une partie des phases cristallines. Une céramique composée d'alumine (96%), de magnésium et d'oxydes de calcium. La surface de contact a été attaquée avec une solution d'acide fluorhydrique (20%) dans l'eau pendant 1 min, ce qui augmente la porosité de surface en dissolvant une partie des phases cristallines. Les échantillons avaient deux zones de contact différentes (3.135 et 16.000 cm²) afin d'analyser l'influence de la taille de la soudure dans le processus. Ce changement d'échelle a rendu nécessaire la modification des conditions de chauffage et de charge pour assurer l'équivalence des cycles thermiques subis par les éprouvettes et les pressions exercées sur eux. La seule différence observée était que lorsque la zone de contact est plus grande, un traitement de détente plus long était nécessaire après le soudage. Le matériau a été chauffé à 640°C à 0,15 MPa. Une fusion naissante a eu lieu (Fig.II.6) ainsi que la plastification de l'alliage, qui a coulé à travers les pores et les fissures

de la céramique, produisant une fixation mécanique. L'ensemble de ce processus s'est déroulé dans une atmosphère d'argon qui a empêché l'oxydation de l'aluminium [16].

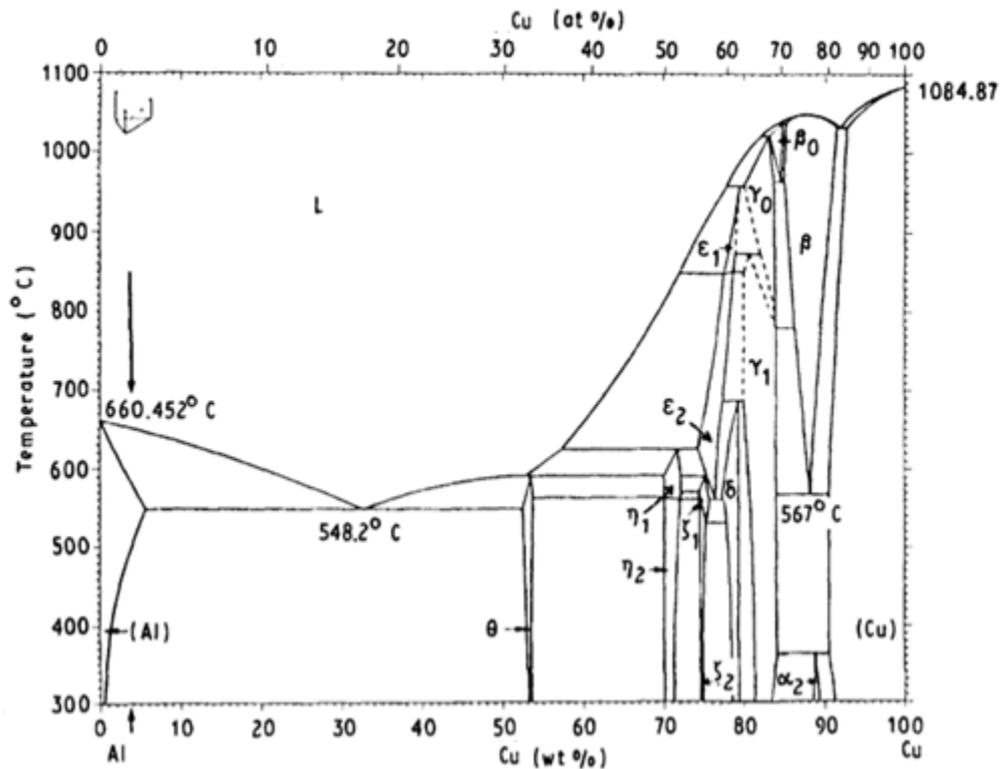


Figure II.6. Diagramme Al-Cu. La flèche verticale indique l'alliage utilisé [16].

La fixation mécanique obtenue a été facilitée par le fluage du métal à des pressions et températures élevées et la forte porosité de la céramique. Une fois que nous avons déterminé la déformation minimale de l'alliage d'aluminium nécessaire pour produire une liaison solide, un moule en acier a été utilisé (enduit de graphite pour démoulage plus facile). Ce moule a permis de réaliser le formage à chaud et, en même temps, il a limité la course des pistons en interrompant la pression exercée sur les éprouvettes (Fig.II.5). Après le soudage, un processus de refroidissement en atmosphère inerte termine le cycle thermique (Fig.II.7). Cette méthode nous a permis d'obtenir des soudures solides d'alumine et d'aluminium et entre des morceaux d'alumine (Fig.II.8) [16].

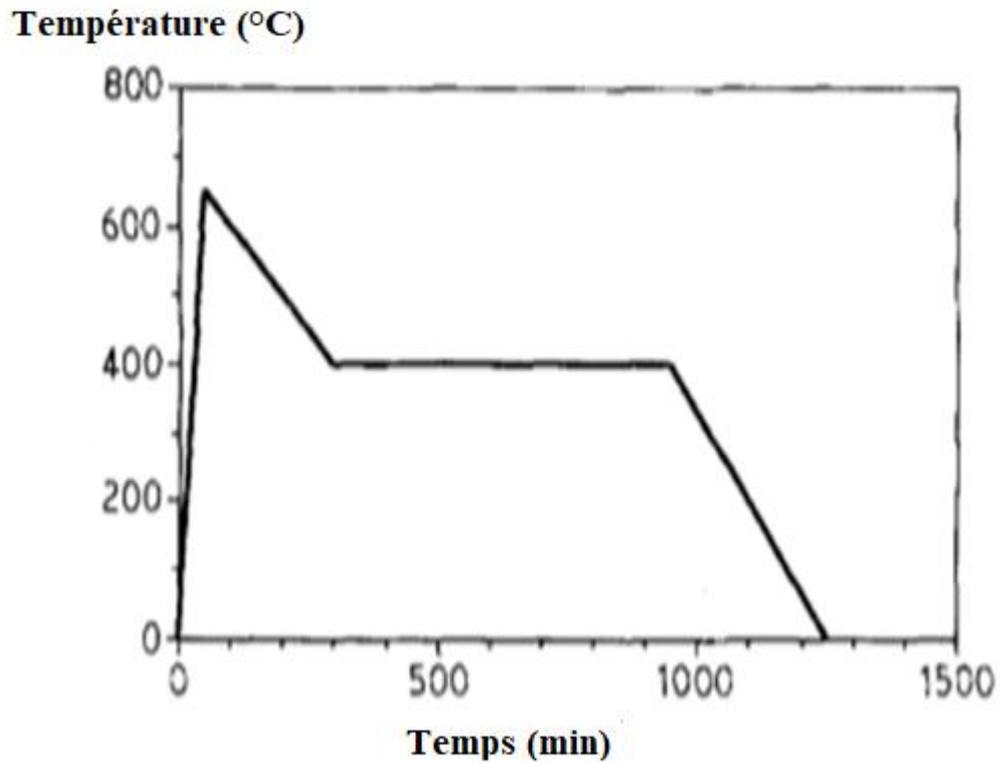


Figure II.7. Diagramme température temps [16].

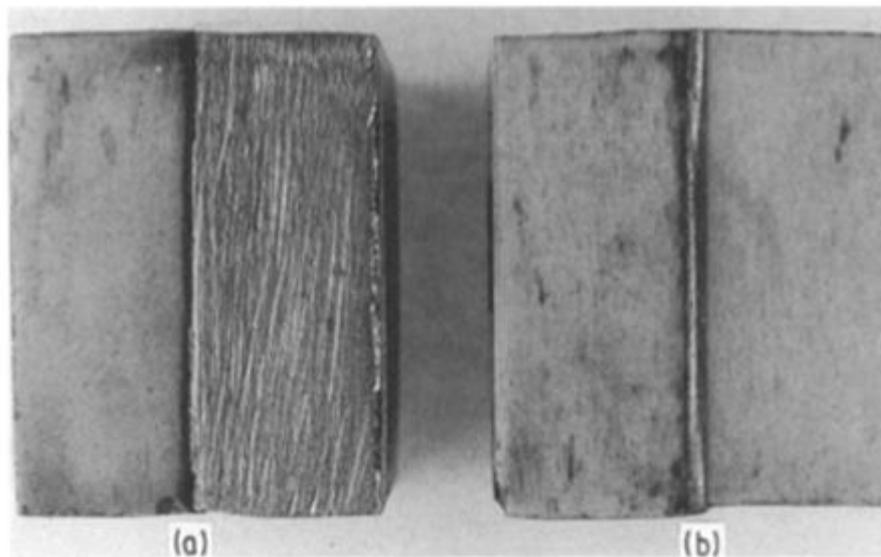


Figure II.8. (a) Soudage de Al- Al_2O_3 . (b) Soudage de deux pièces de Al_2O_3 avec une feuille d'Aluminium [16].

II.5.2. Soudage par diffusion à l'état solide de l'acier avec l'aluminium

La (Fig.II.9) montre une microstructure du soudage de l'acier avec l'aluminium après un maintien de 1 heure à 600 °C et qui a été réalisé par Springer et al [28].

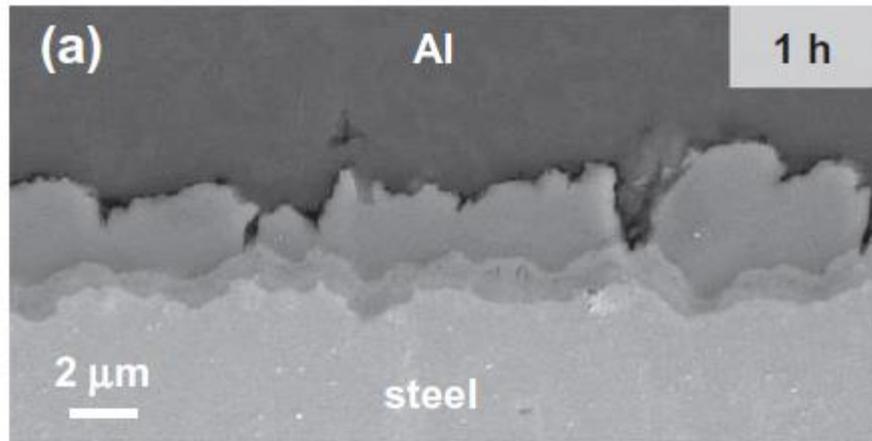


Figure II.9 Microstructure du soudage de l'acier avec l'aluminium [28].

II.6. Les matériaux dissimilaires soudés par diffusion

Le tableau suivant résume les matériaux dissimilaires soudés par diffusion.

Matériaux soudés	Références
Nitride de silicium - Ni	[29] [30] [31][32] [33] [34] [35] [36]
Nitride de silicium - Fe	[37] [38] [39] [40]
Nitride de silicium - V	[41]
Nitride de silicium - Cr	[42][43] [44]
Ti ₃ SiC ₂ - Cu	[45]
Si ₃ N ₄ - Cu	[46]
Carbure de tungstène- Ni	[47]
Nitride de silicium - Ti	[48]
Alliage de titane (Ti-6Al-4V) - Acier inoxydable 304	[49]
ZrB ₂ - Les alliages Al-Sn-Mg	[50]
Al ₂ O ₃ -Tous les alliages contenant Sr, Mg, et Si	[51]
Al ₂ O ₃ -Cr ₁₈ -Ni ₈	[52]
Carbure de silicium - Mo	[53]
Al -Al ₂ O ₃	[54] [55]
Al-6Mg PSZ	[56]
TsTS-19 - AMg6	[57]
Al ₂ O ₃ - Acier inoxydable	[58]
Al ₂ O ₃ - Nb	[59]

Chapitre III

Matériaux et Méthodes Expérimentales

Chapitre III. Matériaux et Méthodes Expérimentales

Introduction

Dans ce chapitre, on présente les matériaux utilisés, la méthode de soudage effectuée, et les techniques de caractérisation.

III.1. Matériaux étudiés

Les matériaux utilisés dans cette étude expérimentale sont : l'acier doux et l'alliage d'Aluminium 1100. Des tiges d'acier doux et d'alliage d'Aluminium **1100** de diamètre 12 mm ont été utilisées pour réaliser les joints acier/aluminium. Le (Tableau III.1) présente la composition chimique de l'acier doux utilisé. Le (Tableau III.2) présente la composition chimique de l'alliage d'aluminium utilisé.

Elements	C	Si	S	P	Mn	Cu	Mg	Zn	Fe	Al
Mild Steel	0.39	0.28	0.03	0.03	0.9	0.14	—	—	98.2	0.03

Tableau III.1. Composition chimique de l'Acier doux (déterminée par Spectrométrie de fluorescence des rayons X (XRF)).

Elements	C	Si	S	P	Mn	Cu	Mg	Zn	Fe	Al
Al 1100	—	0.57	—	0.04	—	0.01	0.53	0.02	0.23	98.6

Tableau III.2. Composition chimique de l'alliage d'aluminium 1100 (déterminée par XRF).

III.2. Technique de soudage

Les échantillons sont soudés à l'état solide par diffusion et qui ont été obtenus en utilisant une technique qui a été réalisée en mettant en contact les deux métaux dans un four électrique à 600°C sous atmosphère contrôlée pendant différents temps de maintien (Fig.III.1)

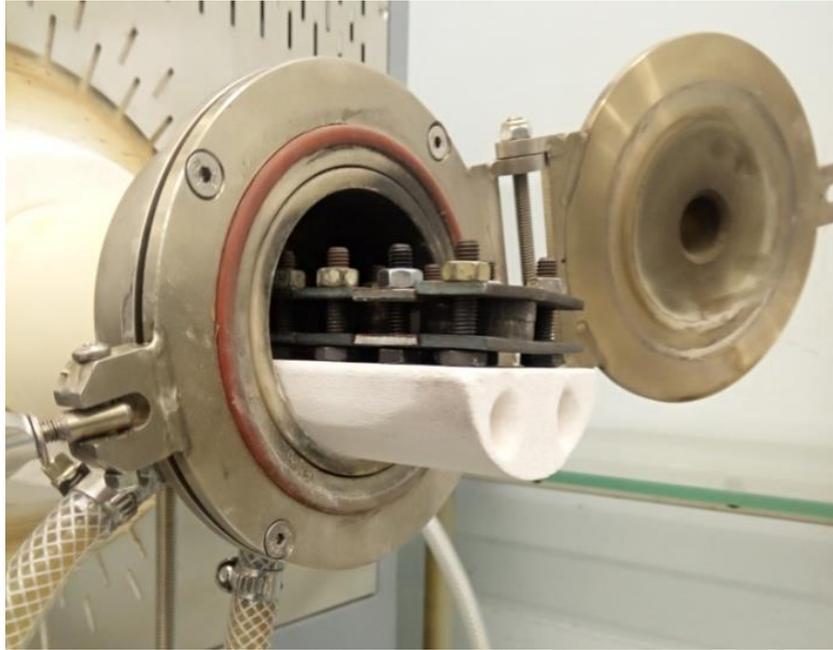


Figure III.1. Four électrique de marque Jolaba.

La (Fig.III.2) montre un exemple de soudage d'un échantillon soudé par diffusion.



Figure III.2. Échantillon soudé par diffusion (Acier/Aluminium).

III.3. Préparation métallographique

Pour étudier le joint soudé on a fait une préparation métallographique, suivie par des techniques de caractérisation.

III.3.1. Polissage

Les échantillons sont passés par un polissage mécanique en utilisant une polisseuse de la marque « Mecapol » (Fig.III.3). Les papiers abrasifs utilisés sont (240, 320,400, 600, 800, 1000, 1200) ; et puis un polissage mécanique de finition à l'aide d'une pate diamantée de la taille ($3\mu\text{m}$).



Figure III.3. Polisseuse de type Mecapol.

III.3.2. Attaque chimique

Pour révéler la microstructure de nos échantillons. On a effectué une attaque électrolytique en utilisant le montage montré dans la (Fig.III.4).

Notre électrolyte a été constitué de (10 g de NaOH + 90 ml de H₂O)

On note qu'on a utilisé un fil d'aluminium pur comme cathode et notre échantillon (acier et aluminium) comme anode. Les échantillons sont rincés en utilisant l'eau distillée et séchés à l'air.



Figure III.4. Montage de l'attaque électrolytique.

Les paramètres de l'attaque électrolytique sont :

- La tension électrique : 5 Volt
- Le temps : 6 min

III.4. Techniques de caractérisation

III.4.1. Microscopie optique

Pour l'observation de structure du joint soudé. On a utilisé un microscope métallographique de la marque 'Vistavision' (Fig.III.5).



Figure III.5. Microscope optique de la marque Vistavision.

III.4.2. Microdureté Vickers

Pour mesurer la dureté du joint soudé, un microduromètre a été utilisé, ce dernier est constitué d'un pénétrateur sous forme de pyramide droite à base carrée en diamant (Fig.III.6) qui applique une charge constante sur la surface du matériau et laisse une empreinte. L'essai de Micro dureté Vickers consiste à mesurer les longueurs des diagonales de l'empreinte laissée sur la surface des échantillons après l'application de la charge. Dans notre étude on a utilisé un microduromètre de la marque ZWICK (Fig.III.7). La charge appliquée est 25gf pendant 18 s.

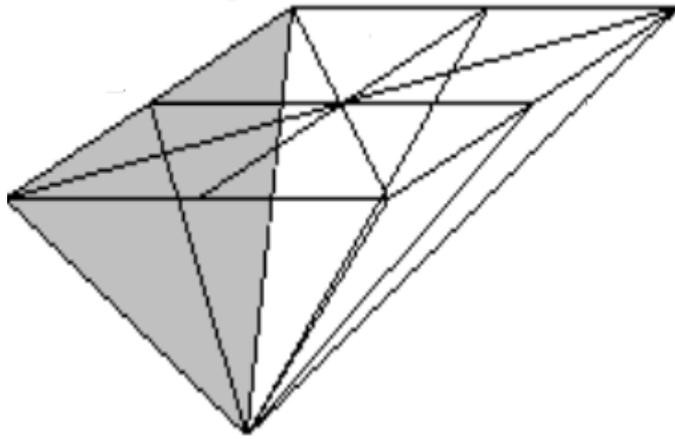


Figure III.6. Schéma de l'indenteur Vickers.

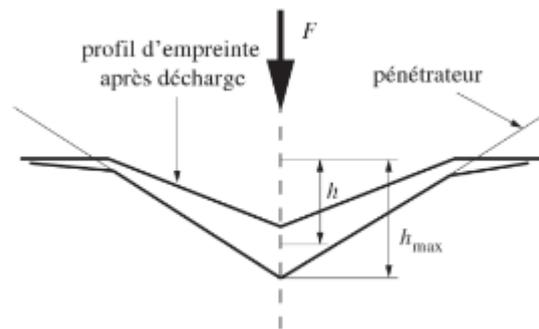


Figure III.7. Schéma d'une empreinte Vickers.

La dureté Vickers est donnée par la relation suivante :

$$HV = \frac{1,854 \cdot F}{d^2}$$

Où

F = la charge appliquée en (N)

d = la diagonale de l'empreinte en (mm)[60].



Figure III.8. Microduromètre de type ZWICK.

Chapitre IV

Résultats et interprétation

Chapitre IV. Résultats et interprétation

Introduction

Dans ce chapitre on présente les résultats de l'étude microstructurale et de dureté du joint soudé par diffusion à l'état solide à 600 °C et à différent temps de maintien.

IV.1. Observation macroscopique

La (Fig.IV.1) montre une vue macroscopique des quatre échantillons obtenus après soudage par diffusion à l'état solide à 600 °C et à différent temps de maintien (15 min, 25min, 30 min). On remarque bien que les deux matériaux dissimilaires (Aluminium et Acier) sont bien soudés.

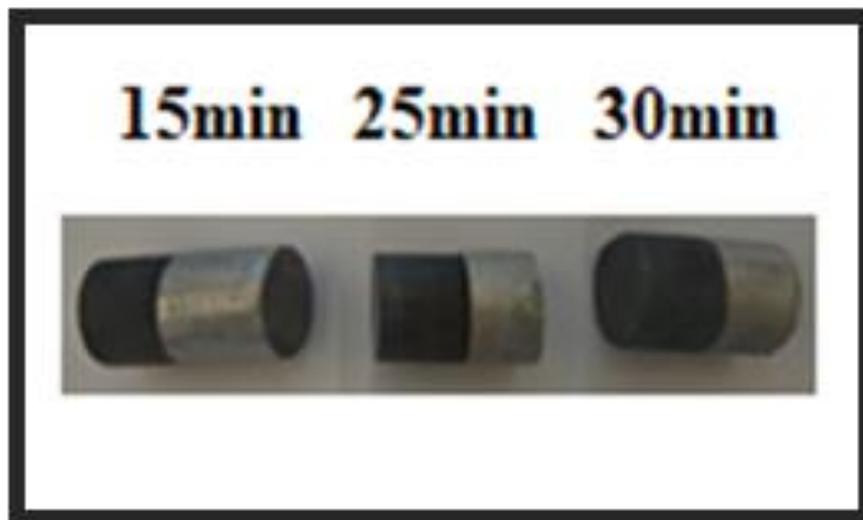


Figure IV.1. Les échantillons après soudage des deux matériaux dissimilaires (Al/Acier).

IV.2. Observation microscopique

IV.2.1. Evolution microstructurale de la partie aluminium du joint soudé

La (Fig.IV.2) présente les microstructures du joint soudé par diffusion à l'état solide à 600 °C et à différent temps de maintien. Les différentes zones se différencient par leurs couleurs.

On constate que le joint soudé (Fig.IV.2.a) est formée d'une couche noire suivie par une large zone distincte (zone de reaction) dans la partie aluminium et qui peut contenir une zone de diffusion moins large et qui est au voisinage de la couche noire.

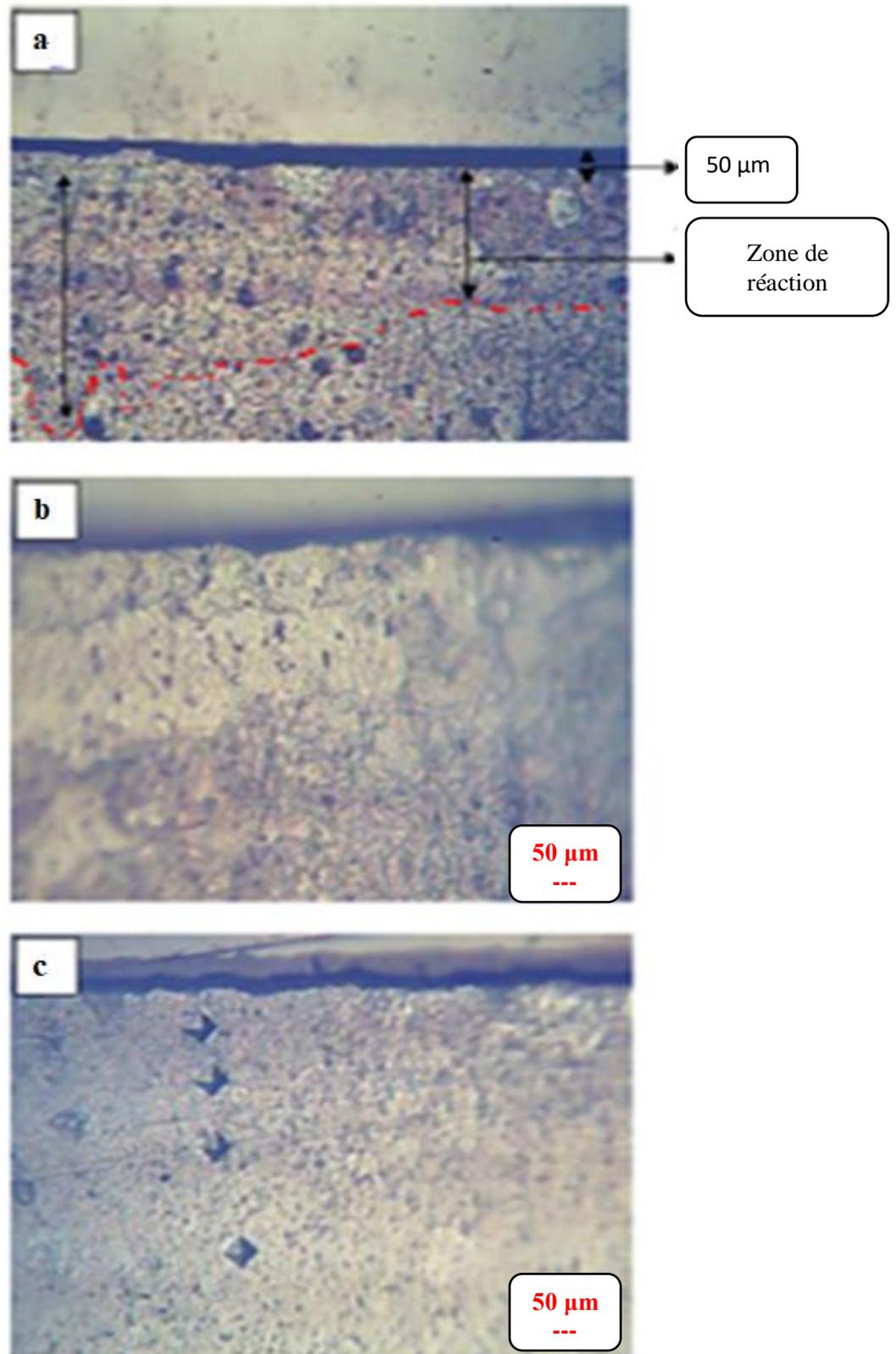


Figure IV.2. Microstructures du joint soudé par diffusion à l'état solide à 600 °C pendant:
(a) 15 min, (b): 25 min et (c) : 30 min.

D'après la recherche bibliographique et le diagramme d'équilibre fer-aluminium (Fig.IV.3) on peut attribuer la couche noire à la zone intermétallique, qui est constituée de la phase AlFe_3C et AlFe .

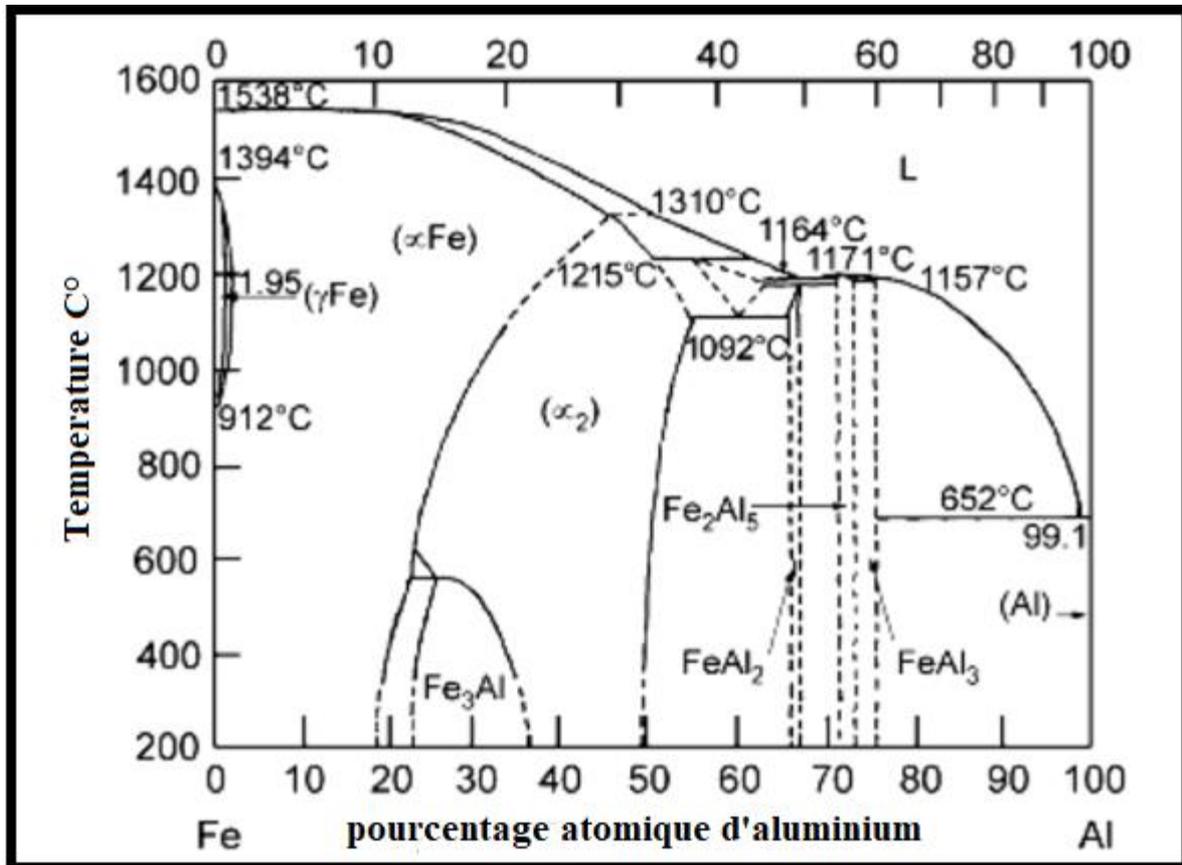


Figure IV.3. Diagramme d'équilibre (Fe-Al) [61].

Pour la zone de réaction; elle a une largeur qui varie le long du joint (de 400 à 800 μm environ). Elle est constituée de grains fortement attaqués par le réactif chimique. On peut dire que cette zone est le siège d'une recristallisation des grains. On peut dire aussi que la zone de diffusion ne peut être qu'une zone de faible épaisseur (quelques microns) difficile à visualiser par microscopie optique et qu'est une zone de diffusion des éléments provenant de l'acier et qui diffusent vers l'aluminium. D'après nos recherches bibliographiques la zone de diffusion est constituée de la phase Al_5Fe_2 .

L'observation approfondie de la couche noire (Fig.IV.4) montre bien qu'elle est formée aussi de deux sous couches. La première sous couche proche de l'acier est qui très sombre par rapport à la deuxième sous couche qui est un peu moins sombre.

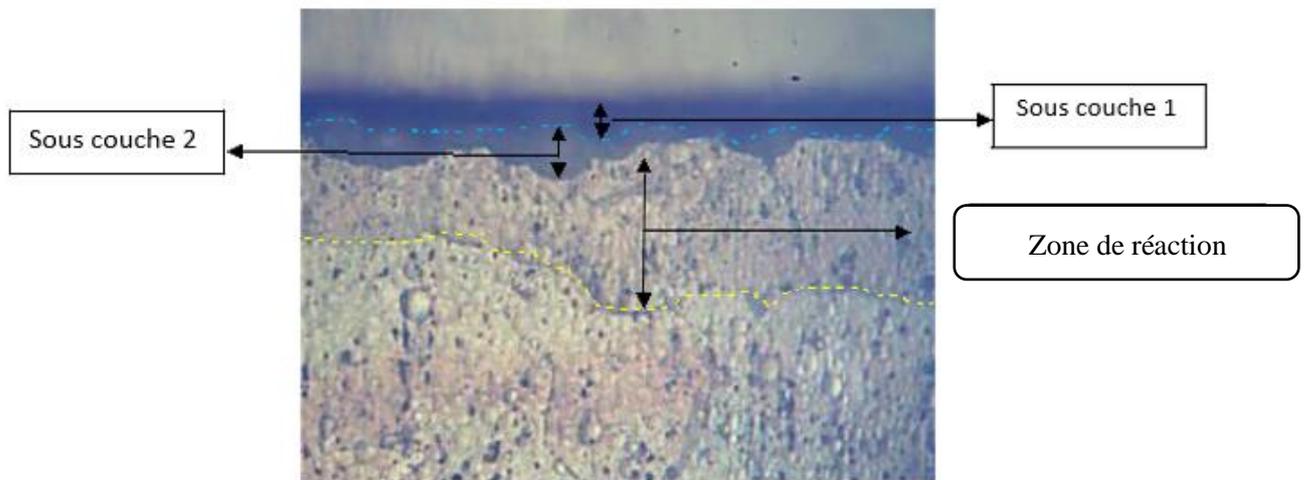


Figure IV.4. Microstructures du joint soudé par diffusion à l'état solide à 600 °C pendant 15 min.

Springer et al. [28] ont étudié la formation et la croissance des phases intermétalliques lors de l'interaction entre l'acier à bas carbone et l'aluminium pur. Dans leur étude, ils ont présenté la zone de réaction entre l'acier et l'Al après soudage par diffusion pendant 1 h à 600 °C (Fig.IV.5).

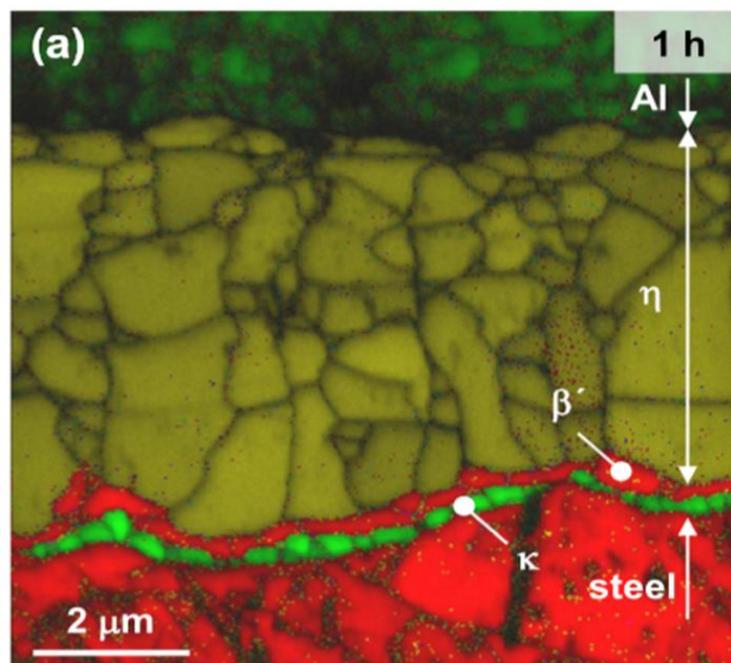


Figure IV.5. Micrographe obtenu par EBSD montre la zone de réaction entre l'acier et l'Al après diffusion pendant 1 h à 600 °C [28].

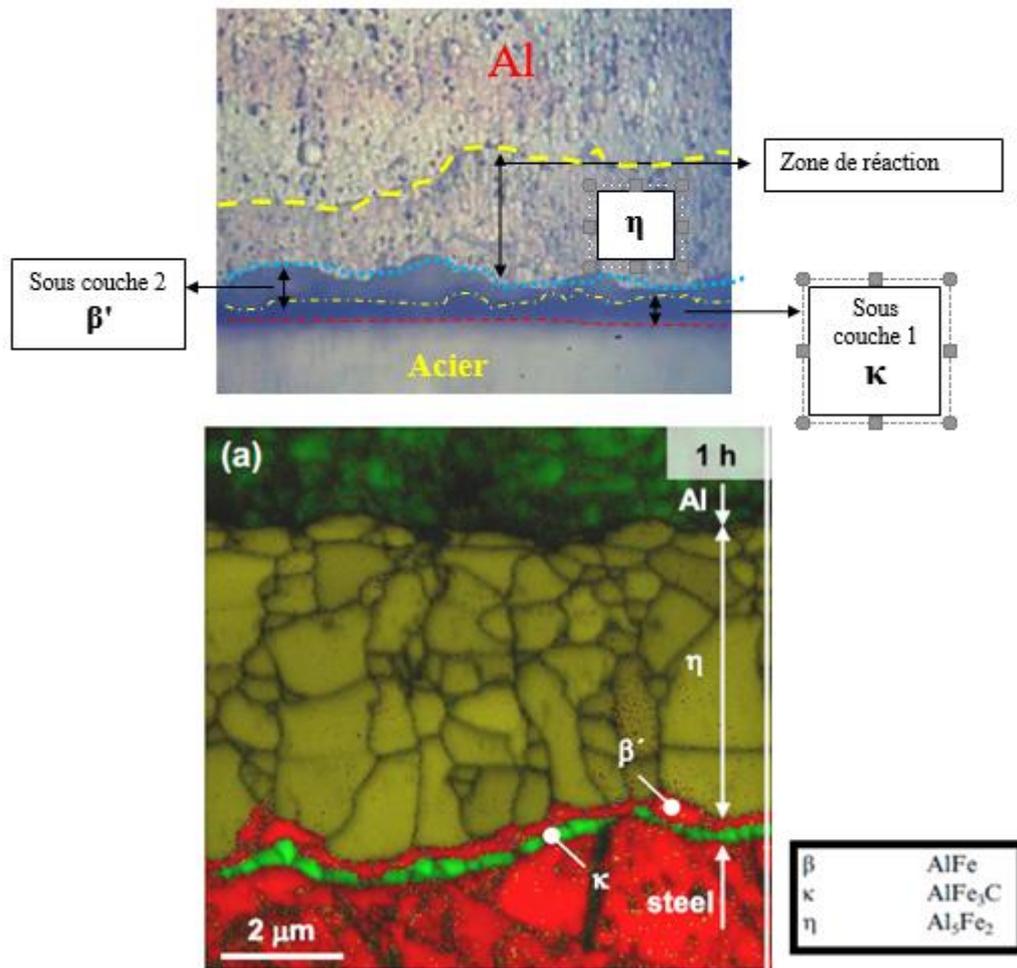


Figure IV.6. Deux résultats obtenus en utilisant presque les mêmes paramètres.

Après comparaison entre leur et nos résultats on peut dire que la première sous couche est la phase AlFe_3C et la deuxième sous couche est la phase AlFe .

IV.2.2. Evolution microstructurale de la partie acier du joint soudé

La (Fig.IV.7) présente l'évolution microstructurale de la partie acier du joint soudé Acier/Aluminium lors du procédé de soudage par diffusion à l'état solide lors du maintien à $600\text{ }^\circ\text{C}$ pendant 15, 20, 25 et 30 minutes. On peut dire que les transformations visibles sont au niveau de l'interface de contact qui devient de plus en plus large. La largeur de cette interface est de l'ordre de l'épaisseur d'une empreinte de microdureté Vickers. Une observation approfondie de cette interface montre qu'elle a une morphologie particulière et qui correspond à l'intermétallique.

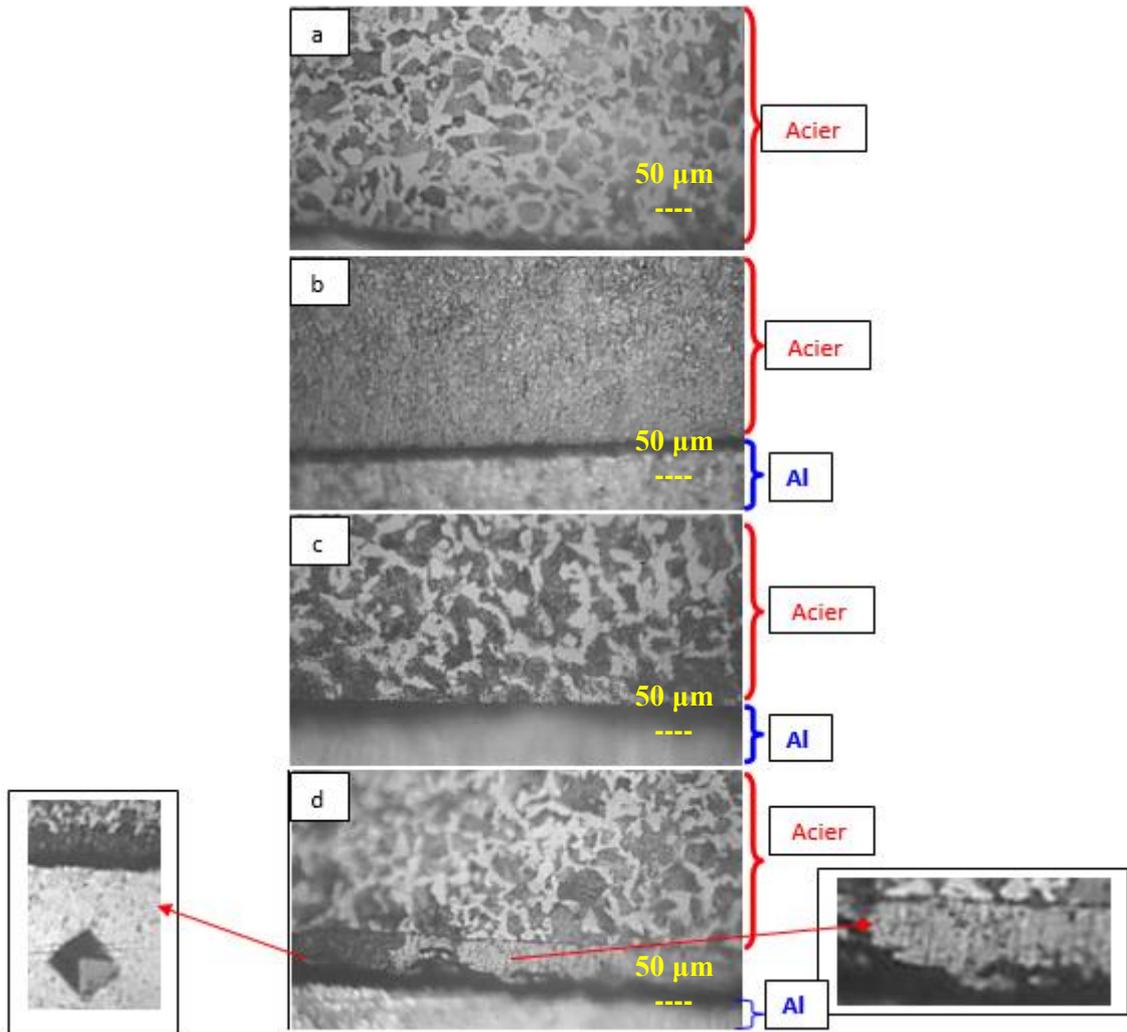


Figure IV.7. Evolution microstructurale de la partie acier du joint soudé Acier/Aluminium lors du procédé de soudage par diffusion à l'état solide pour un maintien à 600 °C pendant : (a) 15 min, (b) 20 min, (c) 25 min et (d) 30 min.

D'autre part, on a pu observer des phénomènes au niveau du joint soudé comme la pénétration de l'acier dans l'aluminium, mais dans quelques zones de contact avec l'aluminium, car ce dernier est plus ductile par rapport à l'acier (Fig.IV.8.a). Cependant, l'interface Acier/Aluminium du joint soudé reste toujours rectiligne et droite même avec le prolongement du temps de maintien à 600 °C pendant 30 min (Fig.IV.8.b).

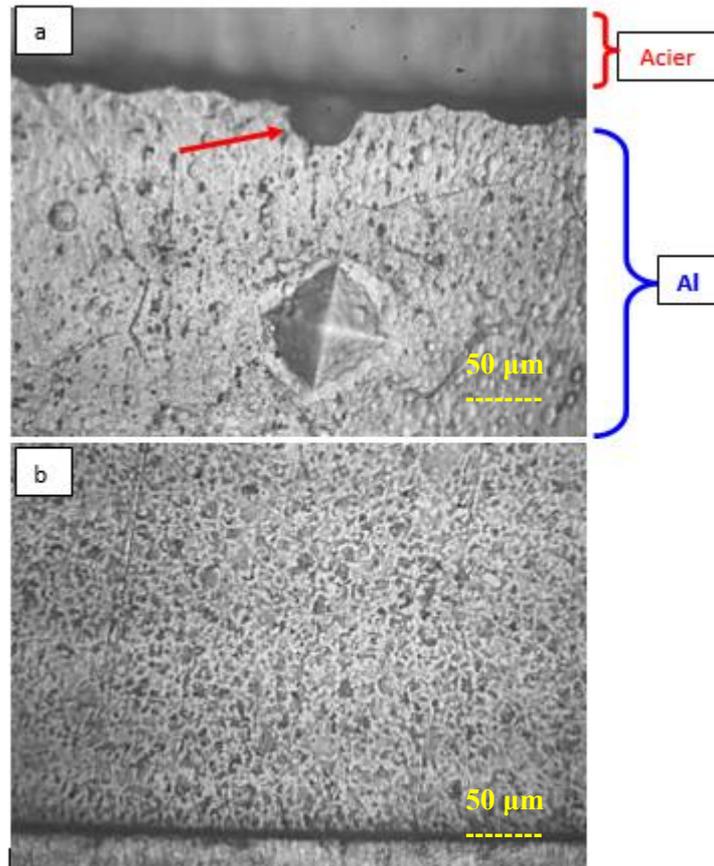


Figure IV.8. Microstructures du joint soudé Acier/Aluminium lors du procédé de soudage par diffusion à l'état solide pour un maintien à 600 °C pendant : (a) 15 min, (b) 30 min.

Dans la partie acier le joint soudé soumis au temps de maintien de 20 minutes, on a révélé une microstructure qui varie de l'interface vers le cœur de l'acier comme le montre la (Fig.IV.9)

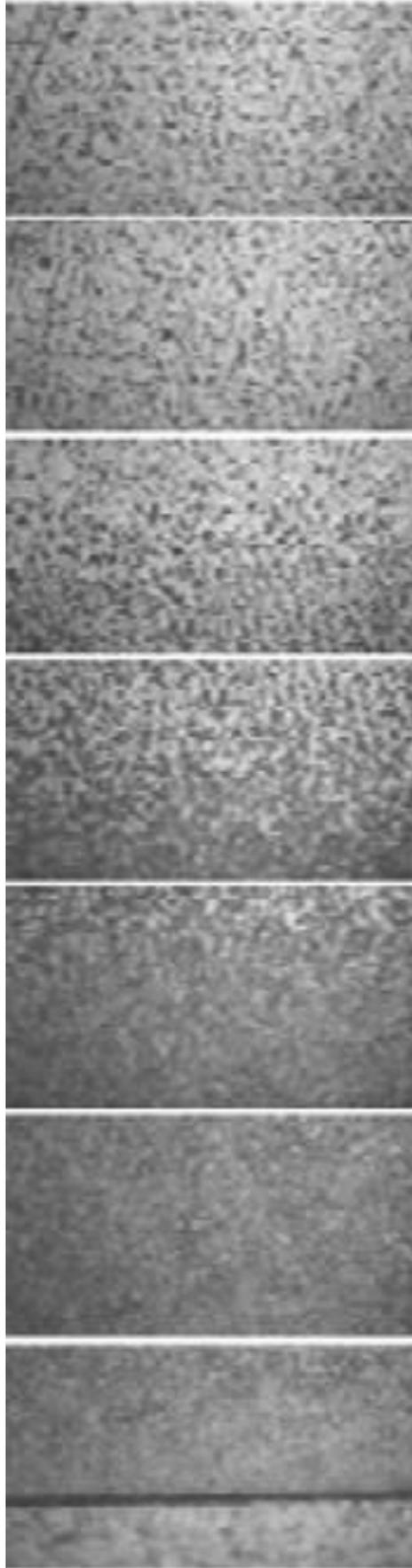


Figure IV.9. Microstructures dans la partie acier du joint soudé Acier/Aluminium après le procédé de soudage par diffusion à l'état solide lors du maintien à 600 °C pendant 20 min.

IV.3. Mesure de microdureté

La (Fig.IV.10) rassemble les courbes de profil de dureté Vickers enregistrées de la partie acier jusqu'à la partie aluminium en passant par le joint de contact Acier/Aluminium. On remarque bien que la plus grande valeur de dureté est enregistrée dans le cœur d'acier et diminue en se déplaçant vers la zone de contact, puis augmente en se déplaçant vers le cœur d'aluminium. On sait que les pièces ont subi une déformation lors de serrage des deux métaux, cette déformation provoque la mobilité des dislocations et l'augmentation de leur nombre, lorsque les pièces sont chauffées à une température de 600°C qui est supérieure à $0.3 T_f$ des deux métaux et qui ont subi un traitement de recristallisation, donc on constate que ce changement de dureté est dû à la recristallisation qui provoque sa diminution notamment au niveau de la zone de contact car dans laquelle les contraintes sont concentrées plus que les métaux de base.

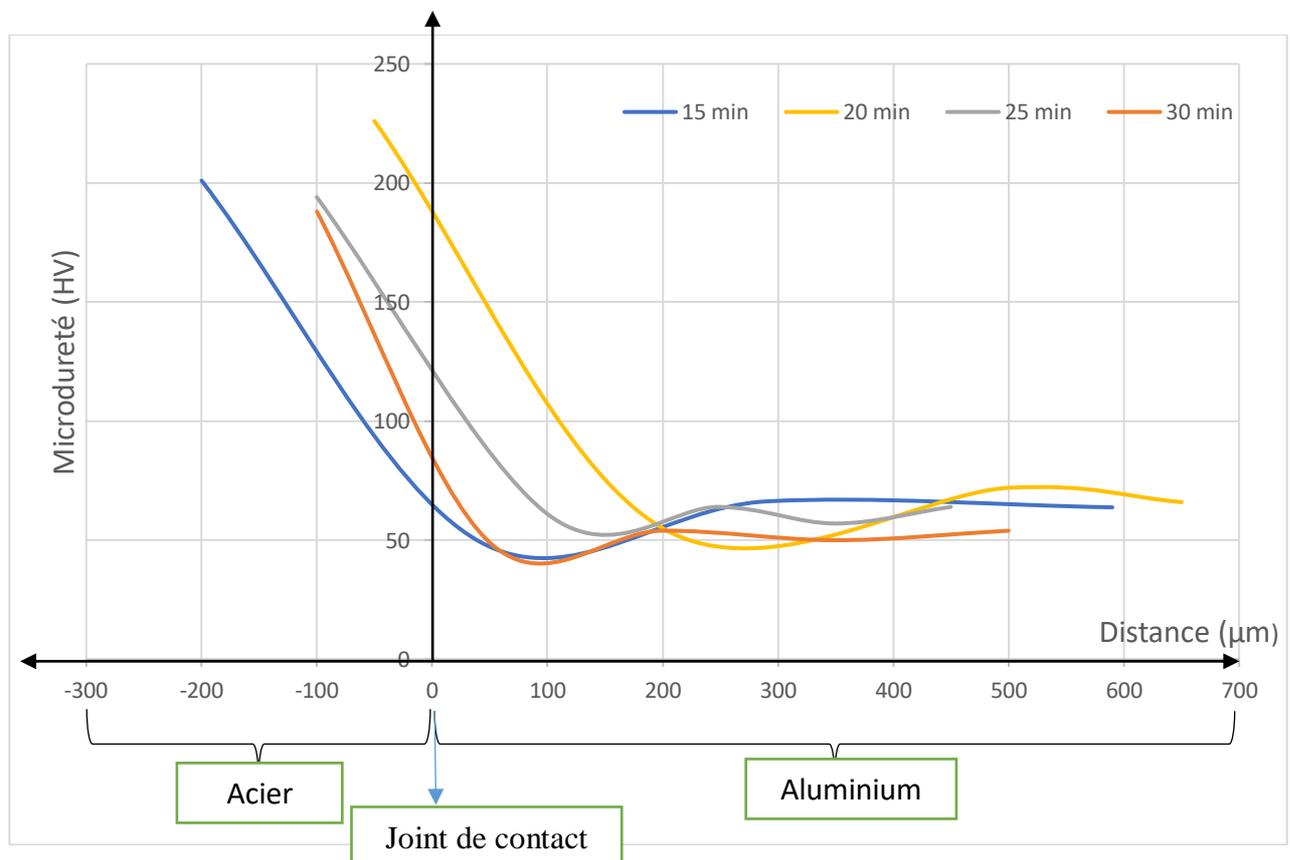


Figure IV.10. Courbes de profil de dureté Vickers enregistrées après le procédé de soudage par diffusion à l'état solide lors du maintien à 600°C pendant 15,20, 25 et 30 min.

Pour mettre en évidence l'évolution microstructurale dans la partie acier du joint soudé soumis au temps de maintien de 20 minutes; des mesures de microduretés Vickers ont été effectuées (Fig.IV.11).

Cette (Fig.IV.11) est présentée pour bien visualiser les empreintes de dureté et qui montrent clairement que la dureté est grande dans la zone adjacente à l'interface et qui diminue progressivement en se déplaçant vers le cœur. Cette diminution est due au changement microstructurale d'une zone à une autre.

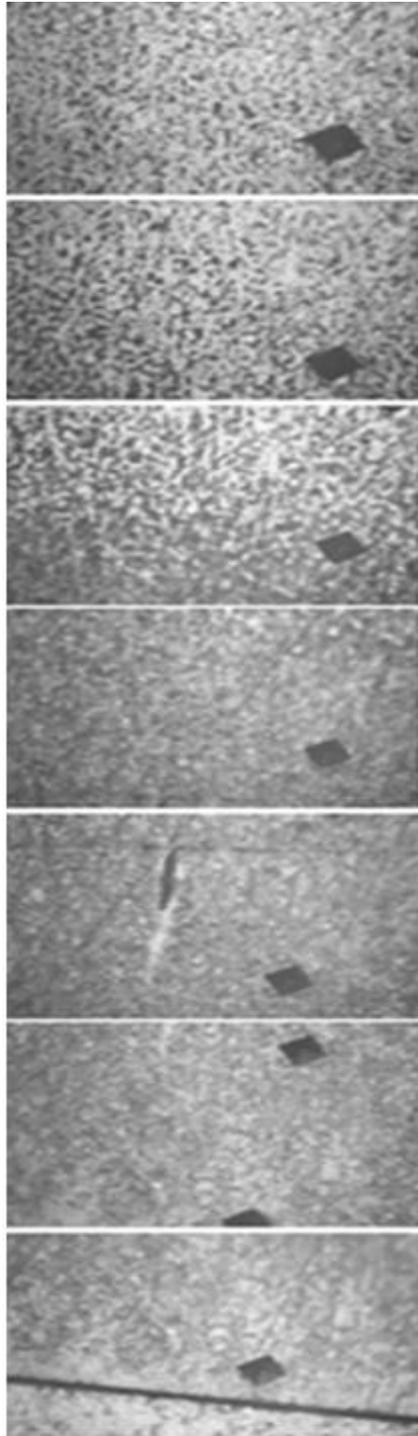


Figure IV.11. Des empreintes de dureté Vickers dans la partie acier du joint soudé Acier/Aluminium après le procédé de soudage par diffusion à l'état solide lors du maintien à 600 °C pendant 20 min.

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GÉNÉRALE

Le but principal de notre étude était d'étudier le soudage par diffusion à l'état solide de deux métaux dissimilaires et qui sont l'aluminium et l'acier et de caractériser le joint soudé à 600 °C et à différents temps de maintien.

Dans ce travail on a utilisé deux moyens de caractérisation et qui sont :

- Le microscope optique,
et
- La microdureté Vickers

Cette étude nous a permis d'obtenir les résultats suivants :

- Globalement la microstructure du joint soudé est différente de celles des métaux de base.
- Le joint soudé est formée d'une couche noire qui est la zone intermétallique constituée de la phase $AlFe_3C$ et $AlFe$ suivie par une large zone distincte (zone de réaction) dans la partie d'aluminium.
- La zone de réaction à une largeur qui varie le long du joint (de 400 à 800 μm environ). Elle est constituée de grains fortement attaqués par le réactif chimique. Elle est considérée comme le siège d'une recristallisation des grains.
- La zone de diffusion a une faible épaisseur (quelques microns) difficile à visualiser par microscopie optique.
- L'acier est l'élément qui diffuse vers l'aluminium.
- La zone de diffusion est constituée de la phase Al_5Fe_2 .
- La couche noire est formée de deux sous couches. La première sous couche proche de l'acier est très sombre par rapport à la deuxième sous couche qui est un peu moins sombre.
- La première sous couche est la phase $AlFe_3C$ et la deuxième sous couche est la phase $AlFe$.
- L'interface a une morphologie particulière qui correspond à l'intermétallique.
- Le changement de dureté est dû à la recristallisation qui s'est effectuée au niveau des pièces notamment les zones de contact car dans lesquelles les contraintes sont beaucoup plus concentrées par rapport aux métaux de base.

Perspectives

Notre perspective est d'étudier ce soudage par d'autres moyens de caractérisation comme le MEB, le MET et les rayons X.

RÉFÉRENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **Warren S.**, Joining of advanced materials, Butterworth-Heinemann, New York, (2013).
- [2] **Bensaada S.**, Métallurgie du soudage et contrôles, Biskra, (2016).
- [3] **ROCDACIER.**, Le soudage chalumeau – Soudage OA – Soudage oxyacétylénique (2017). <https://www.rocdacier.com/souder-chalumeau-soudage-oa/>. Téléchargé le 16/11/2019.
- [4] **Klas W.**, Welding processes handbook, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, (2011).
- [5] **Shashank M., Stevens M, et Chess M.**, Mixed material joining advancements and challenges, Center for Automotive Research, Ann Arbor, (2017).
- [6] **CDSA technologies**, Soudage laser (2019), <https://www.cdsa-technologies.com/soudage-laser-6.html>, téléchargé le 16/11/2019.
- [7] **Chantal P.** Procédés spéciaux de soudage et de coupage, De Boeck, Bruxelles, (2008).
- [8] **Heyraud M. et Paccaud P.**, Soudage par ultrasons. Séminaire de méthodes de production, 25 novembre 2011.
- [9] **Messler and Savage W.** Joining of Advanced Materials, Butterworth-Heinemann, New York, (1993).
- [10] **Messler Jr, Robert W.** Principles of welding: processes, physics, chemistry, and metallurgy, Wiley VCH, Troy, (2008).
- [11] **Akbarimousavi, S. A. A., et M. GohariKia.**, (2011), Investigations on the mechanical properties and microstructure of dissimilar cp-titanium and AISI 316L austenitic stainless steel continuous friction welds, Materials and Design, 32.5, 3066-3075.
- [12] **Mousavi, S. A. A. A., and A. Rahbar Kelishami.**, (2008), Experimental and numerical analysis of the friction welding process for the 4340 steel and mild steel combinations, Welding journal New York, 87.7, 178.
- [13] **Özdemir N., Sarsılmaz F., and Hasçalık A.**, (2007), Effect of rotational speed on the interface properties of friction-welded AISI 304L to 4340 steel, Materials and design, 28.1 301-307.

- [14] **Koen F.** Assemblage thermique de tôles en matériaux dissimilaires, institut Belge de la soudure ASBL.
- [15] **Emmanuel Rigal, Nicolas Bouquet, Marc Bernacki, Frédéric Bernard.,** Etablissement et évolution des interfaces lors du soudage diffusion. JA - Journées annuelles de la SF2M, Matériaux et conversion d'énergie, Oct 2015, Paris, France. ffhal-01247744f.
- [16] **Becerra S. Leon O., González-Estrada, and Pertuz A.,** (2017), Influence of the boundary condition on the first ply failure and stress distribution on a multilayer composite pipe by the finite element method, GIEMA, School of Mechanical Engineering.
- [17] **Stephenson, David J.,** Diffusion bonding 2, Elsevier science publishers, London (2012).
- [18] **Mercier Jean P., Zambelli G., and Kurz W.,** Introduction à la science des matériaux, presses polytechniques, Rome (1999).
- [19] **Kearns, William H.,** (1980), Welding Processes-Resistance and Solid-State Welding and Other Joining Processes, Amer Welding Society, Vol. 3.
- [20] **Nicholas M. G., and Mortimer D. A.,** (1985), Ceramic/metal joining for structural applications, Materials Science and Technology, 1.9, 657-665.
- [21] **José Lemus Ruiz., Leonel Ceja Cardenas., Egberto Bedolla Bercerril and Victor H. Lopez Morelos.,** Production, characterization, and mechanical evaluation of dissimilar metal/ceramic joints, Instituto de investigaciones metalurgicas, (2011).
- [22] **Balasubramanian M.,** (2015), Development of processing windows for diffusion bonding of Ti-6Al-4V titanium alloy and 304 stainless steel with silver as intermediate layer, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 25.9, 2932-2938.
- [23] **Lemus-Ruiz J., Bedolla-Becerril E., and Flores-López J. G.,** (2009), Joining and characterizations of silicon nitride (Si₃N₄) to titanium (Ti) using a Cu-foil and Cu-Zn braze alloy, Revista Mexicana de Física, 55.1, 25-29.
- [24] **Kumar, S Suresh., Krishnamoorthi, J., Ravisankar, B., Angelo, P C.,** (2009), Methodology to evaluate the quality of diffusion bonded joints by ultrasonic method. Indian journal of engineering and materials sciences, CSIR, 16, 331-334,
- [25] **Akselsen O. M.,** (1992), Diffusion bonding of ceramics, Journal of materials science, 27.3, 569-579.
- [26] **Jacobson, David M., and Humpston G.,** Principles of brazing, Asm International, Ohio (2005).
- [27] **Kazakov, Fedotovitch N.,** Diffusion bonding of materials, Mir publishers, Moscow, (2013).

- [28] **H.Springer, A.Kostka, E.J.Payton, D.Raabe, A.Kaysser-Pyzalla, G.Eggeler.,** (2011), On the formation and growth of intermetallic phases during interdiffusion between low-carbon steel and aluminum alloys, *Acta materialia*, 59, 1586-1600.
- [29] **Esposito L., Bellosi A., and Celotti G.,** (1997), Silicon nitride-nickel joints through diffusion bonding, *Acta materialia*, 45.12, 5087-5097.
- [30] **Vegter R. H., and Ouden G. D.,** (1998), Diffusion bonding of zirconia to silicon nitride using nickel interlayers, *Journal of materials science*, 33.18, 4525-4530.
- [31] **Deschaux-Beaume F., Frety N., and Colin C.,** (2003), Diffusion bonding of Si₃N₄-TiN composite with nickel-based interlayers, *Metallurgical and Materials Transactions A* 34.8, 1627-1636.
- [32] **E.Heikinheimo, A.Kodentsov, J.A.Van Beek, J.T.Klomp, F.J.J.Van Loo.,** (1992), Reactions in the systems MoSi₃N₄ and NiSi₃N₄, *Acta metallurgica et materialia*, 40, 111-119.
- [33] **Peteves, Stathis D.,** (1989), Designing Interfaces for Technological Applications: Ceramic-ceramic Ceramic-metal Joining, *Materials and Manufacturing Processes*, 7, 473-475.
- [34] **Klomp J. T.** "Chemistry and Kinetic Aspects of Metal-Ceramic Diffusion Bonding." *Joining Ceramics, Glass and Metal Int. Conf. Bad Nauheim.* (1989).
- [35] **Manuel E. Brito, Hiroyuki Yokoyama, Yoshihiko Hirotsu, Yoshiharu Mutoh.,** (1989), High Resolution and Analytical Electron Microscopy Study of Si₃N₄-Ni Bonded Interface, *ISIJ International*, 29.3, 253-258.
- [36] **Loo V., Gülpén F. J. J., J. H., and Kodentsov A.,** (1993), The role of diffusion and thermodynamics in metal-ceramic interactions, *Materials and Interface Chemistry*, Deutsche Glastechnische Gesellschaft e.V, 3-14.
- [37] **Suganuma, K., T. Okamoto, and M. Shimada.,** (1984), High-pressure bonding of nitrides and iron." *High Temp.--High Press*, 16.6, 627-625.
- [38] **Deschaux-Beaume, F., N. Frety, and C. Colin.,** (2003), Diffusion bonding of Si₃N₄-TiN composite with nickel-based interlayers, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 34.8, 1627-1636.
- [39] **Gernot Kostorz.,** *High Tech. Ceramics*, Academic press limited, Cambridge, (1987).
- [40] **Wolfgang K.,** (1989), *Joining ceramics, glass and metal*, MATERIALS SCIENCE, Germany.
- [41] **Maeda, Masakatsu; Igarashi, Osamu; Shibayanagi, Toshiya; Naka, Masaaki.,** (2003), Solid State Diffusion Bonding of Silicon Nitride with Vanadium Foils, *Materials, Metallurgy and Weldability*, 32.2, 291-301.
- [42] **Gotman, I., and Gutmanas E. Y.,** (1989), Interaction of Si₃N₄ with chromium powder, *Journal of materials science letters*, 8.9, 1103-1106.

- [43] **None.**, (1990), PM into the 1990S, Powder Metallurgy, 33.3, 269-287.
- [44] **Schuster, Julius C.**, (1988), Silicon nitride-metal joints: phase equilibria in the systems Si_3N_4 -Cr, Mo, W and Re, Journal of materials science, 23.8, 2792-2796.
- [45] **Haiyan C., Peng J., and Fu L.**, (2016), Effects of interfacial reaction and atomic diffusion on the mechanical property of Ti_3SiC_2 ceramic to Cu brazing joints, Vacuum, 130, 56-62.
- [46] **Raić, Karlo T.**, (2000), An estimate of Si_3N_4 diffusion into Cu based filler metal, Ceramics international, 26.1, 19-24.
- [47] **José Lemus-Ruiz, Leonel Ceja-Cárdenas, J. A. Verduzco et Osvaldo Flores.**, (2008), Joining of tungsten carbide to nickel by direct diffusion bonding and using a Cu-Zn alloy, Journal of materials science 43.18, 6296-6300.
- [48] **Lemus J., and Drew R. A. L.**, (2000), Diffusion bonding of silicon nitride to titanium, British ceramic transactions, 99.5, 200-205.
- [49] **Balasubramanian M.**, (2015), Development of processing windows for diffusion bonding of Ti-6Al-4V titanium alloy and 304 stainless steel with silver as intermediate layer, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 25.9, 2932-2938.
- [50] **Zhengyi Jiang, Shanqing Li, Jianmin Zeng, Xiaoping Liao and Daoguo Yang.**, (2011), Diffusion bonding of ZrB_2 ceramic and Al-Sn-Mg alloys at atmosphere, Advanced Materials Research, 189-193.
- [51] **Janghorban, K.**, (2009), Multilayer diffusion bonding of polycrystalline Al_2O_3 to Al alloys containing Sr, Mg, and Si, Iranian journal of science and technology transaction B-Engineering, 33.B3, 241-251.
- [52] **Wang J., Li Yajiang, and Yansheng Y.**, (2006), Microstructural characterization in diffusion bonded TiC- Al_2O_3 / $\text{Cr}_{18}\text{-Ni}_8$ joint with Ti interlayer, Indian Academy of Sciences, 29.2, 155-158.
- [53] **Martinelli, A. E., and R. A. L. Drew.**, (1995), Microstructural development during diffusion bonding of α -silicon carbide to molybdenum, Materials Science and Engineering: A 191.1-2, 239-247.
- [54] **M. A. Martínez, J. Rodríguez, C. Navarro, R. Cortés et V. Sánchez-Gálvez.**, (1992), Welding of dense alumina and aluminium by plastic deformation and diffusion, Journal of materials science 27.15, 4230-4236.
- [55] **Karakozov, E. S; Ravich, A. M; Kharlamov, B. A; Shkirov, V. S.**, (1982), Diffusion bonding high alumina ceramics with AMts aluminium alloy, Welding Production, 29.11, 8-10.

- [56] **Kazakov N. F., Bachin V. A., and Trifonova N. A.,** (1983) Formation of nuclei of interaction between aluminium foil and quartz glass during diffusion welding. *Automatic Welding*, 36.3, 52-54.
- [57] **Kazakov, N. F; Novikov, V. G; Ekimov, A. I; Kravchenko, V. E.,** (1982), Determining the region of optimum conditions for diffusion welding TsTS-19 piezoceramic to AMg6 aluminium alloy, *Automatic Welding* 35.8, 18-20.
- [58] **Dilermando T., Ferrante M., and Ouden G.D.,** (2002), "Diffusion bonding of aluminium oxide to stainless steel using stress relief interlayers, *Materials Science and Engineering: A* 337.1-2, 287-296.
- [59] **Burger, K., and Rühle M.** (1989), Material transport mechanisms during the diffusion bonding of niobium to Al₂O₃, *Ultramicroscopy*, 29, 88-97.
- [60] **Suzanne D.,** « *Traité des Matériaux: Tome 2, Caractérisation expérimentale des matériaux: propriétés physiques, thermiques et mécaniques* », presses polytechniques, Lausanne, (1998).
- [61] **Hélène Quehen.,** (2018) *Nouvel alliage intermétallique Fe₃Al, Métallurgie et transformation des métaux*, Saint Didier au Mont D'or.