

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



**UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA 1
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE MECANIQUE**

Projet de Fin d'Études
Master 2 IMS

Soudage des aciers inoxydables par TIG

Proposé et encadré par :
Madame Kheloui

Réalisé par :
Bouraba Abdel Aalim
Bouguerra Abdel Raouf

Année universitaire 2021/2022

Remerciements:

Tout d'abord, nous remercions le bon DIEU le tout puissant de nous avoir donné la volonté et le courage pour accomplir le présent travail, nous tenons à saluer ici les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la concrétisation de ce travail.

Nos remerciements s'adressent à la personne qui nous a proposé le sujet de ce mémoire: *M. Kheloui kahina* qui m'a encadré tout au long de cette année d'étude. A travers nos discussions, il nous a apporté une compréhension plus approfondie des divers aspects du sujet pour pouvoir mener à bien ce travail de recherche.

Sommaire

| | |
|---|----|
| INTRODUCTION GÉNÉRALE : | 9 |
| CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES ACIERS INOXYDABLES | 11 |
| 1- Histoire : | 12 |
| 2- Définition : | 14 |
| 3- Principales nuances d'aciers inoxydables : | 14 |
| 3-1- ferritique : | 15 |
| 3-2- martensitique: | 15 |
| 3-3- austénitique : | 15 |
| 3-4- duplex : | 15 |
| 4- Produits en aciers inoxydables: | 15 |
| 5- Structure métallurgique et rôle des éléments d'addition: | 16 |
| 5-1- Le chrome: | 16 |
| 5-2- Le carbone: | 16 |
| 5-3- Autres éléments: | 16 |
| 5-4- Système fer-chrome: | 17 |
| 5-5- Système fer-chrome-nickel: | 18 |
| 5-6- Éléments α -gènes et γ -gènes: | 19 |
| 6- Types d'aciers inoxydables: | 21 |
| 6-1- Les aciers martensitiques : | 22 |
| 6-2- Les aciers ferritiques : | 22 |
| 6-3- Les aciers austénitiques : | 22 |
| 6-4- Les aciers austéno-ferritiques : | 23 |
| 7- Conditions à réunir pour favoriser la résistance à la corrosion: | 23 |
| 8- Mise en œuvre des aciers inoxydables: | 24 |
| 8-1- Problèmes particuliers du travail à chaud : | 24 |
| 8-2- Traitements thermiques : | 25 |

| | |
|---|----|
| 8-3- Formage à froid : | 26 |
| CHAPITRE II :SOUDEGE DES ACIERS INOXYDABLES (TIG) | 31 |
| 1- Procédure d'assemblage ou de transformation des aciers inoxydables : | 32 |
| 2- Les aciers austéno-ferritiques : | 33 |
| 3- Tungstène et Soudage TIG : | 34 |
| 3-1- Tungstène: | 34 |
| 3-2- Soudage TIG: | 36 |
| CHAPITRE III : PARTIE EXPERIMENTALE..... | 47 |
| 1- Introduction : | 48 |
| 2- Matériau d'étude : | 48 |
| 3- Caractérisation métallographique : | 49 |
| 4- Techniques de préparation:..... | 49 |
| 5- Échantillonnage: | 49 |
| 6- Enrobage des échantillons: | 50 |
| 7- Le polissage : | 50 |
| 7-1- Le polissage d'ébauches : | 50 |
| 7-2- Le polissage de finition : | 51 |
| 8- L'attaque chimique : | 51 |
| 9- Microscopie Optique (MO) : | 52 |
| 10- Traitement thermique : | 53 |
| 11- La mesure de dureté vickers : | 57 |
| CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSION | 58 |
| 1- Observations métallographiques: | 59 |
| 1-1- Examen micrographique: | 59 |
| 1-2- Examen de métal de base: | 59 |
| 1-3- Examen du ZAT : | 60 |
| 1-4- Examen de ZF: | 61 |

| | |
|---|----|
| 1-5- Examen de zone de liaison :..... | 62 |
| 1-6- Examen de métal de base: (échantillon 1/800°C) :..... | 63 |
| 1-7- Examen du ZAT : (échantillon 1/800°C) :..... | 63 |
| 1-8- Examen du zone de liaison: (échantillon 1/800°C) : | 64 |
| 1-9- Examen de ZF : (échantillon 1/800°C) :..... | 65 |
| 1-10- Examen de métal de base : (échantillon 2/1000°C) :..... | 65 |
| 1-11- Examen de ZAT: (échantillon 2/1000°C) :..... | 66 |
| 1-12- Examen de zone de liaison : (échantillon 2/1000°C) : | 66 |
| 1-13- Examen de ZF: (échantillon 2/1000°C) :..... | 67 |
| 1-14- Mesure de dureté dans les trois échantillons en appliquant une force de 10kg : 67 | |
| 2- Discussion des résultats :..... | 68 |
| 2-1- Introduction | 68 |
| 2-2- Caractérisation par microscopie optique..... | 69 |
| 2-3- Caractérisation par MO de l'acier inoxydable 316 soudé par TIG..... | 69 |
| 2-4- Caractérisation par MO des aciers après traitements thermique..... | 72 |
| 2-5- Caractérisation mécanique des aciers inoxydable soudé et traité :..... | 75 |
| Conclusion : | 79 |

Listes des figures

| | |
|--|----|
| Figure1.5 : Diagramme de phase fer-chrome. | 17 |
| Figure1.6 : Coupe du diagramme de phase ternaire Fe-Cr-Ni montrant l'évolution du domaine austénitique γ en fonction de la teneur en nickel. | 19 |
| Figure1.7 : Diagramme de Pryce et Andrew. | 20 |
| Figure1.8 : Diagramme de Schaeffler. | 21 |
| Figure 1.9: Diagrammes TTT d'un acier 316 : indice de grosseur du grain ASTM -1 et 3/4 pour l'alliage 1 (recuit pendant 1h et trempé à l'eau) et l'alliage 2 (recuit pendant 1,5h et trempé à l'eau), respectivement | 28 |
| Figure 2.1 : tungstène. | 34 |
| Figure2.2 : T.I.G. Tungsten Inert Gas. | 37 |
| Figure2.3 : Générateur de courant | 38 |
| Le circuit de soudage se compose essentiellement des éléments suivants: | 38 |
| Figure2.4 :Type de courant entre générateur AC et DC | 39 |
| Figure2.5 : Branchement en polarité inversée et en polarité directe | 40 |
| Figure2.6 : La forme d'onde tension de réseau et la forme d'onde tension de soudage. | 40 |
| Figure2.7 : La torche porte-électrode | 41 |
| Figure2.8: Groupe de refroidissement par eau. | 42 |
| Figure2.9: bouteille de gaz protection. | 43 |
| Figure2.10 : exemple de soudage TIG. | 46 |
| Figure2.11 : Graphiques optimisés en fonction des caractéristiques métallurgiques des matériaux. | 46 |
| Figure2.12 : Exemple position horizontale de soudage TIG. | 46 |
| Figure3.1 : acier inoxydable 316 | 49 |
| Figure3.2 : Machine enrobeuse et les échantillons enrobés par la résine. | 50 |
| Figure3.3 : polisseuse. | 51 |
| Figure3.4 : Attack chimique sur l'acier 316. | 52 |
| Figure3.5 : Microscope optique | 53 |
| Figure 3.6 : Diagrammes TTT d'un acier 316 : indice de grosseur du grain ASTM -1 et 3/4 pour l'alliage 1 (recuit pendant 1h et trempé à l'eau) et l'alliage 2 (recuit pendant 1,5h et trempé à l'eau), respectivement | 54 |
| Figure 3.7 : Cinétique de précipitation isotherme des carbures $M_{23}C_6$ dans un acier 316. | 55 |

| | |
|--|----|
| Figure 3.8 : Diagrammes TTT d'un acier 316 déformé à froid: indice de grosseur du grain ASTM -1 et 3/4 pour l'alliage 3 (recuit pendant 1h, trempé à l'eau et 20% de déformation à froid) et l'alliage 4 (recuit pendant 1,5h, trempé à l'eau et 20% de déformation à froid), respectivement | 56 |
| Figure3.9 duromètre..... | 57 |
| Figure4.1: Microstructure du métal de base (316) avec un grossissement de X200. | 59 |
| Figure4.2: Microstructure du ZAT (316) avec un grossissement de X200. | 60 |
| Figure4.3: Microstructure du ZF (316) avec un grossissement de X200. | 61 |
| Figure4.4: Microstructure du ZF (316) avec un grossissement de X200 | 61 |
| Figure4.5: Microstructure du ZF (316) avec un grossissement de X200. | 62 |
| Figure4.6: Microstructure du Zone de liaison (316) avec un grossissement de X200..... | 62 |
| Figure4.7: Microstructure du Métal de base (316) avec un grossissement de X50 | 63 |
| Figure4.8: Microstructure du ZAT(316) avec un grossissement de X100..... | 63 |
| Figure4.9: Microstructure du ZAT (316) avec un grossissement de X50. | 64 |
| Figure4.10: Microstructure du zone de liaison (316) avec un grossissement de X50. | 64 |
| Figure4.11: Microstructure du ZF (316) avec un grossissement de X50. | 65 |
| Figure4.12: Microstructure de métal de base (316) avec un grossissement de X50. | 65 |
| Figure4.13: Microstructure du ZAT(316) avec un grossissement de X50..... | 66 |
| Figure4.14: Microstructure du zone de liaison (316) avec un grossissement de X50. | 66 |
| Figure4.15: Microstructure du ZF(316) avec un grossissement de X50. | 67 |
| Figure 4.16 : Micrographie Optique du métal de base acier inoxydable 316. | 69 |
| Figure4.17: Micrographie optique montrant la croissance épitaxiale dans la région de la soudure (a) et le sens l'orientation des grains solidifié dans la ZF (b) | 71 |
| Figure4.18 : Micrographie optique de l'acier traité à 800°C (a) et agrandissement de la zone fondue (b) | 72 |
| Figure 4.19: Micrographie optique de l'acier traité à 1000°C (a) et agrandissement de la zone fondue (b) | 74 |
| Figure 4.20: Evolution de la microdureté de l'acier 316 soudé et non traité. | 76 |
| Figure 4.21 : Evolution de la microdureté de l'acier soudé et traité à 800°C. | 77 |

Figure 4.22 : Evolution de la microdureté de l'acier soudé et traité à 1000°C.78

INTRODUCTION GÉNÉRALE :

L'intérêt des aciers inoxydables, couramment appelés acier inox ou inox, réside dans leurs nombreuses caractéristiques de résistance mécanique (dureté, résilience, résistance à la déformation). Un avantage majeur de ces aciers et leur résistance à la corrosion et à l'oxydation à chaud, due à la présence en surface de l'alliage d'une couche protectrice de quelques nanomètres d'épaisseur, appelée 'filme passif' major constituant, oxydes et d'hydroxydes de fer et de chrome, leur coût d'élaboration reste relativement modéré, du fait de l'abondance naturelle de minerai de fer.

L'utilisation de ces aciers touche beaucoup : les réalisations de l'ingénieur des plus grandes ou plus petites, vie quotidienne, industries mécaniques, agroalimentaires, chimiques, transports, médecine, chirurgie, les industriels de la construction.

De nos jours, les industriels de la construction métallique portent un intérêt croissant à la caractérisation des diverses hétérogénéités, incluses dans les

structures et liées en partie aux opérations d'assemblage, telles que l'âge. Ce point de liaisons se révèle être tout particulièrement une zone d'hétérogénéité, tant au point de vue microstructural que mécanique.

Le procédé de soudage TIG a été inventé pendant la Seconde Guerre Mondiale pour répondre aux besoins de l'industrie aéronautique Américaine pour une méthode d'assemblage du Magnésium Aluminium. A la fin des années 1930 ; Russel Meredith a utilisé le premier procédé TIG pour le soudage du Magnésium en utilisant une électrode en Tungstène et l'Hélium comme gaz de protection.

Le procédé de soudage TIG (Tungstène Inert Gas) ou aussi connu sous le nom de GTAW (Gas Tungstène Arc Welding) aux États-Unis, est un procédé de soudage très connu ; utilisé dans des applications telles que le domaine aéronautique et naval, industrie pétrolière et pétrochimique, du fait qu'il est soit un procédé associé à des énergies de soudage importantes et de faibles vitesses qu'il 'autant de Flex autant.

C'est le procédé le plus souple de soudage à l'arc car il ne nécessite pas impatientement de métal d'apport pour transmettre la chaleur à la pièce à souder 'confirment au soudage à l'électrode fusible ou enrobée.

La simplicité technologique du dispositif et l'absence de projection en font un procédé de haute qualité facilement automatisable pour des joints de petites dimensions et faibles d'accès.

Depuis peu, scientifiques et industriels s'intéressent au soudage des métaux et alliages de composition chimique différents ce qu'on appelle soudage hétérogène. Un procédé qui suscite beaucoup d'intérêt sur le volet économique que celui des propriétés mécaniques et métallurgiques de la construction.

Ce travail a trait à l'étude de joints soudés à l'aide de procédé de soudage TIG ; l'objectif de cette étude est d'améliorer et de caractériser le cordon de soudure assemblages possibles pour l'acier inoxydable austénitique (316). Plus précisément on cherche, les paramètres mécaniques et structuraux des cordons de soudure. C'est précisément dans ce contexte que se situe notre travail que nous avons organisé de la manière suivante :

Le premier chapitre : Nous détaillons dans ce chapitre les différentes classes d'aciers inoxydables en décrivant la structure du film passif.

Le deuxième chapitre : Nous détaillons dans ce chapitre le soudage des aciers inoxydables par la méthode (TIG) .

Le Troisième chapitre : on trouve la description des différentes techniques expérimentales utilisées dans notre travail..

Le quatrième chapitre : Les résultats obtenus par observation Métallographique.

Il est à noter que les chapitres finissent par des conclusions intermédiaires, qui seront regroupées à la fin du document dans une conclusion générale et on donnera aussi quelques perspectives.

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES ACIERS INOXYDABLES

1- Histoire :

Les premiers alliages de fer et d'acier résistant à la corrosion furent coulés dès l'Antiquité : le pilier de fer de Delhi, érigé sous ordre de Kumarâgupta Ier au ve siècle subsiste encore de nos jours en parfait état. Cependant une distinction doit être faite dans le vocabulaire : ces alliages devaient leur résistance à leur teneur en phosphore, et non en chrome. Il ne s'agissait donc pas d'aciers inoxydables dans le sens que l'on donne actuellement au terme. Dans ces alliages, sous des conditions climatiques favorables, il se forme en surface une couche de passivation d'oxyde de fer et de phosphates qui protège le reste du métal bien mieux qu'une couche de rouille.



Figure 1.1 : usine de fabrication

Les premiers aciers résistants à base de chrome furent développés par le métallurgiste français Pierre Berthier, qui remarqua leur résistance à certains acides et imagina leur application en coutellerie. Cependant, à l'époque, on n'utilisait pas les bas taux en carbone et haut taux en chrome couramment utilisés dans les aciers inoxydables modernes, et les alliages obtenus alors, trop riches en carbone, étaient trop fragiles pour avoir un véritable intérêt.

En 1878, les établissements Jacob Holtzer¹ situés à Unieux (Loire) commencent la production industrielle d'aciers au creuset chromés. Pour autant, seules de meilleures caractéristiques mécaniques sont alors recherchées, la corrosion intéressant peu les métallurgistes. Ainsi, en 1890, à ce sujet, Henry Marion Howe

se contente de rapporter que le chrome est réputé accélérer la rouille du fer.

Dans les années 1890, l'Allemand Hans Goldschmidt développa et breveta un procédé appelé la thermité qui permettait d'obtenir du fer sans carbone. Entre 1904 et 1911, divers chercheurs, notamment le Français Léon Guillet, mirent au point différents alliages que l'on pourrait aujourd'hui considérer comme inoxydables. En 1911, l'Allemand Philip Monnartz mettait en évidence l'influence du taux en chrome des alliages et leur résistance à la corrosion.

Enfin, en 1913, l'Anglais Harry Brearley des laboratoires Brown-Firth (Sheffield, Angleterre), en travaillant sur l'érosion dans les canons d'armes à feu, développa un acier qu'il baptisa rustless (« sans rouille ») : il s'aperçut que des échantillons polis en vue d'examens de laboratoire ne subissaient pas d'oxydation. Cet acier sera ensuite rebaptisé stainless (« sans tache », ou « pur »), ce sera officiellement le premier acier à porter le nom d'« inoxydable » ; Brearley entra dans l'histoire comme leur inventeur. Il s'agissait alors d'un acier inoxydable martensitique (0,24 % en carbone et 12,8 % en chrome). Cependant, d'autres aciers comparables avaient été développés en Allemagne par Eduard Maurer (de) et Benno Strauss (de) qui élaboraient un acier inoxydable austénitique (21 % de chrome et 7 % de nickel) pour Krupp AG. Aux États-Unis, Christian Dantsizen et Frederick Becket lancèrent déjà la fabrication industrielle d'acier inoxydable ferritique. En 1908, Krupp avait déjà construit des navires à coque en acier inoxydable chrome-nickel.

En 1924, William Herbert Hatfield (en), qui succéda à Harry Brearley à la tête des laboratoires Brown-Firth, élaborait l'acier « 18/8 » (18 % en masse de chrome et 8 % en nickel) qui est probablement le représentant le plus utilisé des aciers inoxydables fer-nickel-chrome.

En 1925 est mis au point le Procédé Ugine-Perrin dans les usines savoyardes de la Société d'électrochimie, d'électrometallurgie et des aciéries électriques d'Ugine, future Ugitech, une méthode permettant d'obtenir un acier inoxydable à la fois pur, fiable et bon marché, par agitation des aciers avec des laitiers préalablement fondus, pour obtenir une épuration complète des aciers.

2- Définition :

L'acier inoxydable, couramment appelé acier inox ou inox, est un acier (alliage à base de fer et de carbone) mais comportant dans ce cas moins de 1,2 % de carbone avec plus de 10,5 % de chrome, dont la propriété est d'être peu sensible à la corrosion et de ne pas se dégrader en rouille.

La présence de chrome en solution au-delà de 10,5 % dans la matrice d'un acier provoque la formation d'une couche protectrice d'oxyde de chrome qui lui confère son inoxydabilité. D'autres éléments peuvent être ajoutés, notamment le nickel qui améliore les propriétés mécaniques en général et la ductilité en particulier, ou encore le molybdène ou le titane qui améliorent la stabilité de l'alliage pour des températures autres qu'ambiante, ou encore des éléments à haut point de fusion comme le vanadium et le tungstène accompagné en général d'une augmentation de la teneur en chrome, pour obtenir la résistance aux hautes températures au contact d'une flamme (aciers réfractaires).

L'acier inoxydable est devenu indispensable dans de nombreux domaines : ustensiles de cuisine (malgré sa conductivité thermique dix fois plus faible que celle de l'aluminium), objets usuels, médecine, chirurgie, bâtiment et travaux publics, construction navale, automobile, aéronautique, outillage, industries mécaniques, agroalimentaires, chimiques, transports, etc. Il est entièrement recyclable

3- Principales nuances d'aciers inoxydables :

Pour être classé dans la catégorie inoxydable, un acier doit contenir au moins 10,5 % de chrome (Norme EN 10020).

Principales familles d'aciers inoxydables :

3-1- ferritique :

fer-chrome, carbone < 0,1 %, ferromagnétique (« magnétique »). La nuance la plus courante est l'EN DIN 1.4016 (AISI 430). Le chrome et le molybdène augmentent la résistance à la corrosion. Le titane et le niobium améliorent la soudabilité.

3-2- martensitique:

fer-chrome, carbone > 0,1 %, ferromagnétique (« magnétique »), apte à la trempe.

3-3- austénitique :

fer-chrome-nickel, carbone < 0,1 % (y compris nuance DIN 1.4301 / AISI 304, souvent appelé 18/8 ; 18/10), paramagnétique (« amagnétique ») à l'état de livraison. C'est plus de 65 % de l'utilisation d'acier inoxydable .

3-4- duplex :

fer-chrome-nickel, structure mixte austénitique-ferritique, magnétique (la nuance la plus connue est l'EN DIN 1.4462). Ces aciers présentent en général des caractéristiques mécaniques supérieures et une meilleure résistance à la corrosion que la plupart des nuances austénitiques et ferritiques courantes.

4- Produits en aciers inoxydables:

1-Les principales formes de produits sont :

2-les tôles à chaud et à froid.

3-les tubes ronds, carrés (décoration), rectangulaires (décoration).

4-les barres.

5-les fils.

6-les demi-produits destinés soit à être forgés, soit relaminés.

7-les fibres.

8-les accessoires, la robinetterie, les raccords.

5- Structure métallurgique et rôle des éléments d'addition:

Les éléments d'addition :

5-1- Le chrome:

Les aciers inoxydables sont des aciers auxquels on a ajouté du chrome. Conformément à la norme européenne EN 10088-13, un acier est classé acier inoxydable s'il contient au minimum 10,5 % en masse de chrome et moins de 1,2 % de carbone.

5-2- Le carbone:

La teneur en carbone est limitée à un maximum de 1,2 % en masse afin d'éviter la formation de carbures⁴ (notamment de carbures de chrome qui sont des composés chimiques très stables) qui sont préjudiciables au matériau. Par exemple, le carbure Cr_23C_6 qui peut apparaître dans l'austénite 18-9 a un effet négatif vis-à-vis de la corrosion intergranulaire (appauvrissement très important en chrome aux abords des carbures formés provoquant la perte du caractère d'inoxidabilité par captation du chrome).

5-3- Autres éléments:

-Le nickel favorise la formation de structures homogènes de type austénitique. Il apporte les propriétés de ductilité, de malléabilité et de résilience. Il est à éviter soigneusement dans le domaine du frottement.

-Le manganèse est un substitut du nickel. Certaines séries d'aciers austénitiques ont été développées permettant de faire face aux incertitudes d'approvisionnement du nickel⁶.

-Le molybdène et le cuivre contribuent à la tenue dans la plupart des milieux corrosifs, en particulier ceux qui sont acides, mais aussi dans les solutions phosphoriques, soufrées, etc. Le molybdène augmente la stabilité des films de passivation.

-Le tungstène améliore la tenue aux températures élevées des aciers inoxydables austénitiques.

-Le titane doit être utilisé à une teneur qui dépasse le quadruple de la teneur en carbone. Il évite l'altération des structures métallurgiques lors du travail à chaud, en particulier lors des travaux de soudure où il prend la place du chrome pour former un carbure de titane (TiC) avant que ne se forme le carbure de chrome Cr₂₃C₆ préservant de ce fait le caractère inoxydable de l'acier en évitant l'appauvrissement en chrome de la matrice aux abords des zones carburées.

-Le niobium est un point de fusion beaucoup plus élevé que le titane et présente des propriétés. Il est utilisé dans les métaux d'apport pour le soudage à l'arc électrique en lieu et place du titane qui serait volatilisé pendant le transfert dans l'arc électrique.

-Le silicium joue également un rôle dans la résistance à l'oxydation, notamment vis-à-vis des acides fortement oxydants (acide nitrique concentré ou acide sulfurique concentré chaud).

5-4- Système fer-chrome:

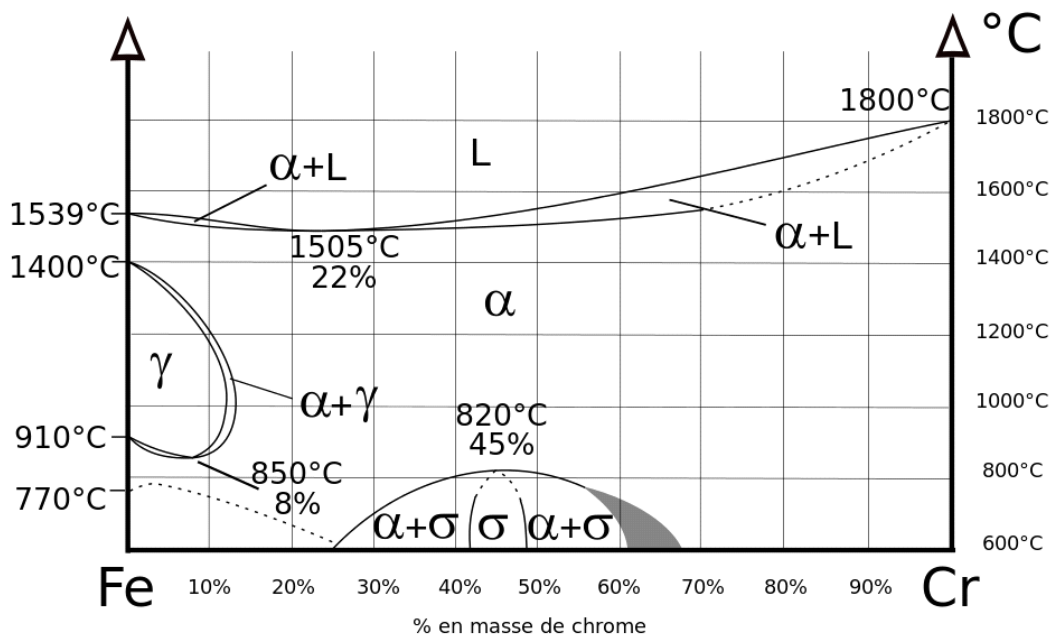


Figure 1.5 : Diagramme de phase fer-chrome.

Le fer pur possède trois formes allotropiques en fonction de la température :

-Jusqu'à 910 °C (point A3) : forme alpha (α), ferrite (cubique centré).

-De 910 à 1 400 °C (point A4) : forme gamma (γ), austénite (cubique à faces centrées) .

-De 1 400 à 1 538 °C (température de fusion) : forme delta (δ), ferrite (cubique centré).

Le chrome est un élément dit alphagène. Il favorise fortement la forme ferritique. Sur le diagramme de phase Fe-Cr, le domaine austénitique est assez réduit et est représenté par un domaine limité appelé boucle gamma.

Pour des teneurs supérieures à 11,5 % de chrome, l'alliage reste ferritique dans toute la plage de température. Il y a disparition de la transformation allotropique α - γ . Entre 10,5 et 11,5 % de chrome, l'alliage est biphasé ferrite + austénite dans certaines plages de température. Il subit une transformation ferrite/austénite pour des teneurs inférieures à 10,5 %.

On notera que le chrome jusqu'à 8 % abaisse la température A3 et se comporte comme un élément gammagène. Ce comportement s'inverse pour des teneurs supérieures à 8 %, point à partir duquel cette température augmente.

Au-delà de 12,7 % de chrome, dans le cadre d'un refroidissement lent, il peut y avoir formation de phase intermétallique sigma (σ) à des températures comprises entre 820 °C et 475 °C. Elle précipite au joint de grain ou dans la matrice ferritique entraînant une fragilité⁹. Une hypertrempe consiste à refroidir rapidement (trempe à l'eau) l'acier au-dessous de 475 °C pour bloquer la formation de phase σ .

5-5- Système fer-chrome-nickel:

Le nickel est à l'opposé du chrome un élément dit gammagène. Il ouvre le domaine austénitique.

Concrètement, l'addition de nickel augmente la taille de la boucle gamma.

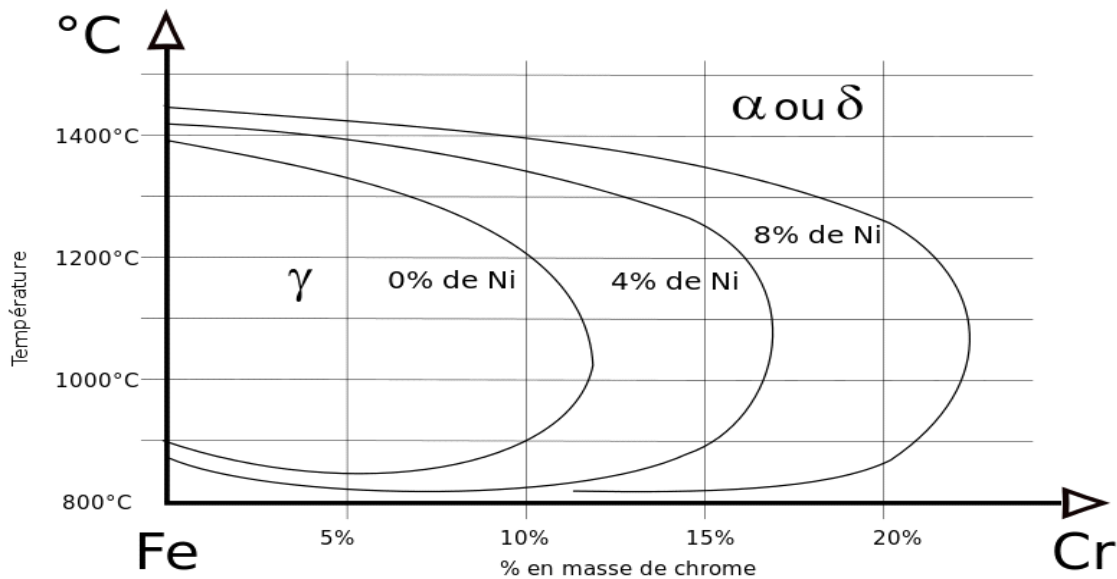


Figure 1.6 : Coupe du diagramme de phase ternaire Fe-Cr-Ni montrant l'évolution du domaine austénitique γ en fonction de la teneur en nickel.

5-6- Éléments α -gènes et γ -gènes:

D'autres éléments ont un rôle alphasgène ou gammagène. Un rôle particulier est tenu par le carbone et l'azote.

Le carbone a un rôle gammagène et rentre donc en « compétition » avec le chrome⁵. En fait plus que le carbone seul, c'est le couple carbone-azote dont il faut tenir compte. Ces deux éléments étant des éléments d'alliage d'insertion contrairement aux autres éléments qui sont des éléments de substitution.

Les éléments alphasgènes sont le chrome, le molybdène, le silicium, le titane, le niobium, le vanadium, le tungstène, l'aluminium et le tantale.

Les éléments gammagènes sont le nickel, le carbone, l'azote, le cobalt et le manganèse. Le manganèse peut avoir un rôle plus complexe.

Plusieurs modèles approximatifs ont été mis au point pour prévoir le comportement de l'alliage en fonction de la composition globale de l'alliage. Les teneurs sont affectées de coefficients établis par expérience afin de tenir compte du poids de chacun des éléments.

Pour les produits laminés, il existe le modèle de Pryce et Andrew donnant les équations suivantes :

$$\text{chrome équivalent} : (\text{Cr})_{\text{eq}} = (\% \text{Cr}) + 3(\% \text{Si}) + (\% \text{Mo})$$

$$\text{nickel équivalent} : (\text{Ni})_{\text{eq}} = (\% \text{Ni}) + 0.5(\% \text{Mn}) + 21(\% \text{C}) + 11,5(\% \text{N}) \cdot 5$$

On remarquera le poids important du carbone et de l'azote.

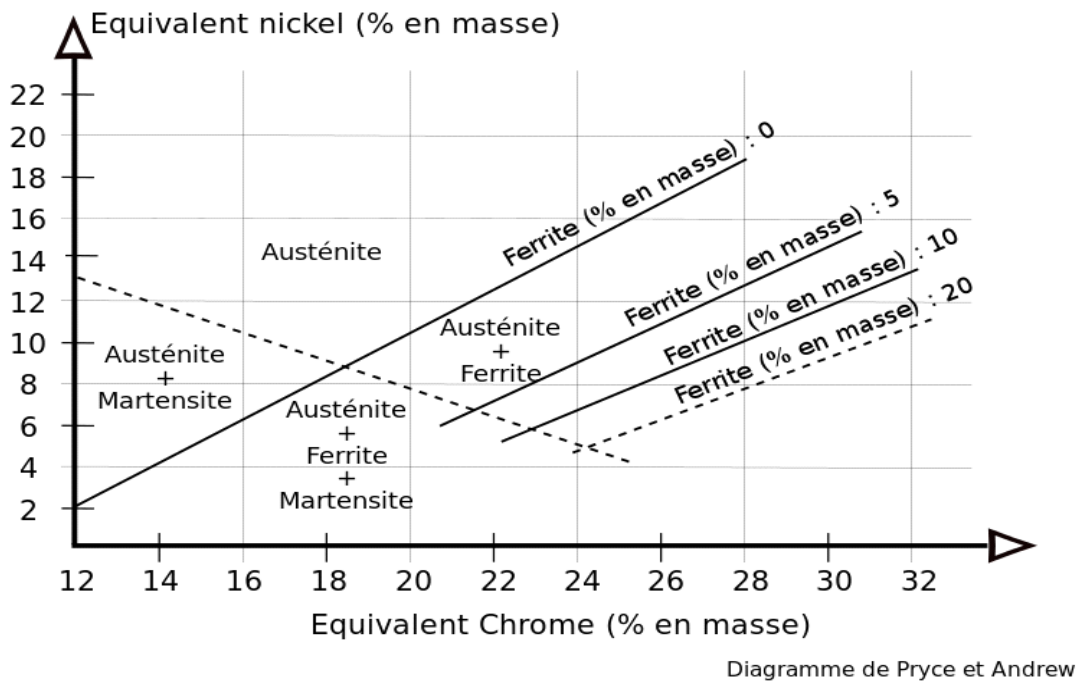


Figure 1.7 : Diagramme de Pryce et Andrew.

Il existe également le modèle de Schaeffler et le modèle de Delong pour les aciers inoxydables à l'état brut de soudage :

$$\text{chrome équivalent} : (\text{Cr})_{\text{eq}} = (\% \text{Cr}) + 1,5(\% \text{Si}) + (\% \text{Mo}) + 0,5(\% \text{Nb})$$

$$\text{nickel équivalent} : (\text{Ni})_{\text{eq}} = (\% \text{Ni}) + 0,5(\% \text{Mn}) + 30(\% \text{C})$$

Dans le modèle de Delong, seule la formule du nickel équivalent diffère du modèle de Schaeffler avec la prise en compte de l'azote :

$$\text{nickel équivalent} : (\text{Ni})_{\text{eq}} = (\% \text{Ni}) + 0,5(\% \text{Mn}) + 30(\% \text{C}) + 30(\% \text{N})$$

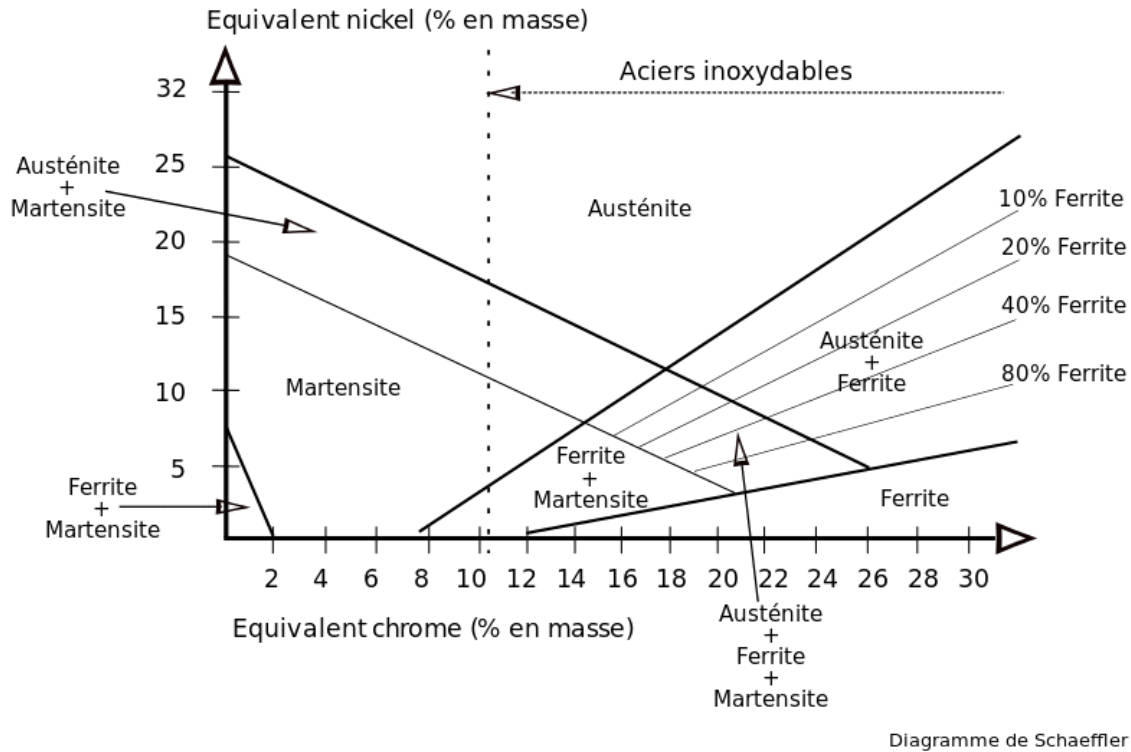


Figure 1.8 : Diagramme de Schaeffler.

6- Types d'aciers inoxydables:

Les aciers au chrome sont ferritiques et magnétiques à l'état adouci. Certains se comportent comme des aciers spéciaux auto-trempants, d'autres ne se trempent que partiellement ou pas du tout. Les aciers au nickel-chrome sont en général austénitiques, ils sont livrés à l'état hypereutecté. Après certaines phases de travail, dans certains cas après soudage, il arrive que ces aciers subissent à nouveau un traitement d'hypertrempe (réchauffage à 1 100 °C environ), pour remettre en solution des composés intermétalliques et/ou chimiques qui auraient pu se former. L'hypertrempe est toujours suivie d'un refroidissement rapide pour traverser très rapidement les zones de températures où il pourrait se former des précipités, comme le carbure de chrome ($Cr_{23}C_6$), ou des phases intermétalliques indésirables. Cette hypereutecté confère à l'acier les propriétés qu'il avait lors de son élaboration.

6-1- Les aciers martensitiques :

Ils sont utilisés lorsque les caractéristiques de résistance mécanique sont importantes. Les plus courants titrent 13 % de chrome avec au moins 0,08 % de carbone. D'autres nuances sont plus chargées en éléments d'addition, avec éventuellement un faible pourcentage de nickel.

Exemples : X20Cr13, X46Cr13, X29CrS13, N690Co (X105CrCoMo18-2).

6-2- Les aciers ferritiques :

Ils ne prennent pas la trempe. On trouve dans cette catégorie des aciers réfractaires à haute teneur en chrome (jusqu'à 27 %), particulièrement intéressants en présence de soufre. Les aciers ferritiques sont parfois utilisés comme barrière de résistance à la corrosion (tôles plaquées, tôles revêtues, protégées [dites « claddées », de cladding, « habillage », « revêtement »]) des parois d'équipements sous pression en acier utilisés dans les industries pétrochimique et chimique. Ces aciers sont souvent utilisés en lieu et place des aciers austénitiques pour la réalisation d'ustensiles de cuisine. Certains aciers ferritiques, intégrant du titane dans leur composition, développent une résistance à la corrosion semblable aux aciers austénitiques.

Exemples : X6Cr17, X6CrMo17-1, X3CrTi17.

6-3- Les aciers austénitiques :

Ce sont de loin les plus nombreux, en raison de leur résistance chimique très élevée, de leur ductilité comparable à celle du cuivre. Les teneurs en éléments d'addition sont d'environ 18 % de chrome et 10 % de nickel. La teneur en carbone est très basse et leur stabilité peut être améliorée par des éléments tels que le titane ou le niobium. De par leur excellente ductilité, ces aciers ont aussi un domaine d'utilisation aux basses températures (jusqu'à moins 200 °C) et sont en compétition avec les alliages légers et l'acier à 9 % de nickel pour la réalisation d'équipements destinés à la cryogénie.

Exemples : X2CrNi18-9, X2CrNiMo17-12-2.

6-4- Les aciers austéno-ferritiques :

Leur solidification se fait d'abord en structure ferritique (ferrite delta) suivie d'une transformation partielle, en phase solide, en structure austénitique, certains (notamment dans le monde du soudage) préfèrent donc l'appellation ferrito-austénitiques. Ils ont des propriétés de résistance à la corrosion intergranulaire ainsi qu'à la corrosion en eau de mer remarquables et présentent, pendant l'essai de traction, un palier élasto-plastique. Ils ont un comportement mécanique semblable aux aciers de construction. Le simple fait de désigner correctement ces aciers permet de tout de suite comprendre qu'un refroidissement lent depuis l'état liquide, pendant le soudage par exemple, permettra à un maximum de phase ferritique de se transformer en phase austénitique et réciproquement, un refroidissement rapide aboutira à un gel de la ferrite laissant peu de possibilités à la transformation austénitique et donc, par voie de conséquence, une sensibilité accrue à la fissuration.

Exemple : X2CrNiN23-4.

La connaissance des types d'acier est essentielle pour les systèmes constitués d'éléments assemblés mécaniquement ou par soudage, la mise en présence de deux aciers inoxydables trop différents dans un électrolyte peut en effet provoquer des phénomènes de corrosion électrochimique très destructeurs.

7- Conditions à réunir pour favoriser la résistance à la corrosion:

Les facteurs favorables à la lutte contre la corrosion sont également applicables aux aciers inoxydables :

-Les surfaces doivent être décapées pour éliminer tous les oxydes résultant du travail à chaud : laminage, forgeage, traitements thermiques, assemblages par soudure, etc. ; le décapage peut être mécanique (meulage) ou chimique (acide fluorhydrique, avec les problèmes d'hygiène, sécurité et environnementaux que cela pose).

-Ne traiter thermiquement que des pièces propres et sèches, sans traces de graisses, de résidus de produits dégraissants, et surtout sans particules ferreuses ; le nettoyage à l'acide nitrique avant traitement est généralement une excellente solution.

-Supprimer les tensions résiduelles résultant d'un écrouissage à froid, en particulier celles qui résultent de l'emboutissage.

-Éviter, lors de la conception des pièces, de créer des zones difficiles à nettoyer.

-Éviter tous les contacts non indispensables entre les pièces d'acier inoxydables et les autres matériaux, métalliques ou non.

-Utiliser des outils (brosse, piquettes, marteaux, disques de meule, forets, etc.) n'ayant servi que sur ce type d'acier (risque de contamination par le fer) .

-Protéger des projections et des poussières métalliques provenant de la mise en œuvre, à proximité, d'aciers non inoxydables (risque de contamination par le fer) ; favoriser le travail en atelier blanc.

-Plus encore pour les aciers inoxydables que pour les autres métaux, l'état de surface doit être particulièrement soigné car il conditionne l'établissement d'un film passivant.

le cas échéant, aider la formation d'un film passif en traitant à l'acide nitrique.

8- Mise en œuvre des aciers inoxydables:

8-1- Problèmes particuliers du travail à chaud :

Par rapport à d'autres matériaux métalliques, les aciers inoxydables possèdent certaines propriétés particulières dont il faut tenir compte lors de la mise en forme :

-Ils réagissent énormément aux températures assez hautes.

-Ils sont très mauvais conducteurs de la chaleur.

-Leur résistance mécanique est élevée, surtout dans le cas des austénitiques (à froid ce sont au contraire les martensitiques les plus résistants).

-Le grain tend à grossir à chaud et ne peut être régénéré que par corroyage.

-Le travail doit être suivi d'un recuit et d'un décapage permettant de profiter de la résistance à la corrosion.

Les pièces massives doivent donc être chauffées lentement jusqu'à environ 800 °C avant d'être portées plus rapidement à la température de travail, qui se situe aux alentours de 1 000 °C. Il faut éviter avant tout la décarburation des aciers martensitiques, le maintien prolongé à haute température des aciers ferritiques et des aciers austénitiques, dont le grain grossit facilement et se révèle difficile ou parfois même impossible à régénérer. Le refroidissement rapide à l'eau, après travail, est souvent préconisé.

ils réagissent énormément aux températures assez hautes ;

ils sont très mauvais conducteurs de la chaleur ;

leur résistance mécanique est élevée, surtout dans le cas des austénitiques (à froid ce sont au contraire les martensitiques les plus résistants) ;

le grain tend à grossir à chaud et ne peut être régénéré que par corroyage ;

le travail doit être suivi d'un recuit et d'un décapage permettant de profiter de la résistance à la corrosion.

Les pièces massives doivent donc être chauffées lentement jusqu'à environ 800 °C avant d'être portées plus rapidement à la température de travail, qui se situe aux alentours de 1 000 °C. Il faut éviter avant tout la décarburation des aciers martensitiques, le maintien prolongé à haute température des aciers ferritiques et des aciers austénitiques, dont le grain grossit facilement et se révèle difficile ou parfois même impossible à régénérer. Le refroidissement rapide à l'eau, après travail, est souvent préconisé.

8-2- Traitements thermiques :

C'est le plus souvent sous forme de tôles ou de tubes que l'on utilise les aciers inoxydables, et dans ce cas on est souvent obligé de pratiquer un recuit d'adoucissement après des opérations telles que l'emboutissage, pour éviter le maintien de contraintes résiduelles trop élevées.

Le dégraissage avant traitement doit être particulièrement soigné, les atmosphères oxydantes sont les plus indiquées et les atmosphères carburantes doivent être proscrites.

Les aciers martensitiques trouvent leur principale utilisation en construction mécanique, sous forme de pièces massives. Pour obtenir la résistance voulue, ils sont généralement trempés puis revenus. L'adoucissement s'impose généralement après l'érouissage résultant du travail à froid. Le revenu abaissant la résistance à la corrosion, il vaut mieux utiliser une nuance moins riche en carbone qui diminue l'intensité de la trempe et permet d'éviter un revenu à trop haute température.

Les aciers ferritiques ne prennent pas la trempe mais il faut souvent les recuire, par exemple entre deux passes d'emboutissage et, dans des cas bien particuliers et après avis du producteur de l'acier, après soudure. Un trop long maintien à température élevée engendre une certaine fragilité par suite du grossissement du grain.

Les aciers austénitiques et austéno-ferritiques sont adoucis par un traitement à haute température, de 900 °C jusqu'à 1 150 °C, suivi d'un refroidissement aussi rapide que possible. La résistance à la corrosion, particulièrement à sa forme intergranulaire, nécessite de pratiquer autant que possible un traitement d'hypertrempe.

La détente des tensions internes peut se faire à température relativement basse, environ 400 °C ou 450 °C.

Les aciers inoxydables à durcissement structural nécessitent des traitements particuliers selon les nuances.

8-3- Formage à froid :

Toutes les techniques habituelles du travail à froid sont applicables aux aciers inoxydables et donc aux pièces obtenues à partir de tôles ou de fils que l'on peut trouver dans d'innombrables objets d'usage courant.

Les aciers inoxydables sont relativement durs et cette dureté s'élève par érouissage, au fur et à mesure qu'on les déforme. Ce phénomène est particulièrement marqué pour les aciers austénitiques. Les aciers ferritiques

s'écrouissent moins et l'allongement qu'on peut leur imposer est plus faible.

Le « retour élastique » après formage est beaucoup plus grand que pour les aciers doux « ordinaires ».

La lubrification entre les pièces en cours de formage et les outils est essentielle et ne pose pas de problèmes particuliers pour la plupart des opérations. Toutefois, pour les pièces à caractère décoratif, il faut faire attention à la formation de défauts superficiels à la suite d'un grippage intempestif. L'emploi d'outils en acier trempé, en fonte grise à graphite lamellaire (GJL type « meehanite ») ou encore en cupro-aluminium, ainsi que les protections par des vernis pelables ou des feuilles plastiques constituent souvent une bonne solution.

L'écrouissage diminue la résistance à la corrosion et crée parfois un magnétisme résiduel par suite de la formation de martensite (dite « martensite d'écrouissage ») dans la famille des austénitiques. Un recuit permet de restaurer les structures.

Le pliage à la presse ou à la molette ne présente pas de difficulté particulière.

L'emboutissage nécessite des machines deux fois plus puissantes que celles qui servent pour l'acier doux. La pression exercée par les serre-flans doit être suffisante pour éviter les plissements mais pas trop pour éviter les déchirures. Les matrices et poinçons en fontes alliées au nickel-chrome donnent les meilleurs résultats, les feuilles minces peuvent être conformées dans des matrices en alliage cuivre-zinc. Les congés doivent avoir un rayon ni trop petit, ni trop grand, pour éviter à la fois un écrouissage excessif et les plissements, on prend en général entre 5 et 10 fois l'épaisseur des flans. La lubrification s'effectue avec tous les lubrifiants classiques, solutions savonneuses, huiles solubles ou non, avec dans les cas difficiles des ajouts de lubrifiants solides ou de matières chimiquement actives : plomb, talc, graphite, bisulfure de molybdène, huiles sulfurées ou sulfochlorées, additifs phosphorés, etc. Les recuits se font de préférence en atmosphère oxydante et autant que possible aussitôt après l'emboutissage.

Le repoussage ne pose pas de problème particulier, les précautions à prendre sont les mêmes que pour l'emboutissage, les meilleurs outils sont en acier cémenté.

La structure austénitique des aciers inoxydables étant une structure métastable obtenue par hypertrempe, une forte proportion des éléments d'alliage est alors en sursaturation dans la matrice. Il s'en suit, lors d'un recuit ou d'un maintien en température, que ces éléments solutés tendent à précipiter. Les éléments Fe, Cr, Mo, N, et C sont les principaux constituants des précipités ainsi que Ti pour la nuance stabilisée au titane. Les processus de précipitation se produisent sur un large domaine de température et de nombreuses phases peuvent apparaître pour un acier 316, (Figure 1.9) Les précipités formés sont principalement des carbures de chrome $M_{23}C_6$ suivis par des phases intermétalliques (phases σ , χ et de Laves) à plus haute température et long temps de maintien. Une augmentation de la température d'hypertrempe engendre un décalage du diagramme TTT (Temps-Température-Transformation) vers des temps de précipitation plus courts.

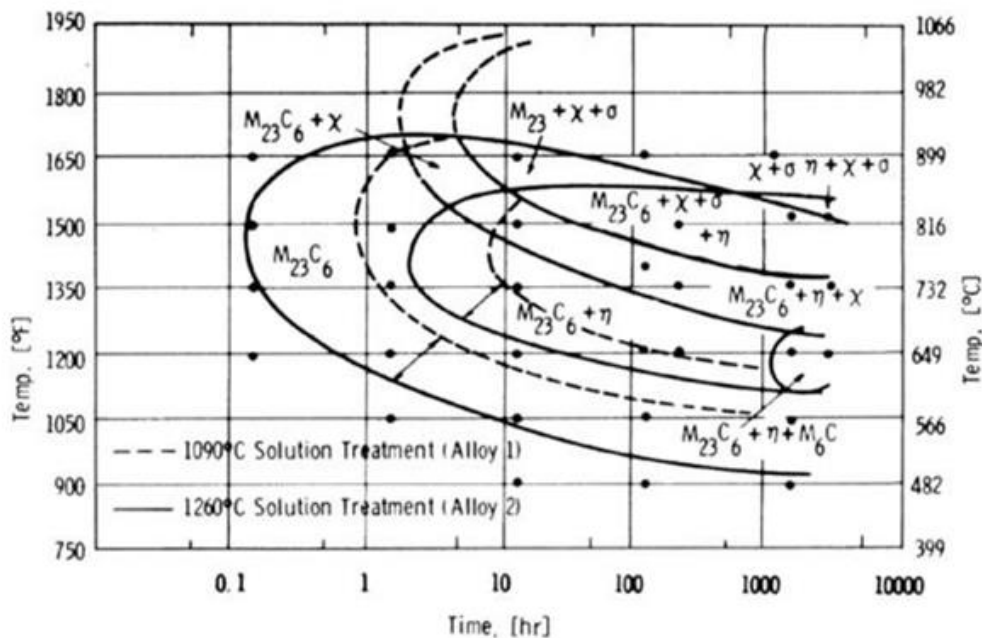


Figure 1.9: Diagrammes TTT d'un acier 316 : indice de grosseur du grain ASTM -1 et 3/4 pour l'alliage 1 (recuit pendant 1h et trempé à l'eau) et l'alliage 2 (recuit pendant 1,5h et trempé à l'eau), respectivement .

Le carbure $M_{23}C_6$ (M, atome métallique et C, carbone) est le principal carbure de tous les aciers inoxydables austénitiques exceptées les nuances avec des ajouts de titane et de niobium. Sa présence est souvent associée à des risques de déchromisation locale de la matrice s'accompagnant d'une perte d'inoxidabilité et d'une sensibilité des joints de grains, l'ensemble pouvant donner finalement lieu au phénomène de corrosion inter granulaire . L'utilisation d'une nuance bas carbone, l'acier 316L, permet de réduire efficacement l'apparition de ce carbure.

La composition chimique d'un carbure $M_{23}C_6$ dans un 316L après un vieillissement de 1500h à 900°C est $(\text{Cr}_{16}\text{Fe}_5\text{Mo}_2)\text{C}_6$. La séquence de précipitation des carbures de chrome est la suivante : joint de grains, parois de macles incohérentes puis cohérentes et enfin dans les grains pour des températures comprises entre 540 et 840°C , Lorsque de la ferrite se présente dans l'austénite, la précipitation de ces carbures débute initialement aux interfaces α/γ étant donné que la diffusion des éléments d'alliages est plus rapide dans la ferrite que dans l'austénite, (Une inclusion non métallique peut également être un site favorable pour la germination des carbures de chrome. La cinétique de précipitation de ce carbure est contrôlée par la vitesse de diffusion du chrome dans le fer qui est très rapide dans la gamme de température $600-900^{\circ}\text{C}$.

La **phase Sigma (σ)** est un intermétallique de composition nominale FeCr qui est généralement étendu à $(\text{FeNi})_x(\text{CrMo})_y$. La précipitation de la phase σ est limitée par la diffusion des éléments d'alliage et nécessite des interfaces à hautes énergies. Cette phase se forme d'abord aux joints de grains triples, puis aux joints simples et, seulement après des durées élevées, aux parois de macles et enfin sur les inclusions intragranulaires de type oxyde Le mécanisme de germination de cette phase est sujet à controverse en ce qui concerne le rôle de la ferrite δ et du carbure $M_{23}C_6$. Certains auteurs montrent que la phase σ peut se former à partir des carbures $M_{23}C_6$ et d'autres la trouvent indépendamment de celle-ci .Les auteurs sont néanmoins d'accord sur le fait que la ferrite δ résiduelle, héritée des hautes températures, est un site favorable pour la précipitation de la phase σ .

La **phase Chi (χ)** est un intermétallique mineur des aciers inoxydables au molybdène, observé aux alentours de 750°C et pour des durées élevées. Sa composition nominale est $\text{Fe}_{36}\text{Cr}_{12}\text{Mo}_{10}$ mais cette phase tolère de larges variations de composition, le nickel pouvant se substituer au fer. La composition de la phase χ dans un acier 316L est $(\text{FeNi})_{36}\text{Cr}_{18}\text{Mo}_4$. Les sites de germination de la phase χ sont tout d'abord les joints de grains, les parois de macles et, occasionnellement, dans les grains sur les dislocations. Il apparaît que cette phase peut fréquemment croître depuis les carbures M_{23}C_6 qui se décomposent après de longs maintiens à haute température.

La **phase de Laves (η)** est également un intermétallique mineur des aciers inoxydables au molybdène, de composition nominale Fe_2Mo .

Le comprend une étape de travail à froid,.Le travail à froid accélère considérablement la cinétique de précipitation pour les carbures (M_{23}C_6) et la phase σ . Selon les auteurs, cet effet est attribué au travail à froid lui-même par l'augmentation du nombre de sites de germination (dislocations et fautes d'empilement) ou à la recristallisation se produisant inévitablement lors du traitement thermique Le nombre de particules de la phase σ augmente très rapidement après la recristallisation du matériau. Aucune précipitation particulière n'a cependant été observée dans des tôles en acier 316L puisqu'après le laminage à froid, l'hypertrempe est réalisée à haute température (1030-1110°C) et les vitesses de refroidissement sont très rapides.procédé de fabrication de l'acier austénitique est un facteur important jouant sur la cinétique de précipitation des carbures (M_{23}C_6) et des phases intermétalliques, notamment lorsque celui-ci .

CHAPITRE II :SOUDAGE DES ACIERS INOXYDABLES (TIG)

1- Procédure d'assemblage ou de transformation des aciers inoxydables :

Les procédés de soudage existants restent valables dans l'ensemble ; on recherche naturellement des soudures saines, sans porosités, dotées d'une bonne résistance mécanique, mais ici il faut en outre qu'elles conservent les qualités de résistance à la corrosion qui sont celles des matériaux de base.

Avant de procéder au soudage d'un acier inoxydable, il est extrêmement important de nettoyer convenablement les bords à souder y compris les abords (sur une zone qui pourrait atteindre une température supérieure à 400 °C) de toutes traces de graisse, de dépôts de carbone (traçage au crayon mine) ou autres impuretés de façon à éviter la formation de carbures du genre Cr₂₃C₆ ce qui provoquerait un fort appauvrissement en chrome (de l'ordre de 95 %) et donc la perte d'inoxidabilité de ces zones appauvries. Une très bonne méthode de nettoyage consiste à utiliser un jet de vapeur surchauffée. Les mêmes précautions sont à prendre lors du coupage thermique (plasma, LASER) et les traitements thermiques.

En principe les aciers inoxydables se travaillent dans des ateliers dit « blancs », c'est-à-dire présentant une propreté accrue et l'absence de matière pouvant polluer l'acier inoxydable. Dans les cas où la propreté doit être poussée (aviation, spatial, alimentaire, chimie, pharmacie...), l'accès à l'atelier se fait par sas et l'atmosphère est sur pressurisée.

La propriété de la couche d'oxyde ne doit pas faire oublier que le chrome est oxydable et donc de la nécessité de protéger le bain de fusion de l'action de l'oxygène par une atmosphère inerte qui peut être selon le cas, de l'argon ou de l'hélium ou de l'azote voire le vide, dans des procédés de soudage sans laitier comme le TIG, le MIG, le A-TIG, le plasma, le laser, le faisceau d'électron...

Les aciers martensitiques, en raison de leur haute teneur en carbone, se prêtent mal au soudage homogène (problème de rupture fragile en 1^{re} passe) et de fissuration à froid par conjugaison des trois facteurs : présence de structures fragiles, effet de l'hydrogène et apparition de contraintes) ; à chaque fois que possible préconiser le soudage hétérogène avec produit d'apport austénitique.

Les aciers ferritiques tendent à devenir fragiles lorsqu'ils sont soudés en homogène et devraient être immédiatement suivi d'un traitement d'hypertrempe (remise en solution des carbures et des composés intermétalliques), ce qui n'est pas toujours réalisable. Lorsque rien ne s'y oppose (problème de corrosion galvanique par exemple) ou qu'il n'y a pas de contre-indication avec la destinée de l'équipement fabriqué, il est préconisé de souder en hétérogène avec un produit d'apport austénitique en utilisant de faibles énergies de soudage pour éviter la formation de zones à gros grains fragiles à basse température.

Les aciers austénitiques sont les plus aptes au soudage. Le métal d'apport et les paramètres de soudage doivent être choisis avec soin afin que le joint soudé conserve les propriétés chimiques et mécaniques de l'acier de base.

2- Les aciers austéno-ferritiques :

On a toujours intérêt à privilégier les méthodes qui limitent dans le temps et en volume la fusion du métal : le soudage par résistance (par points, à la molette, par étincelage) donne d'excellents résultats et il ne faut pas oublier le brasage, qui ne provoque aucune fusion du métal de base. Le brasage diffusion sous vide donne d'excellents résultats pour l'assemblage de pièces usinées relativement petites et aux profils complexes (pièces d'horlogerie, micro-moteurs, prothèses, instrumentation...). Les brasures à l'argent donnent des joints très résistants mais le brasage au cuivre, à l'étain et, par voie de conséquence le soudo-brasage au laiton sont formellement proscrits car ils provoquent une décohésion granulaire et la ruine de l'assemblage.

Le meilleur moyen pour souder les aciers inoxydables, lorsque c'est possible, est le soudage avec métal d'apport austénitique. Tous les procédés traditionnels sont utilisables sauf le chalumeau : soudage à l'arc à l'électrode enrobée, le soudage à l'arc submergé, les procédés sous atmosphère inerte comme le TIG et le MIG, le soudage plasma. Le flux d'argon ou d'hélium autour de l'arc électrique empêche l'oxydation du bain de fusion ainsi que pendant le transfert du métal d'apport. Le chalumeau ne doit pas être utilisé parce que le carbone contenu dans la flamme pénètre le métal fondu et le rend cassant. Le chalumeau n'est utilisable que pour braser, donc sans fondre l'inox

3- Tungstène et Soudage TIG :

3-1- Tungstène:

3-1-1- Caractéristiques notables:

Le tungstène pur est un métal dur de couleur allant du gris acier au blanc étain. On peut le couper à l'aide d'une scie à métaux lorsqu'il est très pur, mais il est cassant et difficile à travailler lorsqu'il est impur, et on le travaille normalement par forgeage, extrusion, ou étirement. Cet élément a le plus haut point de fusion (3 422 °C) de tous les métaux, la plus faible pression de vapeur et la plus grande résistance à la traction de tous les métaux à une température supérieure à 1 650 °C, son module d'Young est de 406 GPa. Du fait de sa très haute température de fusion, le tungstène n'est pas fondu mais fritté à haute température ainsi que certains de ses composés comme le carbure de tungstène . Sa résistance à la corrosion est excellente et il ne peut être que légèrement attaqué par les acides minéraux. Le tungstène métallique forme une couche d'oxyde protecteur lorsqu'il est exposé à l'air. Lorsqu'on l'ajoute en faible quantité aux alliages d'acier, il en augmente la dureté.



Figure 2.1 : tungstène

3-1-2- Histoire:

Le premier à avoir supposé l'existence du tungstène (du suédois tung sten signifiant « lourde pierre ») est Peter Woulfe, en 1778, alors qu'il examinait de la wolframite.

Il détermina alors que ce minéral devait contenir une substance inconnue. En 1781, Carl Wilhelm Scheele établit qu'un nouvel acide pouvait être formé à partir du tungsténite. Scheele et Berman suggérèrent qu'il devait être possible d'obtenir un nouveau métal en réduisant cet acide. Les frères José et Fausto Elhuyar découvrirent, en 1783, un nouvel acide dérivé de la wolframite identique à l'acide tungstique. En Espagne, un peu plus tard la même année, les deux frères réussirent à isoler le tungstène en réduisant l'acide avec du charbon. On leur attribua la découverte de l'élément.

3-1-3- Applications:

Le tungstène connaît un grand nombre d'utilisations, la plus courante étant sous forme de carbure de tungstène (WC) et de sous-carbure de tungstène (W₂C), qui sert à la fabrication des pièces d'usure dans la métallurgie, l'industrie minière et pétrolière. On se sert du tungstène pour la fabrication des filaments des ampoules électriques et des postes de télévision, ainsi que dans celle des électrodes, les très fins filaments que l'on peut produire avec ce métal ayant un très haut point de fusion.

Autres utilisations :

- Son point de fusion très élevé le rend particulièrement adéquat pour les applications spatiales et celles qui demandent l'utilisation de très hautes températures.

- La dureté et la densité de ce métal le rendent idéal pour faire des alliages de métaux utilisés dans l'armement, les puits de chaleur, ainsi que comme poids et contre-poids.

- Les pièces d'usure utilisées, par exemple dans les outils à haute vitesse, utilisent souvent des alliages de tungstène et d'acier pouvant contenir jusqu'à 18 % de tungstène.

- Des composés du tungstène sont utilisés comme catalyseur, pigment inorganique. Le disulfure de tungstène est utilisé comme lubrifiant stable au-dessus de 500 °C.

- Le tungstate de sodium (numéro CAS : 10213-10-2) fait partie du réactif de Folin Denis.

- Étant donné que son coefficient de dilatation est équivalent à celui du verre borosilicate, il est utilisé pour faire des collages verre sur métal.

- Des superalliages contenant du tungstène sont utilisés pour faire des pales de turbine, des outils en acier, ainsi que des plaquages.

- Il est utilisé comme électrode réfractaire dans le soudage TIG.

- Les contacts d'arc de disjoncteurs à haute tension sont aussi partiellement constitués de tungstène afin de supporter la haute température d'un arc électrique.
- DIME (Dense Inert Metal Explosive), nouvel armement très performant pour tuer un être humain tout en causant des dégâts dans un rayon très limité de quelques mètres.
- Le fabricant de raquettes de tennis français Babolat l'utilise désormais dans sa nouvelle gamme de raquettes "GT" (pour Graphite/Tungstène). L'ajout de tungstène au graphite à quelques endroits stratégiques permet d'améliorer la stabilité de la raquette

3-2- Soudage TIG:

3-2-1- Introduction au soudage TIG :

Le soudage à l'arc protégé par le gaz inerte de tungstène est activé par le tungstène pur ou le tungstène (lanthanum de tungstène de thorium, tungstène de cérium, zirconium, tungstène, tungstène) de gaz inerte de soudage à l'arc protégé par le gaz inerte, en utilisant l'arc entre l'électrode de tungstène et la pièce de travail pour faire fondre le métal et la formation de soudures. Pendant le processus de soudage, le tungstène fond et n'agit que comme électrode. En même temps, il est protégé par de l'argon ou de l'hélium par la buse de la torche. Vous pouvez également ajouter un autre métal au besoin. Dans le monde, il est appelé tungstène inerte gaz blindé arc de soudage.

Les principaux avantages du soudage à l'arc protégé par le gaz inerte de tungstène peuvent être une large gamme de matériaux de soudage de grande taille. Plus de 0,6 mm et pièces de travail, y compris les matériaux d'épaisseur, y compris l'acier en alliage, l'aluminium, le magnésium, le cuivre et ses alliages, la fonte grise, le séchage ordinaire, divers cuivre, nickel, argent, titane, plomb. Les principales zones d'application sont le soudage de pièces minces et moyennes d'épaisseur, qui sont utilisés comme soudures de racine dans les sections épaisses.

Soudage manuel et soudage automatique de 0,5 ~ 4,0 mm d'épaisseur en acier inoxydable, le plus couramment utilisé est le soudage à l'arc protégé au gaz inerte tungstène. Le soudage à l'arc protégé au gaz inerte de tungstène est également utilisé pour le soudage de la partie épaisse du passage racine, le soudage est principalement utilisé pour le soudage.

DC tungstène antesten gaz protégé arc de soudage arc source de chaleur, la tension de travail est de 10 ~ 15 v, mais le courant 300, la pièce est l'anode, l'électrode de tungstène du pistolet de soudage comme la cathode.

Habituellement un argon de gaz inerte. Le gaz inerte passe à travers le pistolet de soudage pour former un bouclier dans la piscine en fusion de soudage à arc. Augmenter l'apport de chaleur, ajouter habituellement 5% d'hydrogène et d'argon. Cependant, dans le soudage de l'acier inoxydable ferritique, il n'y a pas d'hydrogénation dans l'argon. La consommation de gaz naturel est d'environ 8 ~ 10 litres par minute. Dans le processus de soudage, en plus de la meilleure couture de soudage soufflant du pistolet de soudage sous gaz inerte pour protéger l'arrière de la couture de soudage.

Si nécessaire, la piscine de soudure peut être remplie et composée du même fil soudé matériel austéritique. Lors du soudage de l'acier inoxydable ferritique, le remplissage de type 316 est habituellement utilisé.

Le soudage à l'arc protégé par le gaz est une méthode de soudage à l'arc utilisant le gaz comme milieu de protection. Ses avantages sont une bonne visibilité de l'arc et de la piscine en fusion, un fonctionnement facile, et peu ou pas d'enlèvement des scories après soudure. Mais soyez particulièrement à l'épreuve du vent lorsque vous travaillez à l'extérieur.

Selon le processus de fusion de l'électrode, il peut être divisé en gaz non-fusion au gaz blindé de soudage (tungstène) de soudage au gaz et de gaz en fusion au gaz de soudage protégé. Le premier comprend le soudage protégé au gaz inerte de tungstène, le soudage à l'arc plasmatisé et l'hydrogène atomique. Le courant de soudage à l'hydrogène atomique a été rarement utilisé dans la production; le soudage à l'arc plasma sera dans le chapitre suivant, le contenu de ce chapitre est l'histoire limitée de l'arc de tungstène de gaz inerte soudage.

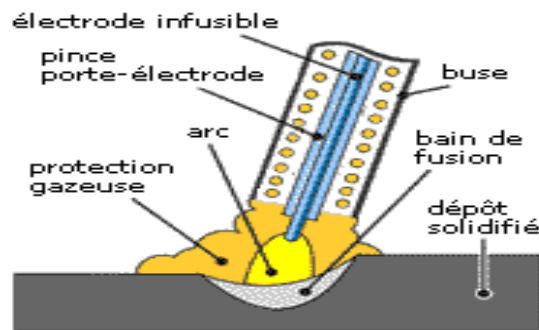


Figure 2.2 : T.I.G. Tungsten Inert Gas

3-2-2- Le circuit de soudage TIG :

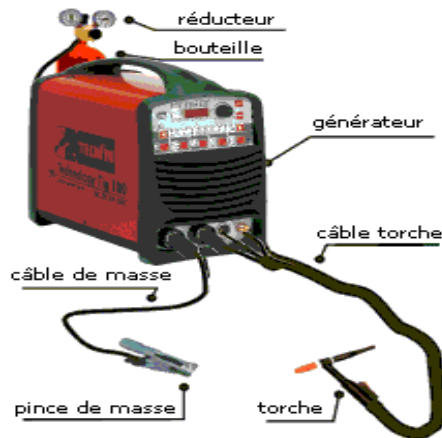


Figure2.3 : Générateur de courant

Le circuit de soudage se compose essentiellement des éléments suivants:

1. Générateur de courant.
2. Torche porte-électrode de tungstène avec faisceau câbles.
3. Électrode.
4. Bouteille de gaz avec circuit sous pression.
5. Pince avec câble de masse.
6. Groupe de refroidissement par eau.

3-2-3- Générateur de courant:

Le générateur de courant a pour fonction d'alimenter l'arc électrique se créant entre le matériel de base et l'électrode de tungstène au moyen de la sortie d'une quantité de courant suffisant à le maintenir allumé.

À l'intérieur est généralement prévu un dispositif de régulation du courant de soudage de type mécanique (dérivation mécanique) ou électronique (système à thyristors ou onduleur).

On peut identifier deux catégories d'appartenance différentes:

a) Générateur de courant alternatif CA (alternating current):

Le courant/tension en sortie du générateur assume la forme type d'une onde carrée dont la polarité change à intervalles réguliers, avec une fréquence allant de 20 à 200 cycles par seconde (Hertz) ou d'avantage en fonction du type de générateur utilisé. Cette dernière est obtenue au moyen d'un ou plusieurs dispositifs ayant pour fonction de transformer le courant/tension secteur de type sinusoïdal en un courant/tension de type alternatif de soudage adéquat.

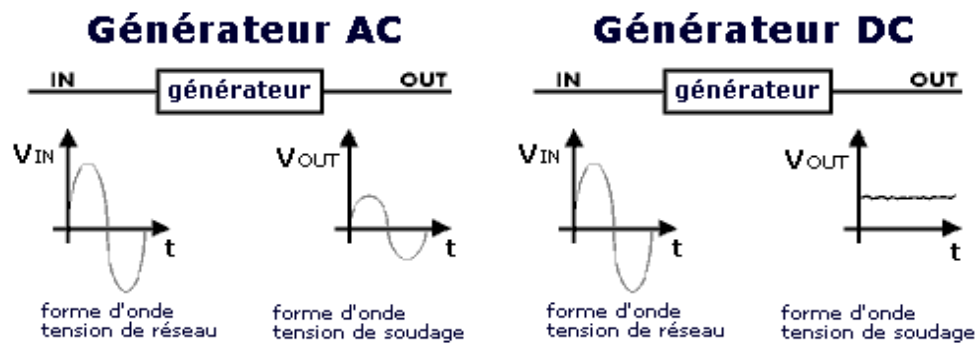


Figure2.4 :Type de courant entre générateur AC et DC

b) Générateur de courant continu CC (direct current):

Le courant en sortie du générateur présente une forme d'onde continue obtenue au moyen des dispositifs permettant la conversion du courant/tension de type alternatif à continu.

Dans l'hypothèse où le circuit de soudage est composé d'un générateur de courant continu (CC), une classification supplémentaire peut être introduite en fonction du mode de connexion des pôles du courant de soudage au matériel à souder ou de la forme d'onde du courant de soudage:

c) Courant continu avec connexion en polarité directe:

Avec la polarité directe, la torche et son câble sont connectés au pôle négatif, et le matériel à souder au pôle positif de la source d'alimentation; dans ce cas, les électrons fluent de l'électrode vers la pièce et provoquent la fusion de cette dernière.

Il s'agit du type de courant le plus utilisé avec le système TIG et garantissant une bonne qualité de soudage avec la quasi-totalité de métaux et alliages courant, à l'exception de l'aluminium. Le courant continu à polarité directe produit un bain de fusion étroit et profond, ainsi qu'une pénétration radicalement supérieure à celle pouvant être obtenue avec la polarité inverse.

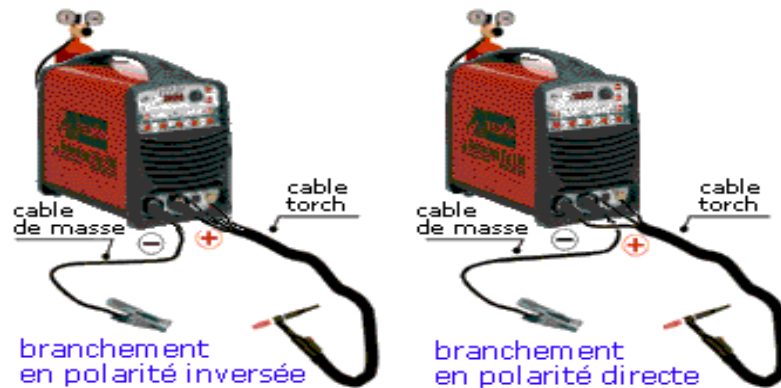


Figure 2.5 : Branchement en polarité inversée et en polarité directe

d) Courant continu avec connexion en polarité inverse:

Avec cette polarité, la torche et son câble sont connectés au pôle positif, et la pièce au pôle négatif de la machine d'alimentation.

Ce type d'alimentation n'est que rarement utilisée car elle produit un bain plat avec une pénétration réduite. La polarité inverse entraîne un chauffage excessif de l'électrode et, pour éviter que cette dernière ne grille, il est nécessaire d'utiliser des intensités de courant plutôt réduites, ce qui justifie son utilisation limitée.

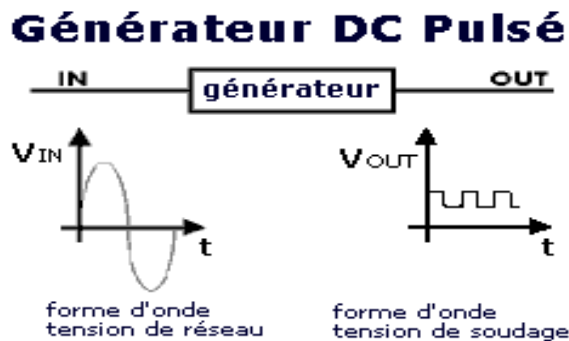


Figure 2.6 : La forme d'onde tension de réseau et la forme d'onde tension de soudage

Il existe une autre famille de générateurs, désignés comme générateurs de courant continu indépendamment de la polarité de la connexion, et plus précisément comme générateurs de courant continu modulé ou pulsé.

Le générateur de courant modulé est un générateur à courant continu équipé de dispositifs spécifiques permettant de varier l'amplitude du courant de soudage. Le courant modulé ou pulsé s'obtient en superposant au courant continu un second composant, généralement à ondes carrées, produisant une pulsation périodique de l'arc. Ce système permet d'obtenir un cordon de soudage formé d'une superposition continue de points de soudage et formant, l'un après l'autre, un cordon unique. Ce système est en particulier utilisé en cas d'épaisseurs réduites exigeant de contrôler l'apport de chaleur pour éviter toute perforation de la pièce à souder sans compromettre la pénétrabilité du soudage.

3-2-4- Torche porte-électrode de tungstène avec faisceau câbles:

La torche porte-électrode est un dispositif englobant l'électrode de tungstène, et est connectée à des câbles branchés au générateur ayant pour fonction de l'alimenter électriquement et d'en convoier le gaz de protection.

En fonction du type d'utilisation nécessaire, il existe des torches à refroidissement naturel, au moyen d'un gaz de protection et en cas de nécessité de basses intensités de courant, et des torches à refroidissement à eau en cas de courants élevés (200 - 500 A) et de soudages fréquents.



Figure2.7 : La torche porte-électrode

3-2-5- Baguette d'apport:

L'épaisseur du matériel, le type de raccord et les caractéristiques de soudage nécessaires

influent sur la nécessité d'utiliser ou non un métal d'apport à ajouter au bain. L'ajout du métal d'apport au soudage manuel s'effectue en immergeant une baguette de matériau dans la zone de l'arc, sur le côté du bain de fusion.

Le matériau d'apport est très souvent similaire au métal de base et est fréquemment additionné d'une quantité réduite de désoxydants ou d'autres éléments permettant d'améliorer les propriétés de la zone fondue.

3-2-6- Bouteille de gaz avec circuit de pression:

La bouteille de gaz avec circuit de pression se compose comme suit:

- Une bouteille contenant le ou les gaz de protection.
- Un manomètre utilisé pour signaler la quantité de gaz présent à l'intérieur de la bouteille.
- Un réducteur de pression.
- Une électrovanne, si la torche est équipée d'un poussoir d'amorçage de commande permettant l'ouverture et la fermeture du débit de gaz en fonction des nécessités de l'opérateur.

3-2-7- Pince avec câble de masse:

La pince avec câble de masse permet la connexion électrique entre le générateur de courant et le matériel de base à souder. Le câble doit avoir une section et une longueur adaptées à l'ampérage maximal de la source de soudage.

3-2-8- Groupe de refroidissement par eau:

Le groupe de refroidissement par eau est un dispositif utilisé pour le refroidissement de la torche lorsque cette dernière est refroidie à eau, pour éviter toute surchauffe en cas de courants de soudage élevés. Cet appareil permet, au moyen d'une pompe, une circulation constante de l'eau dans la torche et, au moyen d'un système de refroidissement, le contrôle des sur températures.



Figure2.8: Groupe de refroidissement par eau

3-2-9- Gaz de protection:

La fonction principale du gaz de protection est de le substituer à l'air à proximité du bain de fusion, de l'électrode et de l'extrémité de l'éventuelle baguette d'apport, pour éviter tout risque de contamination des agents nocifs présents dans l'atmosphère.

Les caractéristiques physiques et chimiques du gaz de protection peuvent avoir des influences variées sur le soudage en fonction des types de métal. Les gaz de protection utilisés pour le soudage TIG sont les suivants: argon, hélium, mélanges argon-hélium et mélanges argon-hydrogène.

Il est dans tous les cas essentiel que ces gaz soient purs, des taux d'impuretés, même infimes, risquant de compromettre la qualité du soudage et de le rendre inacceptable.

Durant le soudage utilisant l'argon comme gaz de protection, l'arc est relativement stable mais le bain est moins chaud; il en découle que ce gaz est indiqué pour un soudage sur des épaisseurs réduites.

Il convient de remarquer que l'argon est un gaz largement utilisé du fait de son coût bien inférieur à celui de l'hélium; ce facteur se révèle décisif dans le choix du gaz de protection.

L'arc en hélium développe une chaleur supérieure à celui avec l'argon; son utilisation est donc conseillée pour le soudage de matériaux présentant une conductibilité thermique élevée car elle permet une vitesse de soudage supérieure.

L'hélium étant plus léger que l'air, il est indispensable de l'utiliser en quantité supérieure à l'argon pour une protection adéquate du bain.

Les mélanges argon et hélium sont utilisés pour obtenir des gaz de protection aux caractéristiques intermédiaires.



Figure2.9: bouteille de gaz protection.

3-2-10- Électrodes fixes:

Différents types d'électrodes fixes (non soumise à fusion) sont disponibles dans le commerce:

-électrodes de tungstène pur. Utilisées avec des intensités de courant réduites et en courant alternatif, l'arc étant plus stable. Ce type d'électrode est le plus économique.

-électrodes de tungstène thorié. Supportent des intensités de courant élevées. L'allumage de l'arc s'effectue facilement et, une fois amorcé, reste relativement stable. L'utilisation de ces électrodes est indiquée pour le soudage d'aciers en courant continu en polarité directe.

-électrodes de tungstène au zircon. Utilisées pour le soudage manuel sur aluminium, magnésium et alliage avec une intensité de courant moyenne ou basse.

-électrodes au cérium. Se caractérisent par une forte émission d'électrons, permettent une bonne pénétration et une résistance à l'usure satisfaisante.

3-2-11- Systèmes d'allumage de l'arc:

L'allumage de l'arc électrique s'effectue par contact rapide entre l'électrode au tungstène et la pièce, ou bien au moyen d'un dispositif d'allumage spécifique sans contact.

Pour éviter toute contamination de l'électrode et tout coup d'arc sur le matériel de base, l'arc est souvent amorcé sur une plaque extrêmement propre (en cuivre, ou du matériel identique au matériel de base) placée à proximité du chanfrein.

Les types d'allumage de l'arc les plus fréquemment utilisés sont les suivants:

-amorçage (haute fréquence): L'étincelle pilote est fournie par un générateur haute fréquence superposant à la tension de soudage une impulsion haute tension; la puissance de ce dispositif est minime mais permet néanmoins l'amorçage à distance de l'arc électrique.

L'amorçage HF exige l'utilisation d'une torche de soudage spécifique comportant une gachette permettant la commande de l'amorçage.

-amorçage à arc pilote: Dans ce cas, l'arc jaillit entre l'électrode de tungstène et une électrode auxiliaire pouvant être un anneau placé sur la buse de la torche.

L'allumage de l'arc pilote s'effectue par une étincelle haute fréquence agissant dans le circuit de l'arc pilote; après allumage de l'arc pilote, l'étincelle pilote est suspendue, l'arc principal s'amorçant spontanément par simple décharge de l'électrode de tungstène rendue incandescente en atmosphère de gaz ionisé. Ce type d'amorçage est surtout utilisé pour les installations automatiques.

-amorçage LIFT: S'obtient au moyen d'un dispositif fournissant un courant à valeur réduite pour ne pas endommager la pointe de l'électrode de tungstène quand cette dernière se trouve en contact avec le matériel à souder.

Dès que l'on éloigne l'électrode de la pièce, une étincelle jaillit et entraîne l'allumage de l'arc; le générateur augmente par conséquent le courant de soudage jusqu'à la valeur définie initialement.

Le départ LIFT, du fait de l'absence de haute fréquence, a la propriété de ne créer aucune perturbation électromagnétique; le contact de la pointe de l'électrode avec le matériau à souder entraîne quoi qu'il en soit une pollution du bain.

-amorçage par frottement (scratch): Ce type d'amorçage s'effectue par frottement de l'électrode de tungstène sur la pièce à souder, ce qui provoque l'allumage de l'arc. Le contact entre électrode et pièce à souder entraîne, au début du cordon, des inclusions de tungstène compromettant la qualité du soudage.

3-2-12- Soudage TIG des matériaux:

Ce procédé est principalement appliqué pour le soudage des aciers inoxydables, de l'aluminium et de ses alliages, du nickel, du cuivre, du titane et de leurs alliages. Les aciers inoxydables sont soudés en courant continu (CC) avec polarité directe.

Il est possible de souder sans matériel d'apport des pièces d'une épaisseur arrivant jusqu'à 2,5 mm; au-delà de cette épaisseur, les bords doivent être chanfreinés et exigent l'utilisation de la baguette d'apport, cette dernière devant être particulièrement adaptée à la qualité de l'acier inoxydable à souder. Avant de procéder au soudage, il est conseillé de procéder à un nettoyage attentif au moyen d'une brosse en acier inoxydable. L'aluminium et ses alliages sont soudés en courant alternatif (CA) et, pour une bonne exécution du cordon, exige l'application d'un générateur haute fréquence de caractéristiques adéquates. En cas de forte oxydation, il est nécessaire d'éliminer cette dernière au moyen d'une brosse ou d'un décapage (procédé chimique pour éliminer l'oxyde).

Dans ce cas également, il est possible de souder sans matériel d'apport des pièces d'une épaisseur arrivant jusqu'à 2,5 mm; au-delà de cette épaisseur, les bords doivent être chanfreinés et exigent l'utilisation de la baguette d'apport.

Le soudage en atmosphère d'argon avec électrode au tungstène est également utilisé

pour les aciers doux et leurs alliages, le nickel et ses alliages, le cuivre et ses alliages, le titane et les métaux nobles. Pour tous ces métaux et alliages, on utilise un courant continu (CC) en polarité directe.



Figure2.10 : exemple de soudage TIG

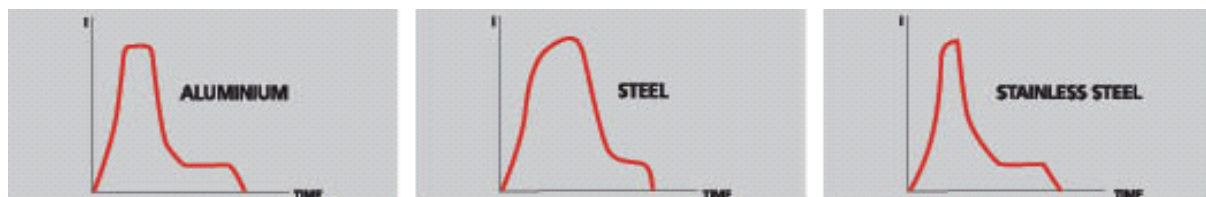


Figure2.11 : Graphiques optimisés en fonction des caractéristiques métallurgiques des matériaux.

Soudages dans toutes les positions La possibilité d'opérer avec des courants réduits en maintenant un haut niveau qualitatif du soudage, grâce à la viscosité du bain, assure des résultats exceptionnels dans toutes les positions et facilite l'exécution pour le soudeur.

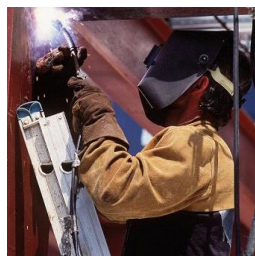


Figure2.12 : Exemple position horizontale de soudage TIG.

CHAPITRE III : PARTIE EXPERIMENTALE

1- Introduction :

Dans le cadre de présente étude nous avons essayé d'évaluer et de caractériser la microstructure et les propriétés mécaniques d'un joint soudé en acier inoxydable 316.

2- Matériau d'étude :

Les matériaux utilisé dans cette étude est un aciers inoxydable (316) :

Les aciers inoxydables austénitiques conservent à température ambiante une structure austénitique cubique à faces centrées. Il s'agit de solutions solides de fer, généralement à grains fins, obtenues par hypertrempe. En dehors du chrome, le nickel constitue le plus important des éléments d'alliage principalement en raison de son caractère γ -gène qui permet de stabiliser la structure austénitique à température ambiante. Des éléments stabilisateurs tels que le titane et le niobium sont régulièrement ajoutés afin de piéger le carbone et l'azote.

L'alliage 316 (désignation américaine) est un acier austénitique dont il existe de nombreuses variantes, Elles diffèrent par la teneur en C, N et en éléments d'additions (Cr, Mo et Ni) et en Ti dans le cas de la nuance stabilisée au titane (316Ti). La désignation américaine du 316L est cependant très réductrice par rapport à la désignation Européenne.

| Acier | C | Si | Mn | P _{max} | S | N | Cr | Mo | Ni | Ti |
|-----------------|-------|-----------|-----------|------------------|------------|-----------|----------------|----------------|----------------|----|
| 316 (1.4401) | ≤0,07 | ≤1,0 0 | ≤2,0 0 | 0,045 | ≤0,01 5 | ≤0,1 1 | 16,5 à 18,5 | 2,00 à 2,50 | 10,0 à 13,0 | - |
| 316 (1.4436) | ≤0,05 | ≤1,0 0 | ≤2,0 0 | 0,045 | ≤0,01 5 | ≤0,1 1 | 16,5 à 18,5 | 2,00 à 2,50 | 10,0 à 13,0 | - |



Figure3.1 : acier inoxydable 316

3- Caractérisation métallographique :

La caractérisation métallographie a pour objectif l'observation du matériau à l'échelle microscopique, elle permet de relever la structure métallographique homogène ou hétérogène d'une coupe transversale d'un cordon de soudure.

4- Techniques de préparation:

La réalisation d'une métallographie nécessite un certain l'échantillonnage, l'enrobage, le polissage et l'attaque chimique.

5- Échantillonnage:

L'échantillon est pris de telle façon qu'il doit représenter correctement la pièce dont il est issu du point de vue composition et structure.

6- Enrobage des échantillons:

D'une façon général , l'enrobage permet de faciliter la manipulation des échantillons et d'avoir une meilleure prise en mains pour obtenir des surfaces plus plane. La méthode la plus simple était d'utiliser la résine thermoplastique à l'état liquide, un durcisseur et des moules destinés à cet effet.



Figure3.2 : Machine enrobeuse et les échantillons enrobées par la résine.

7- Le polissage :

Deux étapes importantes dans le polissage sont considérées :

7-1- Le polissage d'ébauches :

Le polissage d'ébauches de la surface à examiner est réalisé sur une polisseuse, possédant du papier abrasif de plusieurs granulométries P400-P600- 800-P1000 et P1200.

Ces nombres correspondent au nombre de grains par unité de surface (grains/cm²).

On fait tourner l'échantillon de 90° à chaque changement de granulométrie pour effacer les stries du polissage précédent. La durée de polissage est d'environ dix minutes par granulométrie.



Figure3.3 : polisseuse.

7-2- Le polissage de finition :

L'opération de finition s'effectue sur un disque de feutre avec une suspension de poudre d'alumine.

8- L'attaque chimique :

L'observation au microscope optique (MO) après polissage nécessite une attaque chimique pour révéler et mettre en évidence les grains et les différentes phases de l'alliage, l'échantillon subit une attaque chimique avec une solution de (25g d'acide oxalique +100ml d'eau). Après attaque, l'échantillon est soigneusement lavé à l'eau, puis séché.

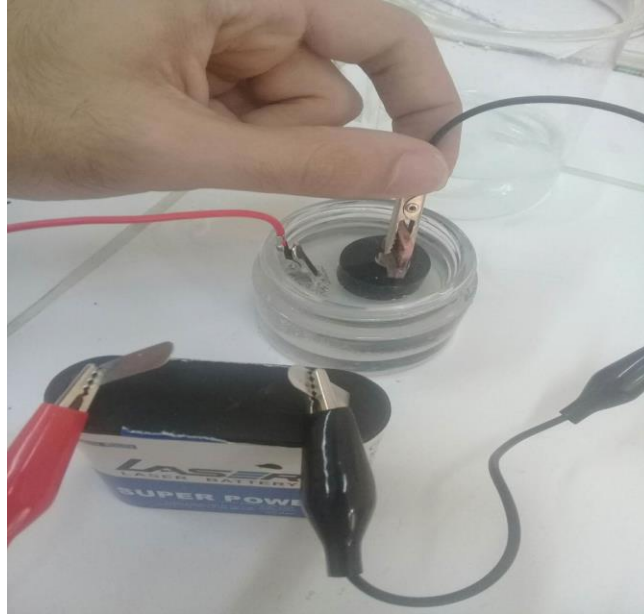


Figure3.4 : Attack chimique sur l'acier 316

9- Microscopie Optique (MO) :

Le microscope optique utilisé dans cette étude est de type Leica, il permet l'observation des échantillons avec des grossissements de 5 à 100 fois. Ce microscope est doté d'une caméra, d'un téléviseur et d'un logiciel d'acquisition et de traitement d'image. L'observation des surfaces après chaque traitement nous permet d'obtenir des informations sur la morphologie et l'épaisseur de la couche d'oxyde formée sur le substrat.



Figure3.5 : Microscope optique .

10-Traitement thermique :

La structure austénitique des aciers inoxydables étant une structure métastable obtenue par hypertrempe, une forte proportion des éléments d'alliage est alors en sursaturation dans la matrice. Il s'en suit, lors d'un recuit ou d'un maintien en température, que ces éléments solutés tendent à précipiter. Les éléments Fe, Cr, Mo, N, et C sont les principaux constituants des précipités ainsi que Ti pour la nuance stabilisée au titane. Les processus de précipitation se produisent sur un large domaine de température et de nombreuses phases peuvent apparaître pour un acier 316,(Figure 3.6)Les précipités formés sont principalement des carbures de chrome $M_{23}C_6$ suivis par des phases intermétalliques (phases σ , χ et de Laves) à plus haute température et long temps de maintien. Une augmentation de la température d'hypertrempe engendre un décalage du diagramme TTT (Temps-Température-Transformation) vers des temps de précipitation plus courts.

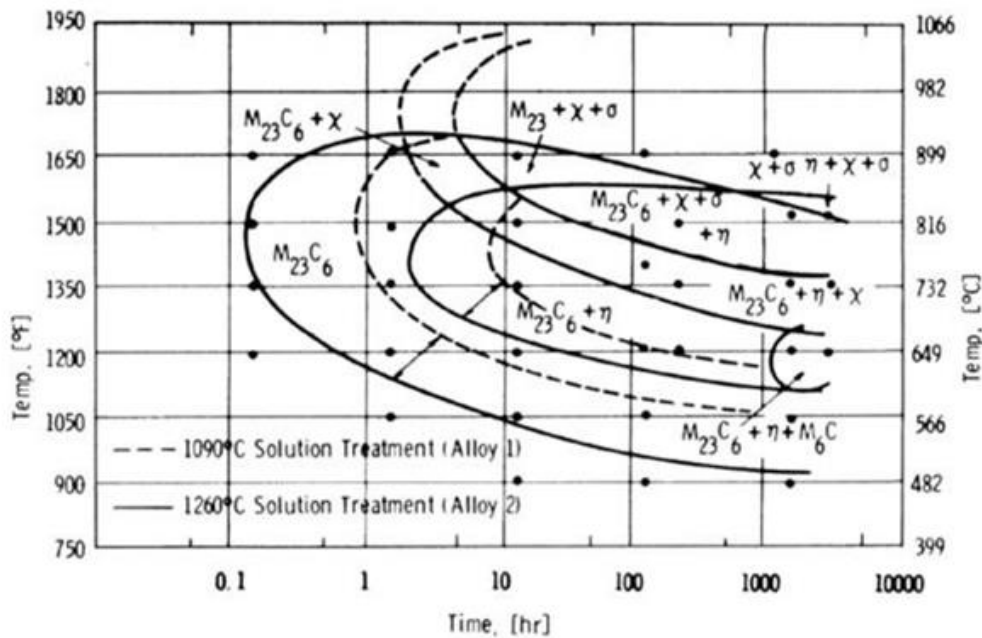


Figure 3.6 : Diagrammes TTT d'un acier 316 : indice de grosseur du grain ASTM -1 et 3/4 pour l'alliage 1 (recuit pendant 1h et trempé à l'eau) et l'alliage 2 (recuit pendant 1,5h et trempé à l'eau), respectivement .

La composition chimique d'un carbure $M_{23}C_6$ dans un 316L après un vieillissement de 1500h à $900^{\circ}C$ est $(Cr_{16}Fe_5Mo_2)C_6$. La séquence de précipitation des carbures de chrome est la suivante : joint de grains, parois de macles incohérentes puis cohérentes et enfin dans les grains pour des températures comprises entre 540 et $840^{\circ}C$. Lorsque de la ferrite se présente dans l'austénite, la précipitation de ces carbures débute initialement aux interfaces α/γ étant donné que la diffusion des éléments d'alliages est plus rapide dans la ferrite que dans l'austénite, (Une inclusion non métallique peut également être un site favorable pour la germination des carbures de chrome. La cinétique de précipitation de ce carbure est contrôlée par la vitesse de diffusion du chrome dans le fer qui est très rapide dans la gamme de température $600-900^{\circ}C$.

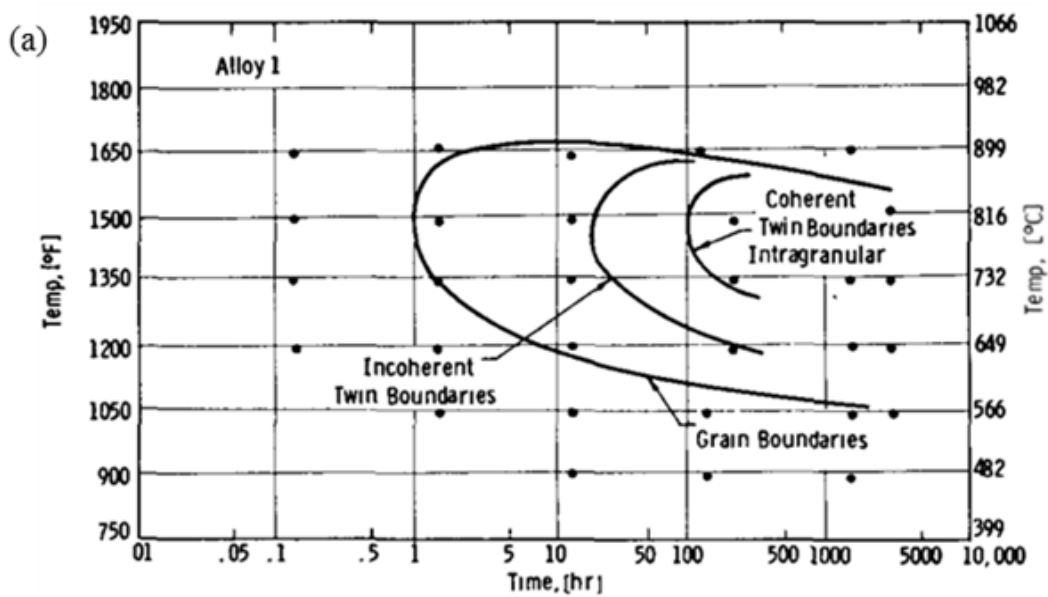


Figure 3.7 : Cinétique de précipitation isotherme des carbures M₂₃C₆ dans un acier 316.

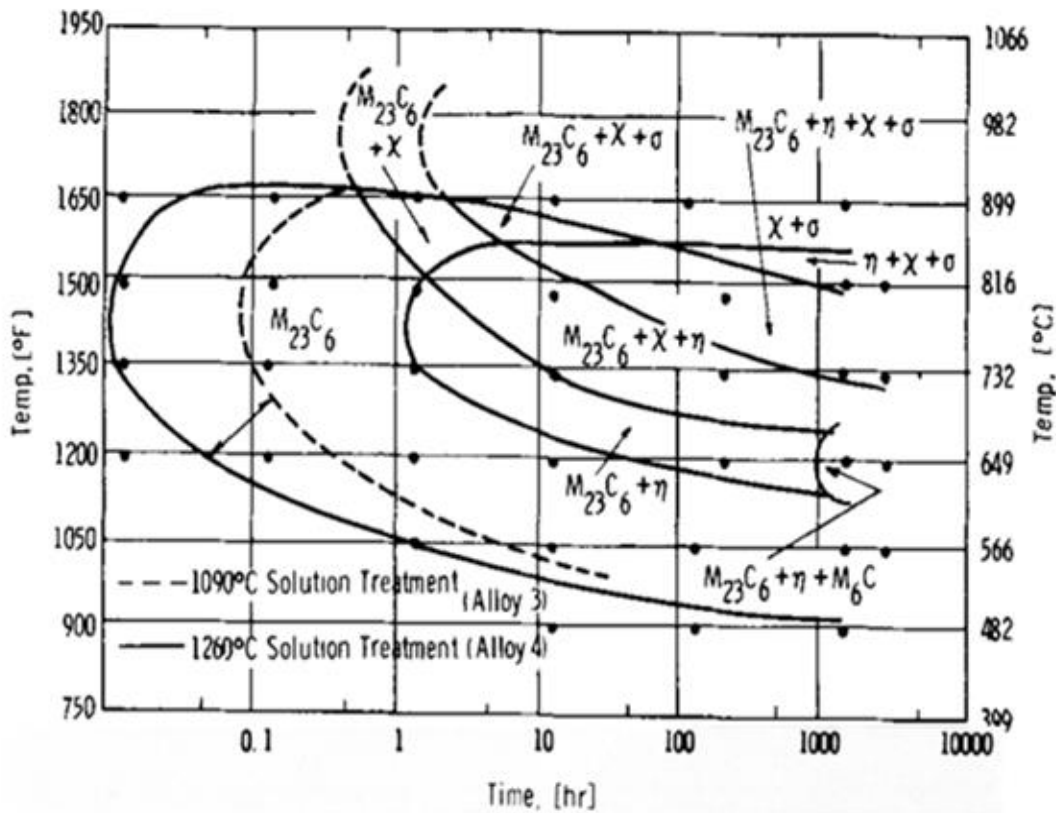


Figure 3.8 : Diagrammes TTT d'un acier 316 déformé à froid: indice de grosseur du grain ASTM -1 et 3/4 pour l'alliage 3 (recuit pendant 1h, trempé à l'eau et 20% de déformation à froid) et l'alliage 4 (recuit pendant 1,5h, trempé à l'eau et 20% de déformation à froid), respectivement .

11-La mesure de dureté vickers :

La mesure de dureté Vickers se fait avec un indenteur en forme de pyramide normalisée en diamant de base carrée et d'angle au sommet entre faces égal à 136° sur lequel on applique une force. L'empreinte que laisse le pénétrateur peut être utilisée pour calculer la dureté du matériau. La force et la durée de l'appui sont normalisées. Cette mesure est très utilisée en laboratoire pour sa précision, un peu moins dans les milieux de production où l'on préférera soit des méthodes plus rapides comme la dureté Rockwell soit qui ne demande pas autant de soin dans la préparation de l'échantillon comme la dureté Brinell.



Figure3.9 duromètre

CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSION

1- Observations métallographiques:

1-1- Examen micrographique:

La connaissance des propriétés du matériau passe par la détermination des phases qui le compose, quant à leur forme, leurs distributions et leurs qualités. L'observation métallographique au microscope optique est une méthode de base pour l'étude des transformations structurales. L'obtention de la surface d'examen nécessite une suite d'opération allant du prélèvement des échantillons à l'attaque chimique. La préparation des échantillons doit être effectuée de sorte à éviter tout échauffement ou écrouissage du matériau, ces derniers peuvent entraîner des modifications structurales.

Il apparaît clairement que les cordons de soudures ont composé de trois zones, au milieu la zone fondue ZF se compose d'un mélange du métal d'apport et le métal de base fondue, une couche entre la zone fondue et le métal de base se compose de deux parties une partie très mince de coté de la zone fondue appelée la zone de liaison ZL et une autre de coté de métal de base appelée la zone affectée thermiquement ZAT.

1-2- Examen de métal de base:

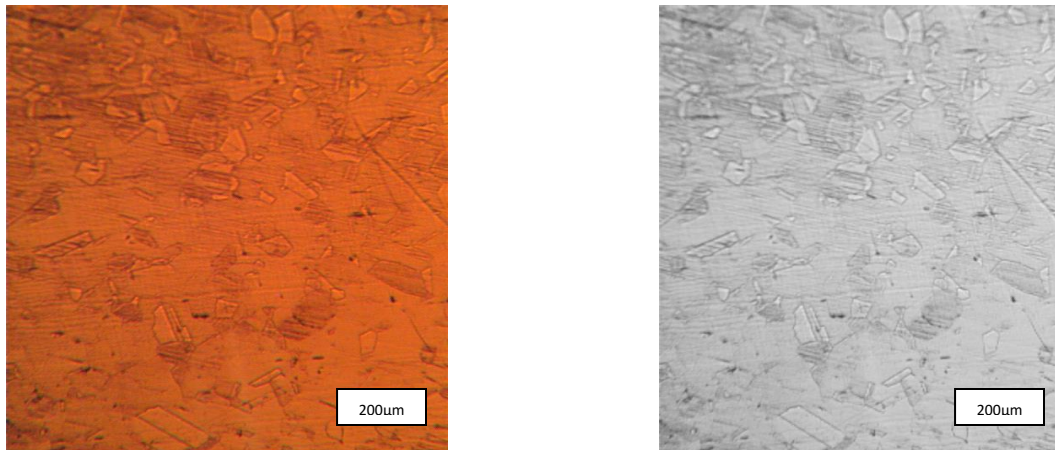


Figure4.1: Microstructure du métal de base (316).

La figure 4.1 représente la microstructure de métal de base de l'acier inoxydable (316), elle montre une structure austénitique constituée de la phase gamma. La morphologie des grains est majoritairement de forme polygonale avec présence des

macles dans différentes directions. Nous constatons également la présence de fines bandes de couleur noir qui sont allongées fort probablement dans le sens du laminage, ces bandes peuvent être de nature ferritique ou des précipités qui se sont compensés au niveau des joints de grains lors du traitement thermomécanique.

1-3- Examen du ZAT :

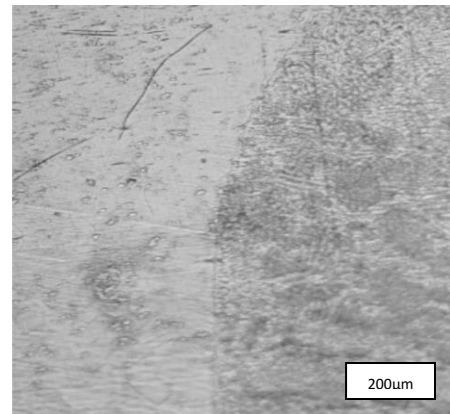
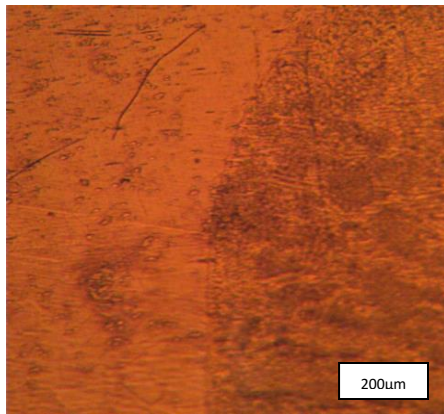


Figure4.2: Microstructure du ZAT (316).

1-4- Examen de ZF:

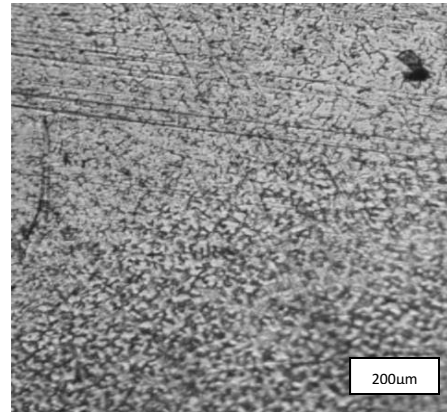
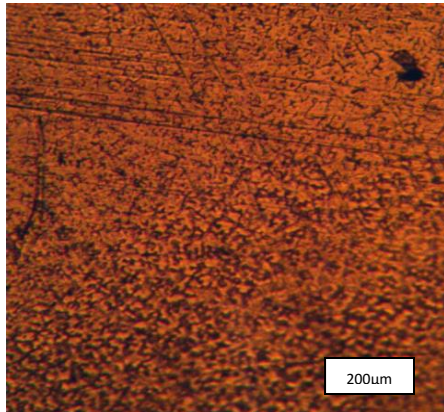


Figure4.3: Microstructure du ZF (316).

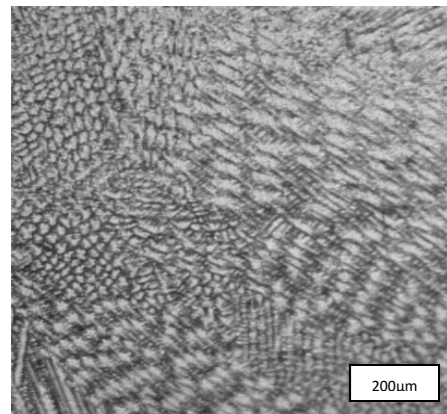
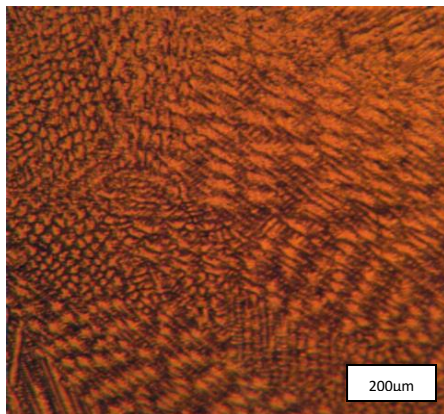


Figure4.4: Microstructure du ZF (316) .

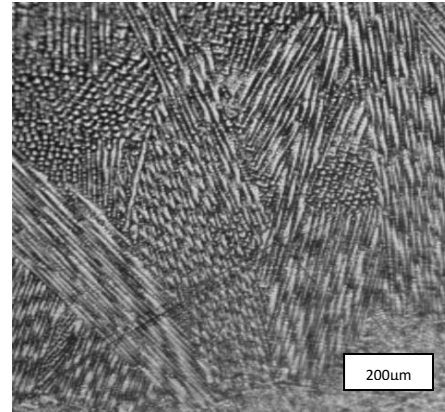
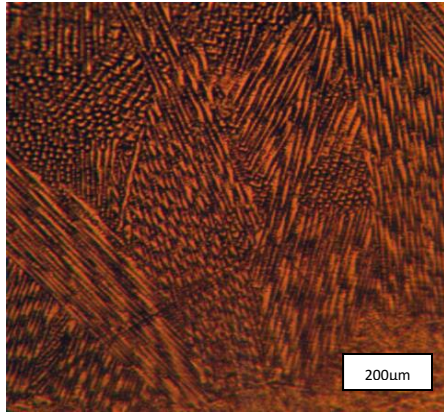


Figure4.5: Microstructure du ZF (316).

1-5- Examen de zone de liaison :

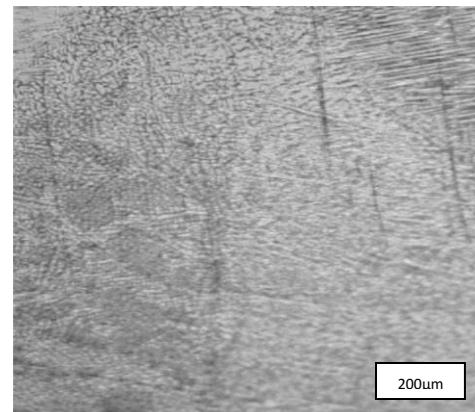
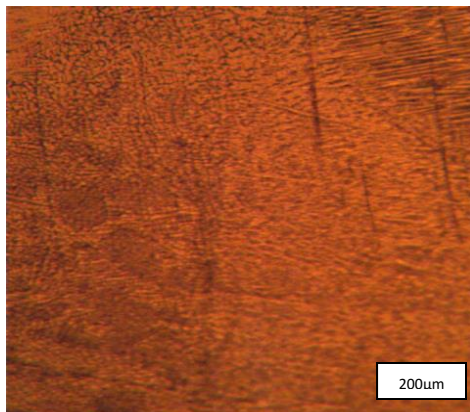


Figure4.6: Microstructure du Zone de liaison (316).

La figure 4.2représente la microstructure de la zone affectée thermiquement ,on a constaté que les grains sont grossiers à cause de l'effet de soudage. La figure4.4 représente la microstructure de la zone fondue du soudage sur un constat que la structure est également de forme de morphologie dendritique.

1-6- Examen de métal de base: (échantillon 1/800°C) :

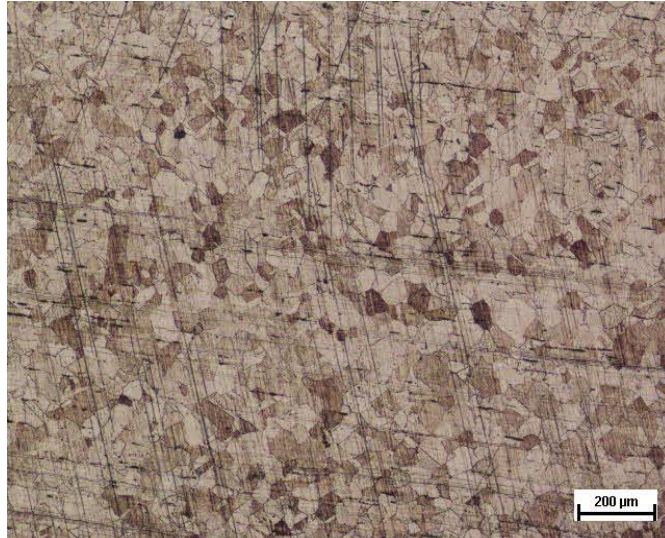


Figure4.7: Microstructure du Métal de base (316) avec un grossissement de X50
1-7- Examen du ZAT : (échantillon 1/800°C) :

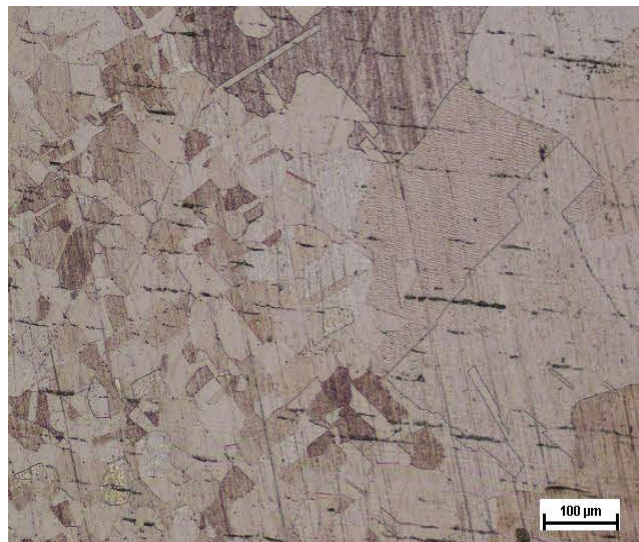


Figure4.8: Microstructure du ZAT(316) avec un grossissement de X100.

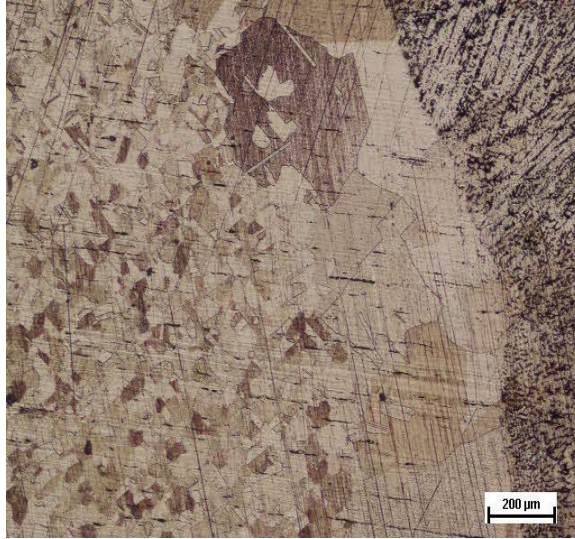


Figure4.9: Microstructure du ZAT (316) avec un grossissement de X50.

1-8- Examen du zone de liaison: (échantillon 1/800°C) :

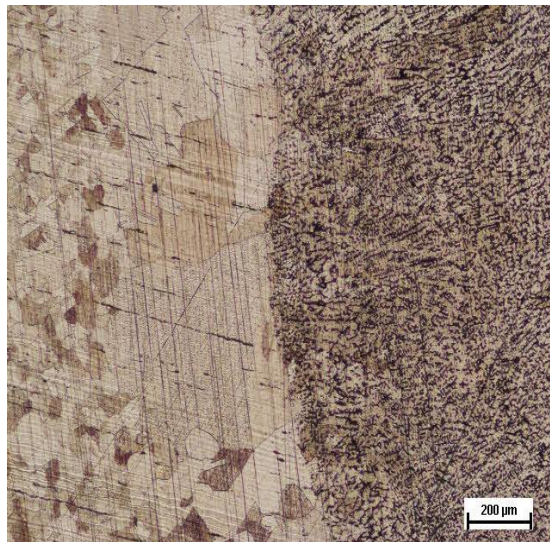


Figure4.10: Microstructure du zone de liaison (316) avec un grossissement de X50.

1-9- Examen de ZF : (échantillon 1/800°C) :

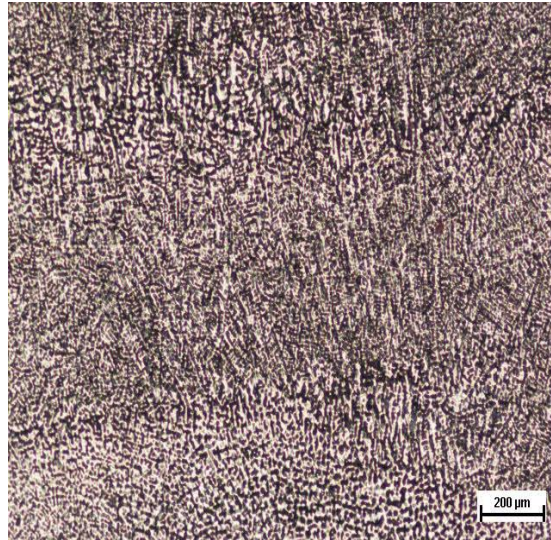


Figure4.11: Microstructure du ZF (316) avec un grossissement de X50.

1-10- Examen de métal de base : (échantillon 2/1000°C) :



Figure4.12: Microstructure de métal de base (316) avec un grossissement de X50.

1-11-Examen de ZAT: (échantillon 2/1000°C) :

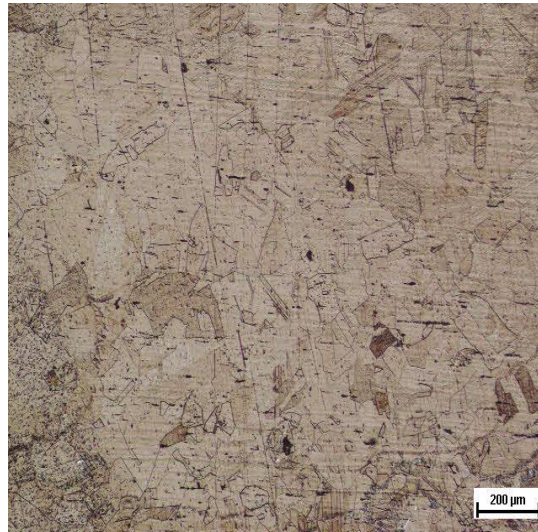


Figure4.13: Microstructure du ZAT(316) avec un grossissement de X50.

1-12-Examen de zone de liaison : (échantillon 2/1000°C) :



Figure4.14: Microstructure du zone de liaison (316) avec un grossissement de X50.

1-13-Examen de ZF: (échantillon 2/1000°C) :



Figure4.15: Microstructure du ZF(316) avec un grossissement de X50.

1-14-Mesure de dureté dans les trois échantillons en appliquant une force de 10kg :

-On remarque que la dureté augmente après le traitement thermique à 800°C

-à 1000°C on remarque que la dureté se diminue par rapport à 800°C à cause de grossissement des grains donc la température du traitement thermique idéale est entre (800 jusqu'a850°C) car la dureté dans cet intervalle est maximal.

2- Discussion des résultats :

2-1- Introduction

L'étude de la structure métallographique des assemblages soudés en acier inoxydable et la connaissance approfondie des phénomènes intervenants par chaque procédé de soudage, ainsi que les facteurs influençant son comportement, permet de prévenir des anomalies et choisir des conditions adaptées à son utilisation.

Dans notre travail, on a utilisé des échantillons déjà soudé au laboratoire **LTSM** Le métal de base qui a été utilisé c'est de l'acier **inoxydable 316** et comme métal d'apport pareil c'est l'acier 316. Le procédé de soudage qui a été adopté à ces échantillons est la technique de soudage par TIG (Tungsten Inert Gas), qui est un procédé de soudage à l'arc avec électrode réfractaire dans lequel un gaz inerte protège l'électrode, le bain de fusion, le métal d'apport et la pièce.

Par la suite, des traitements thermiques après soudage, ont été réalisés dans le but de restaurer les propriétés du métal, en particulier en zone affectée par la chaleur.

Lors de l'exécution de ces divers traitements thermiques, il importe de prendre un certain nombre de précautions. Tels que la température et le temps de maintien ainsi que le mode de refroidissement.

Pour choisir la température optimale de trempe, nous avons utilisé le diagramme TTT de l'acier inoxydable 316. Pour cela, nous avons choisi les deux températures de 800 et 1000°C et les comparer.

Une caractérisation microstructurale de ces échantillons a été effectuée, par l'utilisation d'un microscope optique.

Des profils de dureté de différentes zones (MB, ZAT, ZF) ont été également réalisés, sur les échantillons traités et non traités.

2-2- Caractérisation par microscopie optique

2-3- Caractérisation par MO de l'acier inoxydable 316 soudé par TIG

L'observation microscopique optique(MO) du métal de base (Figure4.16), révèle nettement la forme typique des grains d'austénites de différentes tailles et qui sont orientés de façon aléatoire. La présence de macles est également confirmée.

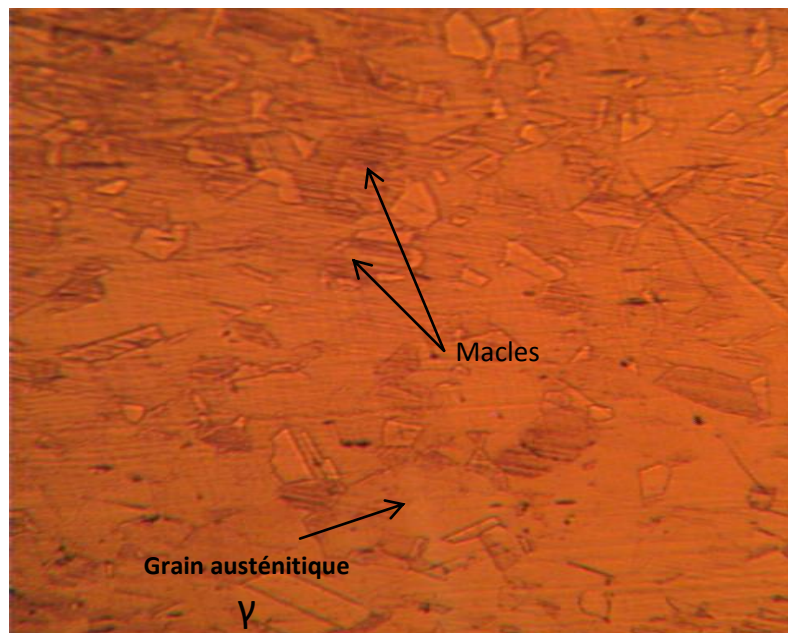


Figure 4.16 : Micrographie Optique du métal de base acier inoxydable 316.

La Figure 4.17 montre la continuité métallique au sein de la soudure dans la région séparant la zone fondue du métal de base. Sur cette figure on observe clairement le phénomène d'épitaixie. Ce phénomène selon lequel les cristaux de solidification dans la zone fondue adoptent, en prenant naissance à l'interface (ZF/MB). A l'échelle de la microstructure, ce phénomène se traduit par le fait que les joints de

grains du métal de base traversent sans discontinuité l'interface qui est devenue la **zone de liaison (ZL)**. Les flèches en gris sur la Figure 4.17.b indiquent le sens d'orientation des grains solidifiés dans la **zone fondue (ZF)**. Les grains du métal de base qui ont servi de support pour la solidification dans cette région de la soudure (zone de liaison) semblent continuer leur croissance dans la zone fondue.

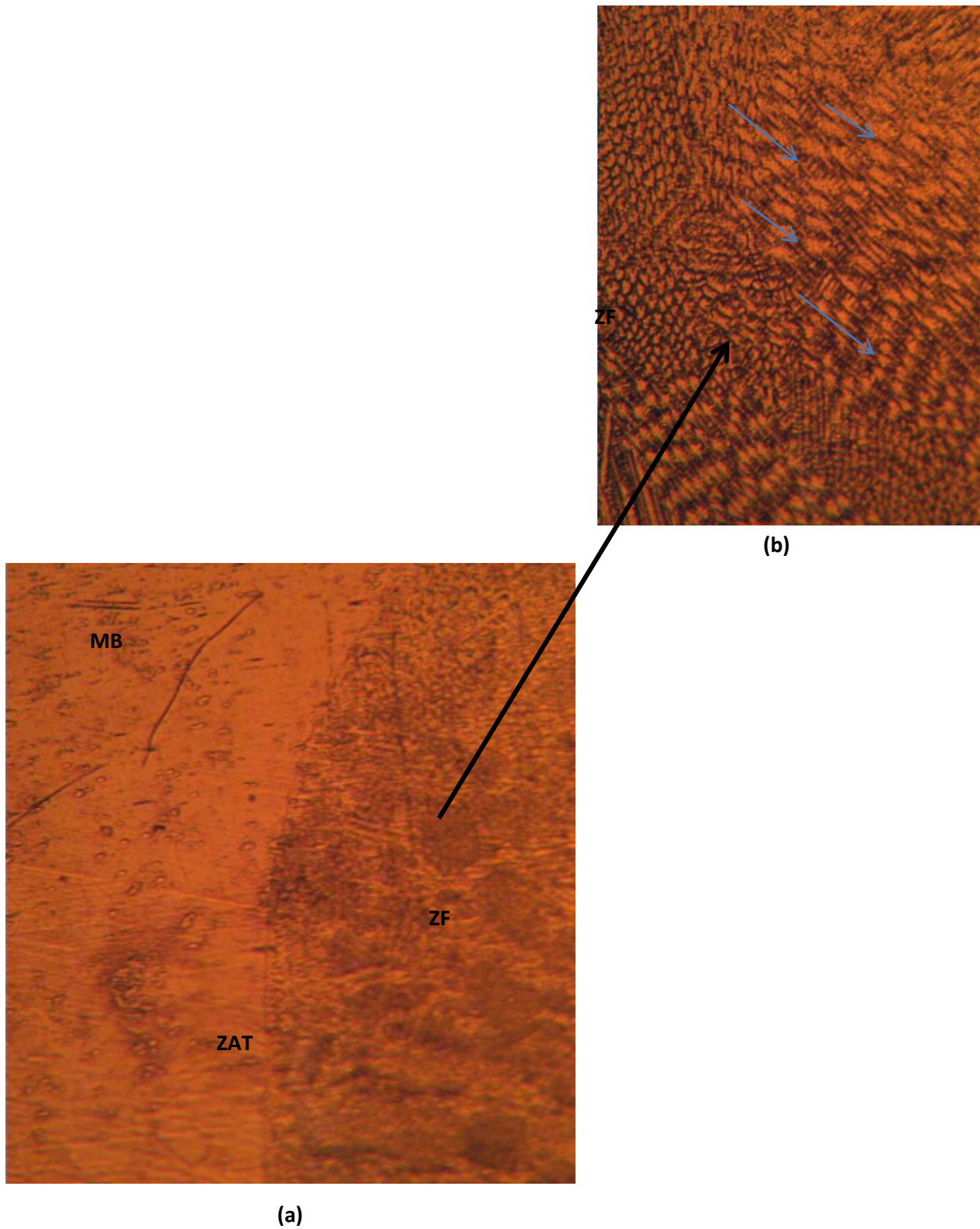


Figure4.17: Micrographie optique montrant la croissance épitaxiale dans la région de la soudure (a) et le sens l'orientation des grains solidifié dans la ZF (b).

2-4- Caractérisation par MO des aciers après traitements thermique

Dans cette étude, nous avons effectué deux traitements thermiques de trempe, le premier c'est à la température de 800°C et l'autre c'est à la température de 1000°C.

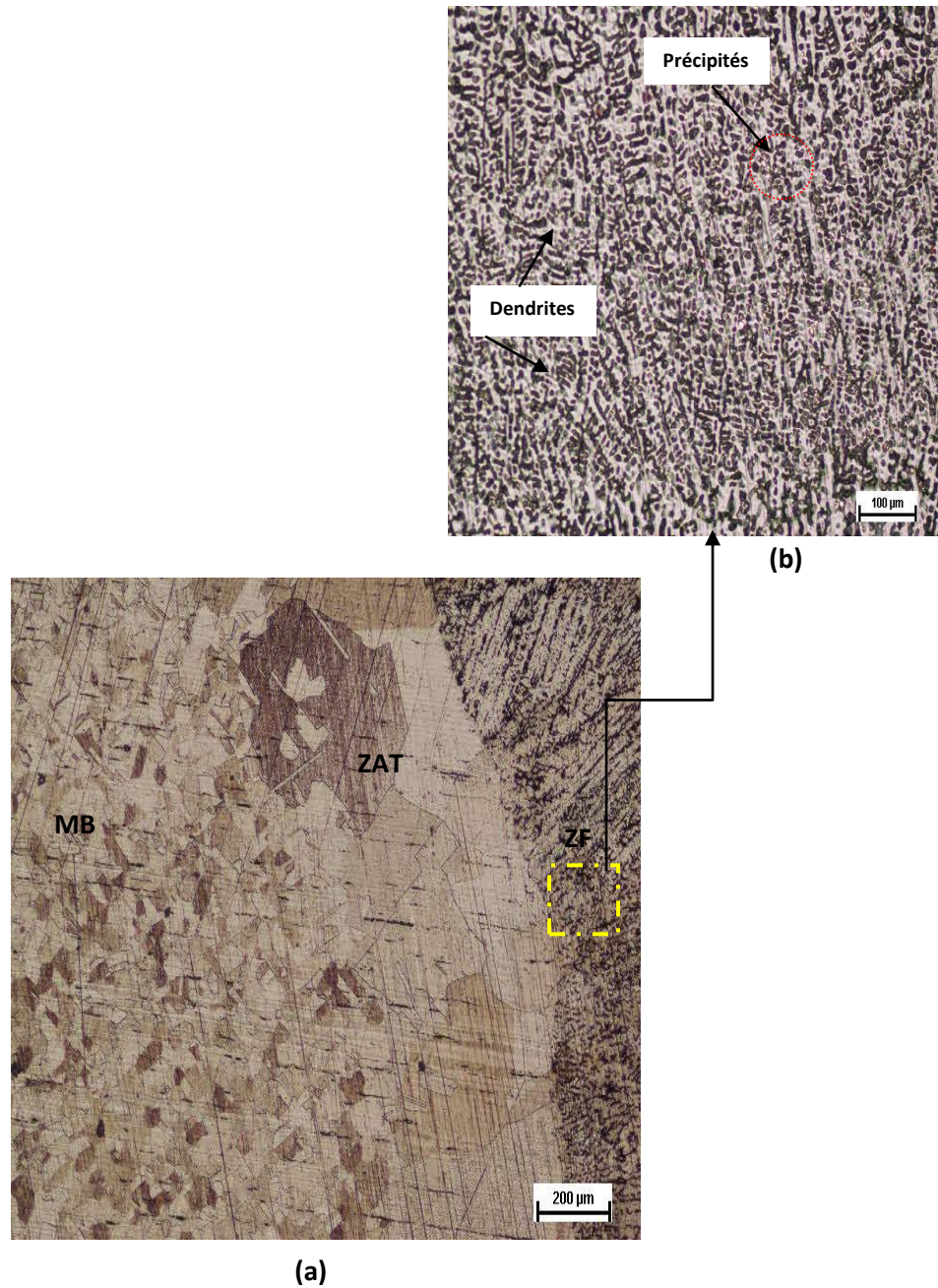


Figure4.18 : Micrographie optique de l'acier traité à 800°C (a) et agrandissement de la zone fondue (b).

La micrographie du traité à 800°C (**Figure 4.18**), montre clairement le grossissement du grain au niveau de la **ZAT** dû au régime de refroidissement rapide, en le comparant avec les grains plus fins du métal de base **MB**. Par contre, la zone fondu du traité à 800°C (Figure 4.18 .b), révèle une structure dendritique à base de la ferrite (δ), avec une grande masse de précipité $M_{23}C_6$. En outre, cette structure de la zone fondue, nous semble beaucoup plus fine par rapport à celle de la zone affectée thermiquement.

Les carbures $M_{23}C_6$, se précipitent dans un intervalle température compris entre 500°C-850°C.

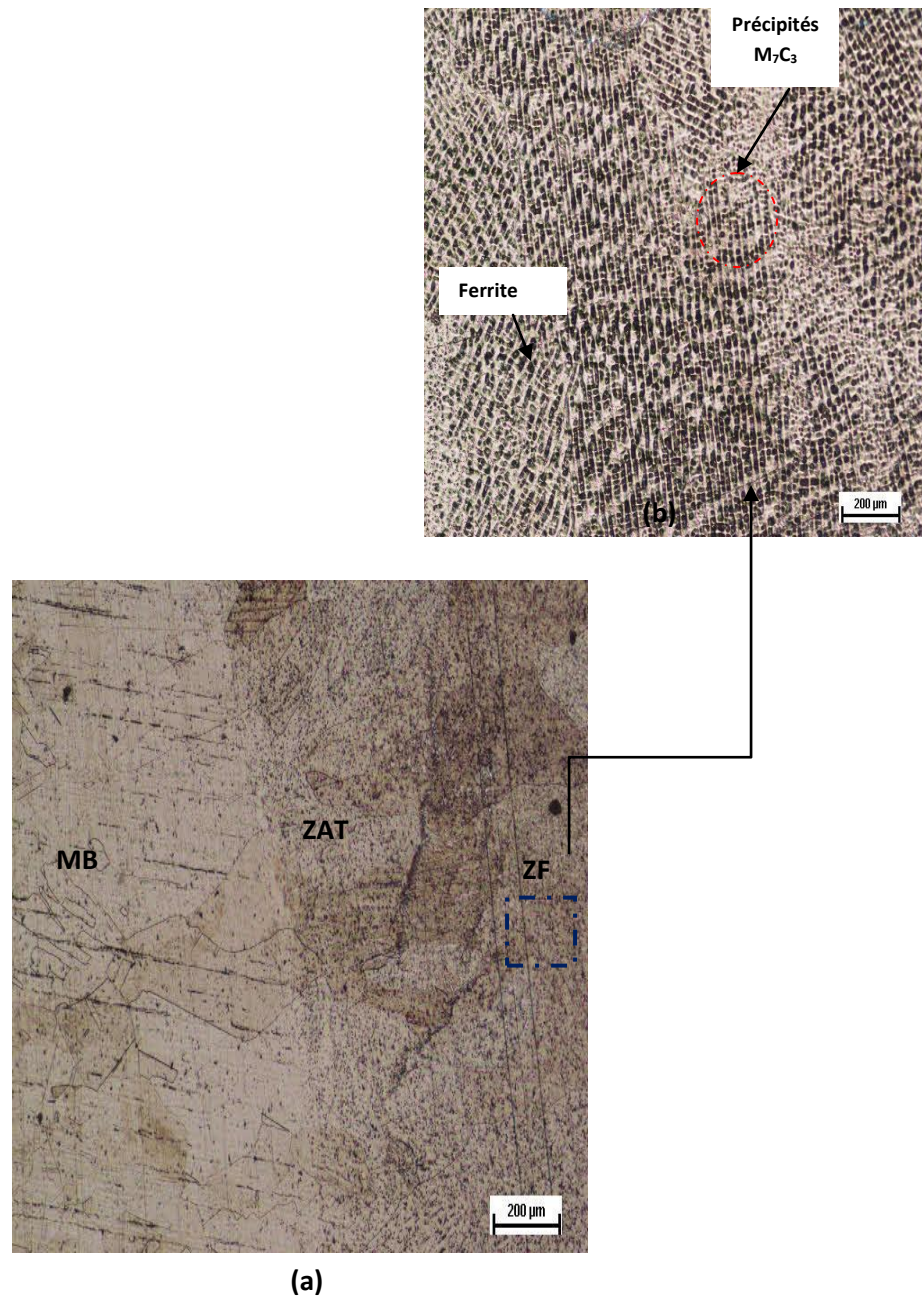


Figure 4.19: Micrographie optique de l'acier traité à 1000°C (a) et agrandissement de la zone fondue (b).

La micrographie du traité à 1000°C (**Figure 4.19**), dévoile une structure plus grossière, avec augmentation du taux de précipités. Les carbures M_7C_3 précipitent

généralement à des températures un peu plus élevée 950°C-1050°C. On constate que plus la température du traitement thermique de trempe augmente davantage, plus le chrome ne cesse de dissoudre au niveau des joints de grains et même dans les grains pour former des carbures mentionner précédemment (Figure4.19.b).

2-5- Caractérisation mécanique des aciers inoxydables soudés et traités :

2-5-1- Mesure de la microdureté :

Les différentes valeurs de la microdureté mesurée dans les différentes zones du cordon de soudure dans le cas de l'acier non traité sont schématisées dans la **Figure4.20**, nous remarquons que la valeur de la dureté mesurée dans le métal de base est de l'ordre de 166 HV induit par la structure austénitique. On observe également qu'il y a une augmentation de la dureté dans la ZAT (180 HV) induite par la structure grossière dû au mode de solidification et ainsi que les conditions du refroidissement. La dureté atteint des valeurs maximales au niveau de la zone de liaison causées par les précipités de solidification. Par contre, dans la zone fondue (ZF) on remarque une diminution remarquable de la dureté qui est de l'ordre de 152 HV. Ceci est dû à la structure brute de solidification qui est dendritique, ainsi que la forte proportion de ferrite delta (δ).

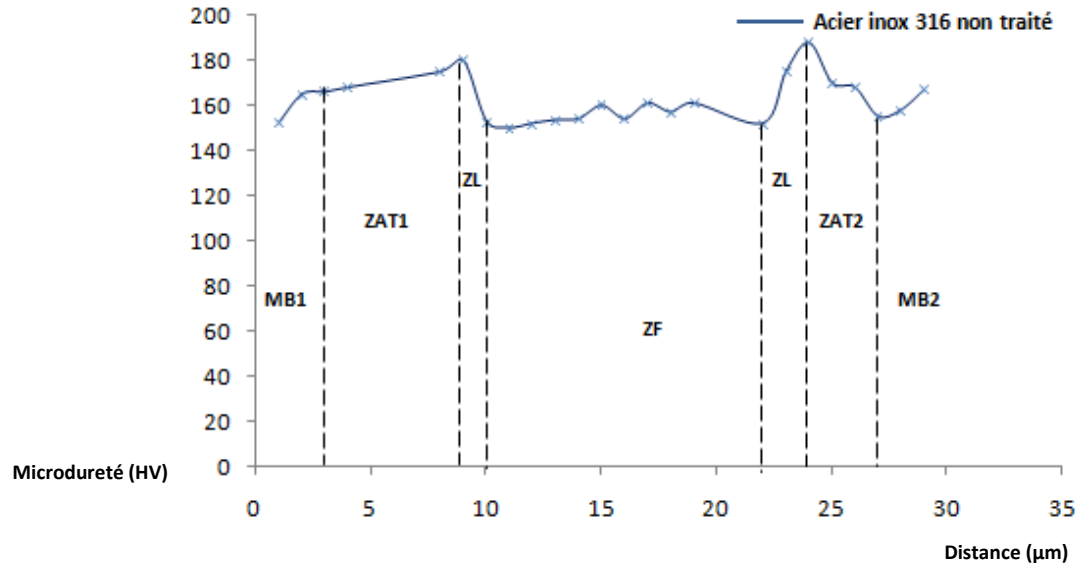


Figure 4.20: Evolution de la microdureté de l'acier 316 soudé et non traité.

L'étude de la microdureté de l'acier inoxydable 316 soudé par TIG et traité à 800°C (Figure 4.21), nous montre que la dureté du métal de base atteinte la valeur de 180 HV. En rapprochant de la zone affectée thermiquement (ZAT1) la dureté augmente considérablement jusqu'à une valeur maximale de 210HV qui est probablement due à la précipitation des carbures de types $M_{23}C_6$. La dureté atteinte des valeurs maximales au niveau de la zone de liaison causées par les précipités de solidification. Par contre, dans la zone fondue (ZF) on remarque une réduction importante de la dureté qui est de l'ordre de 170 HV.

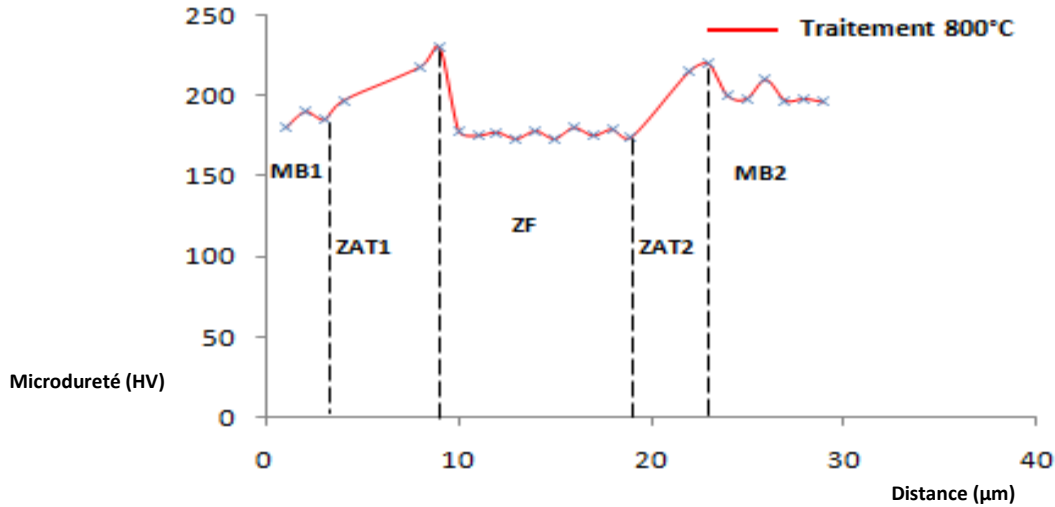


Figure 4.21 : Evolution de la microdureté de l'acier soudé et traité à 800°C.

Cependant, dans le cas de l'acier inoxydable 316 soudé et traité à 1000°C (Figure 4.22), la courbe de l'évolution de la dureté en fonction de la distance, nous montre que il y a une chute des duretés dans les différentes zones du cordon de soudure. D'après les résultats microscopique de l'acier traité à 1000°C, on a observé qu'il y a un grossissement du grain au voisinage de la zone affecté thermiquement, ce phénomène peut induire la diminution de la dureté, notamment en la présence aussi des nouveaux précipités de type M_7C_3 , qui apparaissent à des températures dépassant les 950°C.

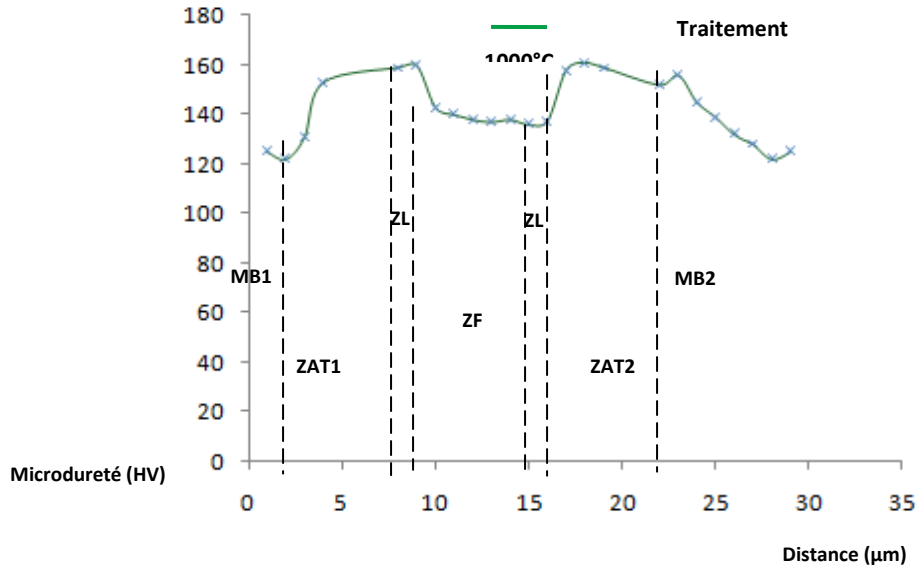


Figure 4.22 : Evolution de la microdureté de l'acier soudé et traité à 1000°C.

Conclusion :

L'objectif de cette étude étant de connaître les différentes variantes structural et mécanique après les traitements thermique de trempe à différentes températures de l'acier inoxydable 316 soudé par TIG pour cela nous avons choisi deux températures de traitement à 800°C et 1000°C.

On compare les micrographies et la micro dureté de l'acier soudé avec celui qui est traité à 800°C. On observe une augmentation considérable de la micro dureté qui attente la valeur 210HV a été justifier par la présence des nouveaux précipites de type $M_{23}C_6$.

On augmentant d'avantage la température à 1000°C, une diminution remarquable de la dureté jusqu'à 120HV ce qui a été justifier par le grossissement des grains aux delà 950°C. qui nous montre le formation des précipites de types M_7C_3 .

Donc on peut dire que dans le cas de l'acier 316 soudé par TIG , la température de trempe idéale est celle de 800°C.

ملخص :

يتعلق هذا العمل بدراسة الوصلات الملحومة باستخدام عملية اللحام TIG ؛ الهدف من هذه الدراسة هو تحسين وتوصيف حبة اللحام للتركيبات المحتملة للفولاذ المقاوم للصدأ الأوستنيتي (316) بشكل أكثر تحديداً ، نبحث عن المعلمات الميكانيكية والهيكلية لخرز اللحام قبل وبعد المعالجة الحرارية.

Résumé :

Ce travail a trait à l'étude de joints soudés à l'aide de procédé de soudage TIG ; l'objectif de cette étude est d'améliorer et de caractériser le cordon de soudure des assemblages possibles pour l'acier inoxydable austénitique (316). Plus précisément, on cherche, les paramètres mécaniques et structuraux des cordons de soudure. Avant et après le traitement thermique .

Abstract :

This work relates to the study of welded joints using the TIG welding process; the objective of this study is to improve and characterize the weld bead of possible assemblies for austenitic stainless steel (316). More specifically, we look for the mechanical and structural parameters of the weld beads. Before and after heat treatment.

Liste des sources et référence :

- [1]:[PDF](tr) Henry Marion Howe, Çelik Metalurjisi, cilt. 1, The Scientific Publishing Company, 1890.
- [2]: Michel Dupeux, Science des matériaux : aide-mémoire, Paris, Dunod, coll. « Bilimler s. / Aide-mémoire »
- J. Barralis, G. Maeder, Métallurgie, ayrintılandırma, yapılar-özellik, normalleştirme, derleme «Les précis AFNOR/Nathan»
- [3]:Pierre-Jean Cunat, « Aciers inoxydables, critères de choix et Structures », Traté « Matériaux métalliques », Techniques de l'ingénieur, Mars 2000, s. M4540-3.
- [4]:Pierre-Jean Cunat, « Aciers inoxydables, critères de choix et Structures », Traté « Matériaux métalliques », Techniques de l'ingénieur,
- [5]:Jean Philibert, Alain Vignes, Yves Bréchet ve Pierre Comprade (Nouvelle sunumu 2013), Métallurgie. Du minerai au matériau, Paris, Dunod, col. « Technique et ingénierie / Mécanique et matériaux. ».
- [6]:Jean Barralis et Gérard Maeder, Métallurgie: élaboration, struct-proprietés, normalization, Paris, AFNOR Nathan, col. « Les précis AFNOR/Nathan », 2005
- [7]:Pierre-Jean Cunat, « Aciers inoxydables, critères de choix et Structures », Traté « Matériaux métalliques », Techniques de l'ingénieur, Mars 2000, s. M4540-7.
- [8]:Pierre-Jean Cunat, « Aciers inoxydables, critères de choix et Structures », Traté « Matériaux métalliques », Techniques de l'ingénieur, Mars 2000, s. M4540-8.
- [9] : https://fr.wikipedia.org/wiki/Acier_inoxydable.
- [10] : mémoire de master Soudage tig des aciers inoxydables traites microstructure et traitements thermiques présenté par : baiteche mohamed .

