



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

MEMOIRE

Présenté pour obtenir le diplôme de master en génie
mécanique

Option : ingénierie des matériaux et des surfaces

THEME : réparation des fissures par rechargement

PRESENTE PAR :

- AIT KHALED IDIR

- ABD ESSAMIE MESSAOUD

Année universitaire 2022/2023

REMERCIEMENT

On tient à remercier le dieu qui nous a donné la patience pour finir nos travail et le présenter de cette façon.

Nous tenons aussi à remercier Monsieur NACER BACHA notre promoteur à l'université de SAAD DAHLEB BLIDA 01 pour nous avoir accordé toute sa confiance mais aussi pour tout le soutien et les conseils avisés pour l'avancement du mémoire .

Je tiens ensuite à remercier tous les professeurs qui nous ont aidé de loin ou de proche durant notre parcours universitaire .

Sommaires

Chapitre 1

GÉNÉRALITÉS SUR LES FISSURES

1.1 Introduction	1
1.2 Méthode de réparation des fissures.....	2
1.2.1 Rechargement par soudage	2
1.2.2 Le rechargement par soudage manuel (SMAW).....	2
1.2.3 Rechargement par laser	3
1.2.4 Rechargement par projection thermique	4
1.2.4.1.Projection flamme avec refusion	4
1.2.4.2 Projection à l'arc électrique	5
1.2.5 Réparation par pâte	5
1.2.5.1Loctite® Hysol® 3472 A&B	5
1.2.5.2Loctite® 3463.....	6
1.2.6 Couture métallique	7
1.2.6.1 Processus de réparation	7

CHAPITRE 2

MÉTHODOLOGIE

2.1.Introduction	9
2.2. Echantillons	9
2.3. Préparation métallographique des échantillons	9
2.3.1.Polissage.....	9
2.4. Analyse micrographique de la microstructure	10
2.4.1 microscope	10
2.5. Rechargement par soudage	11
2.5.1. Poste à souder	11
2.6. Rechargement par projection thermique	13
2.6.1 Torche Eutalloy Super jet-S	13
2.6.2 Les poudres	14
2.7. Découpage des échantillons	14
2.8.Rechargement par projection	14
2.9 Durometre vickers	15

CHAPITRE 3

RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS

3.1.Introduction	17
3.2.Préparation des échantillons	17
3.2.1.nettoyage de surface	17
3.2.2.création de la fissure	18
3.3..Microstructure du substrat de référence	19
3.4.Rechargement MIXTE.....	20
3.4.1.mesure de la microdureté.....	24
3.5.Rechargement par projection thermique.....	25

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 : Les paramètres de soudage utilisés	13
Tableau 2.2: Données techniques de la projection thermique	15
tableau 3.1 : les paramètres de soudage utilisés échantillons 1	20
tableau 3.2 : les paramètres de soudage utilisés échantillons 2	21
Tableau 3.3 représente les microdureté moyennes des échantillons recharge par soudage.	24

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Fissure dans une pièce métallique

Figure 1.2: Procédé de soudage SMAW [4]

Figure 1.3 : Technologie laser additive

Figure 1.4 : répartition par pate (Loctite Hysole)

Figure 1.5 : Pâte Loctite 3463

Figure 1.6 : Couture métallique

Figure 2.1 : Polisseuse de finition PRESI MINITECH 233

Figure 2.2 : Microscope optique Carl Zeiss Axiovert.

Figure 2.3 : Poste à souder Gekamac RKM 650.

Figure 2.4 : Baguette à souder 7018.

Figure 2.5 : Baguette à souder 4800.

Figure 2.6: Torche de projection thermique Eutalloy Superjet-S.

Figure 2.7 : durometre rockwell

Figure 3.1: Baguette de base carrée après nettoyage de sa surface.

Figure 3.2: Création d'une fissure dans la barre en acier.

Figure 3.3: Etude microscopique du substrat

Figure 3.4: coupe transversale d'échantillons recharge par soudage baguette 7018, etudier par microscope optique.

Figure 3.5: coupe transversale d'échantillons recharge par soudage baguette 4800, etudier par microscope optique.

Figure 3.6 : zone affectée thermiquement

Figure 3.7 : zone fondue

Figure 3.8: coupe transversale d'échantillons recharge par projection thermique utilisant poudre tungtech , étudiée par microscope optique.

Figure 3.9: coupe transversale d'échantillons recharge par projection thermique utilisant la poudre 10092, étudiée par microscope optique.

RÉSUMÉ

dans le cadre de cette étude nous avons utilisé deux différentes méthodes de réparation des fissures

réparation des fissures par rechargement soudage à l'arc en projetant une poudre de type Cobaltec 10092 et par rechargement projection thermique avec des poudres ungtch 10112 et cobaltech 10092

L'objectif principal de ce travail est de voir l'efficacité de réparation des fissures par rechargement

Les résultats ont montré que:

-Pour le soudage à l'arc, le colmatage se fait généralement plus ou moins bien selon le diamètre des baguettes et la nature de la technique utilisée. Pour le soudage à l'arc, l'emploi de baguettes de petits diamètres pour entamer la réparation suivi de baguettes de plus gros diamètre pour le remplissage s'est avéré plus efficace. Si les disparités mécaniques sont à tenir en compte, il faudra suivre le rechargement par un traitement thermique approprié pour atténuer cette différence.

-Pour la projection thermique, le colmatage s'est fait de manière plus douce et plus efficace que le rechargement par le soudage à l'arc. Les zones de liaison sont très minces ce qui indique que l'effet de chaleur apporté par la projection thermique est négligeable. Cependant, le choix de la poudre de remplissage est très important. Il influence les propriétés du matériau réparé et les disparités mécaniques sont très importantes.

-Il semble qu'une utilisation mixte des deux techniques semble la plus judicieuse. La projection thermique est d'abord utilisée pour colmater correctement la fissure en profondeur, ensuite le soudage à l'arc est employé pour le remplissage de la fissure.

-Des études doivent être faites avec le rechargement par le soudage TIG qui a la possibilité de rechargement avec une plus douceur les fissures. -Une étude sur le choix des poudres à employer pour la projection thermique doit être aussi réalisée pour optimiser les paramètres opératoires du rechargement.

SUMMARY

In this study we used two different methods of crack repair repair of cracks by hardfacing arc welding by projecting a powder type Cobaltec 10092 and by hardfacing thermal projection with ungtch 10112 and cobaltech 10092 powders

The main objective of this work is to see the effectiveness of repairing cracks by hardfacing

The results showed that:

-For arc welding, the sealing is generally more or less successful depending on the diameter of the rods and the nature of the technique used. For arc welding, the use of small diameter rods to start the repair followed by larger diameter rods for the filling proved to be more effective. If mechanical disparities are to be considered, it will be necessary to follow the refacing with an appropriate heat treatment to mitigate this difference.

-For thermal spraying, the filling was smoother and more effective than hardfacing by arc welding. The bonding areas are very thin which indicates that the heat effect brought by thermal spraying is negligible. However, the choice of the filler powder is very important. It influences the properties of the repaired material and the mechanical disparities are very important.

-It seems that a mixed use of the two techniques is the most judicious. Thermal spraying is first used to properly seal the crack in depth, then arc welding is used to fill the crack.

-Studies should be made with TIG welding which has the possibility of more gently filling the cracks. -A study on the choice of powders to be used for thermal spraying must also be done to optimize the operating parameters of the hardfacing.

Introduction general

La plupart des entreprises industrielles s'assurent que leur économie est la meilleure, et luttent ainsi contre toutes les raisons qui pourraient être néfastes pour cette dernière. Cependant, la dégradation de surface des métaux et alliages, telle que la corrosion, le frottement, l'usure et la fatigue est le phénomène le plus préoccupant dans le domaine industriel, qui peut détruire les composants métalliques utilisés dans différentes industries et entraîner d'énormes pertes économiques. C'est pourquoi il est nécessaire de lutter contre ces phénomènes pour réduire ces pertes.

Le rechargement par soudage SMAW est la première méthode utilisée dans notre étude.

Le deuxième procédé de projection thermique est un terme général qui résume de nombreux procédés utilisés pour appliquer des matériaux métalliques et non métalliques sur des pièces à revêtir. Le but est de recharger du matériel endommagé ou d'appliquer une couche de protection pour répondre à des exigences élevées.

Cette technologie est largement utilisée dans de nombreuses industries telles que l'énergie nucléaire, l'aviation, le naval (pales d'hélices, coques usées, etc.) et l'automobile (têtes de soupapes, turbocompresseur lames, etc.). L'industrie papetière, minière, chimique, les propriétés des pièces peuvent être modifiées, donnant aux surfaces des propriétés spécifiques pour améliorer la résistance à la corrosion et à l'usure.

CHAPITRE 1

GÉNÉRALITÉS SUR LES FISSURES

1.1 Introduction

La rupture est un problème auquel l'homme doit se préoccuper tant qu'il fabriquera des structures. L'endommagement de ses structures par le phénomène de fissuration représente 90% de rupture en service.

La découverte de toute fissure justifie des interventions immédiates pour les arrêter avant qu'elles ne se propagent au point de rupture brutale et catastrophique.

Comme on le sait, de nombreuses structures et composants d'ingénierie, fabriqués à partir de matériaux métalliques, contiennent des fissures ou des défauts semblables à des fissures [1].

Historiquement, la fissuration du métal est un problème de longue date dans l'industrie métallurgique. Cependant, pendant ces temps anciens, la fissuration des métaux était rarement étudiée scientifiquement et pas si contrôlable. Selon Hart [2], ce n'est qu'à la Seconde Guerre mondiale que la reconnaissance des fissures métalliques en tant que problème d'ingénierie est devenue importante.

Les fissures sont des fissures superficielles ou souterraines qui se développent dans un matériau. Les fissures peuvent se développer et entraîner une rupture complète du composant posant des menaces importantes pour la vie des composants et pouvant entraîner des blessures graves ou la mort. La rupture fragile des métaux se produit avec peu ou pas d'avertissement visible.

Plusieurs méthodes de détection et de réparation de fissures dans les métaux ont été développées, caractérisées et validées par recherche. La figure 1.1 montre un exemple d'une fissure sur une pièce métallique.



Figure 1.1 : Fissure dans une pièce métallique

Ce chapitre passe en revue les techniques de réparation des fissures dans les métaux.

1.2 Méthode de réparation des fissures

1.2.1 Rechargement par soudage

Historiquement, le rechargement par soudage évoquait immédiatement la notion de réparation, par la suite, cette notion a été intégrée dans la conception afin de limiter les zones où le métal doit avoir des propriétés particulières (par exemple rechargement dur ou inoxydable) et utiliser des matériaux de moindre coût pour le reste de la construction. Le rechargement est une technique, selon la nature du substrat, métallurgique ou chimique qui consiste à revêtir une pièce ou une partie de pièce d'un matériau ayant les propriétés requises pour résister à une sollicitation connue et définie. En règle générale, le rechargement est envisagé soit lors de la conception d'une pièce et/ou soit lors de sa maintenance, les technologies de rechargement permettent d'allonger de façon significative la durée de vie de pièces très fortement sollicitées en service.

Le rechargement par soudage à l'arc est une technique de revêtement destinée à augmenter la durée de vie et la performance des composants industriels, en préventif sur des pièces neuves, ou dans le cadre d'un programme de maintenance. De nombreuses industries ont adopté ce procédé en raison des économies significatives qu'il génère en réduisant les arrêts et les coûts de production. A chaque application correspond un fil fourré de rechargement spécifiquement développé ou adapté [3].

1.2.2 Le rechargement par soudage manuel (SMAW)

Le rechargement à l'arc avec électrode enrobée est un procédé de soudage autogène qui consiste à déposer, avec une électrode de métal d'apport enrobée, sur un substrat métallique en le fusionnant.[4]. Cette fusion est obtenue grâce à la chaleur dégagée par un arc établi entre l'électrode enrobée et la pièce de métal et dont la température est de 3500°C à l'anode, 2500 °C à la cathode et 5000 °C dans l'arc. La fusion de l'électrode enrobée et du métal de base forme le bain de fusion qui, en se solidifiant, forme le cordon de soudure. De plus, la fusion de l'enrobage dégage un gaz qui protège le bain de fusion de l'air ambiant et forme un laitier (dépôt vitreux) qui couvre le bain de fusion. La figure 1.2 représente le principe de ce procédé.

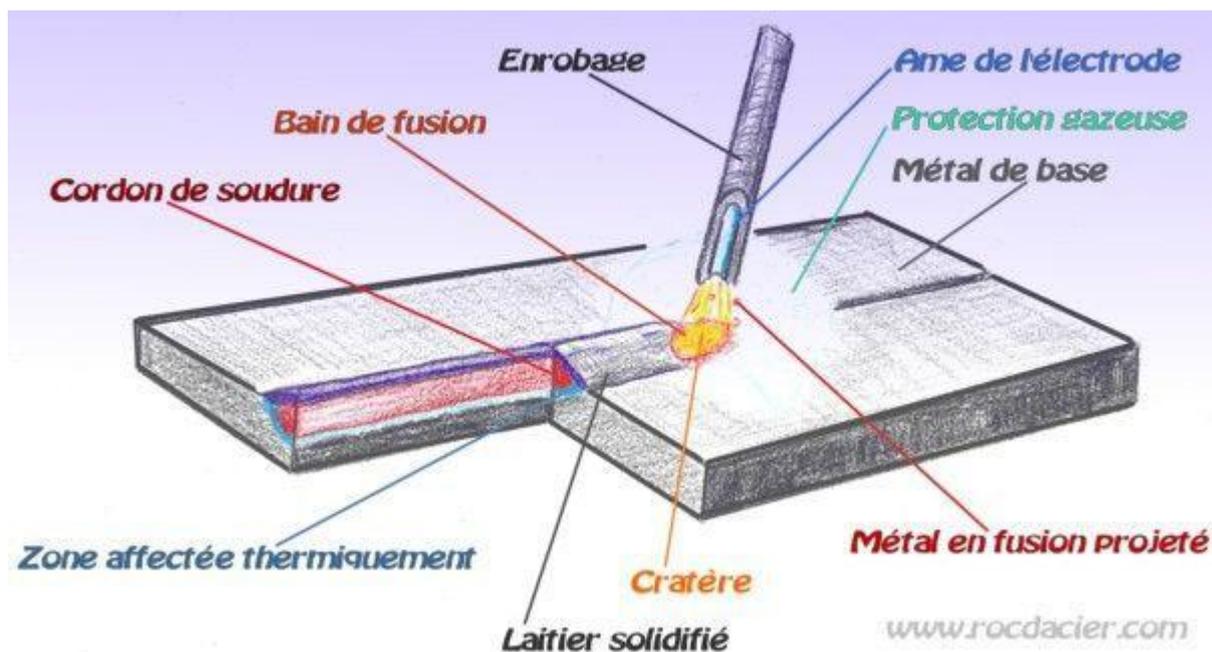


Figure 1.2: Procédé de soudage SMAW [4]

Le procédé de soudage à l'arc avec électrode enrobée est relativement simple. Une soudeuse, généralement à courant constant, est connectée à une électrode enrobée et à une pièce de métal à souder, ce qui provoque la création d'un arc électrique, libérant l'énergie nécessaire pour fusionner le métal d'apport (contenu dans l'électrode) sur le métal à souder. Le flux recouvrant l'électrode sert à protéger le bain de fusion de la contamination atmosphérique. Ce type de soudage exige une vitesse et un angle de soudure constants, et la pointe de l'électrode doit demeurer à la même distance de la pièce. C'est la raison pour laquelle on rapproche le porte électrode lorsque le métal fond.

1.2.3 Rechargement par laser

La technologie laser additive (LAT) utilise un faisceau laser pour faire fondre localement la poudre de remplissage et la surface du matériau cible [5, 6]. Les pièces sont construites couche par couche en focalisant le laser et la source de poudre sur le substrat [7].

La poudre assistée par gaz de protection est délivrée via un système de distribution de poudre intégré et la chaleur générée par le bain de fusion ainsi que le faisceau laser font fondre la poudre et se lient au substrat lors de sa solidification [8, 9]. Par rapport à ses homologues conventionnels le LAT offre les avantages d'une petite zone affectée par la chaleur (HAZ) et d'un petit zone de dilution de la soudure (WDZ) qui protège à la fois les propriétés mécaniques et métallurgiques des substrats soudés [10, 11]. LAT est largement utilisé pour la fabrication de formes libres, le traitement des matériaux, la fabrication, la maintenance et la réparation de pièces de grande valeur et critiques [5, 6] (voir figure 1.3).

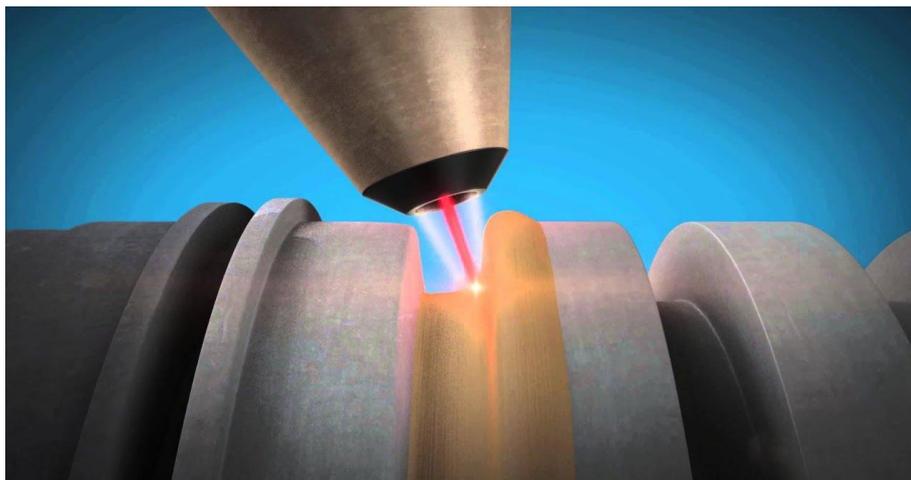


Figure 1.3 : Technologie laser additive

1.2.4 Rechargement par projection thermique

Selon la nature du matériau projeté (poudre ou fil), le type de source d'énergie (flamme ou électricité), les procédés de projection thermique utilisés dans le rechargement dur sont généralement les suivants :

1.2.4.1. Projection flamme avec refusion

Les alliages utilisés pour ces dépôts sont des alliages à base Ni ou Co contenant des éléments d'addition tels que le bore (1%), le silicium (2 à 5 %), le chrome (10 à 20 9%), et pouvant être chargés en carbures (jusqu'à 70 %). Les dispositifs utilisés sont les torches à gaz avec lesquelles les opérations de projection et de refusions sont réalisées simultanément. La refusions est alors réalisée soit à l'aide d'une torche oxyacétylénique ou oxy-propane, soit à l'aide d'un dispositif à induction [12]. Les poudres utilisées sont les carbures de chrome ou de tungstène liés par du nickel à du cobalt, l'alumine ou l'oxyde de chrome. Les dépôts obtenus ont l'avantage d'être très compacts (porosité inférieure à 1%), d'avoir une bonne adhérence. L'épaisseur du dépôt reste en général inférieure à 0,2 mm. Les domaines de l'aéronautique, la sidérurgie, la chimie ou le textile utilisent ce procédé assez contraignant par ses dimensions et ses nuisances sonores.[13]

Dans le mode de projection, le support et son revêtement sont portés à une température élevée. Cet apport d'énergie calorifique, adapté aux matériaux, remet en solution le dépôt, qui se lie au support suivant un procédé de type métallurgique.

On distingue deux types de projection avec refusion, essentiellement utilisés en rechargement: [14]

- la projection-refusion simultanée

La pièce est préalablement préparée et préchauffée à environ 200°C. Le revêtement s'effectue en petites zones successives, immédiatement refondues. Un léger voile de pré-métallisation peut-être effectué sur toute la surface à revêtir pour éviter l'oxydation.

- la projection-refusion subséquente

La pièce préalablement préparée est préchauffée à environ 150°C. Le revêtement est entièrement réalisé en une ou plusieurs passes successives. Le dépôt est ensuite élevé à température adéquate pour le lier par fusion au support.

Dans les deux cas, on respecte un refroidissement à l'abri des courants d'air, avant usinage.

1.2.4.2 Projection à l'arc électrique

Le principe de cette technique consiste à amorcer un arc électrique entre deux électrodes consommables sous forme de fil. La tension appliquée entre ces deux fils varie entre 18 et 40 V pour des intensités de courant comprises entre 100 et 500 A. L'arc généré fait fondre l'extrémité des fils. Une circulation de gaz comprimé (généralement de l'air) permet d'atomiser la partie fondue des fils. La température de l'arc peut dépasser 6000 K dans l'air à pression ambiante, ce qui contribue à un chauffage excessif des particules et une vaporisation importante des gouttelettes. L'utilisation d'air comprimé comme gaz d'atomisation conduit également à l'oxydation des gouttelettes métalliques surchauffées.

Ce procédé permet d'obtenir des dépôts épais de 0,5 à 3 mm avec une adhérence de 20 à 40 MPa. Il permet de déposer des matériaux métalliques ductiles tels que le zinc, l'aluminium ou le cuivre [15] mais également des superalliages non ductiles avec des qualités de dépôt comparables à ceux obtenues par projection plasma, ainsi que des dépôts métalliques renforcés par des particules céramiques non fondues grâce à la technologie des fils fourrés

1.2.5 Réparation par pâte

Les Polymères composites permettent de réparer, de reconstruire et de restaurer les dommages de mécanismes et d'équipements métalliques de façon permanente, ceci sans brasage ou chauffage.

Basée sur une expérience de plus de 50 ans de fabrication et d'application et une haute technicité, la gamme comprend des formulations de produits pâteux ou coulables pour l'aluminium et l'acier.[16]

1.2.5.1 Loctite® Hysol® 3472 A&B

Époxy bi-composant coulable, chargé acier auto-nivelant. Recommandé pour la réparation, le rechargement de pièces usées ou défectueuses. Idéal pour colmater des fissures de fonderie ainsi que pour la réalisation de moules. Un exemple est montré à la figure 1.4.



Figure 1.4 : répartition par pate (Loctite Hysole) [16]

Comme applications pour ce composites, nous pouvons citer:

- Réalisation de moules, montages et prototypes
- Réparation de raccords filetés
- Réparation de raccords et de réservoirs
- Réparation par nivellement des pièces et assemblages métalliques cassés

1.2.5.2 Loctite® 3463

Cette pâte, chargée en poudre d'acier, durcit en 10 minutes. Elle est pratique puisqu'elle est faite en bâton modelable. Elle adhère sur une surface humide et polymérise sous l'eau. Elle possède une bonne résistance chimique et à la corrosion. Elle peut être percée, taraudé et peint.



Figure 1.5 : Pâte Loctite 3463 [16]

Comme applications pour ce composites, nous pouvons citer:

- Etanchéité de fuites sur tuyaux et réservoirs
- Lissage de soudure
- Rebouchage de fissures de fonderie
- Rebouchage de trous taraudés surdimensionnés

1.2.6 Couture métallique

La couture de fissures métalliques est une technique de réparation mécanique qui utilise une combinaison de séries de broches de couture et serrures [17, 18, 19, 20]. Les écluses seraient installées en travers de la ligne commune à intervalles le long de la longueur de fissure. Cette technique a été signalée pour produire des joints étanches aux gaz et aux liquides qui restaurent le métal à son force d'origine sans avoir besoin de souder davantage le joint. Les auteurs ont convenu que la technique offre un certain nombre d'avantages qui comprennent l'amortissement et l'absorption des contraintes de compression, la répartition des contraintes de traction et la dissipation la charge loin de la fissure, en maintenant l'alignement d'origine des surfaces réparées. Les réparations sur site se font avec un démontage minimum de l'équipement, un temps d'arrêt minimum. Elle est rentable et reconnu dans le monde entier. En outre, la couture de fissures métalliques est couramment utilisée sur la fonte, mais a également été appliquée avec succès à d'autres métaux usinables tels que la fonte ductile, l'acier, l'aluminium et les pièces moulées en bronze. La technique est aussi appelée: « Verrouillage des métaux, chirurgie des métaux, soudage à froid, soudage par points et colmatage des fissures » comme autres noms [18].

1.2.6.1 Processus de réparation

Après la détection de la fissure, cette dernière est réparée de manière procédurale. Le processus de base commence par le positionnement, le réalignement en maintenant fermement les surfaces fissurées ensemble à l'aide de fixations et de pinces spéciales [19] comme le montre la figure 1.6. Des trous sont ensuite percés à travers ligne de fracture à la profondeur de l'outil de la coulée à l'aide de gabarits spéciaux. Des serrures sont ensuite installées dans les ouvertures à une profondeur de 80 % de l'épaisseur de la paroi coulée ou métallique [20] et goupillé dans un état étanche métal sur métal, qui devient solidaire du métal de base. Des trous sont ensuite percés le long de la ligne de fissure. Ils sont ensuite tapés et remplis de goujons qui se chevauchent (épingles de couture), résultant en un joint qui a une résistance étanche à la pression et une rigidité de coulée d'origine. Chaque la broche de couture a une rainure de rupture au-dessus de son épaupe qui permet à la tête de se tordre lorsqu'elle atteint le bon couple [20]. Après cela, des burins pneumatiques et des meuleuses peuvent être utilisés pour lisser la surface réparée. Le minimum l'espacement entre les serrures pour une résistance maximale a été signalé comme étant égal à la moitié de la longueur des serrures étant utilisé.

L'application de la technique s'étendrait aux installations et machines, aux moteurs de navires, aux boîtes de vitesses, pour alimenter les presses et les raffineries pétrochimiques.

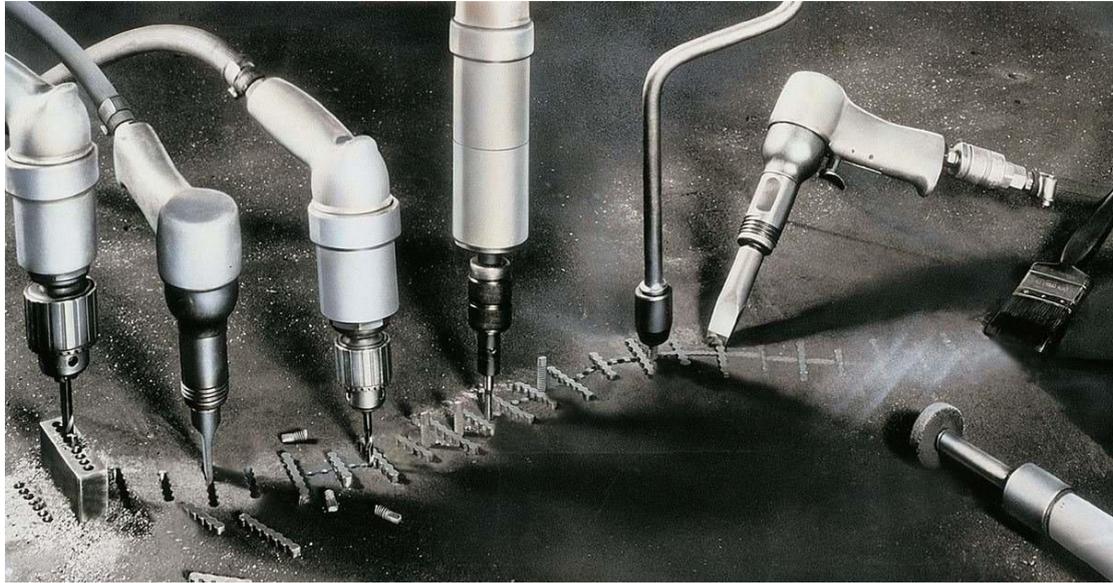


Figure1.6 : Couture métallique [19]

Conclusion :

Les fissures sont des phénomènes dangereux généralement repérés dans les structures que cela soit superficielle ou souterraine. Leur inspection est nécessaire dès le début de leur propagation afin d'éviter toute sorte de rupture .

CHAPITRE 2: MÉTHODOLOGIE

2.1.Introduction

Ce chapitre est consacré à la partie méthodologique de notre travail. Les étapes de préparation et de réalisation ainsi que le matériel utilisé durant nos expériences sont décrits brièvement dans cette section.

2.2. Echantillons

Les matériaux utilisés pour nos expériences sont simplement des barreaux carrés de construction que retrouve dans les chantiers des travaux publics. Selon des informations prises sur le Web, les aciers de construction, des barreaux à face carrée sont en général des aciers au carbone de 0.4 % jusqu'à 0.8 %.

2.3. Préparation métallographique des échantillons:

La préparation métallographique des échantillons sert à les préparer afin de révéler leur microstructure en utilisant un microscope optique,. Les échantillons sont découpés transversalement à l'aide d'une meule.

Toutes les opérations de polissage, analyse micrographique et essais de microdureté sont réalisées dans le laboratoire LTSM au sein du département mécanique.

2.3.1.Polissage:

Après la coupe transversale les échantillons subissent un polissage en 2 étapes:

polissage grossier:

Cette opération est effectuée manuellement à l'aide d'une polisseuse de type PRESI MINITECH 233 et des papiers abrasifs de 220, 400, 600, 800, 1000 et 1200. L'eau est utilisé comme un lubrifiant et un refroidisseur.

polissage de finition:

Dans cette étape on utilise une poudre d'alumine Al_2O_3 en suspension sur un disque couvert par un tissu en soie , on utilise la même polisseuse avec un changement du disque tournant. Après le polissage de finition échantillons subit un rinçage à l'eau et séchage . La figure 2.1 montre une photo de la polisseuse de marque PRESI MINITECH 233. La poudre d'alumine avait une taille de 1 μm . A la fin du polissage, les surfaces des éprouvettes avaient un fini miroir.

attaque chimique:

L'attaque chimique est un procédé qui utilise en général un acide pour révéler les différentes phases et joints de grains que peut contenir une microstructure donnée. L'acide est choisi selon le type de matériau à étudier.

Dans cet étude, le réactif utilisé est le Nital, un solution à base d'acide nitrique et d'eau distillée. La concentration était du Nital utilisé était de 3%.



Figure 2.1 : Polisseuse de finitionPRESI MINITECH 233

2.4. Analyse micrographique de la microstructure:**2.4.1 microscope:**

L'analyse micrographique a pour but de l'étude de la microstructure des échantillons soude et projeté.

Le microscope optique utilisé est un microscope métallographique à plateau inversé de marque Carl Zeiss Axiovert muni d'un appareil photo de marque Sony. Les agrandissements possibles avec ce microscope sont de 100X à 1000X. Les photos des micrographies sont stockés dans la carte mémoire de l'appareil photo. On peut les récupérer par un câble USB lié à un microordinateur. La figure 3.2 montre une photo du microscope optique, l'appareil photo Sony ainsi que le microordinateur.



Figure 2.2 : Microscope optique Carl Zeiss Axiovert.

2.5. Rechargement par soudage:

Le rechargement est une opération qui consiste à rapporter par fusion, sur des parties usées ou fissurées d'un métal soit de même nature (rechargement homogène) ou de nature différente (rechargement hétérogène) de celui du métal de base.

2.5.1. Poste à souder

Le poste à souder utilisé dans ce travail est un générateur de courant de marque Gekamac RKM 650 qui fonctionne sous un voltage de 380 V / 50 Hz. Il est suffisamment puissant pour faire des tâches aussi diverses que celles citées en dessous:

- Soude des électrodes de $\varnothing 2.0$ - $\varnothing 6.0$ mm, tous types d'électrodes.
- Adapté pour le travail en condition très difficile
- Présence d'un potentiomètre permettant un réglage fin des intensités.
- Écran numérique.
- Ventilateur performant permettant un refroidissement rapide
- Présence de 2 roues et de 2 bras de traction [21] .



Figure 2.3 : Poste à souder Gekamac RKM 650.

baguette 7018:

Electrode basique avec d'excellentes caractéristiques opératoires et caractéristiques mécaniques. Un exemple de cette électrode est montré à la figure 2.4

Soudage avec d'excellentes résiliences sur les aciers carbone, teneur jusqu'à 0,4 %.

Rendement de 120%

Excellente soudabilité même en position haute.

Bonnes caractéristiques mécaniques à -40°C

Convient pour déposer des couches sur des aciers à teneur élevée en carbone.[22]

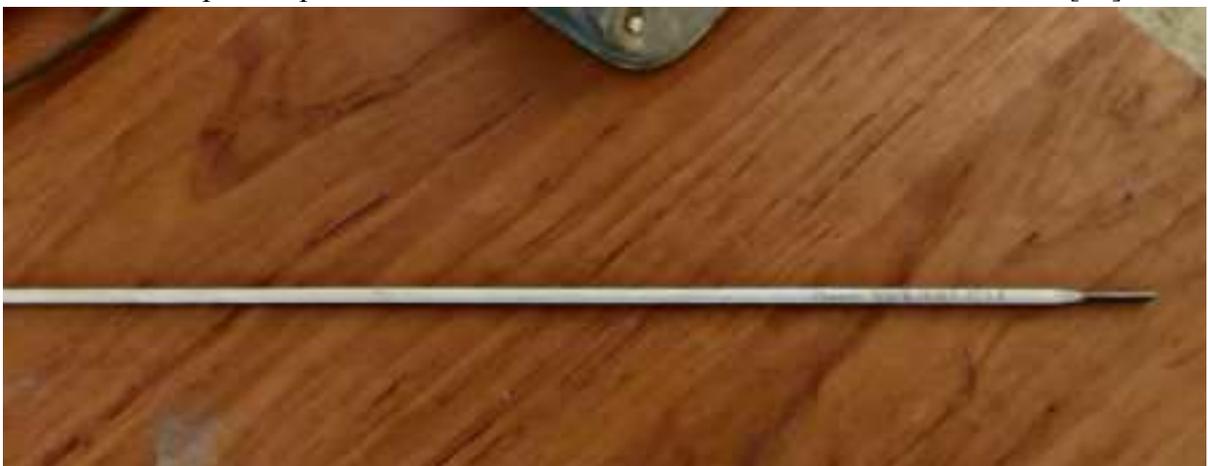


Figure 2.4 : Baguette à souder 7018.

baguette 4800:

Électrode avec une faible reprise d'humidité (LMA) pour aciers doux et faiblement alliés. La baguette dépose un métal solide résistant à la fissuration. En verticale montante, la vitesse de soudage est importante. (voir figure 2.5)

Elle convient particulièrement pour la tuyauterie. On peut l'utiliser dans les constructions où il est impossible d'éviter des contraintes importantes.[23]



Figure 2.5 : Baguette à souder 4800.

Les paramètres de soudage utilisés sont regroupés au tableau 2.1

<u>baguette</u>	<u>intensité</u>	<u>poudres</u>
<u>7018</u>	<u>90-100</u>	<u>Cobaltech 10092</u>
<u>4800</u>	<u>110-120</u>	<u>cobaltech 20092</u>

2.6. Rechargement par projection thermique:

2.6.1 Torche Eutalloy Super jet-S

La torche SuperJet Eutalloy S est une torche de pulvérisation thermique oxyacétylénique qui délivre des revêtements de protection anti-usure très précis. Les poudres d'alliage sont pulvérisées sur la pièce à revêtir et fusionnées simultanément. La liaison avec le métal de base par diffusion garantit qu'il n'atteint pas son point de fusion. Le revêtement dense n'est pas affecté par la dilution et conserve toutes ses propriétés conçues. La conception modulaire du système facilite le retrait de tous les composants pour le nettoyage, l'entretien et éventuellement le remplacement. Des dispositifs de sécurité sont incorporés, tels que : le levier d'arrêt rapide coupe l'alimentation en gaz de la torche. Le chauffage dans la torche provoque la fusion des bouchons frittés pouvant bloquer les gaz.[24] La figure 2.6 montre une photo de la mallette contenant la torche SuperJet-S ainsi que ses accessoires.



Figure 2.6: Torche de projection thermique Eutalloy Superjet-S.

2.6.2 Les poudres

Trois poudres ont été sélectionnées pour le rechargement des fissures provoquées dans les substrats. Elles ont été choisies pour faciliter la fusion. Les trois poudres en question sont:

- Cobaltech 10092. (Alliage Co-Ni-Cr-W-B-Si)
- Tungtech 10112. (Alliage Ni-Cr-B-Si-Fe et carbure de tungstène à 60%) NiAl

2.7. Découpage des échantillons

Des échantillons sous forme de fer carrée d'un acier au carbone de dimension de 1 cm *1 cm et 5 cm de longueur coupée à l'aide d'une tronçonneuse.

2.8.Rechargement par projection

technique de projection :

- préchauffage de l'échantillon.
- projection de la poudre par balayage jusqu'à la fissure est rempli.
- refusion du rechargement par repassage avec la torche sans déposition.

Données technique :

Tableau 2.2: Données techniques de la projection thermique.

Paramètre	Donnée
taux de dépôt	0,5-5,0 Kg/h
débit oxygène	80-1000L/h
débit acétylène	90-1200L/h
pression oxygène	1,5-2,5 bar
pression acétylène	0,5-0,6 bar
distance de projection	4 cm - 5 cm
distance de refusion	2 cm - 3 cm
angle de projection de poudre	90°
angle de refusion	45°

En utilisant les données techniques indiquées dans le tableau au-dessus , on prépare 2 échantillons.

échantillon 1: projeté par la poudre eutalloy tungtech 10112.

échantillon 2: projeté par la poudre eutalloy cobaltech 10092.

2.9 DUROMÈTRE VICKERS

Applications

Les duromètres Vickers servent principalement à mesurer la dureté des pièces fines et de petite taille ainsi que des échantillons avec traitement de surface qui n'exigent que de faibles forces de pression.

Technologies

Cet essai de dureté se fait à l'aide d'une pointe pyramidale qui est pressée contre l'échantillon. L'empreinte sur l'échantillon est ensuite agrandie et mesurée à l'aide d'un appareil optique.



figure 2.7 durometre rockwell

CHAPITRE 3

RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS

3.1.Introduction:

Ce chapitre est consacré aux différentes méthodes utilisées pour réparer une fissure par le biais notamment de la soudure à l'arc et de la projection et par la combinaison des deux méthodes.

Avant de commencer notre travail de recherche, nous avons dû nous initier au soudage à l'arc et à la projection thermique. La première étape pour ces deux méthodes est la préparation de surface. Dans ce travail, nous avons utilisé exclusivement la tronçonneuse ainsi qu'une meule et une bande abrasive montées en même temps sur une même machine. Une fois devenu bien initié aux méthodes de soudage et de projection thermique, nous avons commencé notre travail de recherche. Les résultats ainsi que leurs interprétations seront présentés dans les sections suivantes..

3.2.Préparation des échantillons

Toutes les opérations de préparation des échantillons et rechargement sont réalisées dans le laboratoire de Traitement de Surface & Matériaux sis à la salle 101 du département mécanique. Les échantillons provenaient de barres carrées métalliques de 10 mm x10 mm en acier au carbone (la composition exacte n'est pas connue) que nous avons trouvé à l'atelier de soudage du département de mécanique. Les longueurs des barres étaient d'environ 300 mm à 400 mm.

3.2.1.nettoyage de surface:

Le nettoyage des surfaces est primordial pour assurer une bonne adhérence du métal d'apport, que ce soit pour le soudage ou pour la projection thermique. En utilisant la meule, nous enlevons toute la rouille visible sur la surface et nous créons une légère rugosité pour assurer un bon accrochage mécanique pour la projection thermique. Pour l'opération de soudage, l'adhérence est en général de type métallurgique. La classe de nettoyage dans notre cas était proche de Sa2. Cet état est largement suffisant pour les opérations de soudage et de projection thermique. La figure 3.1 montre une photo de l'aspect d'une surface d'une barre

carrée après nettoyage à la meule. La barre est exempte de souillure, de rouille et on aperçoit bien la rugosité de surface.



Figure 3.1: Baguette de base carrée après nettoyage de sa surface.

3.2.2. création de la fissure

Les barres à base carrée sont saines lorsqu'elles sont ramenées de l'atelier de soudage. Pour simuler une fissure, nous avons utilisé, par le biais de la meule, un disque fin dédié au découpage des aciers pour taillader la barre sur toute sa longueur. La blessure ainsi créée représentera pour nous la fissure qui possède une profondeur d'environ 2 mm. La figure 3.2 montre clairement la fissure ainsi créée sur toute la longueur de la barre en acier.



Figure 3.2: Création d'une fissure dans la barre en acier.

La barre en acier 'fissurée' sera découpée en menu morceau de 10 mm x 10 mm x 50 mm de long et qui constitueront les éprouvettes sur lesquelles les opérations de soudage et de projection thermique seront effectuées.

3.3. Microstructure du substrat de référence

Afin de mieux connaître la nature des barres d'acier que nous utilisons comme éprouvette (nous rappelons que nous les avons trouvées au laboratoire de soudage sans aucune prescription), nous avons prélevé des éprouvettes de ces barres et nous l'avons préparé métallographiquement pour observation au microscope optique. Une attaque au Nital s'en est suivi et a révélé la microstructure montrée à la figure 3.3. La microstructure est complètement perlitique parsemée de grains blanc qui s'apparente à de la cémentite. Il semble donc qu'on est en présence d'un acier au carbone hypereutectoïde.

En utilisant le microduromètre INNOVATEST FALCON 400 , avec une masse de 100 grammes, nous avons trouvé une valeur moyenne de 235 HV₁₀₀. Cette valeur est normale pour un acier hypereutectoïde.



Figure 3.3: Etude microscopique du substrat

3.4. Rechargement mixte

Après la mise en marche du poste à souder, on prépare 2 échantillons en utilisant 2 types de baguettes différentes:

- 1) des échantillons # 1 rechargées avec des baguettes 7018 et complétées par la poudre Cobaltec 10092 pour remplir la fissure.;
- 2) des échantillons # 2 rechargées avec des baguettes 4800 et complétées par la poudre Cobaltec 10092 pour remplir la fissure.

La préparation métallographique de l'échantillon et l'étude microscopique nous mène aux observations suivantes:

Échantillon 1: rechargé par baguette 7018 + poudre Cobaltec 10092

Les paramètres de soudage utilisés sont regroupés au tableau 3.1.

Tableau 3.1: Paramètres de soudage à l'arc et type de poudre de rechargement

Baguette	Intensité (A)	Poudre
7018	90-100	Cobaltec 10092

La préparation métallographique de l'échantillon, l'étude microscopique nous mène aux observations suivantes :

La coupe transversale d'un échantillon rechargée par soudage à l'arc avec une baguette 7018 en ajoutant la poudre Cobaltec 10092 est montrée à la figure 3.4.

Nous distinguons la zone fondue caractérisée par sa structure de coulée. La zone adjacente est clairement identifiée par une structure de Widmanstaetten sous laquelle apparaît une recristallisation se produisant dans l'acier au-dessus de 1000°C et forme de lamelles ou aiguilles révélée par une attaque de l'acier par une solution de Nital. Nous avons constaté que la fissure est remplie complètement par le rechargement. Auparavant, lors de l'utilisation du soudage à l'arc avec des baguettes de différents diamètres et différentes compositions, il y avait toujours une zone, notamment au fond de la fissure, qui n'était pas totalement remplie. Cela ressemblait à une porosité dans la section transversale du substrat. Comme nous n'avons pas fait d'essais de flexion par choc sur éprouvette entaillée Charpy qui permet de mesurer la résistance d'un matériau à la rupture, nous ne pouvons nous prononcer sur le risque de la

présence d'une telle porosité. C'est pourquoi nous nous attachés dans ce travail à obtenir un remplissage "parfait" ou complet de la fissure créée artificiellement.

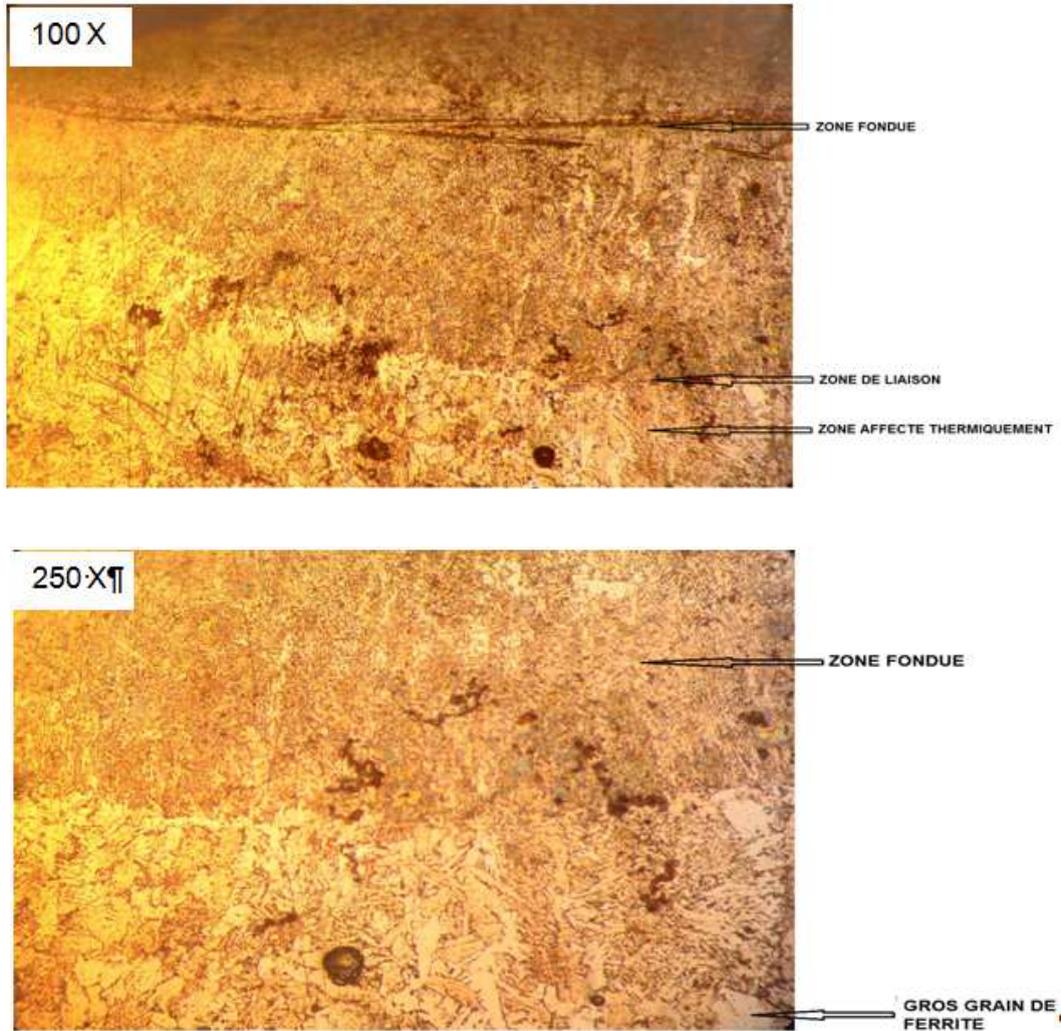


Figure 3.4: Coupe transversale d'un échantillon rechargé par baguette 7018 + poudre Cobaltec

Échantillon 2: rechargé par baguette 4800 + poudre Cobaltec 10092

Les paramètres de soudage utilisés sont regroupés au tableau 3.2.

Tableau 3.2: Paramètres de soudage à l'arc et type de poudre de rechargement

Baguette	Intensité (A)	Poudre
4800	110-120	Cobaltec 10092

La coupe transversale d'un échantillon rechargée par soudage à l'arc avec une baguette 4800 en ajoutant la poudre Cobaltech 10092 est montrée à la figure 3.5.

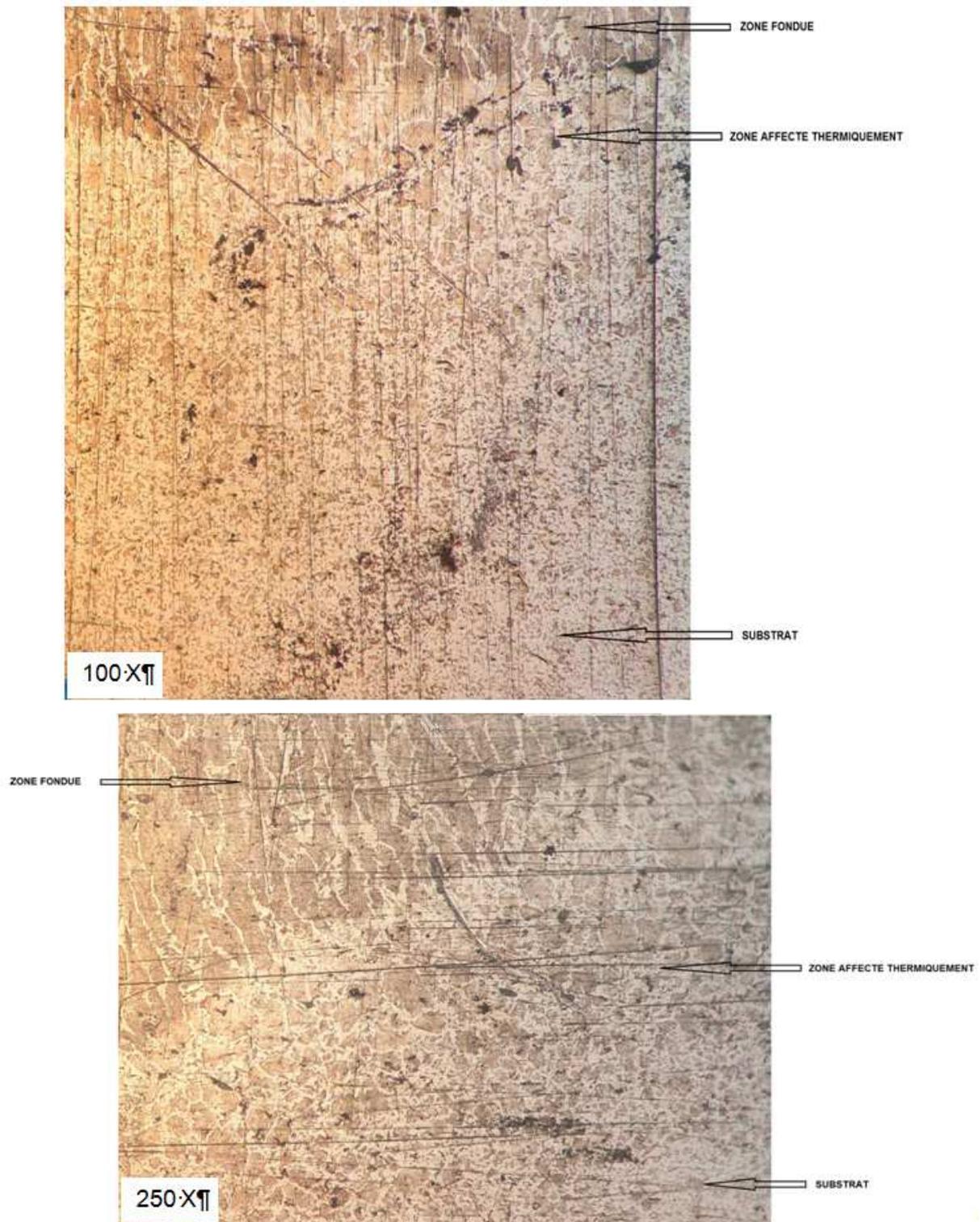


Figure 3.5: Coupe transversale d'un échantillon rechargé par baguette 4800 + poudre Cobaltec

D'après la figure 3.5, nous distinguons encore une fois les trois zones caractéristiques: zone fondue, zone de transition et zone du métal de base. Ici, avec la baguette de rechargement 4800; les microstructures semblent plus grossières que celles observées avec celles obtenues avec la baguette 7018. La seule raison à ce phénomène est probablement la composition chimique des deux baguettes. Les grossissements au microscope optique de la zone affectée thermiquement et de la zone fondue sont montrés respectivement aux figures 3.6 et 3.7 respectivement. Le grossissement important des grains est ici très évident.



Figure 3.6 : Zone affectée thermiquement (baguette 7018 + Cobaltec)

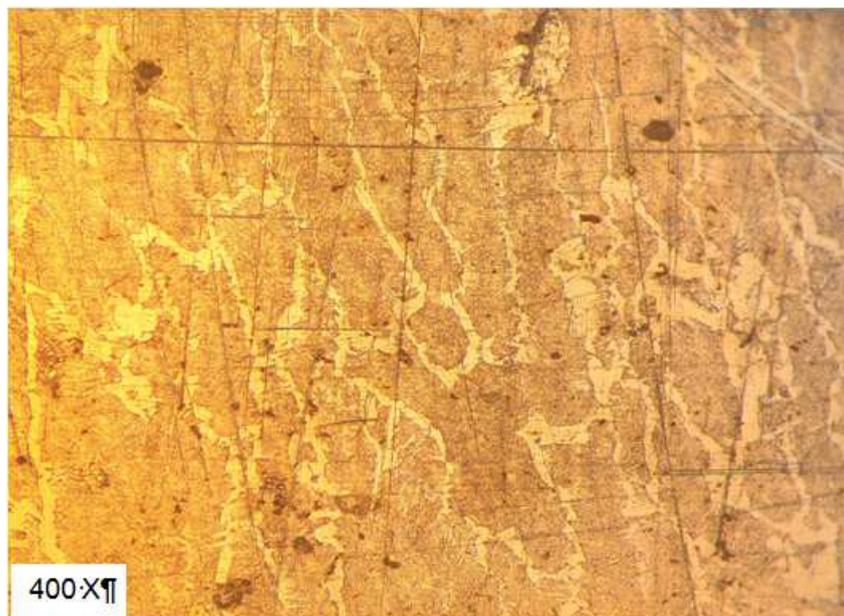


Figure 3.7 : Zone fondue (baguette 4800 + Cobaltec)

Nous constatons aussi qu'avec le soudage à l'arc avec des baguettes de 7018 et l'ajout de la poudre Cobaltec ont complètement rempli la fissure artificielle créée. Nous ne pouvons pas cependant apprécier, encore une fois, l'efficacité de ce remplissage sans d'autres essais mécaniques. D'autres essais de rechargement sont à prospecter pour trouver une solution optimale pour chaque situation (notamment en fonction de la forme, la profondeur et la taille de la fissure).

3.4.1. Microdureté

En utilisant le duromètre INNOVATEST FALCON 400 , on mesure la microdureté des échantillons.

la force est de 100 g/F et l'unité est HV

Tableau 3.3 représente la microdureté moyenne des échantillons recharger par soudage.

échantillons	Microdureté HV ₁₀₀	
	Ech. 1	Ech. 2
zone fondue	267.88 HV	251.89 HV
zone affectée thermiquement	203.27 HV	210.21 HV
zone de métal de base	180.71 HV	167.53 HV

3.5.Rechargement par projection thermique

Afin de vérifier l'efficacité de rechargement des fissures par rapport au rechargement au soudage à l'arc ou par rapport au rechargement mixte, nous avons déposé des rechargements de poudre par projection thermique. Deux poudres ont été déposées: une poudre à base de NiCr et de carbures de tungstène et une autre poudre à base ayant une matrice de cobalt et des carbures de chrome. Après la mise en marche de la torche de projection Eutalloy Superjet-S , on prépare les deux types d'échantillons en utilisant la poudre Tungtec 10112 pour échantillons #1 et la poudre Cobaltec 10092 pour les échantillons notés ici #2. Les données techniques de la projection thermique sont données dans le tableau 3.4.

Échantillon #1: (rechargé par refusion : poudre Tungtec 10112).

La figure 3.8 montre une coupe transversale d'un échantillon coupé à l'endroit de la fissure artificielle. Nous distinguons bien les contours de la fissure dans laquelle est rempli le revêtement par la Tungtec ainsi que la zone de liaison et le substrat. Il est remarquable de noter que la poudre a complètement rempli la zone de fissuration. Les différences de microdureté dans les différentes zones sont essentiellement dues à la nature même du matériau de rechargement. Nous observons une matrice de nickel-chrome chargée de carbures de tungstène qui sont bien distribuées. La zone de liaison est très mince comparativement aux ZAT que l'on observe dans le soudage à l'arc. Ceci veut dire que l'influence thermique de la projection thermique sur le substrat est très limitée. C'est une piste intéressante qu'il faudra développer dans une étude ultérieure pour apprécier les disparités mécaniques d'un rechargement par projection thermique dans la réparation des fissures.

Les microduretés notées ci-dessous ne sont pas ne sont pas importantes dans la mesure où il faut chercher d'abord à optimiser le choix de la poudre en fonction de la composition chimique du substrat. Cependant, il est intéressant de noter que la zone de liaison est non seulement très mince mais a une microdureté proche de celle du substrat.

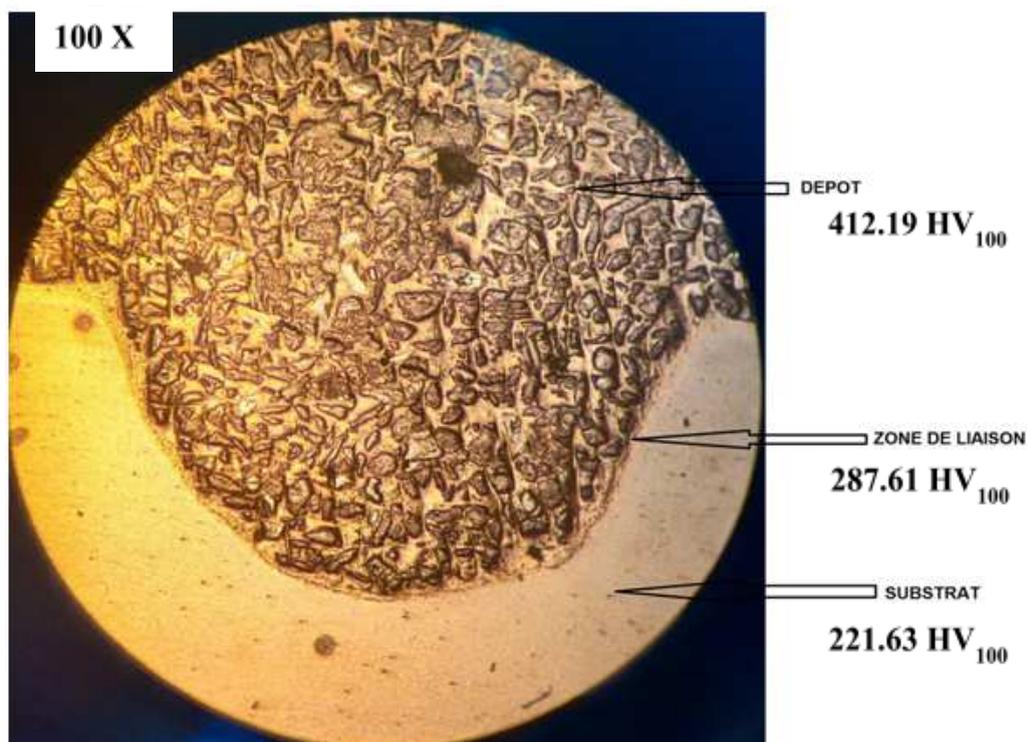


Figure 3.8: Rechargement d'une fissure par projection thermique avec la Tungtec.

Échantillon 2: (rechargé par refusion : poudre Cobaltec10092).

La figure 3.9 montre une coupe transversale d'un échantillon coupé à l'endroit de la fissure artificielle. Nous distinguons bien les contours de la fissure dans laquelle est rempli le revêtement par la Cobaltec ainsi que la zone de liaison et le substrat. Il est remarquable de noter que la poudre a complètement rempli la zone de fissuration. Les microduretés entre la zone de liaison et le substrat n'est pas très élevée. La zone de liaison est là aussi très mince. Elle semble adhérer de façon métallurgique au substrat. Le remplissage de la fissure est parfait.

La périphérie de la zone de liaison avec le substrat semble un peu affinée mais sur une épaisseur très mince. Les tâches circulaires dans le revêtement qui ressemblent à des étoiles en mouvement dans le ciel, représentent la dispersion des carbures dans la matrice de cobalt. Ici aussi, l'influence du traitement thermique subit par le substrat semble très limitée. Nous voyons qu'à travers les microduretés des échantillons #1 et #2, la nature de la zone de fusion qui dépend de la poudre utilisée ainsi que les épaisseurs des zones de liaison, un travail d'optimisation du choix des poudres est plus que nécessaire.

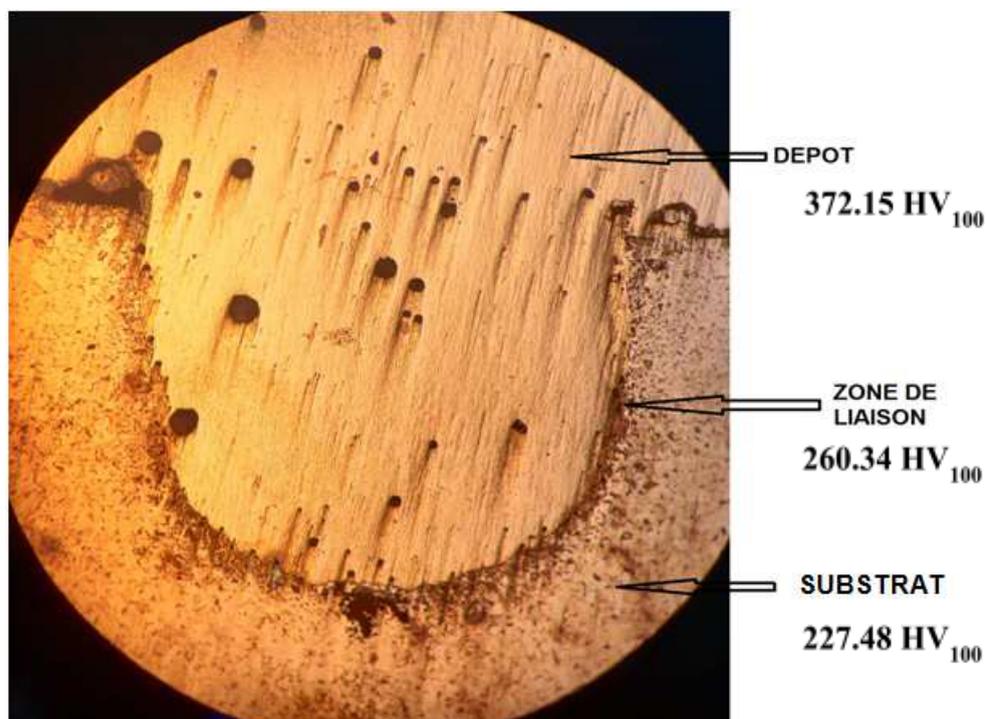


Figure 3.9: Rechargement d'une fissure par projection thermique avec la Cobaltec.

Conclusion

Les deux techniques assurant une très bonne réparation de fissure mais d'après les résultats obtenus on peut constater que le soudage a un effet sur la micrographie et les paramètres mécanique du substrat contrairement à la projection thermique

Conclusion General

Le colmatage de fissure est un traitement qui vise à reboucher un trou, une fente, voire une fuite, sur une pièce mécanique en acier généralement. En pratique, la méthode consiste à obturer la fissure au moyen d'une injection, ou d'une autre technique identique comme le rechargement. Le remplissage du produit de colmatage n'est en général fait que sur une certaine profondeur. Dans cette étude, nous avons créé artificiellement une fissure sur des barres carrées en acier au carbone dans le but de les colmater soit avec un rechargement à l'arc électrique ou par projection thermique ou bien en employant les deux méthodes simultanément. Les résultats ont montré que:

-Pour le soudage à l'arc, le colmatage se fait généralement plus ou moins bien selon le diamètre des baguettes et la nature de la technique utilisée. Pour le soudage à l'arc, l'emploi de baguettes de petits diamètres pour entamer la réparation suivi de baguettes de plus gros diamètre pour le remplissage s'est avéré plus efficace. Si les disparités mécaniques sont à tenir en compte, il faudra suivre le rechargement par un traitement thermique approprié pour atténuer cette différence.

-Pour la projection thermique, le colmatage s'est fait de manière plus douce et plus efficace que le rechargement par le soudage à l'arc. Les zones de liaison sont très minces ce qui indique que l'effet de chaleur apporté par la projection thermique est négligeable. Cependant, le choix de la poudre de remplissage est très important. Il influence les propriétés du matériau réparé et les disparités mécaniques sont très importantes.

-Il semble qu'une utilisation mixte des deux techniques semble la plus judicieuse. La projection thermique est d'abord utilisée pour colmater correctement la fissure en profondeur, ensuite le soudage à l'arc est employé pour le remplissage de la fissure.

-Des études doivent être faites avec le rechargement par le soudage TIG qui a la possibilité de rechargement avec une plus douceur les fissures.

-Une étude sur le choix des poudres à employer pour la projection thermique doit être aussi réalisée pour optimiser les paramètres opératoires du rechargement.

Au final nous pouvons donc dire que la réparation des fissure par rechargement est un choix favorable pour maintenir et lutter contre toute sorte d'endommagement structural

Références

- [1]. Pook, L.P. (1983) The Role of Crack Growth in Metal Fatigue. Metals Society, London.
- [2] P. Hart, “Weld Metal Hydrogen Cracking in Pipeline Girth Welds,” in 1st International Conference, Wollongong, Silverwater, Australia, 1999.
- [3]: Revêtements anti-usure pour une plus longue durée de vie, Guide de la Réparation et Maintenance par Soudage, ESAB, , pp 3-39. 2e édition, (2003).
- [4]: CEMEQ, Module 9, chap2, LE SOUDAGE À L’ARC AVEC ÉLECTRODE ENROBÉE SMAW, (2000) [
- 5] J. Yu, M. Rombouts, G. Maes and F. Motmans, “Material properties of Ti6Al4V parts produced by laser metal deposition,” Physics Procedia, vol. 39, pp. 416 - 424, 2012.
- [6] B. Graf, S. G. A. Ammer and M. Rethmeier, “Design of experiments for laser metal deposition in maintenance, repair and overhaul applications,” in 2nd International Through-life Engineering Services Conference, Berlin, Germany, 2013.
- [7] P. A. Kobryn and S. L. Semiatin, “Mechanical Properties of Laser-Deposited Ti-6Al-4V,” Wright-Patterson Air Force Base, USA, 2002
- [8] R. M. Mahamood, E. T. Akinlabi, M. Shukla and S. Pityana, “Laser Metal Deposition of Ti6Al4V: A Study on the Effect of Laser Power on Microstructure and Microhardness,” in Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2013 Vol II, Hong Kong, 2013.
- [9] S. Pityana, R. M. Mahamood, E. T. Akinlabi and M. Shukla, “Gas Flow Rate and Powder Flow Rate Effect on Properties of Laser Metal Deposited Ti6Al4V,” in Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2013 Vol II,, Hong Kong, 2013 . 27
- [10] N. K. Dey, F. W. Liou and C. Nedic, “Additive Manufacturing Laser Deposition of Ti-6Al-4V for Aerospace Repair Applications,” international SFF Symposium, Texas, 2013.

[11] I. Kelbassa, A. P. Patrick, J. Dietrich and J. Wilkes, "Manufacture and repair of aero engine components using laser technology (invited paper)," in 3rd Pacific International Conference on Application of Lasers and Optics, Germany, 2008.

[12] Lech powlowski Dépôts physiques, techniques, microstructures et propriétés Première édition, presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne 2003

[13] H. GRANJON, <> 2ème édition, Publication du Soudage et de ses applications à Paris. 1995.

[14] Corrosion – SURFATEC

[15] Fauchais P., Grimaud A., Vardelle A., Vardelle M., (1989) "La projection plasma revue", Ann. Phys. Fr., Vol.14, pp. 261-310.

[16] www.loclite.com

[17] Locknstitch, "Precision Metal Stitching (Metal Locking) Service," Locknstich, [Online]. Available: <http://www.locknstitch.com/precisionmetal-stitching.html>. [Accessed 11 April 2016]

[18] Metal-Crack-Stitching, "What is cold mechanical stitching?," Metal Crack Stitching, [Online]. Available: <http://www.metalcrackstitching.com/>. [Accessed 11 April 2016].

[19] Metalock-Engineering, "Metal Stitching," Metalock Engineering UK, [Online]. Available: <https://www.metalock.co.uk/typical-on-siterepairs/metal-stitching.aspx>. [Accessed 11 April 2016].

[20] Reynolds-French-and-Company, "Lock-n-Stitch repair services," Reynolds French and Company, [Online]. Available: http://www.r-f.com/lock_n_stitch_repair.asp. [Accessed 11 April 2016].

[21] <https://gedikwelding.com/fr/product-detail/rkm-650>

[22] https://www.lincolnelectric.com/assets/global/Products/ConsumableEU_StickElectrodes/Baso-Basic7018/basic7018-fr.pdf

[23] <https://www.soudure.fr/ok-4800-a2198.html>

[24] <https://www.castolin.com/product/superjet-s-kits>