

République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mohamed Khider- Biskra

Faculté des sciences et de la
technologie

Département: Génie mécanique

Réf:.....



جامعة محمد خيضر بسكرة

جامعة محمد خيضر بسكرة

كلية العلوم و التكنولوجيا

قسم: الهندسة الميكانيكية

المرجع:.....

Mémoire présenté en vue de l'obtention
Du diplôme de

Magistère

Spécialité: Génie Mécanique
Option: Construction mécanique

L'aspect Métallurgique de Rechargement Des Pièces Métalliques

Présenté par:

Benmokhtar Aissa

Soutenu publiquement le: 15 /12 /2011

Devant le jury composé de:

Nadir Amrane
Adel Benchaabane
Mohamed Hadid
Zakaria Boumerzoug

Professeur
M.C.A
M.C.A
Professeur

Président
Examineur
Examineur
Rapporteur

Université de Biskra
Université de Biskra
Université de Biskra
Université de Biskra

REMERCIEMENTS

J'exprime toute ma reconnaissance à Monsieur Z.BOUMERZOUG Professeur à l'Université de Biskra pour sa patience et son encadrement de qualité.

Je remercie M.GUECHICHI M. et M. HAMRIT A. chef d'atelier et Ingénieur au sein de l'entreprise de maintenance des équipements industriels M'sila (MEI) qui m'ont facilité la tâche en accédant aux différentes machines.

Je remercie Monsieur N.Amrane Professeur à l'Université de Biskra, Monsieur M.Hadid Maître de conférences "A" à l'Université de Biskra, et Monsieur A.Benchaabane Maître de conférences "A" à l'Université de Biskra d'avoir accepté de participer au jury.

Je présente mes plus sincères remerciements à Monsieur A.Chala Professeur à l'Université de Biskra qui a accepté de porter un jugement critique sur ce travail.

Je tiens également à remercier vivement mes professeurs:

M^{er} A.Benchaabane Professeur à l'université de Biskra.

M^{er} M.Hadid Professeur à l'université de Biskra.

M^{er} M.Assas Professeur à l'université de Batna.

M^{er} M.Hecini Professeur à l'université de Biskra.

M^{er} N.Amrane Professeur à l'université de Biskra.

M^{er} M.Barkat Professeur à l'université de Biskra.

M^{er} M.Belounar Professeur à l'université de Biskra.

M^{elle} S.Rabehi Professeur à l'université de Biskra.

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail à :

- La mémoire de mes très chers parents
- Mes frères et sœurs
- Ma femme qui m'a longuement soutenu
- Mes filles hind, mouna, wafa et yasmine
- Mon fils khaled
- Tous les amis

SOMMAIRE

Introduction Générale.....	6
Chapitre I: Procédés de revêtement des aciers.....	9
I.1.Cémentation.....	9
I.2.Nitruration.....	12
I.3. Carbonitruration	14
I.4.Métallisation.....	16
I.5.Rechargement des aciers.....	19
Chapitre II: Différentes techniques de rechargement utilisé par la MEI	23
Introduction	23
II.1.Rechargement à la flamme (métallisation)	23
II.2.Métallisation à la flamme en poudre	26
II.3.Métallisation à la flamme en fil.....	30
II.4.Rechargement par soudage.....	32
II.4.1.1.Rechargement MIG.....	34
II.4.1.2.Rechargement TIG.....	34
II.5.Métallisation au plasma d'arc.....	35
Chapitre III: Méthodes expérimentales.....	41
III.1.Matériaux étudiés.....	41
III.2.Préparation des surfaces.....	42
III.3.Les modes de préparation.....	43
III.4.Préparation des échantillons.....	44
III.5.Techniques de caractérisation	42
III.5.1. Microscopie optique.....	45
III.5.2. Microdureté.....	46
III.5.3. Diffraction des rayons X.....	48
III.5.4. Microscopie électronique à balayage.....	51

Chapitre IV: Caractérisation et interprétation des résultats de rechargement à la flamme de l'acier 42CrMo4	55
Introduction	55
IV.1- Caractérisation microscopique.....	55
1. a- Premier cas	55
1. b- Deuxième cas	56
IV.2- Caractérisation par le MEB	61
2. a- Premier cas	61
2. b- Deuxième cas	64
IV.3- Caractérisation par diffraction des rayons X	68
3. a- Premier cas	68
3. b- Deuxième cas	68
IV.4- Microdureté Vickers	70
Conclusion Générale	74
Références bibliographiques	77

Introduction générale

De nombreuses pièces dans des domaines industriels différents (mécanique, aéronautique, navales ...) sont exposées à l'usure. Cette usure fait perdre à ces pièces leurs dimensions initiales et par conséquent les mécanismes et les systèmes mécaniques auxquelles elles appartiennent ne fonctionnent plus normalement.

Economiquement parlant jeter ces pièces usées et les échanger par des pièces neuves revient très chers.

Parmi l'ensemble des solutions disponibles à travers les ateliers du monde industriel pour renforcer la tenue de ces pièces à l'usure, des techniques de rechargement occupent une place à part. Cette opération de réparation est un service qui passe nécessairement par la maîtrise d'un grand nombre de savoir-faire technique et aussi la maîtrise de paramètres métallurgiques complexes et impose des contraintes de réalisation dont la méconnaissance en rend les résultats aléatoires.

Le procédé de réparation est une technique utilisée à l'heure actuelle pour différentes applications :

- Reconstruction aux dimensions voulues de zones détériorées par usure.
- Réparation de pièces dégradées par corrosion et / ou oxydation.
- Réparation de pièces dégradées par fissuration et par fatigue.
- Réparation de pièces dégradées par chocs thermiques.

La plus part des matériaux métalliques peuvent être rechargés : aciers inox, aciers, aluminium, cuivre, bases de cobalt, bases de nickel ...

En principe en rechargeant ces pièces avec un métal d'apport approprié, les dépôts présenteront des caractéristiques identiques à celles d'origine.

Le molybdène est actuellement l'un des matériaux utilisé par l'entreprise de maintenance des équipements industriels (MEI) pour la réparation des vilebrequins tout en assurant :

- Une très bonne tenue en température (stabilité des caractéristiques mécaniques).
- Une bonne résistance à l'oxydation à chaud.
- Excellente tenue au frottement.
- Une bonne usinabilité.

Ainsi l'objectif de ce mémoire est d'étudier :

La qualité de rechargement (métallisation) utilisée pour les deux échantillons:

1^{er} échantillon : rechargé uniquement par le molybdène.

2^{eme} échantillon : rechargé par l'acier (sous couche d'accrochage) et le molybdène.

L'opération de rechargement s'effectue généralement par fusion du métal d'apport ce qui provoque l'échauffement du métal de base, opération qui induira des changements de la microstructure et des propriétés mécaniques. Pour cela on va utiliser les techniques de caractérisation suivantes:

- La microscopie optique.
- Le MEB.
- La diffraction des rayons X.
- La dureté.

L'étude s'appuie sur des essais de métallisation réalisés sur deux paliers, afin d'avoir une estimation sécuritaire de la résistance au frottement et à l'usure.

Dans un premier chapitre, nous avons évoqué tous les procédés de revêtement thermo-chimiques (cémentation, nitruration, carbonitruration...) des aciers couramment utilisés pour assurer de bonnes qualités de résistances à l'usure et au frottement.

Dans un deuxième chapitre, nous avons décrit les différentes techniques de revêtement utilisées dans le domaine industriel. Nous verrons les principes et les mécanismes de rechargement par soudure (TIG, MIG) et par flamme d'une part, et les techniques employées par la MEI (M'sila) d'autre part.

Dans un troisième chapitre, nous avons présenté toutes les techniques de caractérisation utilisées pour suivre les changements microstructuraux et caractériser ainsi nos échantillons.

Dans un quatrième chapitre, et pour finir nous verrons les principales caractérisations, leurs interprétations et les conclusions à tirer de cette étude.

Chapitre I

REVETEMENT ET RECHARGEMENT DES ACIERS

Chapitre I: Revêtement et rechargement des aciers

Introduction

Pour apporter une réponse adéquate aux différentes sollicitations que peut subir une pièce au niveau de son interface (frottement, corrosion ...), il est souhaitable que la pièce présente de hautes caractéristiques de dureté et de résistance mécanique permettant ainsi d'améliorer la résistance au frottement et à l'usure. Parmi les procédés de traitement de surface couramment employés pour assurer les sus dites propriétés on utilise la voie thermo-chimique (cémentation, nitruration,...) complétée éventuellement par la voie mécanique (grenailage).

I- Procédés de revêtement des aciers

Les traitements thermo-chimiques consistent à réaliser un gradient de composition chimique par diffusion le plus souvent d'un métalloïde : C, N, C+N, O. Les traitements les plus connus sont la cémentation, la nitruration et l'oxydation utilisés seuls ou combinés.

I.1- Cémentation.

La cémentation consiste à enrichir superficiellement en carbone une pièce mécanique maintenue à une température supérieure au point de transformation A_{c3} de l'acier considéré dans un milieu carburant. L'opération consiste à réaliser une couche apte à la trempe par diffusion de carbone et à refroidir brusquement l'ensemble pour assurer la transformation martensitique de cette couche superficielle [1].

Le traitement de cémentation est le plus souvent réalisé en atmosphère gazeuse endothermique qui après décomposition thermique du méthanol, donne des compositions proches de celles fournies par les générateurs endothermiques.

La cémentation comporte généralement deux étapes : l'enrichissement en carbone d'une couche superficielle de la pièce, suivie d'une trempe qui conduit à la dureté voulue. L'enrichissement en carbone est l'étape chimique du traitement. Par mise en contact avec un milieu cémentant, on forme à la surface de l'acier une couche superficielle plus au moins profonde enrichie en carbone. Il y a en fait deux phénomènes qui interviennent : une réaction

chimique qui fournit du carbone à la surface du métal et un phénomène de diffusion dans la zone superficielle du métal de la surface vers l'intérieur.

La solubilité du carbone en phase austénitique étant plus élevée en phase austénitique qu'en phase ferritique et le coefficient de diffusion augmente avec la température. Le traitement d'enrichissement a lieu à l'état austénitique vers 900-950°C.

Le traitement de cémentation utilise trois types de ciments :

- Cément solide
- Cément liquide
- Cément gazeux

Actuellement la cémentation gazeuse [2] s'adapte le mieux aux productions industrielles en série. Un milieu cémentant gazeux est obtenu à partir d'un générateur exo ou endothermique avec addition plus au moins importante d'hydrocarbures (CO, CO₂, H₂O, H₂, CH₄, et N₂).

La connaissance des caractéristiques de l'atmosphère pour les quelles il y a possibilité de formation de carbures et / ou d'oxydes est en général nécessaire pour conduire correctement un traitement de cémentation [3].

Le milieu cémentant agit comme une source de carbone superficielle fixant dans les conditions d'équilibre la teneur en surface. Il va donc y avoir simultanément un phénomène de diffusion: un gradient de concentration est établi dans lequel la teneur en carbone décroît de la surface au centre.

Le durcissement de la couche carburée s'obtient par trempe (en général à l'huile) après trempe les pièces subissent un revenu de détente vers 150 à 200 °C conduisant à une augmentation de la ténacité de la couche.

Récemment, deux variantes du procédé de cémentation gazeuse se sont développées; il s'agit de la cémentation sous pression réduite [4] et de la cémentation par bombardement ionique. Dans les deux cas il n'y a pas d'oxydation superficielle, laquelle se traduit par une chute de dureté près de la surface avec réduction de la résistance à la fatigue thermomécanique.

Le bombardement ionique permet d'obtenir avec des atmosphères contenant essentiellement du propane, une très grande vitesse de transfert du carbone dans les pièces traitées, ce qui entraîne une amélioration des cinétiques de cémentation. La cémentation ionique permet aussi de mieux contrôler l'homogénéité de l'épaisseur de la couche cémentée (Fig. I.1) ce qui se traduit par une meilleure maîtrise des variations dimensionnelles après le traitement thermique de trempe [1].

Dans le domaine des aciers pour moules dont la teneur en carbone est comprise entre 0.07 et 0.35 %, le traitement de cémentation est réalisé à des températures de l'ordre de 850 à 1030 °C. La durée de traitement est fonction de la profondeur recherchée. Pour conserver des caractéristiques de ténacité suffisantes, la teneur superficielle en carbone est limitée à 0.6 – 0.9 %. Une sur- carburation conduirait à la formation d'austénite résiduelle et à une précipitation de carbures sur les joints de grains [33] (Fig. I.2).



Fig. I.1 : Micrographie optique d'un échantillon d'acier cémenté [1].

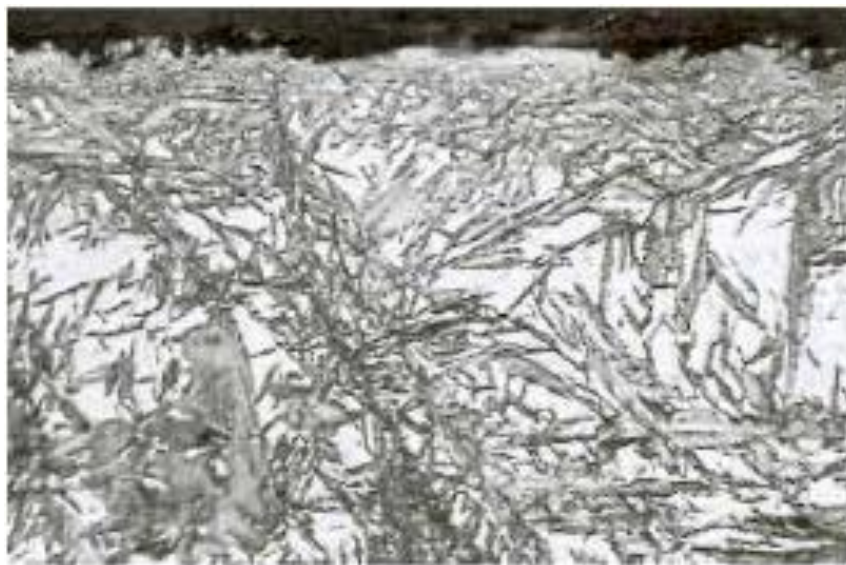


Fig. I.2: Austénite résiduelle dans une couche cémentée et durcie par trempe.

1.2- Nitruration

Ce traitement est actuellement celui qui est le plus largement utilisé. Ce procédé consiste à faire diffuser de l'azote à partir de la surface de l'acier pour augmenter sa résistance à l'usure et aux contraintes mécaniques ou thermomécaniques [1].

Il se forme en général en surface une couche de nitrures ou de carbonitrures souvent composite, dite couche de combinaison (couche blanche) dont les propriétés tribologiques sont mises à profit dans le domaine de la mise en forme. En dessous de cette couche de combinaison se trouve la couche de diffusion, qui contient de l'azote en solution solide et dont l'effet durcissant est obtenu par la précipitation de très fins nitrures d'éléments d'alliage (Cr, Mo, V,...).

La différence essentielle avec la cémentation réside dans le fait que la diffusion d'azote se fait à l'état ferritique, à des températures de l'ordre de 550 °C qui correspond au domaine du revenu après trempe initiale. Il n'y a donc pas de trempe ultérieure avec toutes les incidences que cela comporte au niveau des déformations.

Il existe plusieurs variantes de traitements de nitruration. Les plus utilisées industriellement sont la nitruration en phase liquide (bain de sel) et la nitruration ionique (assistée par plasma) [5].

Dans la variante, traitement en phase gazeuse, les bains de sels sont composés par des mélanges de cyanates et de cyanures alcalins, et l'élément actif est le cyanate qui se transforme en carbonate avec formation d'azote naissant.

Les températures utilisées sont voisines de 570 °C avec des temps de maintien n'excédant pas une dizaine d'heures. Dans ces conditions, des couches de combinaisons constituées de nitrures Fe_4N et $Fe_{2-3}N$ se forment avec présence d'oxydes superficiels liés au brasage des bains par l'air [6].

La nitruration ionique est une autre technique du traitement. Elle consiste à opérer en phase gazeuse sous pression réduite et à activer l'atmosphère par un plasma établi entre l'enceinte et la pièce à traiter sous une tension inférieure à 1000 V. Les espèces dissociées ou excitées par le plasma réagissent à la surface des pièces et provoquent la nitruration. L'intérêt principal de ce traitement est que l'atmosphère gazeuse réactive peut être choisie indépendamment des conditions de travail, ce qui rend possible la réalisation de couches de combinaison monophasées avec un réglage du potentiel azote et du potentiel carbone de l'atmosphère en fonction de la

teneur en carbone de l'acier. Les températures utilisées varient entre 400 et 580 °C avec des temps de maintien de 30 minutes au minimum et de 70 heures au maximum. Les atmosphères utilisées sont adaptées à la composition chimique de la nuance et il est possible de réaliser l'une des configurations suivantes :

- Couche de diffusion seule dans le cas des aciers fragiles ;
- Couche de diffusion + couche de combinaison dans les cas les plus usuels ;
- Couche de diffusion + couche de combinaison dans le cas où l'on cherche une très grande résistance à l'usure (Fig. I.2).

Dans le domaine des aciers à outils relativement chargés en éléments d'alliage tels que le chrome, le molybdène et le vanadium. La diffusion d'azote va entraîner la formation de nitrures submacroscopiques et va se traduire par l'obtention de duretés élevées avec des niveaux de contraintes résiduelles importants. Par contre, la précipitation de nitrures tend à réduire l'épaisseur de la couche de diffusion.

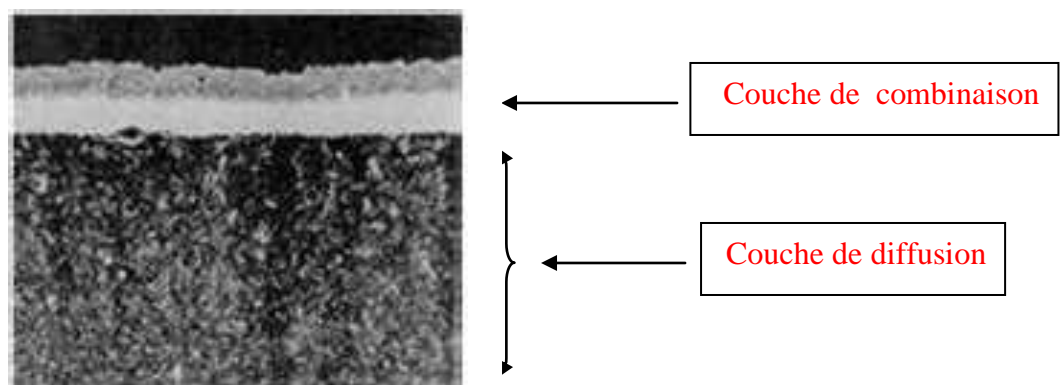


Fig. I.3: Micrographie optique d'un échantillon d'acier nitruré [26].

Pour éviter l'abaissement des caractéristiques mécaniques du substrat, il faut adopter une température de nitruration inférieure d'au moins 30°C à celle du revenu précédent [7].

Une meilleure résistance à la fatigue thermique et à la fatigue mécanique sera assurée par des duretés superficielles très élevées (sup. à 1000 Hv) [2] et des épaisseurs de couches nitrures relativement faibles (inf

à 100 μm); par contre une bonne résistance à l'usure à chaud et au fluage sera obtenue par des épaisseurs de couches importantes (300 à 40 μm).

Il y a donc, des liaisons importantes qui existent entre les caractéristiques de la couche de diffusion d'azote, l'état de surface de la couche de combinaison et les performances en fatigue thermique.

1.3-Carbonitruration

Pour cette opération, les pièces sont chauffées pendant 2 à 10 h jusqu'à 850 ou 860 °c dans un milieu gazeux composé de gaz carburant et d'ammoniac [1]. Il est établi que la diffusion simultanée du carbone et de l'azote accélère la diffusion du carbone. La vitesse de la progression des couches carbonitrurée et cémentée à la profondeur de 0.5 mm est pratiquement la même, bien que la température de nitrocarburation soit presque de 100°c inférieure. L'épaisseur ordinaire d'une couche carbonitrurée est de 0.2 à 0.8 mm.

Pour la carbonitruration on recommande d'employer une atmosphère endothermique contrôlée à laquelle on ajoute de 3 à 15 % de gaz d'éclairage non traité et de 2 à 10% de NH_3 , ou dans le cas d'un four à cuve, un ciment liquide, la triéthanolamine ($\text{C}_2\text{H}_5\text{O}$) $_3\text{N}$, introduite dans l'espace utile du four sous la forme de gouttes.

La carbonitruration est suivie de trempe effectuée soit à la sortie du four après refroidissement jusqu'à 800 ou 825 °c, soit après un deuxième chauffage; on recourt également à une trempe étagée. Après trempe, on applique le revenu à 160 ou 180°c.

Dans les conditions de saturation optimale, la structure d'une couche carbonitrurée doit se composer de martensite à grains fins, d'une petite quantité de carbonitrides fins uniformément répartis et de 25 à 30 % d'austénite résiduelle [33] (Fig. I.4).



Fig. I.4: Couche carbonitrurée: structure martensitique et austénite résiduelle [33].

La dureté de la couche après trempe et revenu à basse température est de 58 à 64 HRC (570 à 690 HV) [34] (Tab. I.1).

Nuance	Dureté avant traitement HV 1	Dureté après traitement HV 1	Durée du traitement
XC 38 (.C 40) état recuit	180	320	1 h 30 min
XC 38 (.C 40) état trempé revenu	250	440	1 h 30 min
42 CrMo 4 état trempé revenu	380	580	1 h 30 min
		600	2 h
		640	3 h
		740	4 h
Z 3 CN 18-8	230	700	1 h 30 min
Fonte GS	380	740	1 h 30 min

Tab. I.1: Exemple de duretés superficielles sur différents alliages ferreux [34].

La teneur élevée en austénite résiduelle assure un bon rodage, par exemple, dans le cas des pignons d'automobiles non rectifiés, ce qui définit l'absence de bruit en service. La résistance maximale s'obtient seulement dans le cas d'une teneur optimale pour l'acier donné en carbone et azote à la surface de la couche carbonitrurée.

La teneur de la couche en azote ne doit pas être inférieure à celle qui élimine les conséquences nocives d'une oxydation interne (≥ 0.1 à 0.15 %). Lorsque la teneur en azote est élevée (0.4 à 0.5 %), il se forme dans la couche un "composant sombre". Ces deux défauts de microstructure altèrent la limite de fatigue à la flexion et la résistance de contact. La part optimale du carbone dans la somme C+N dépend de la nuance de l'acier et varie dans de larges limites de 1.0 à 1.65 %. Dans le cas d'une basse concentration de carbone, dans la structure de la couche, aux joints des grains de martensite, apparaît la troostite. Quand la teneur en carbone d'un acier contenant Cr, Ti, V est élevée, il se forme des carbonitrures qui se fixent préférentiellement aux joints des grains sous forme de réseau continu ou discontinu. Le passage du carbone et des éléments d'alliages dans les carbonitrures réduit la stabilité de l'austénite, ce qui conduit également à la formation de la troostite au sein de la couche. La constitution d'un réseau de carbonitrures et de troostite diminue la limite de fatigue, la plasticité et la ductilité de l'acier.

La carbonituration gazeuse est ordinairement appliquée aux pièces de forme complexe, par exemple, aux pignons qui ont tendance à gauchir. Elle présente les avantages suivants sur la cémentation gazeuse. L'opération

marche à des températures plus basses (850 à 870 °c au lieu de 9030 à 960 °c); la couche à obtenir est plus mince; le gauchissement et la déformation des pièces sont plus faibles; la tenue à l'usure et à la corrosion est plus importante; l'absence de suie se déposant sur les pièces et les parois du four.

Ces derniers temps on recourt à la carbonituration à basse température.

Cette opération s'effectue à 570°C en maintenant les pièces pendant 0.5 à 3 h dans une atmosphère contenant 50 % de gaz endothermique et 50% d'ammoniac ou 50% de propane (méthane) et 50% d'ammoniac. Un tel traitement permet d'obtenir à la surface de l'acier une fine couche carbonitrurée de Fe₃ (N, C) qui possède une tenue à l'usure élevée. Dans le cas des aciers alliés, la dureté d'une telle couche est 500 à 1000 HV. La carbonituration à basse température améliore la limite de fatigue des pièces. Cette opération est recommandée pour remplacer la cyanuration dans des bains de cyanures.

1.4-Métallisation

La saturation superficielle de l'acier en aluminium, chrome, bore et autres éléments s'appelle métallisation par cémentation [1]. La pièce dont la surface est saturée en ces éléments acquiert plusieurs propriétés précieuses, dont la tenue à chaud et à l'usure accrue, la résistance à la corrosion et à la dureté.

La saturation superficielle de l'acier en métaux, ainsi qu'en éléments comme le silicium, s'effectue en plaçant les pièces dans des ciments pulvérulents appropriés (généralement ferro-alliage et 0.5-5 % NH₄Cl) ou en les immergeant dans du métal fondu si la température de fusion de l'élément diffusant est peu élevée (zinc, aluminium, par exemple) ou bien en assurant la saturation à partir d'une atmosphère gazeuse. A cet effet, on emploie des chlorures volatils de métaux (AlCl₃, CrCl₂, SiCl₄,...) obtenus par action du chlore ou du chlorure d'hydrogène sur les métaux ou leurs alliages avec le fer à des températures élevées. Les chlorures se dissocient à la surface du fer et les métaux qui se dégagent à l'état atomique diffusent dans le fer.

I.4.1- Calorisation:

On donne ce nom à la saturation de la surface d'un acier en aluminium. Le plus souvent on emploie la calorisation dans des mélanges de poudres. Les pièces sont enfermées dans une caisse remplie de ciment composé d'aluminium (50 à 75 %) en poudre, d'alumine (25 à 75%) et de chlorure d'ammoniac ($\approx 1.0\%$). La calorisation s'opère à 900 ou 1050 °c pendant 3 à 12 h. Il n'est pas rare qu'on utilise les bains d'aluminium fondu. Les pièces sont immergées dans de l'aluminium fondu saturé en fer (jusqu'à 6 ou 8%), ajouté pour éviter la dissolution de pièces à traiter dans l'aluminium. L'opération s'effectue à 700 ou 800 °c pendant 45 à 90 mn.

Il arrive qu'on recourt à la calorisation par métallisation (pulvérisation d'une couche d'aluminium sur la surface traitée) suivie de recuit d'homogénéisation à 900 ou 1000 °c. Avant de la soumettre au recuit, la pièce est couverte d'un enrobage composé de 48 % de graphite argenté + 30% de sable de quartz, de 20 % d'argile + 20 % de chlorure d'ammoniac. L'enrobage est pétri avec du verre liquide. La calorisation communique à l'acier une tenue à la calamine élevée (jusqu'à 850 ou 900°c), car pendant le chauffage il se forme à la surface des pièces calorisées une pellicule dense d'alumine Al_2O_3 qui préserve le métal de l'oxydation. Une couche calorisée résiste bien également à l'attaque par certains milieux corrosifs. La couche calorisée est constituée d'une solution solide d'aluminium dans le fer α . La concentration de l'aluminium dans la partie superficielle de la couche doit être voisine de 30%.

L'augmentation de la teneur de l'acier en carbone et en éléments d'alliages ralentit la diffusion de l'aluminium. La profondeur de la couche calorisée varie le plus souvent de 0.2 à 1.0 mm.

La calorisation s'emploie dans la fabrication des chambres de combustion des automobiles à générateur de gaz, des pièces des poches de coulée, des soupapes et d'autres éléments de machines dont des températures de service sont très élevées.

I.4.2- La chromisation de l'acier:

C'est la saturation en chrome de la surface des pièces en acier, et assurant une tenue accrue à la corrosion par les gaz (tenue à la calamine) jusqu'à 800 °c, une résistance élevée à la corrosion dans des milieux comme

l'eau, l'eau de mer et l'acide nitrique. La chromisation des aciers à haute teneur en carbone ($> 0.3-0.4$ % en C) augmente également la dureté et la tenue à l'usure [8].

Le plus souvent la chromisation se fait dans des mélanges de poudres (par exemple, 50% de ferro-chrome, 49% d'alumine et 1% de chlorure d'ammoniac). On applique parfois la chromisation dans des gaz (chauffage dans un milieu contenant CrCl_2) et dans le vide. La chromisation dans le vide s'effectue en couvrant d'une poudre de chrome les pièces placées dans un creuset en acier ou en céramique installé dans une chambre à vide (pression 10^{-2} à 10^{-3} mm Hg). A une température élevée, le chrome s'évapore et diffuse dans le fer. La chromisation se poursuit à 1000 ou 1050°C et dure quelques heures.

La couche de diffusion obtenue par chromisation d'un fer industriel est constituée d'une solution solide de chrome dans le fer α . Lorsque l'opération est menée avec un acier à carbone, la couche est constituée de carbures de chrome $(\text{Cr, Fe})_7\text{C}_3$. La structure d'une couche chromisée obtenue dans un acier à 0.45% C se compose de $(\text{Cr, Fe})_7\text{C}_3$, elle est suivie d'une couche de transition à haute teneur en carbone (0.8%). De telles couches de carbures se forment par suite de la diffusion du carbone des couches internes vers la surface à la rencontre du chrome.

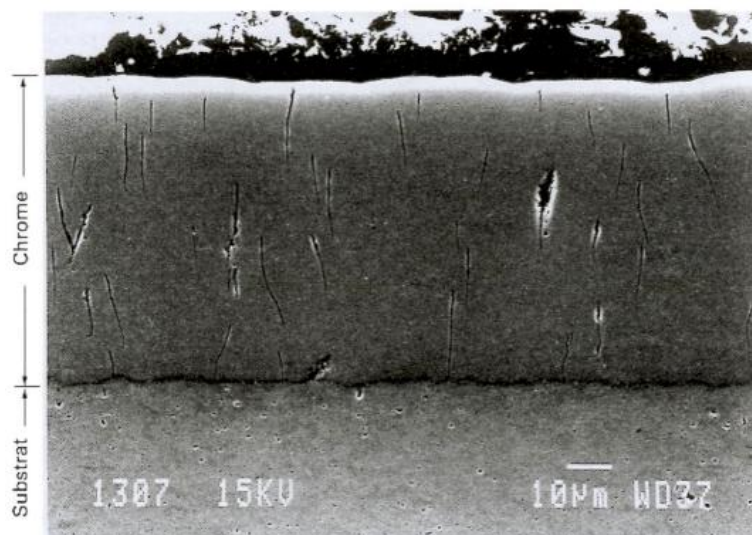


Fig. I.5: Dépôts de chrome durs et épais [35].

La vitesse de diffusion du carbone est supérieure à celle du chrome; c'est pourquoi la couche carburée n'absorbe pas tout le carbone disponible, et une partie de ce qui en reste forme une couche intermédiaire à tenue élevée en carbone. La dureté de la couche formée par chromisation du fer varie de 250 à 300 HV, alors que celle de la couche formée par chromisation d'un

acier, est de 1200 à 1300 HV. L'épaisseur de la couche chromée ne dépasse pas 0.15 à 0.20 mm.

Ces derniers temps on applique une chromisation profonde des brames, bielles et ébauches de tubes, à 1.5 ou 8 mm dans le vide et à une température élevée (1400 à 1450°C). La chromisation des tôles, tubes et barres permet d'éliminer la surchauffe par chauffage réitéré pour le traitement par corroyage.

La chromisation s'emploie pour des pièces de l'équipement de puissance et de l'appareillage des machines à vapeur, des soupapes, des valves, et des pièces travaillant à l'usure dans des milieux agressifs.

1.5-Rechargement

A l'origine, la métallisation était uniquement employée pour des surfaces par la projection de revêtements métalliques. Rapidement, grâce à la qualité des métaux projetés, la résistance des dépôts et l'évolution technique des moyens de projection, la métallisation s'est élargie à d'autres domaines. C'est ainsi, que la possibilité de réaliser des dépôts de fortes épaisseurs, permet la réalisation de rechargement sur des pièces usées [9] (Fig. I.6). Comme expliqué précédemment, l'usure et la dégradation créent des détériorations qui affectent les dimensions et la résistance des pièces.

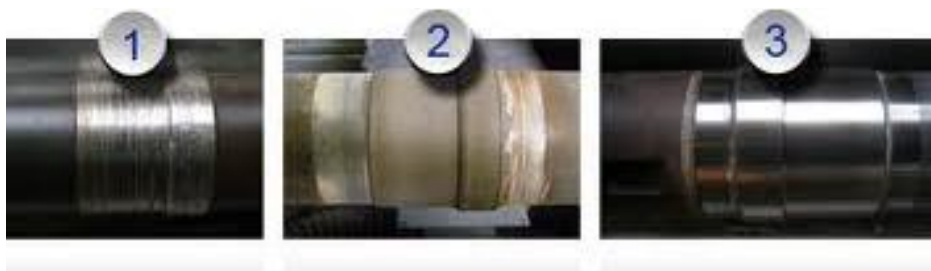


Fig. I.6: Rechargement d'une pièce usée [2].

- 1- Pièce avec portée de roulement détériorée.
- 2- pièce après rechargement.
- 3- pièce finie après rectification.

Les surfaces en contact perdent leurs propriétés mécaniques et la pièce perd ses qualités d'origine. Le rechargement et le ré usinage des surfaces permettent donc de prolonger la vie des pièces. Encore utilisé de nos jours, le rechargement par soudage a l'inconvénient majeur de chauffer la pièce et

ainsi, de la déformer. La métallisation ne chauffe pas et apporte de surcroît un choix de métaux d'apport supérieur.

I.5.1-Choix du métal d'apport:

Le choix du métal d'apport doit tenir compte de la différence des coefficients de dilatation de la pièce et du matériau à projeter. Si l'écart est important, il faut prévoir une ou plusieurs sous couches superposées de métaux différents ayant des coefficients de dilatation progressivement variables.

I.5.2-La préparation

La préparation de surface des pièces est faite mécaniquement par usinage, Soit au tour ou à la rectifieuse pour les pièces cylindriques, soit à la meule ou à la fraiseuse pour les pièces planes.

Dans les deux cas, elle est faite dans trois buts:

- réduire de façon régulière les dimensions de la pièce pour laisser une épaisseur suffisante au dépôt de métallisation,
- réaliser sur la surface un réseau d'ancrage pour le métal déposé,
- augmenter la surface d'accrochage et par conséquent l'adhérence du dépôt.

Que la pièce soit plane ou cylindrique, il faut dans tous les cas de préparation respecter les cotes minima d'usure pour éviter la rupture ultérieure.

Par convention, on respectera la règle du 1% qui est définie de la façon suivante:

" L'épaisseur finale après usinage du revêtement, ne doit pas être inférieur à 1% du diamètre ou de l'épaisseur de la pièce qui reçoit le dépôt ". Cette règle est applicable pour les diamètres ou épaisseurs compris entre 50 et 500 mm. Elle doit-être raisonnée pour les autres dimensions. Par précaution, on vérifiera les outils de coupes pour ne pas écrouir, donc augmenter la dureté superficielle de la surface usinée. Ceci permettra de diminuer l'intensité du sablage final (cette opération n'est obligatoire, mais recommandée). On évitera l'emploi de lubrifiant de coupe, un travail à sec étant mieux adapté.

I.5.3-La pré-métallisation

Lorsque l'épaisseur de rechargement ne dépasse pas 1 mm et que la préparation mécanique est impossible, on peut effectuer un simple sablage (Fig. I.6) suivi d'une pré-métallisation [9].

Elle est faite par projection d'un dépôt spécial de faible épaisseur, à haute teneur en molybdène. La propriété d'accrochage de ce dernier, permet une bonne adhérence du revêtement final sur la pièce. Elle permet aussi, dans certains cas, d'obtenir des revêtements stratifiés de plusieurs centimètres d'épaisseur, en superposant des passes de pré-métallisation avec des couches d'acier de 1 mm d'épaisseur.

Ce procédé d'accrochage est économique en raison de son exécution rapide, de la suppression des opérations de préparation par usinage et de la moindre quantité de métal d'apport déposée.

Cette technique n'est pas employée sur les métaux cuivreux ou les alliages contenant plus de 20 % de chrome.



Fig. I.6: poste de sablage (MEI)
*Maintenance des Equipements Industriels-M'sila.

I.5.4-La finition

La finition du travail de rechargement, consiste à mettre à la cote le dépôt de métallisation. Cette opération s'effectue soit par un usinage à l'outil, soit par une rectification à la meule. En raison de la formation d'oxyde sur le dépôt, le revêtement projeté est souvent plus dur que le matériau homogène.

Chapitre II

TECHNIQUES DE RECHARGEMENT DANS L'INDUSTRIE

Chapitre II: Techniques de rechargement utilisées par la MEI

Introduction

L'usure et la dégradation des surfaces sont des détériorations résultant d'un usage prolongé. On rencontre beaucoup ce phénomène en mécanique, où les pièces en rotation y sont particulièrement exposées. Les opérations de rechargement de ces surfaces, doivent donc tenir compte de la forme des pièces et de leur mise en œuvre. Elles regroupent l'ensemble des procédés de revêtement de surface, pour lesquels un matériau d'apport est fondu par une source de chaleur, puis projeté sur la surface à revêtir sur laquelle il se solidifie. Les propriétés du dépôt dépendent de sa microstructure qui est fortement conditionnée par les paramètres des particules à l'impact et par ceux du substrat. Les paramètres des particules à l'impact sont leur vitesse, leur température, leur état de fusion, leur taille et leur état chimique. Ils dépendent directement de l'écoulement du jet et des conditions d'injection du matériau dans celui-ci. Les paramètres du substrat sont, sa nature, sa rugosité, son état chimique de surface et sa température avant, pendant et après le dépôt.

On peut séparer les procédés de rechargement en deux familles selon la source de chaleur utilisée:

- Le rechargement par flamme.
- Le rechargement par arc électrique.

II- Les différents procédés de rechargement utilisés par la M.E.I (Maintenance des équipements industriels) de M'sila.

II.1- Métallisation

Le métal d'apport solide, qui peut se présenter sous forme de fil ou poudre, est fondu au moyen d'une source de chaleur importante, provenant de la flamme d'un chalumeau oxyacétylénique (Fig. II.1.a et 1.b) [10].

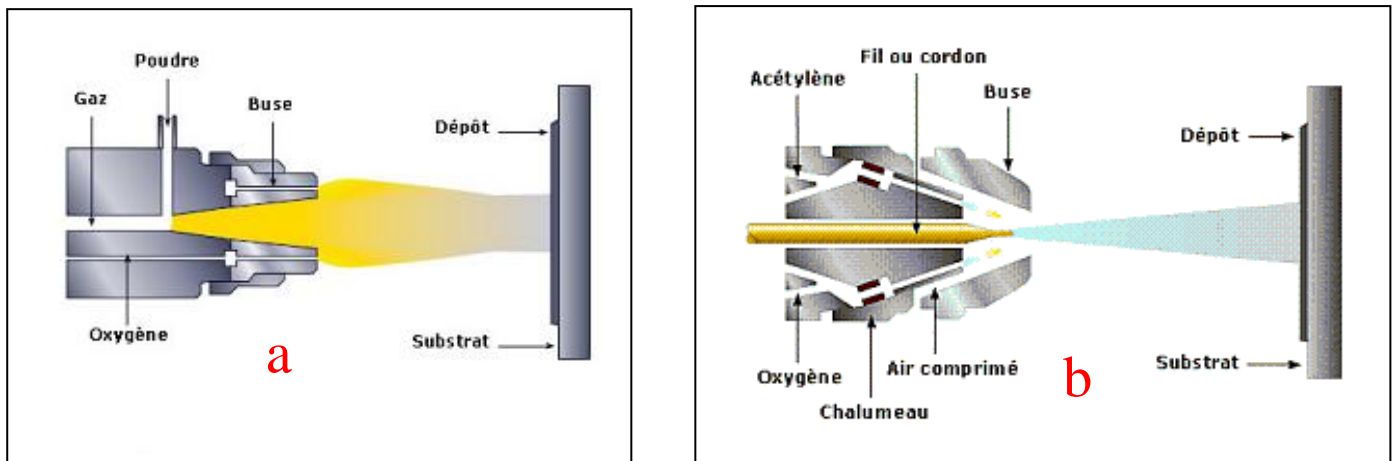


Fig. II.1: Buse de projection thermique [2]. a- à poudre. b- à fil

Réduit à l'état liquide, il est ensuite pulvérisé sous forme de gouttelettes et véhiculé à grande vitesse au moyen d'un vecteur gazeux. Ce dernier est généralement de l'air comprimé, mais il peut être aussi de l'argon, ou de l'azote mélangé au gaz provenant de combustion des gaz (flamme oxy gaz) ou de l'ionisation des gaz (plasma d'arc).

La vitesse des particules pulvérisées est de l'ordre de 100 à 200 m/s, pour les pistolets à gaz et supersonique pour les pistolets à plasma d'arc. Sous l'effet de ces grandes vitesses, les particules viennent s'écraser sur le support à traiter, situé une distance comprise entre 150 et 250 mm.

Durant le trajet de la buse au sujet à traiter (Fig. II.2), les particules se refroidissent légèrement et peuvent se présenter dans un état magmatique (pâteux en périphérie) au moment de l'impact. Sous le choc, le métal va être écaillé et martelé par les particules suivantes qui en s'écrasant vont se souder entre elles. Le dépôt se présente donc sous la forme d'un amas (apparemment compact) de particules liées entre elles de façon mécanique [11].

II.1.1-La mécanique d'accrochage

L'accrochage s'obtient de différentes façons, suivant que le support est tendre ou dur. Dans le premier cas, sous l'effet du choc, les particules pénètrent dans la couche superficielle du support et s'y accrochent, réalisant ainsi une bonne adhérence du revêtement.

Dans le second cas, tout va dépendre de l'état des particules au moment de l'impact qui est fonction de la nature même du métal d'apport et du mode

de fusion adopté pour fondre ce métal . En effet avec l'utilisation de la poudre et particulièrement dans le cas d'une fusion adoptée par flamme oxy-gaz, une certaine quantité de celle-ci peut passer au travers de la source de chaleur sans être fondue. Ce n'est pas le cas avec les fils ou les cordons dont le métal constitutif est toujours porté à fusion au départ de la buse de projection (Fig. II.1.b).

Pour le mode de fusion, les pistolets à flamme oxy- gaz permettent d'obtenir des particules fondues à des températures voisines de la température de fusion du métal d'apport, ce qui permet d'envisager qu'elles atteignent le support dans un état relativement liquide. Le résultat est sensiblement identique pour les pistolets à plasma d'arc alimentés en poudre, du fait d'un passage très court du produit dans la zone de fusion à haute température.

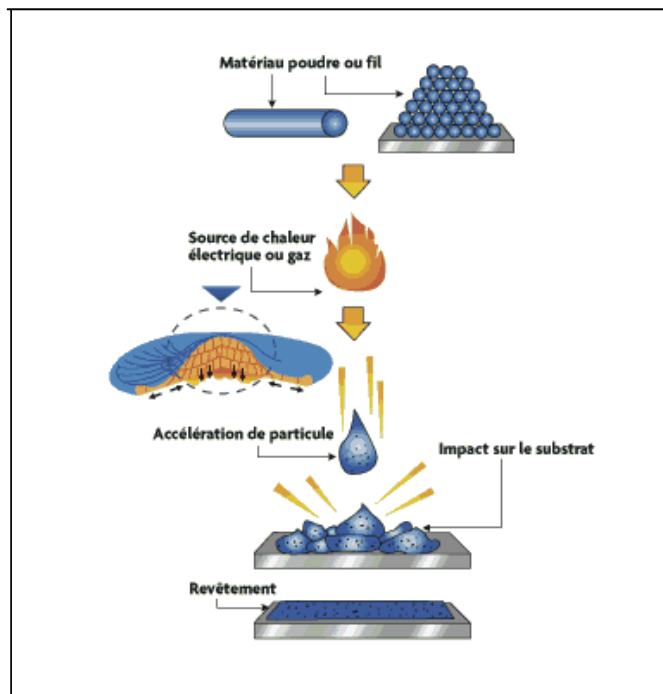


Fig. II.2: Schéma de principe de la projection thermique à la flamme (poudre ou fil) [9].

Par contre, pour un système à arc électrique, la température des particules fondues est beaucoup plus élevée (de l'ordre de 2000 °c), ce qui

permet de penser qu'elles arrivent encore à l'état liquide sur la surface du support.

Par conséquent et suivant les paramètres ci-dessus, on peut constater que le support peut recevoir des particules à l'état solide, magmatique (Pâteux) ou liquide, dont l'accrochage va différer suivant que :

- Les particules sont solides ou magmatiques :

Lorsque la température de fusion du métal d'apport est inférieure ou égale à celle du support, les particules en s'écrasant sur la surface vont s'échauffer par la transformation de l'énergie cinétique en chaleur au moment de l'impact. La liaison mécanique avec le support par fusion localisée, sera alors possible si la surface à traiter a été préalablement préparée. Lorsqu' au contraire la température de fusion du projectile est supérieure à celle du support et qu'il y a affinité entre les deux métaux, on obtiendra par diffusion la formation d'un alliage en surface.

- Les particules sont liquides :

Dans ce cas, lorsque la température à l'impact est proche de la température de fusion du support, on obtiendra une liaison superficielle à condition qu'il ait affinité entre les deux matériaux considérés.

En résumé, on peut dire :

Avec un acier projeté par un pistolet à flamme sur un support également en acier, on obtiendra un accrochage purement mécanique.

Avec ce même acier projeté par arc électrique sur le même support, on obtiendra des zones de liaisons ponctuelles entre les deux matériaux. La température des particules projetées avec un arc électrique étant plus importante qu'avec la flamme ou le plasma d'arc, il en résulte un accroissement de la vitesse d'oxydation avec l'oxygène de l'air pendant le transfert. Le métal ainsi projeté subira des modifications plus importantes.

Dans tous les cas, il faut impérativement que les surfaces à traiter soient soigneusement préparées pour recevoir le revêtement afin d'optimiser son accrochage.

II.2-Métallisation à la flamme par pistolet à poudre

II.2.1-Principe

Ce procédé est sans conteste le plus simple des procédés de projection thermique. Il utilise l'énergie d'une réaction chimique, son principe consiste à introduire un matériau sous forme de poudre, au centre d'une flamme oxy-

combustible produite par un chalumeau et de le véhiculer grâce à l'énergie cinétique transmise par les gaz de combustion [10].

II.2.2-Fonctionnement

Le pistolet de projection (Fig. II.3) est équipé d'un chalumeau oxy-gaz de forme cylindrique alimenté en périphérie par les gaz de combustion (en général un mélange oxy-acétylène ou oxy- propane).



Fig. II.3: Pistolet à poudre [11].

La poudre est distribuée en son centre par gravité, où par un distributeur désolidarisé du pistolet.

- distributeur par gravité : le réservoir à poudre, placé directement au dessus, ou sur le pistolet. La poudre contenue dans ce récipient tombe par gravité directe au centre du chalumeau, ou est entraînée par dépression dans la canalisation de l'un des deux gaz de combustion. Ce procédé est aussi appelé torche à gaz.

- distributeur par pression : un réservoir fermé, situé à proximité du pistolet, est équipé en partie basse d'un distributeur de poudre alimenté en air comprimé. La poudre est véhiculée jusqu'au pistolet par un tuyau et propulsée sur le substrat par le vecteur d'air comprimé. Le dispositif peut être complété par un vibreur ou une vis d'Archimède afin d'assurer une plus grande régularité de l'écoulement du produit.

- distributeur par dépression : le réservoir est muni d'un dispositif à dépression composé d'une cane d'entrée d'air et d'un suceur relié au dispositif d'aspiration. L'effet GIFFARD, produit par un courant d'air comprimé

traversant un système convergent divergent, permet d'entraîner la poudre jusqu'au pistolet.

- distributeur par cyclone : le réservoir à poudre est équipé d'un système cyclonique. Le mouvement tourbillonnaire qui met la poudre en suspension, est assuré par un courant d'air, qui permet de véhiculer celle-ci jusqu'au pistolet de projection.

II.2.3-Les applications

Les températures de la flamme sont de l'ordre de 3000°C, il en résulte que les températures atteintes par les particules projetées ne dépassent pas les 2000°C environ (la chaleur de la flamme assure d'une part la fusion de la poudre et d'autre part le chauffage du support).

La vitesse des particules projetées par la flamme est faible (30 à 50 m/s). C'est pourquoi elles sont souvent accélérées par un vecteur d'air.

La distance entre la buse et le substrat est comprise entre 100 et 150 mm, pour le pistolet à flamme et 80 à 100 mm pour la torche à gaz. Ceci afin que les particules de poudre aient un temps de séjour suffisamment important pour être fondues dans la flamme. Ce procédé permet d'obtenir des dépôts de quelques dixièmes de millimètres d'épaisseur à des taux horaires de dépôt de 2 à 3 kg/h, sans échauffement important du substrat (Température inférieure à 250 °c).

II.2.4-Les dépôts

En raison de la faible vitesse des particules, les dépôts obtenus présentent généralement une faible adhérence (20 à 40 MPa) et une porosité élevée (10 à 20 %) par rapport à ceux obtenus avec d'autres techniques de projection.

Les matériaux les plus utilisés restent les alliages auto-fusibles, qui sont réchauffés à 1150 °c après dépôt. Cette opération supplémentaire permet d'améliorer l'adhérence, d'éliminer en partie les oxydes et de diminuer la porosité. Les dépôts à base d'acier, d'alliages à bas point de fusion ou de polymères sont également réalisables par le procédé flamme poudre.

D'après la littérature [12], les propriétés d'usage d'un revêtement/substrat dépendent des caractéristiques intrinsèques des zones qui le constituent et notamment de l'interface couche-substrat. En effet, cette

interface est souvent ressentie comme un point faible dans cette chaîne. Elle conditionne la tenue mécanique du système. Or la fonctionnalité recherchée dans un tel revêtement ne peut être assurée que si, sous une sollicitation mécanique externe, le revêtement reste adhérent au substrat qu'il doit recouvrir et protéger. L'adhérence dépend de l'ensemble des phénomènes et des mécanismes qui maintiennent liés les composants macroscopiques et régissent la résistance à la rupture d'une interface [28].

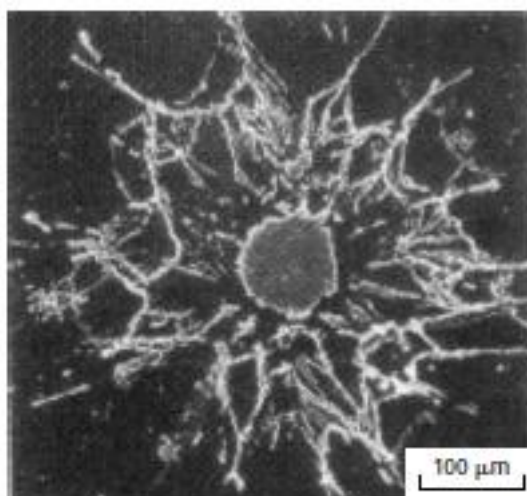
La formation du dépôt présente deux étapes caractéristiques [31]:

- l'écrasement de chaque gouttelette.
- La formation d'une couche de matériau, résultant de la cinématique liée au processus (mouvement relatif torche/pièce).

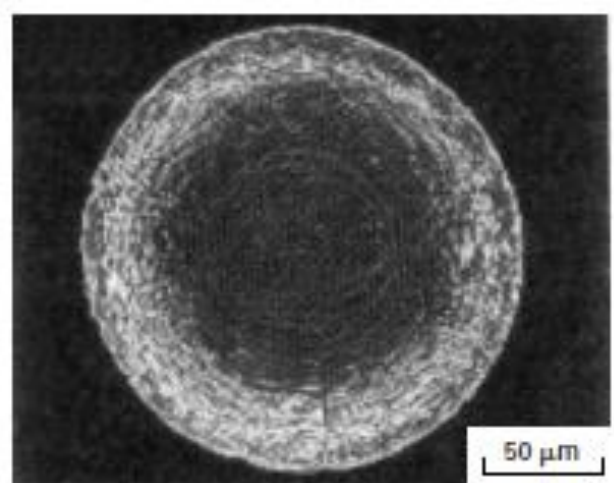
Ce mécanisme d'écrasement est un mécanisme complexe dépendant d'une part des caractéristiques des particules elles mêmes (vitesse, composition chimique, température, degré de fusion) et d'autre part de celles du substrat (nature, rugosité, température).

Deux types de structures existent après impact [32] (Fig.III.4):

- une structure fragmentée, constituée d'un disque central de faible diamètre et de ramifications dirigées vers l'extérieur et reliées ou non à celui-ci.
- Une structure en forme de disque constituée à partir d'un écoulement continu et stable du liquide, allant du point d'impact de la particule vers la périphérie.



-a-



-b-

Fig. III.4 : Mécanisme d'écrasement des particules.
a- structure fragmentée. b- structure en forme de disque

II.2.5-Les utilisations

Ce type de matériel est assez répandu dans toutes les industries. D'un coût d'investissement peu élevé, il permet de résoudre des problèmes d'abrasion, de corrosion, d'usure, d'isolation thermique ou électrique. Il est aussi bien employé pour traiter des pièces neuves que des pièces usées.

II.3-Métallisation à la flamme par pistolet à fil

II.3.1-Principe

Comme pour le procédé à flamme poudre, son principe consiste à introduire un matériau, sous forme de fil, cordon ou baguette, au centre d'une flamme oxy-combustible produite par un chalumeau et à le projeter sur le substrat (Fig. II.4). Mais contrairement à ce dernier, la flamme est uniquement utilisée pour fondre le matériau d'apport, dont la projection des gouttelettes sur le support est assurée par un jet d'air comprimé qui atomise et propulse le matériau fondu [9].

II.3.2-Fonctionnement

Le pistolet de projection est équipé d'un chalumeau oxy-gaz de forme cylindrique alimenté en périphérie par les gaz de combustion, auxquels s'ajoute un vecteur d'air comprimé servant à l'atomisation de l'extrémité fondue du fil et à la propulsion des gouttelettes fondues sur le substrat.

Le pistolet se compose de deux parties distinctes :

- la partie chalumeau, qui utilise des gaz de combustion identiques à ceux utilisés en flamme poudre, soit oxygène + gaz combustible (généralement acétylène ou propane). Elle se compose d'un mélangeur, d'une buse à gaz annulaire et d'une buse à air.
- la partie entraînement du fil, qui peut être animée soit par un système à turbine, soit par un moteur à air comprimé, soit un moteur électrique. Ces différents types d'entraînement, communiquent un mouvement de rotation à deux molettes enserrant le fil et le poussant au travers de la buse à gaz du chalumeau. Suivant le diamètre du fil, le serrage des molettes peut être obtenu par un système à ressort ou par une pression d'air. Dans un tel dispositif, la vitesse d'avance du fil doit pouvoir être réglée en fonction de son diamètre, de sa nature (température de fusion) et de la puissance de chauffe de la flamme.

Dans le cas d'entraînement par turbine à air comprimé, il est nécessaire de passer par un réducteur de vitesse, de manière à communiquer aux molettes un mouvement suffisamment lent. La vitesse d'avance peut varier entre 0.5 et 12 m/mn pour les pistolets portatifs.

Cependant, les types d'entraînement cités ci-dessus s'avèrent insuffisants pour effectuer des dépôts importants, ou lorsqu'on est tenu à des réglages précis de défilement lent, pour l'utilisation de cordons ou baguettes en matériau x réfractaires par exemple. Pour réaliser des rechargements massifs, généralement effectués avec des gros fils rigides qui nécessitent de gros efforts d'entraînement, on utilise des moteurs électriques capables de tirer des fils jusqu'à 5mm de diamètre. Ces moteurs sont généralement dissociés du pistolet et reliés à ce dernier par un flexible.



Fig. II.5: Poste de métallisation à la flamme en fil (MEI)

II.3.3-Les applications

Les températures de la flamme sont de l'ordre de 3000°C et la température à l'extrémité du fil ou de la baguette peut atteindre 95% de la température de la flamme. Ce qui permet de projeter des céramiques.

La vitesse des particules est plus élevée que pour la flamme poudre, en raison du vecteur d'air comprimé, puisqu'elle atteint 150m/s. La distance entre la buse et le substrat est comprise entre 100et 200 mm. Ce procédé permet d'obtenir des dépôts de 1 à 25 kg/h, avec un pistolet portatif ' suivant la nature et le diamètre du fil, mais peut aussi déposer jusqu'à 40 kg/h avec un pistolet fixe en rechargement massif.

II.3.4-Les dépôts

Tous les matériaux peuvent être projetés avec ce procédé, qu'ils soient tréfilables (sous forme de fil) ou non (sous forme de baguette), ou en poudre (sous forme de cordon). Ces différents conditionnements, permettent des dépôts de toutes sortes et la possibilité d'utiliser un pistolet à flamme fil pour projeter des alliages auto fusibles. L'accrochage du dépôt sur le support se fait de façon mécanique. Mais après une projection d'alliages auto fusibles, il est possible de refondre le dépôt afin de le lier métallurgiquement à son support.

II.3.5-Les utilisations

Ce type de matériel est assez répandu dans toutes les industries. Il permet de résoudre des problèmes d'abrasion; de corrosion; d'usure; d'isolation thermique ou électrique. Il est aussi bien employé pour traiter des pièces neuves que des pièces usées .C'est le procédé le plus utilisé en anticorrosion pour la projection de zinc, de zinc aluminium ou aluminium.

II.4-Rechargement par soudage

II.4.1-Rechargement à l'arc

Le rechargement consiste à déposer par fusion une ou plusieurs couches de métal d'apport, sur des pièces afin de reconstituer leurs parties usées ou rompues (Fig. II.6) [9]. Il est aussi utilisé pour former une couche protectrice à la surface des pièces contre la corrosion et l'usure.

Plusieurs métaux d'apport sont utilisés pour le rechargement tels que les aciers doux, les aciers alliés, les aciers inoxydables ...

Dans le cas de rechargement des surfaces planes à l'arc avec électrode, le rechargement se fait en déposant des cordons parallèles cote à cote. Si la surface d'usure est importante, le rechargement s'effectue par dépôt de plusieurs cordons parallèles et chacun d'eux doit empiéter d'un tiers sur son voisin.

Dans le cas où plus d'une couche est nécessaire, elles doivent être déposées perpendiculairement les unes aux autres, tout en s'assurant que le dépôt de la couche supérieure est accompagné de la fusion de la couche inférieure.

Dans le cas où la surface usée est étroite, le rechargement se fait en déposant des cordons superposés.

Pour recharger des pièces très épaisses, on les préchauffe à l'aide d'un chalumeau ou d'un four. Ceci accélère l'opération de rechargement et contribue à son succès.

Finalement la pièce rechargée doit être refroidie lentement à la température de la pièce avant d'usiner sa partie rechargée.



Fig. II.6: Poste de rechargement par soudure (MEI)

II.4.1.1-Rechargement MIG (métal inert gaz)

Le MIG utilise une bobine de fil métallique comme électrode. L'arc électrique éclatant entre cette dernière et la pièce à traiter entraîne une fusion continue du matériau d'apport et nécessite un défilement continu de l'électrode fusible. Le bain de soudure est protégé par un mélange gazeux contenant généralement de l'argon et du dioxyde de carbone. L'emploi du courant pulsé permet de travailler avec des alliages base aluminium. L'utilisation de fils fourrés permet également de déposer des matériaux non ductiles qui ne peuvent être tréfilés. Le caractère continu de cette technologie permet d'obtenir des taux horaires de dépôt importants.

Cette technologie est principalement utilisée pour le dépôt des matériaux résistants à :

- L'abrasion (aciers, fontes alliées, carbures ...)
- L'abrasion et corrosion simultanée (alliages de cobalt)
- Aux chocs thermiques

II.4.1.2-Rechargement TIG (tungsten inert gaz)

Avec la technique TIG, l'électrode utilisée n'est pas fusible (tungstène thorié). Un arc électrique est créé entre la pointe de l'électrode et le métal sur lequel le rechargement est effectué. Le métal d'apport est amené manuellement au niveau de cet arc pour y fondre et se déposer sur la pièce à traiter [30]. L'intensité de soudage est fonction du diamètre du fil d'apport et la nature du substrat. L'argon est utilisé généralement pour protéger le bain de soudure. L'utilisation du courant alternatif permet de réaliser des rechargements sur les alliages d'aluminium. Cette technologie est principalement utilisée pour le dépôt de matériaux résistants à l'abrasion et à la corrosion.

II.5- La métallisation au plasma d'arc.

II.5.1-Principe du plasma d'arc.

Bien que les termes de "flamme plasma" ou "jet de plasma" soient souvent utilisés, il s'agit en réalité d'un "plasma d'arc". Le plasma d'arc est une atmosphère fortement dissociée et ionisée, conductrice d'un courant d'électricité, et que tout arc électrique comporte une gaine de plasma dont l'application n'est pas nouvelle. Elle a été largement exploitée en soudage

haute température et l'énergie de plasma n'a de valeur que si elle est canalisée. La source de chaleur utilisée est un plasma thermique créé par l'ionisation partielle d'un gaz plasmagène (Fig. II.7) [11].

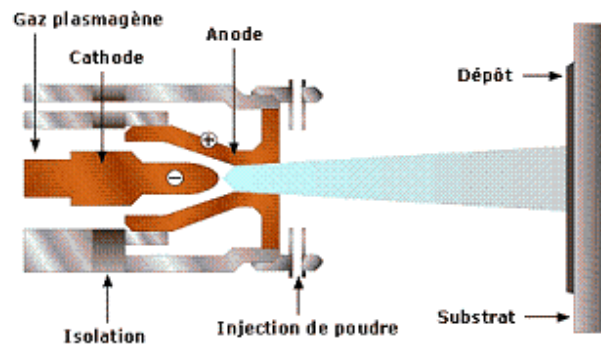


Fig. II.7: Schéma de principe de projection thermique par plasma d'air soufflé.

Le gaz qui ne se trouve plus sous sa forme gazeuse, mais à l'état plasma, produit alors de hautes températures. La particularité de ce système de projection (Fig. II.7), est la très forte constriction imposée à l'arc, qui permet d'atteindre dans le plasma des températures très élevées, de l'ordre de 10000 à 15000 K. Tous les matériaux y compris les plus réfractaires peuvent ainsi être fondus. L'expansion du flux gazeux permet d'atteindre en sortie de tuyère des vitesses d'éjection très élevées, puisqu'elles peuvent dépasser la vitesse du son. Elles sont comprises entre 800 et 1200 m/s, suivant la densité du plasma et la nature des gaz. Ce qui permet d'obtenir une bonne fusion et un bon étalement des particules à l'impact, qui elles, sont projetées à des vitesses de l'ordre de 200 à 250 m/s sur le substrat (Fig. II.8).

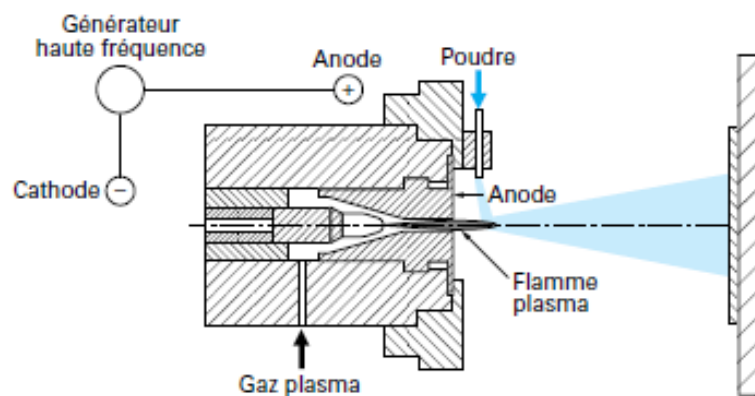


Fig. II.8 : Principe de fonctionnement d'une torche plasma

II.5.2-L'énergie du plasma.

L'énergie fournie et la température atteinte, dépendent directement de la puissance électrique fournie à la source, du débit masse et de la nature du gaz plasmagène ainsi que la géométrie de la torche. En ce qui concerne la nature du gaz, l'énergie contenue dans ce dernier se libère différemment avec l'augmentation de la chaleur, suivant que celui-ci est diatomique ou monoatomique. Si on désire beaucoup d'énergie avec une température moyenne, on choisira l'azote ou l'hydrogène (gaz diatomique). Par contre si l'on désire une haute température, on choisira l'argon ou l'hélium (gaz monoatomique).

L'eau est également utilisée comme milieu plasmatique, car dissociée dans l'arc, elle donne un plasma riche en hydrogène, donnant des puissances très supérieures aux plasmas de gaz.



Fig. II.9 : Poste de métallisation par plasma d'arc (MEI).

II.5.3-Caractéristiques du système de projection.

II.5.3.1-Fonctionnement

La torche plasma est un appareil dans lequel on force un gaz à passer au travers d'un arc électrique étranglé, créé par une décharge haute fréquence, établi entre une anode et une cathode, refroidies par une circulation d'eau.

L'anode cylindrique est évidée au centre pour recevoir la cathode et servir de tuyère d'éjection à la colonne plasma. Le gaz injecté autour de la cathode, traverse l'arc électrique ou il est ionisé et est ensuite propulsé par la tuyère cathodique sous l'état de plasma.

La projection plasma comporte deux techniques différentes :

- la projection par arc soufflé (utilisée surtout en métallisation courante)

C'est un plasma à arc interne dans lequel le jet de plasma ne conduit pas le courant électrique à l'extérieur de la tuyère. La projection peut se faire dans l'air ambiant.

- la projection par arc transféré (utilisée surtout en rechargement).

C'est un plasma à arc externe dans lequel le jet de plasma est entièrement parcouru par le courant électrique. Le circuit se referme sur la pièce à traiter qui sert d'anode extérieure alors que la tuyère est portée à un potentiel.

Les systèmes à plasma d'arc utilisent généralement des produits d'apport en poudres. Le produit est véhiculé par un gaz porteur auxiliaire, généralement de l'argon en raison de sa masse molaire. Il est ensuite injecté dans le jet de plasma par une buse spéciale. Le matériau est alors fondu et éjecté par la colonne de plasma à grande vitesse (dur à la vitesse du gaz). La distance de projection comprise entre 10 et 80 mm doit être constante, ce qui implique souvent une automatisation du système (déplacement linéaire sur pièce tournante). Les dispositifs d'alimentation en poudre sont du même type que ceux décrits dans le chapitre précédent. L'installation comporte en outre des armoires permettant de contrôler avec précision l'amorçage de l'arc, son maintien et les différents débits de gaz, eau et poudre, nécessaires au bon fonctionnement de la torche.

Pour générer un plasma, les trois éléments fondamentaux sont:

- une source de puissance (générateur à courant continu)
- une décharge ionisant le gaz (générateur haute fréquence)
- un couplage assurant le contact entre les deux électrodes via le gaz plasma.

Pour la projection thermique, les deux propriétés conditionnent la vitesse et la température des particules projetées [33]:

- la conductivité thermique qui détermine les transferts plasma-particules et dont l'état de fusion des particules lors de leur impact sur le substrat.
- La viscosité qui permet de diminuer les entrées d'air dans le jet plasma, d'augmenter la longueur du jet et d'éviter les réactions chimiques des particules (oxydation en particulier).

II.5.3.2-Utilisation, avantages et applications.

a-Utilisation

Compte tenu des températures atteintes dans les jets de plasma, il n'y a pas de limitation quant au point de fusion des matériaux. Cette technique permet de projeter une grande gamme de matériaux : métaux et alliages, cermets, céramiques et dans certaines conditions des polymères. Cependant une différence de 300 K entre la température de fusion et la température de décomposition ou d'évaporation du matériau est nécessaire pour éviter qu'il ne se sublime. L'utilisation du plasma sous vide partiel ou en atmosphère contrôlée, permet de maîtriser certains de ces problèmes.

b-Avantages et applications

Le principal avantage de la projection par plasma, est donc la possibilité de pouvoir projeter des matériaux très réfractaires et d'obtenir des dépôts très durs comme avec la céramique, destinés à la protection contre l'usure ou la corrosion et à la protection thermique. Les secteurs d'applications sont variés : on retrouve la projection plasma dans les domaines de l'aéronautique (civil ou militaire), de l'aérospatiale, de l'énergie (pile à combustible, pétrochimie), des mines, de l'impression et de la pâte à papier, de l'industrie du verre, de l'automobile, dans le secteur médical et dans la protection des chocs thermiques comme les barrières diélectriques.

Chapitre III

METHODES EXPERIMENTALES

Chapitre III: Méthodes expérimentales

III.1- Matériau étudié

L'acier utilisé dans cette étude est un acier faiblement allié : il s'agit de l'acier 42CrMo4, sa composition chimique (en % massique) est donnée par le tableau suivant III.1:

C	Cr	Mo	Mn	Si	P	S
0.38/0.45	0.90/1.20	0.15/0.30	0.60/0.90	0.40 max	0.035max	0.035max

Tableau.III.1. Composition chimique de l'acier 42CrMo4.

Caractéristiques [13] :

- **Désignations normalisées**

AFNOR: 42CD4 DIN: 42CrMo4 EN 1002762:1.7225

EN 1008361: 42CrMo4

- **Caractéristiques mécaniques moyennes**

Etat trempé et revenu

Rm: 750/1300 N/mm²

Re: 500/900 N/mm²

A%: 10/14

- **Applications [14]**

Acier de construction faiblement allié au chrome-molybdène pour trempé et revenu.

Bonne trempabilité à l'huile, bonne résistance aux surcharges à l'état traité.

Acier très employé en mécanique, pour des pièces de moyennes à fortes sections : arbres, essieux, crémaillères, vilebrequins, bielles et engrenages.

Cet acier est parfois utilisé pour des pièces trempées superficiellement.

- **Masse volumique**

7.85 Kg/dm³.

III.2-Préparation des surfaces avant métallisation

III.2.1-La préparation des surfaces

La métallisation pour qu'elle soit efficace, elle exige une préparation rigoureuse des surfaces à revêtir. Si quelque fois on peut obtenir, avec des particules liquides très chaudes, des liaisons ponctuelles par fusion entre le projectile et le subjectile, cet accrochage reste toujours très insuffisant. En effet, que ce soit pendant les opérations d'usinage sur des pièces rechargées, ou au cours des sollicitations sur des pièces protégées contre la corrosion, les efforts mécaniques induits aux revêtements engendreront son décollement. Il est donc utile et nécessaire de préparer la surface pour obtenir:

- une propreté qui est un état chimique.
- une rugosité qui est un état physique.
- un préchauffage éventuel.

III.2.2-La propreté

La propreté est le constat visuel de la disparition plus ou moins importante des impuretés de toutes natures, pouvant souiller la surface d'un produit. Elle permet aussi de mettre à jour les modifications physiques éventuelles de la structure (défauts ou autres).

La métallisation exige, que la surface du support devant recevoir un futur revêtement, soit particulièrement propre, exempte de traces de calamine, de rouille, d'huile, ou de graisse, afin de ne pas nuire l'adhérence du métal d'apport. Cette propreté sera obtenue, suivant le type de polluant de la surface, soit par un dégraissage soigné après usinage dans le cas d'opération de rechargement, soit par un sablage dans le cas d'opération de protection anticorrosion.

III.2.3-La rugosité

Pour obtenir une bonne adhérence, la propreté est nécessaire mais pas suffisante. Il faut créer un accrochage mécanique entre le produit et le support. Celui-ci s'obtient par la réalisation d'une rugosité sur toute la surface. La rugosité est le résultat de la modification micro géométrique d'une surface, provoquée par le bombardement intensif de projectiles dans le cas du sablage, ou par l'enlèvement organisé de matière créant un relief, dans le cas d'un usinage. Dans les deux cas, le résultat a pour effet [12] :

- d'augmenter l'aire de contact entre le substrat et le futur revêtement, car l'adhérence est directement liée à l'étendue de la surface.
- de créer un maximum d'aspérités, où le matériau déposé viendra s'ancrer.

La rugosité est complémentaire de la propreté.

III.2.4- Le préchauffage

Comme nous l'avons vu précédemment, suivant la différence de température entre le métal d'apport et celle du support, on obtiendra un accrochage plus ou moins important. Raison pour laquelle, un léger préchauffage de la pièce à traiter est toujours conseillé afin d'augmenter le pouvoir d'adhérence. Le préchauffage peut aussi être employé pour la dessiccation de certaines pièces poreuses, imprégnées en profondeur d'eau ou de graisse ou d'huile, que le nettoyage n'a pas atteint. Il permettra de faire sortir les liquides absorbés, afin que la métallisation adhère efficacement.

III.3-Les modes de préparation

Il existe deux grandes applications dans le domaine de la métallisation :

- celui dit du revêtement anti corrosion
- celui dit du rechargement mécanique.

Suivant le traitement recherché, la préparation de surface va différer pour être, soit :

- un sablage dans l'anticorrosion.
- un usinage dans le rechargement.

III.3.1-Le sablage

Le sablage est le terme impropre donné au traitement par impact, plus généralement appelé grenailage par les professionnels. C'est un procédé de traitement d'une surface par des projectiles petits et nombreux, destinés à induire des modifications physiques, chimiques ou mécaniques au subjectile. La technique employée consiste à utiliser, soit un vecteur gazeux (généralement l'air comprimé), soit une centrifuge (turbine) pour projeter à grande vitesse des grains (projectiles) qui viennent percuter de façon répétée la surface des pièces (subjectiles). Le grenailage met en œuvre des projectiles extrêmement variés, différentes méthodes de projection et de nombreux paramètres qui influencent le résultat.

III.3.2-L'usinage

La préparation de surface par enlèvement de métal répond à 3 volontés :

- créer sur la surface un réseau de résistance aux sollicitations mécaniques qui seront exercées sur le dépôt de rechargement.
- augmenter la rugosité et simultanément la surface d'accrochage.
- diminuer les dimensions de la pièce (dans le cas de réparation de pièces usées) afin de laisser une épaisseur suffisante pour le futur dépôt, tout en respectant les cotes limites de rupture.

Que la forme de la pièce soit cylindrique ou plane, l'adhérence de la couche de métal projeté est mécanique et devra résister aux efforts de glissement et d'arrachement par rapport à son support.

Pour les pièces de révolution, cet usinage sera exécuté sur un tour sans aucune lubrification. Le revêtement ne formant pas une surface continue, puisque interrompu aux extrémités, il faudra obtenir un profil de surface légèrement bombé (convexe) pour accroître l'adhérence. Dans certains cas, on pourra effectuer un sablage fin sur les parties usinées afin d'augmenter la rugosité de la surface.

III.4-Préparation des échantillons

Les échantillons que nous avons utilisé pour faire nos essais sont issus de barres rondes, de 60 mm de diamètre, de nuance 42 Cr Mo 4. L'acier a la même nuance que celle du vilebrequin programmé pour la réparation. Le rechargement est réalisé sur deux portées de la barre d'acier :

- première portée: métallisation par flamme en fil en une seule couche de molybdène.
- deuxième portée: métallisation par flamme en fil utilisant l'acier comme sous couche d'accrochage (Tab.III.2) et le molybdène.

Les échantillons à analyser par microscopie optique et micro dureté ont été tronçonnés selon des petits parallélépipèdes, et les faces destinées à être analysées sont polies aux papiers abrasifs 200, 400, 600, 800 et 1200, puis aux feutres diamantés. Les observations microscopiques ont été réalisées après une attaque chimique au nital 4% de composition :

- 4 ml d'acide nitrique HNO_3
- 100 ml d'éthanol $\text{C}_2 \text{H}_5 \text{OH}$

Un de ces échantillons préparé représente l'échantillon référentiel qui n'a subi aucune métallisation.

C	Cr	Mo	Mn	Ni	Charge de rupture
0.04 %	1.5 %	1.5 %	2 %	4 %	2300 kg/cm ²

Tab. III.2: composition chimique de l'acier d'accrochage
(Sprasteel LS)

III.5- Techniques de caractérisation

Pour suivre les évolutions structurales et caractériser nos échantillons, nous avons utilisé plusieurs techniques à savoir :

III.5.1- Microscopie Optique

Les échantillons sont observés à l'aide d'un microscope optique de type HUND T100-WETZLAR (Fig.III.1), muni de 4 objectifs ($\times 4$, $\times 16$, $\times 40$, $\times 100$) et équipé d'un appareil photo numérique, de longueur focale de 29 mm et de 7.0 giga-pixels. Les photos sont obtenues avec un temps d'exposition de 1/1000 de seconde. Cela nous permet d'avoir des différents grossissements en utilisant le zoom de l'appareil et les objectifs du microscope. L'appareil photo numérique monté sur le microscope nous permet de visualiser les différentes microstructures de nos échantillons.



Fig.III.1: Microscope optique de type
HUND T100-WETZLAR

III.5.2 - La micro dureté

III.5.2.1-Principe de mesure

Les essais de micro dureté Vickers consistent à estimer la valeur de la micro dureté HV, à partir de la longueur de la diagonale d'une empreinte laissée, par le pénétrateur (Fig.III.2) sur la surface de l'échantillon.

Le pénétrateur s'enfonce dans l'échantillon sous une charge constante P, la pénétration se fait de manière monotone à vitesse constante pendant une durée de 15 sec à 20 secs réglables à volonté.

Cette analyse est nécessaire pour estimer et suivre l'évolution de l'une des propriétés mécaniques après avoir réalisé l'opération de métallisation. Pour réaliser les essais de dureté de nos échantillons, nous avons utilisé un microduromètre de type DM2D (Fig.III.3), équipé d'un oculaire ($\times 15$) et des objectifs ($10\times, 40\times$) pour permettre de positionner l'empreinte et régler les lignes de mires afin de mesurer la valeur de la diagonale d (Fig.III.4). La gamme de charge utilisée par cet appareil est: 25gf, 50 gf, 100 gf, 200 gf,.....,1000gf .

Lorsque les lignes sont réglées, une valeur apparaît sur l'afficheur pour désigner la longueur de la diagonale agrandie de 40 fois, et en poussant sur la touche 1/40, l'afficheur montre alors la diagonale réelle en micron. Le calcul de la micro dureté HV, se fait automatiquement par un double clic sur le bouton "HARDNESS" se trouvant sur le cadran de l'appareil de mesure.

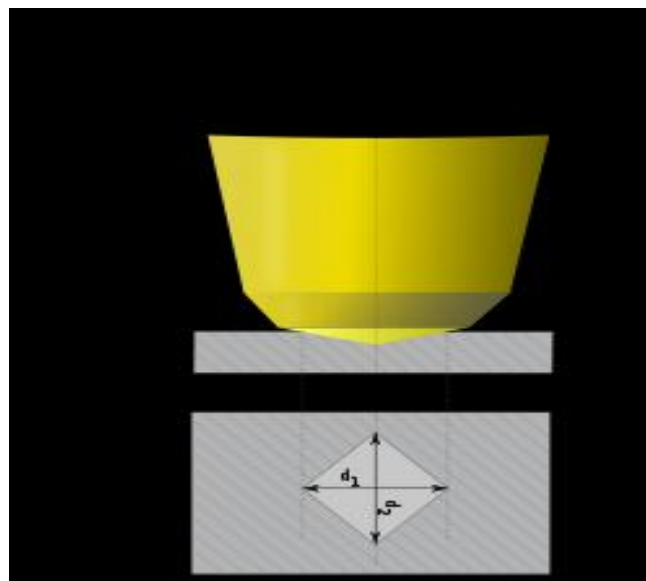


Fig.III.2: Pénétrateur

On peut aussi calculer la microdureté HV manuellement, par l'application de la formule suivante :

$$HV = 1854,4 \times p/d^2 \dots\dots\dots$$

P : charge en gramme force (gf).

d : diagonale en (µm).

HV : microdureté en (Kg/mm²).

Les mesures de dureté ont été effectuées par la méthode Vickers avec :

- une charge 100 gf avec une incertitude de ±1%.
- un objectif (40×).



Fig.III.3: Duromètre DM2D

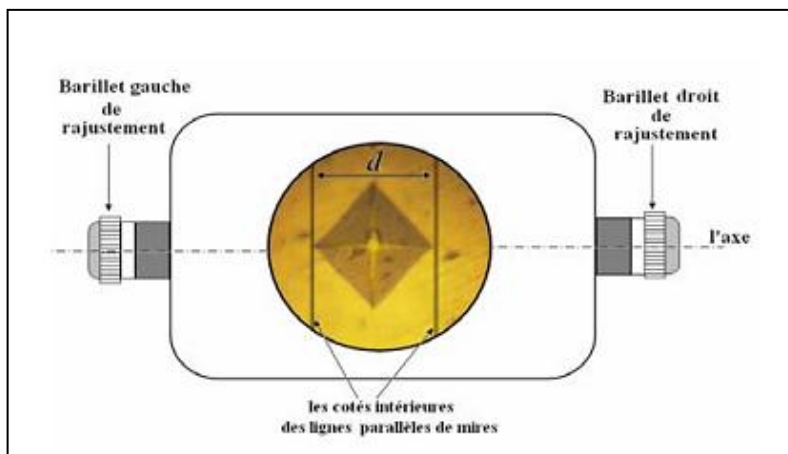


Fig.III.4: Empreinte laissée par un pénétrateur.

III.5.3 - Diffraction des rayons X

III.5.3.1-Principe

On mesure le plus souvent la diffraction du rayonnement électromagnétique des rayons X dont les longueurs d'onde sont de l'ordre des distances qui séparent les plans atomiques des réseaux cristallins [7].

La diffraction des rayons X a été utilisée dans le but d'accéder à des informations sur la structure cristalline du matériau, la taille des grains, la répartition des domaines diffractant ainsi que l'évolution des paramètres de mailles

Les positions des pics dans l'espace angulaire étudié sont données par la relation de Bragg :

$$\sin \theta = n \lambda / 2 d_{hkl}$$

Cette équation comporte deux paramètres expérimentaux qui sont θ (angle d'incidence du faisceau X par rapport à la famille de plans $\{hkl\}$) et λ (longueur d'onde de la radiation utilisée) (Fig.III.5).

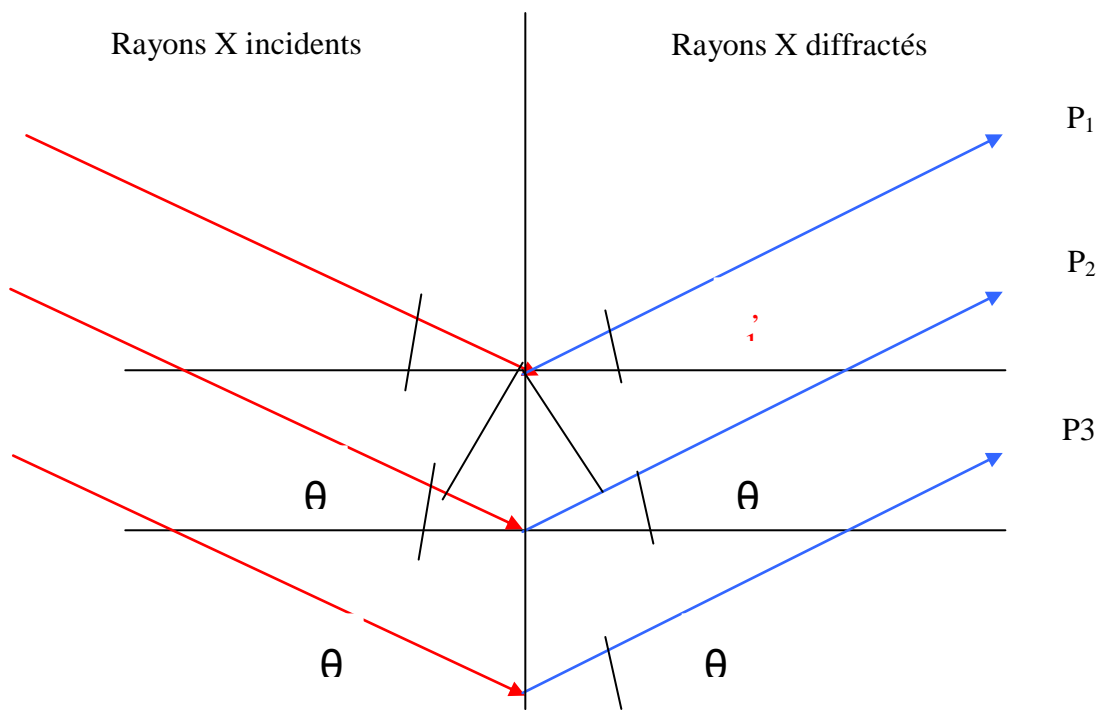


Fig. III.5: Schéma de diffraction des rayons X.

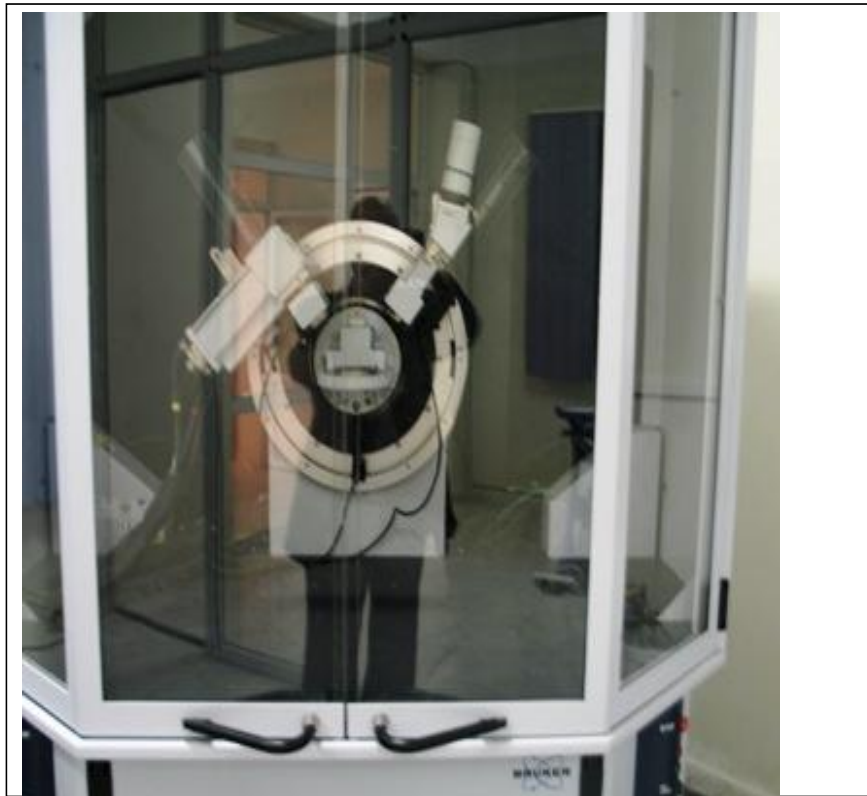


Fig.III.6: Diffractomètre D8 ADVANCE/ BRUKER

III.5.3.2-Appareil utilisé en cristallographie : le diffractomètre

Le diffractomètre comporte un goniomètre (à droite sur la photographie qui ressemble au barillet d'une perceuse) pour manipuler le monocristal dans le faisceau de rayons x sous tous les angles [7].

- Les rayons sortent par le tube vertical en haut.
- Le cristal au centre de la photo est trop petit pour être vu. Il est fixé à l'extrémité d'une fine aiguille de verre manipulée par la tête goniométrique et permet de tourner le cristal dans toutes les orientations selon trois axes successifs (un vertical, un à 45° et un horizontal) tout en le maintenant dans le faisceau de rayons X.
- Une caméra vidéo (en noir en haut à gauche) permet de contrôler que le cristal est bien centré (Fig.III.7).
- Un puit en bas au milieu est tenu par une lame. Il sert à arrêter les rayons X directs qui n'ont pas interagit avec le cristal.

- Un système de refroidissement (à droite du tube avec des lettres en rouge) permet de refroidir le cristal.

L'ensemble des spectres de diffraction a été réalisé sur un diffractomètre D8 X-ray diffractometer (Fig.III.6). Ce diffractomètre est piloté par un logiciel X'Pert High score.

Le rayonnement X monochromatique est produit par une anticathode en cuivre. Le filtre est constitué de nickel et ne laisse passer que la raie K_{α} . L'alimentation du tube est assurée par un générateur délivrant une différence de potentiel de 45 kilovolts et un courant de 30 mA.

Le rayon du goniomètre est de 240 mm. La partie irradiée de l'échantillon est rectangulaire de dimension 10 mm×2mm, les rayons X tombent sur la section longitudinale de l'échantillon.

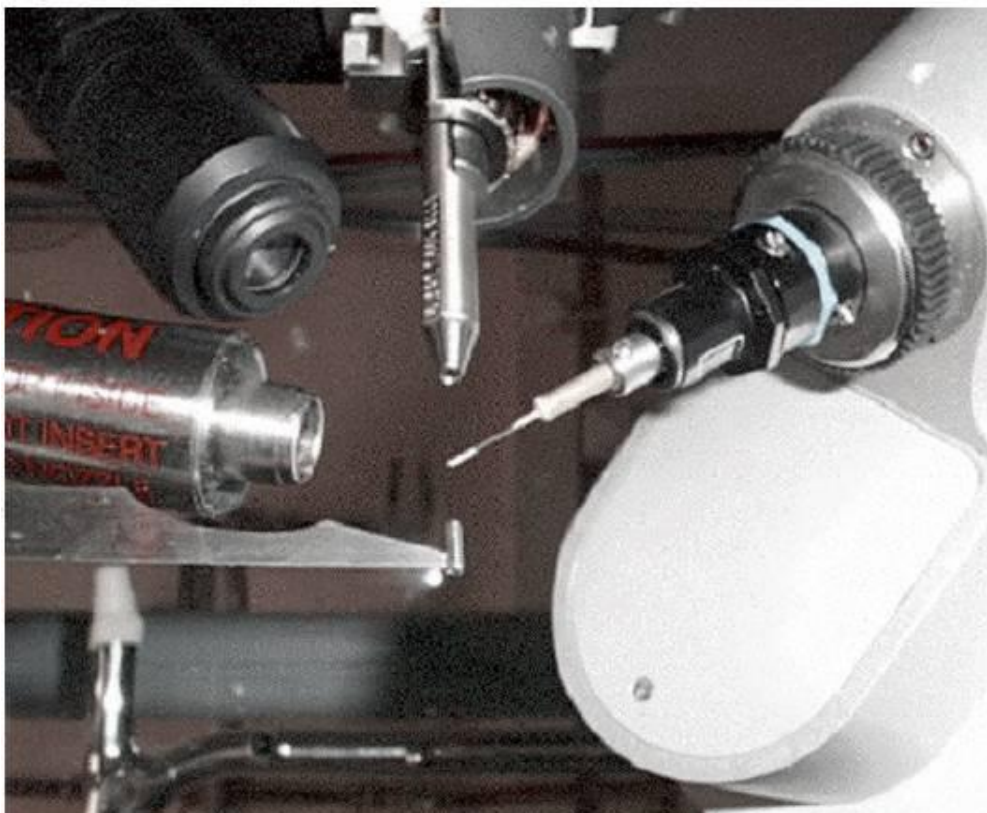


Fig.III.7: Goniomètre

III.5.4- Microscopie Electronique à Balayage (MEB).

En microscopie électronique à balayage (MEB) on travaille en vide ordinaire de l'ordre de $1.3.10^{-3}$ Pa avec toutes sortes d'échantillons sans préparation particulière. Le dépôt d'un film conducteur d'or ou de carbone est parfois nécessaire si l'on veut observer des échantillons isolants [15].

Un faisceau d'électrons est produit au sommet de l'appareil à l'aide d'un canon à électron (Fig.III.9). Ce canon est placé dans une colonne maintenue sous vide et les électrons sont obtenus en chauffant un filament. Le faisceau d'électrons primaires ainsi formé suit un chemin vertical dans la colonne du microscope. Il est ensuite focalisé sur l'échantillon grâce à des lentilles électromagnétiques et des bobines défectrices. Lorsque le faisceau entre en interaction avec l'échantillon, les électrons secondaires sont recueillis par les détecteurs placés à cet effet et le signal obtenu est ensuite analysé et transformé en signal visuel. Dans tous les cas le grandissement va de 10 à 100000 au maximum.

La microscopie électronique à balayage est actuellement la méthode la plus utilisée pour observer la morphologie et les microstructures des échantillons rechargés (en coupe transverse) et pour mesurer l'épaisseur de dépôt. Ces observations apportent également des compléments d'information sur le mode de croissance des couches et les précipités qui peuvent se former.

Nous avons effectué des observations au MEB sur un microscope de type Jeol /JSM-6390 (Fig.III.8)



Fig. III.8: Microscope de type Jeol /JSM-6390

III.5.4.1-Microanalyse X

Le spectre X émis par un échantillon bombardé par un faisceau d'électrons (Fig.III.9) peut être analysé grâce à deux techniques : la spectrométrie à dispersion de longueur d'onde WDS (Wavelength Dispersive Spectrometry) et la spectrométrie à sélection d'énergie EDS (Energy Dispersive Spectrometry) [16]. Ces techniques permettent l'étude non destructive et élémentaire à la fois qualitative et souvent quantitative des éléments en présence.

Un spectromètre à sélection d'énergie est composé d'un détecteur semi-conducteur (diode) qui recueille la totalité du spectre X et le transmet après traitement à un analyseur multicanaux qui classe les différentes raies du spectre en fonction de leur énergie.

Au cours d'une acquisition, le spectre donne instantanément une vue d'ensemble du spectre des éléments rencontrés après identification des pics. Les avantages principaux de la diode résident dans la rapidité d'acquisition des spectres et dans le très bon rendement de détection. On peut en effet ainsi effectuer l'analyse X d'un échantillon dans des conditions de travail compatibles avec une bonne observation en microscopie électronique à balayage. Toutefois, la moins bonne résolution spectrale et les médiocres rapports signaux sur bruit ne permettent pas de rivaliser avec le spectromètre dispersif en longueur d'onde pour l'analyse quantitative et l'analyse d'éléments traces.

Enfin, la diode ne permet pas l'analyse de rayonnement de très faible énergie (moins de 1000 eV).

Cette technique nous permet de déterminer quantitativement la composition des couches de combinaison et les couches de diffusion et de vérifier les taux de contamination (notamment en oxygène) de ces couches.

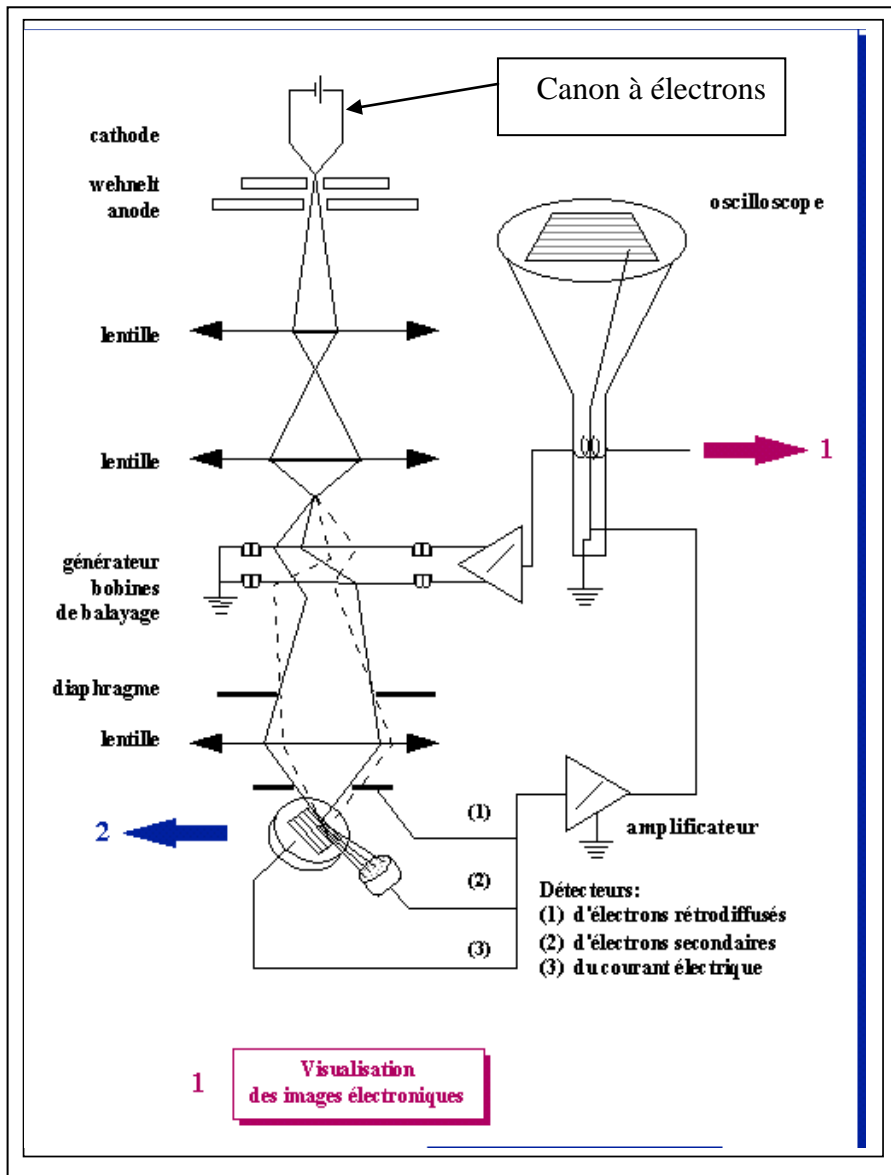


Fig.III.9: Principe du MEB [15].

Chapitre **IV**

CARACTERISATION ET INTERPRETATION DES RESULTATS DE RECHARGEMENT A LA FLAMME DE L'ACIER 42 CrMo4

Chapitre IV : Caractérisation et interprétation des résultats de rechargement à la flamme de l'acier 42CrMo4

Introduction

Ce chapitre est consacré à la caractérisation des résultats de rechargement d'un acier. Il s'agit de la métallisation à la flamme appliquée à l'acier 42 CrMo4 par le dépôt d'une couche de molybdène, afin d'améliorer ses propriétés d'usure et de résistance à la fatigue.

Nous présentons une étude détaillée de l'effet des différents paramètres à savoir, la préparation de la pièce, le préchauffage et la composition du molybdène sur la microstructure et sur les propriétés mécaniques (dureté) des deux échantillons à recharger:

- Premier cas: échantillon rechargé par un dépôt de molybdène.
- Deuxième cas: échantillon rechargé par un dépôt de molybdène et d'acier (acier d'accrochage).

IV-1. Caractérisation par la microscopie optique.

Du point de vue métallurgique, les vilebrequins doivent être capables de supporter d'importantes contraintes et posséder donc des propriétés mécaniques d'un niveau élevé. La présence des éléments tels que le chrome et le molybdène assure la présence de petits précipités de carbure. Ces particules bloquent le grossissement des grains d'austénite et des grains de ferrite au cours de la transformation $\gamma \rightarrow \alpha$.

a- Echantillon de référence (non revêtu)

L'observation micrographique de l'échantillon référence (échantillon sans revêtement) montre qu'elle est de type très proche de la structure perlitique (Fig. IV.1). Il est caractérisé par une dureté moyenne 278 Hv.

Il est nécessaire de rappeler que de faibles addition de chrome et de molybdène réduisent le pourcentage de la ferrite pro-eutectoïde, diminuent la taille des grains et augmentent la teneur en perlite [17]. L'affinité du carbone au chrome et au molybdène conduit à la formation du composé carbonique qui est la cémentite substituée. Notons également que les éléments d'addition diminuent la teneur en carbone de la perlite [29].

b- Echantillon après la métallisation

Après la métallisation (rechargement), on a remarqué pour les deux types d'échantillons qu'il y a une différence microstructurale entre le cœur et l'interface de l'échantillon.

Pour ce qui est du dépôt, les propriétés dépendent de sa microstructure qui est fortement conditionnée par les paramètres des particules à l'impact et par ceux du substrat. La vitesse des particules est de l'ordre de 200 m/s, sous l'effet de ces grandes vitesses les particules viennent s'écraser sur le support (pièce à traiter) et durant le trajet, les particules se refroidissent légèrement et présentent un état pâteux au moment de l'impact. Le dépôt se présente sous la forme d'un amas apparemment compact et présente également des porosités relativement petites qui ne doivent pas dépasser le taux de porosité admissible variant de 10 à 20%.

La liaison mécanique des particules avec le support par fusion localisée est partiellement réalisée: mauvaise préparation préalable de la pièce à traiter à savoir le réchauffement, la propreté et la rugosité.

Le dépôt pour le deuxième échantillon est formé de deux matières: l'acier d'accrochage et le molybdène. L'acier est utilisé dans ce cas comme couche d'accrochage car avec un acier projeté par un pistolet à flamme sur un support également en acier, on obtiendra un accrochage purement mécanique [11], à condition que les surfaces à traiter soient bien préparées pour recevoir le revêtement.

La microstructure au cœur de l'échantillon n'a pas changé, c'est-à-dire la présence d'une microstructure perlitique (Fig. IV.1) avec des lamelles de ferrite et de cémentite (noire). Par contre la zone la plus proche de la couche déposée (interface), on remarque la perte de la forme lamellaire. Cette transformation morphologique est due à l'effet de la chaleur élevée lors du processus de métallisation.

Concernant l'étude par microscopie optique de la couche de molybdène déposé, on constate que cette technique a révélé des taches noires réparties sur toute la surface déposée (Fig. IV.6). Ces taches seront mises en évidence par une observation au MEB. Elle montre bien que le processus de dépôt n'est pas parfait. Ceci est peut être du aux conditions de métallisation qui s'effectuent d'une manière industrielle, contrairement à un dépôt effectué

dans un laboratoire de recherche. On note que le molybdène est un métal de transition qui a un aspect blanc métallique et il est très dur [18].

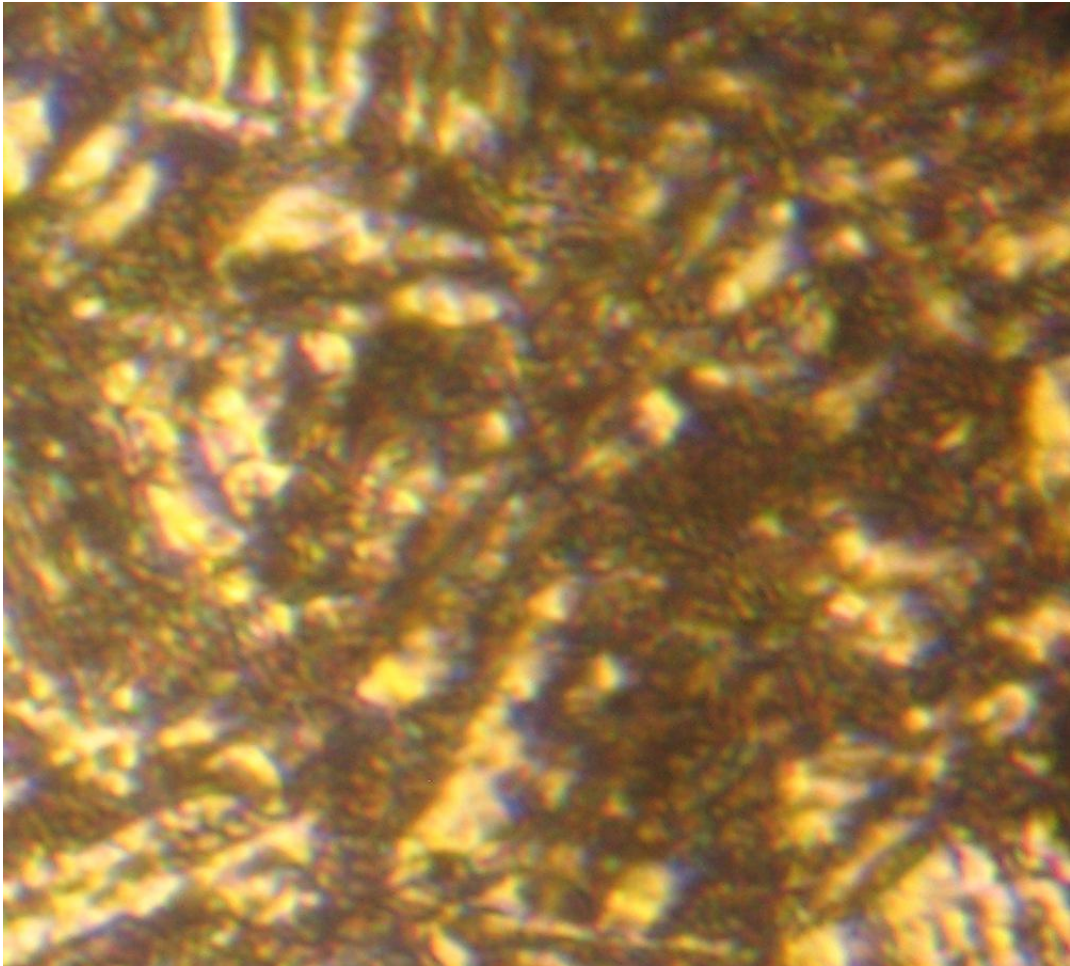


Fig. IV.1: Microstructure de l'échantillon non traité.

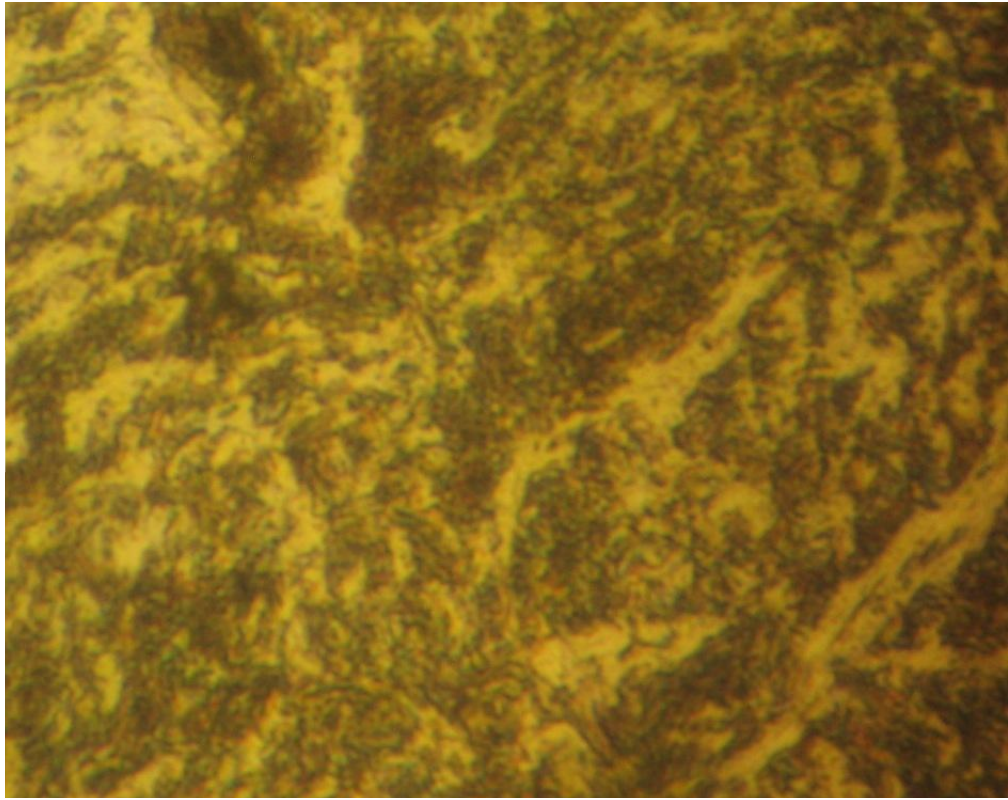


Fig. IV.2: Microstructure de l'échantillon revêtu par le molybdène
(Prés de l'interface)

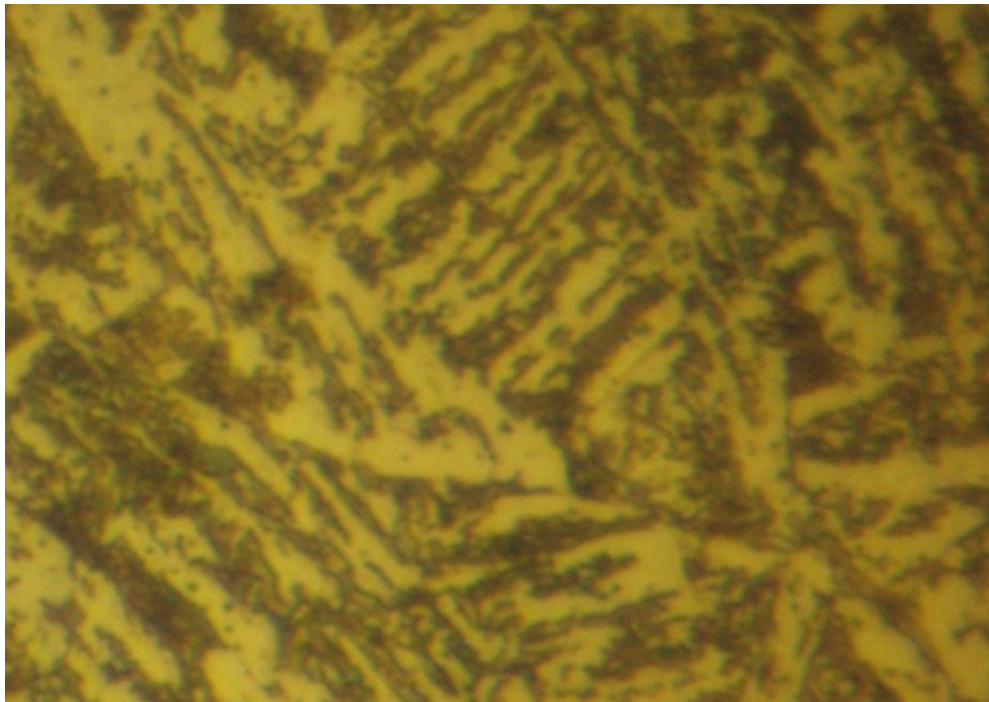
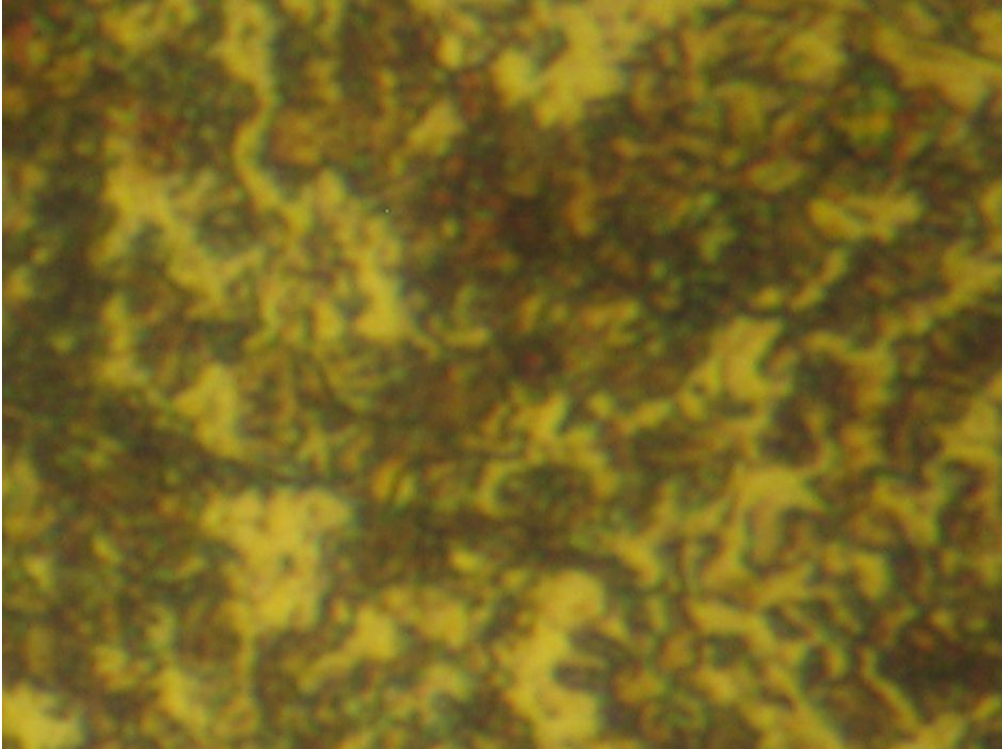


Fig. IV.3: microstructure du cœur de l'acier revêtu par le molybdène.

a



b

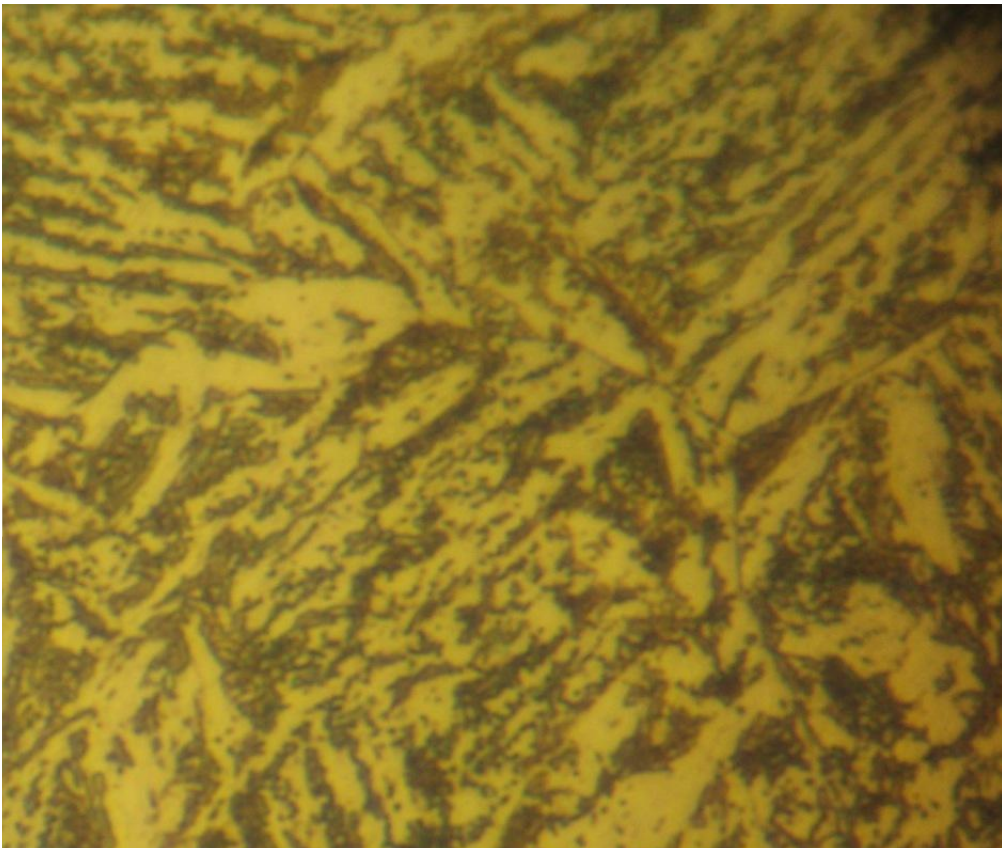
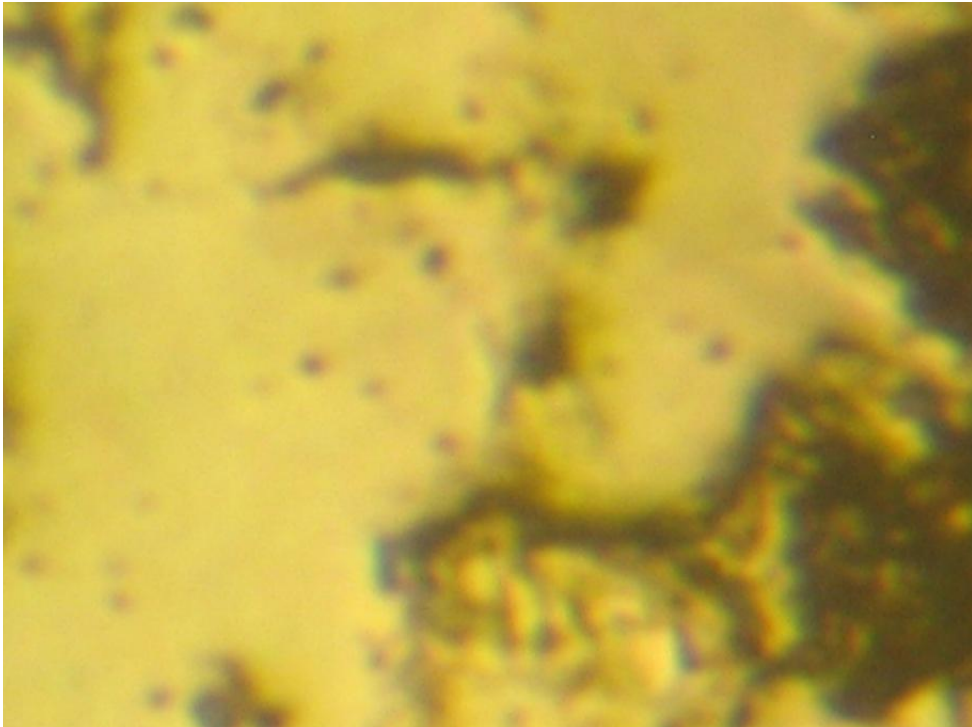


Fig. IV.4: microstructure de l'acier revêtu par le molybdène et l'acier.
a- près de l'interface.
b- au cœur de l'acier.

a



b

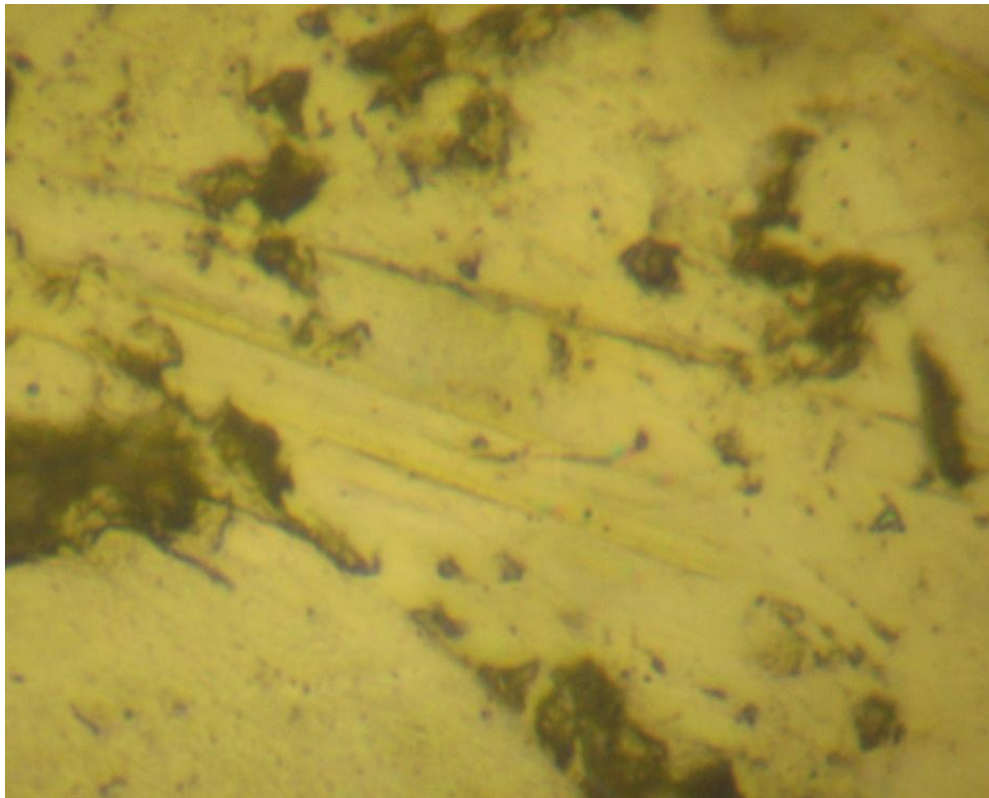


Fig. IV.5: Observation microscopique de deux zones différentes du molybdène déposé dans l'acier 42CrMO4

IV-2. Caractérisation par le MEB

Afin de mieux comprendre les variations microstructurales, ces mêmes échantillons ont été caractérisés par la microscopie électronique à balayage (MEB).

Le dépôt formé par le molybdène présente des pores (Fig. IV.6). Les taches noires mises en évidence par la microscopie optique se sont avérées que ce sont des pores lorsqu'on a utilisé le MEB. La répartition de ces pores est bien illustrée dans les figures IV.6 et IV.8, où leurs tailles sont de plus en plus grandes à proximité de l'interface. De plus, ces deux micrographies montrent que l'accrochage du molybdène sur l'acier n'est pas parfait, car on constate un vide entre les deux matériaux. Les dépôts projetés présentent: une mauvaise adhérence et une cohésion partiellement enregistrée entre les particules d'une part, et un mauvais accrochage des particules avec le substrat d'autre part. Des publications prétendent que ces défauts sont dus à un mauvais écrasement des particules lors de l'impact (paramètres de projection non respectés) et à une mauvaise préparation de la surface à revêtir [10].

Ces pores sont dus à un remplissage partiel et à des gaz enfermés. La dimension des particules et leur vitesse ont une influence importante en ce qui concerne la densité des dépôts. Ces observations sont confirmées par celles obtenues par microscopie optique.

L'observation microscopique au MEB du cœur de l'acier 42CrMo4 confirme le résultat d'observation par microscopie optique, où une structure est formée d'une grande quantité de perlite.

Pour confirmer la nature des éléments chimiques dans chaque zone des échantillons après métallisation, des microanalyses X ont été effectuées sur les deux échantillons à l'aide de la technique EDS. Cette technique souvent liée au MEB, fonctionne avec les électrons et donne des informations qualitatives et plus ou moins quantitatives sur la composition chimique de la pièce analysée.

Les figures IV.9 et IV.10 illustrent les concentrations des principaux éléments: le fer, le molybdène et l'oxygène dans les différentes zones: dépôt, interface (dépôt/acier) et cœur de l'acier. Les revêtements obtenus sont constitués principalement de molybdène (à une teneur de 96.54 % massique) et d'acier d'accrochage.

L'oxygène détecté dans la zone de dépôt seulement présente une teneur de 3.46 %, une présence qui est due au vecteur gaz (air comprimé) utilisé pour la projection de la matière d'apport sur la pièce à traiter.

Dans la figure IV.9, sont présentés les trois spectres EDS relatifs aux positions suivantes: (a) dépôt, (b) interface (dépôt/acier) et (c) cœur de l'acier. Dans les deux premières positions un pic à 3KeV caractéristique du molybdène est observé. La remarque la plus évidente est la diminution de concentration de cet élément (96.54% au dépôt contre 5.82% à l'interface) quand on s'éloigne du dépôt, ce qui confirme la légère diffusion du molybdène juste près de l'interface de la pièce à traiter.

Le spectre du fer a connu un léger changement (90.41% près de l'interface et 99.60% au cœur), sa domination dans la matrice est importante et que la concentration du chrome l'autre élément existant dans la nuance n'a révélé aucun changement, il est resté dissous dans la matrice.

On note que plusieurs théories ont été proposées afin d'expliquer l'effet du molybdène sur la résistance à la corrosion des aciers et en particulier les aciers inoxydables [19].

Plusieurs interprétations ont été avancées:

- la formation d'une couche de passivation avec structure vitreuse.
- L'élimination des zones actives en surface grâce à la formation de molybdates, d'hydroxydes ou à l'accroissement de la repassivation de la couche protectrice de la surface [20-23].

D'autre part, Bichuya et al [24] ont effectué une étude sur le dépôt d'un film de molybdène (0.02 mm) sur l'acier Cr18Ni9Ti mais sous vide.

Pour améliorer l'adhésion, la compagnie SNC ATRA d'Algérie utilise le molybdène comme sous couche intermédiaire d'accrochage pour restaurer les manetons et paliers des vilebrequins [25].

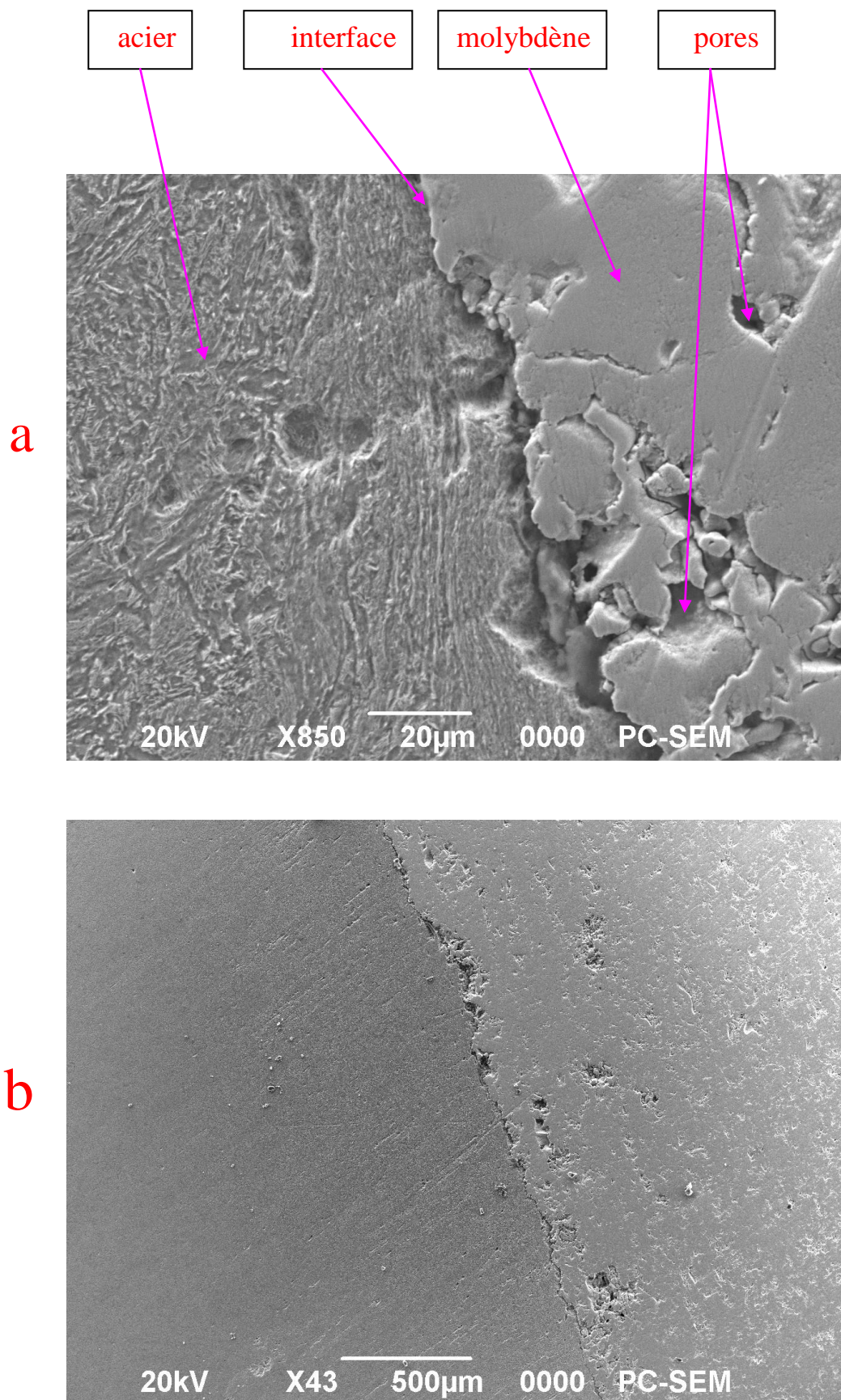


Fig. IV.6: Micrographie MEB (1^oéch) revêtu en molybdène.
a- dépôt de molybdène.
b- vue générale de la pièce revêtue

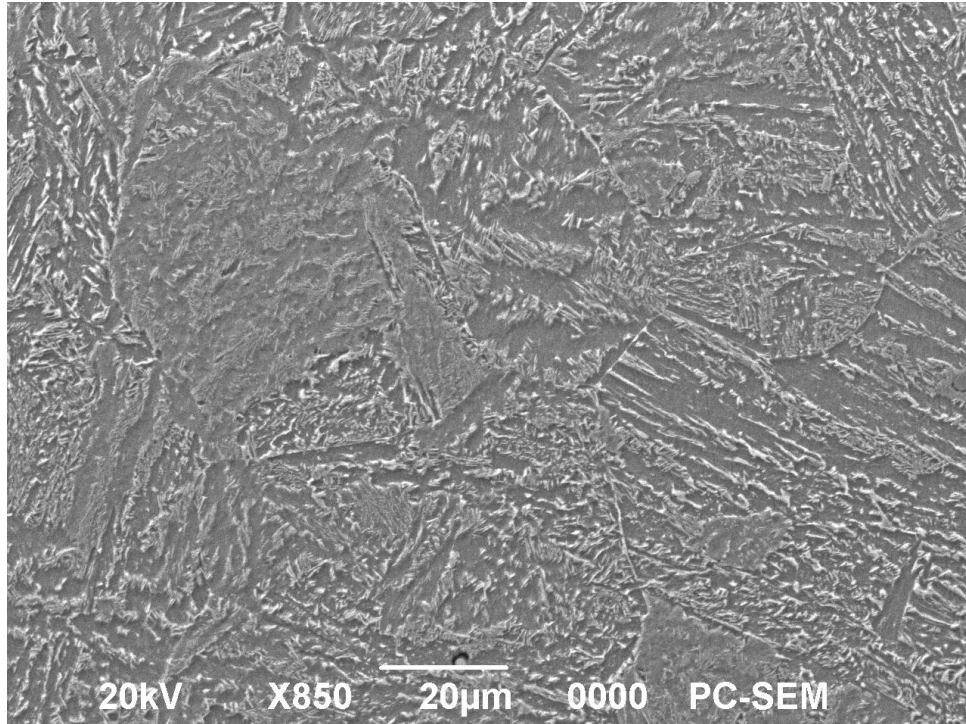


Fig. IV.7: Microstructure du cœur de l'acier 42 CrMo4

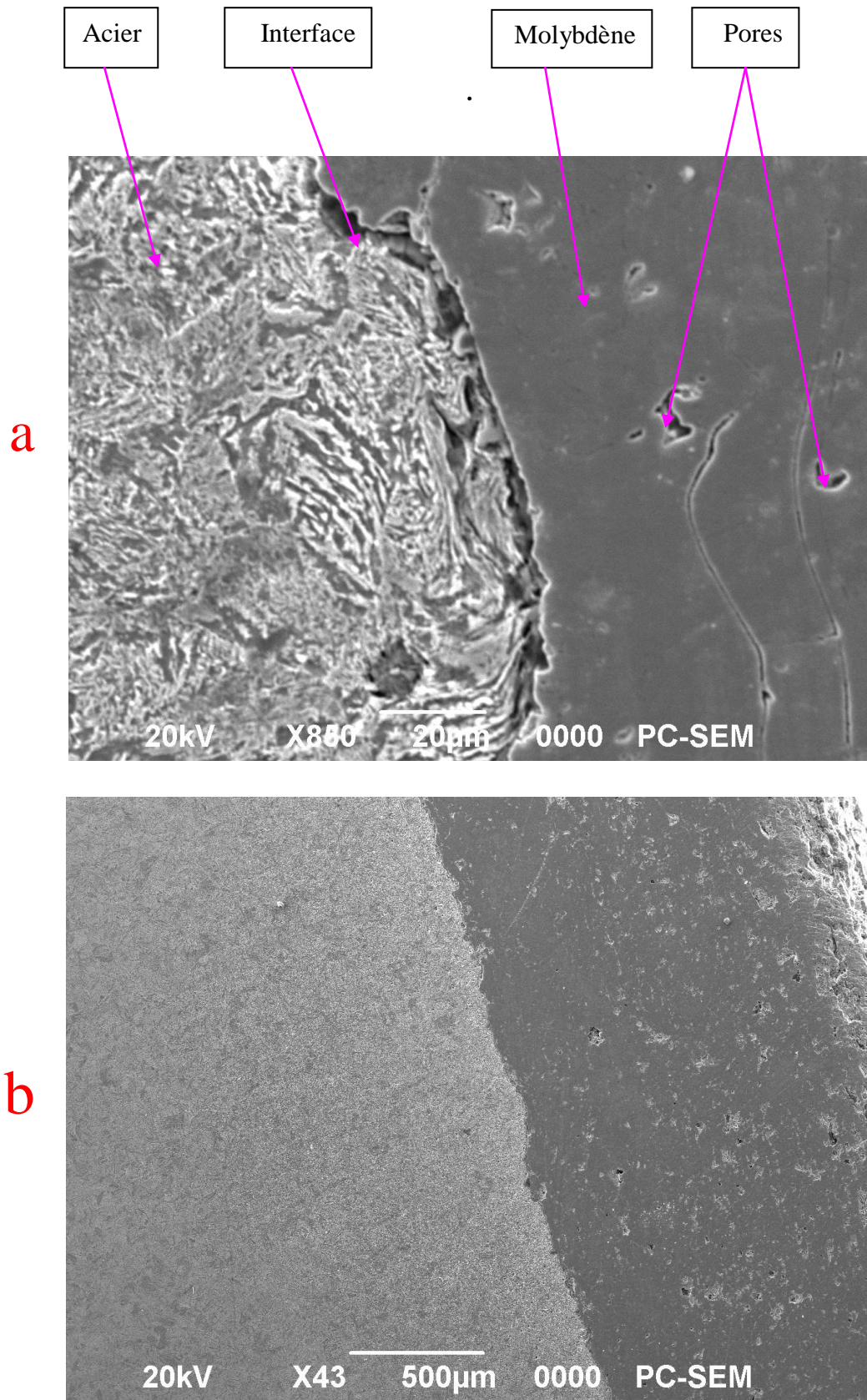
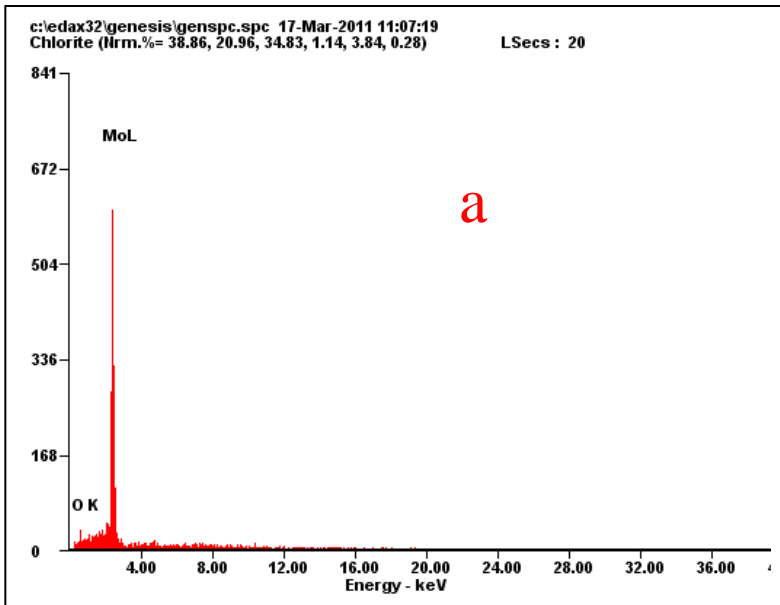


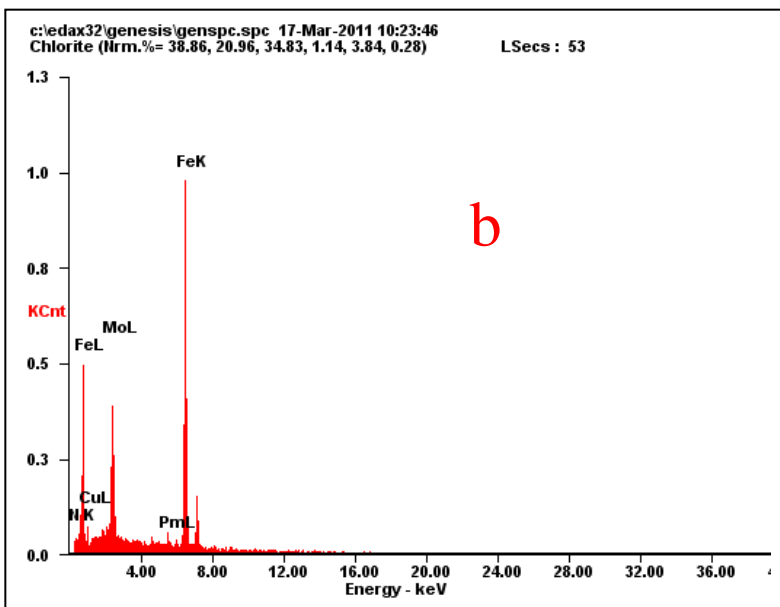
Fig. IV.8: Micrographie MEB (2^oéch), revêtu en molybdène et en acier d'accrochage.

a-dépôt de molybdène et d'acier.

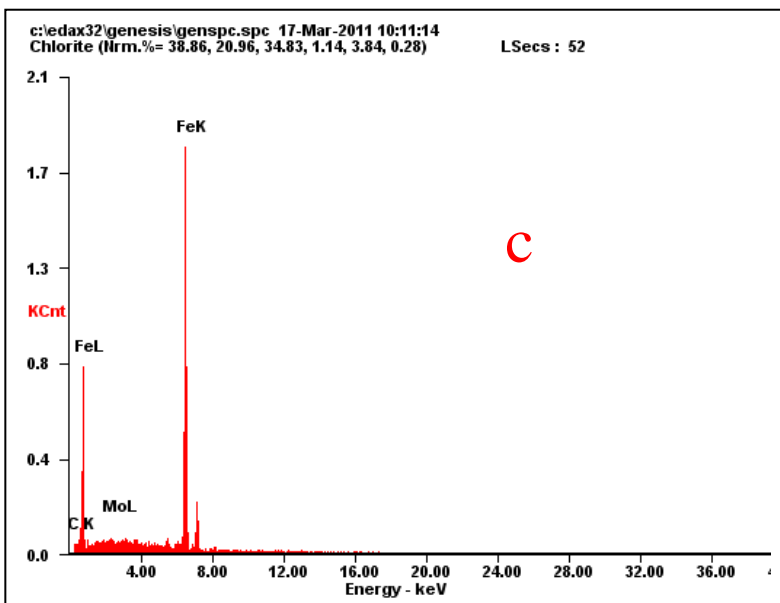
b- vue générale de la pièce revêtue.



Elément	Wt%	At%
OK	3.46	17.69
MoL	96.54	82.31
Total	100.00	100.00

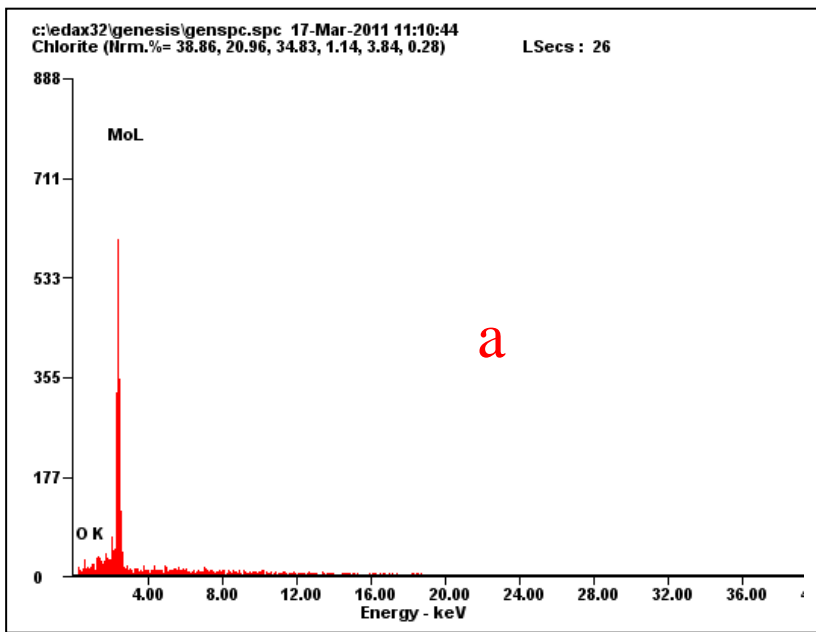


Elément	Wt%	At%
NK	0.24	0.99
CuL	0.44	0.40
MoL	5.82	3.52
FeK	90.41	93.87
PmL	3.10	1.22
Total	100.00	100.00

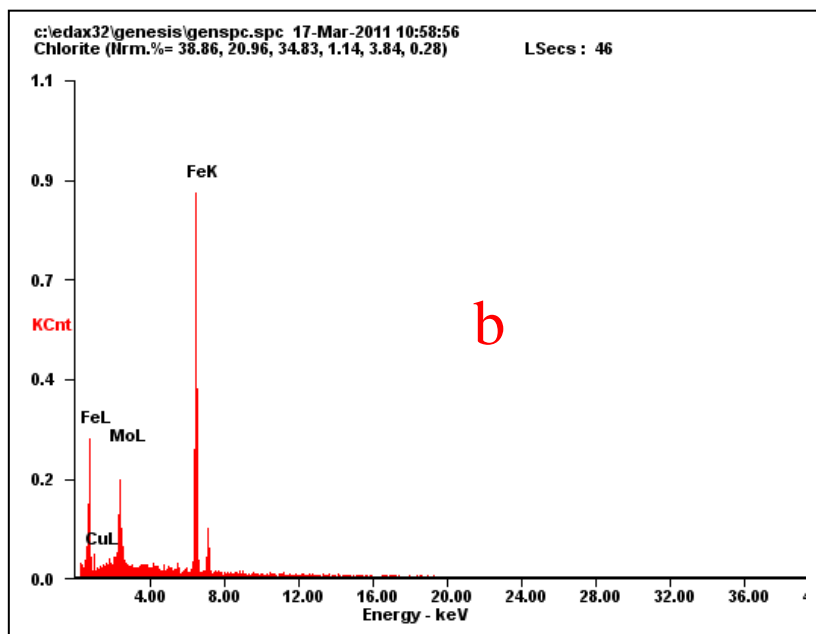


Elément	Wt%	At%
C K	0.23	1.08
MoL	0.16	0.09
FeK	99.60	98.83
Total	100.00	100.00

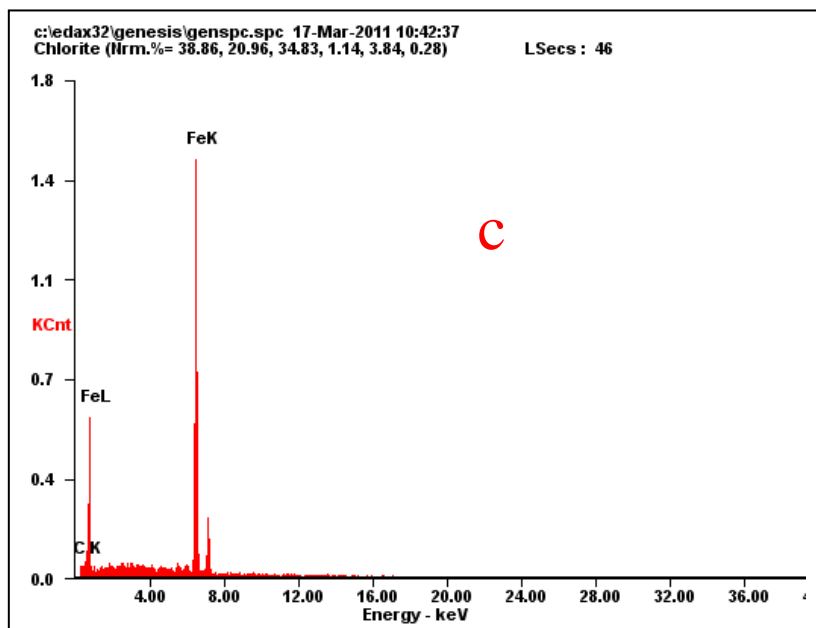
Fig. IV.9 : Spectre EDS(1°éch). a-dans le dépôt de molybdène. b-près de l'interface. c-au cœur de l'acier 42 CrMo4.



Elément	Wt%	At%
OK	3.46	17.69
MoL	96.54	82.31
Total	100.00	100.00



Elément	Wt%	At%
CuL	0.45	0.40
MoL	3.60	2.13
FeK	95.95	97.47
Total	100.00	100.00



Elément	Wt%	At%
C K	0.24	1.12
FeK	99.76	98.88
Total	100.00	100.00

Fig. IV.10 : Spectre EDS(2^oéch). a-dans le dépôt de molybdène et d'acier d'accrochage. b-près de l'interface. c-au cœur de l'acier

IV-3. Caractérisation par la diffraction des rayons X.

Cette analyse par diffraction des rayons X a pour but de mettre en évidence les différentes phases dans chaque zone des échantillons métallisés.

a- **Premier cas:** échantillon de référence (non revêtu).

Le spectre de diffraction de rayons X de l'acier 42CrMo4 non revêtu est présenté dans la figure IV.11. Le spectre correspond exactement au spectre d'un acier, où la phase ferritique est celle qui diffracte en donnant les pics suivants: (110), (200), (211).

b- **Deuxième cas:** échantillon revêtu par le molybdène.

On note que la diffraction de rayons X est effectuée sur la surface du molybdène déposé. Le spectre de diffraction obtenu est présenté dans la figure IV.12. Notons que le molybdène a une structure c.c. Ce spectre révèle bien les pics du molybdène et qui sont: (110), (200), (211) et (220).

Par contre, les autres pics indiqués par 1, 2 et 3 et qui ne sont pas indexés ne peuvent être que les pics des oxydes. De plus leurs intensités ne sont pas importantes par rapport aux pics du molybdène, ce qui reflète la présence d'une faible quantité de ces oxydes.

c- **Troisième cas:** échantillon revêtu par le molybdène et l'acier d'accrochage.

Le spectre de l'analyse par diffraction de rayons X de la surface du molybdène déposé sur l'acier qui contient déjà une couche d'acier d'accrochage (Fig. IV.13) est très semblable à celui du cas b. Ce résultat confirme le dépôt du molybdène.

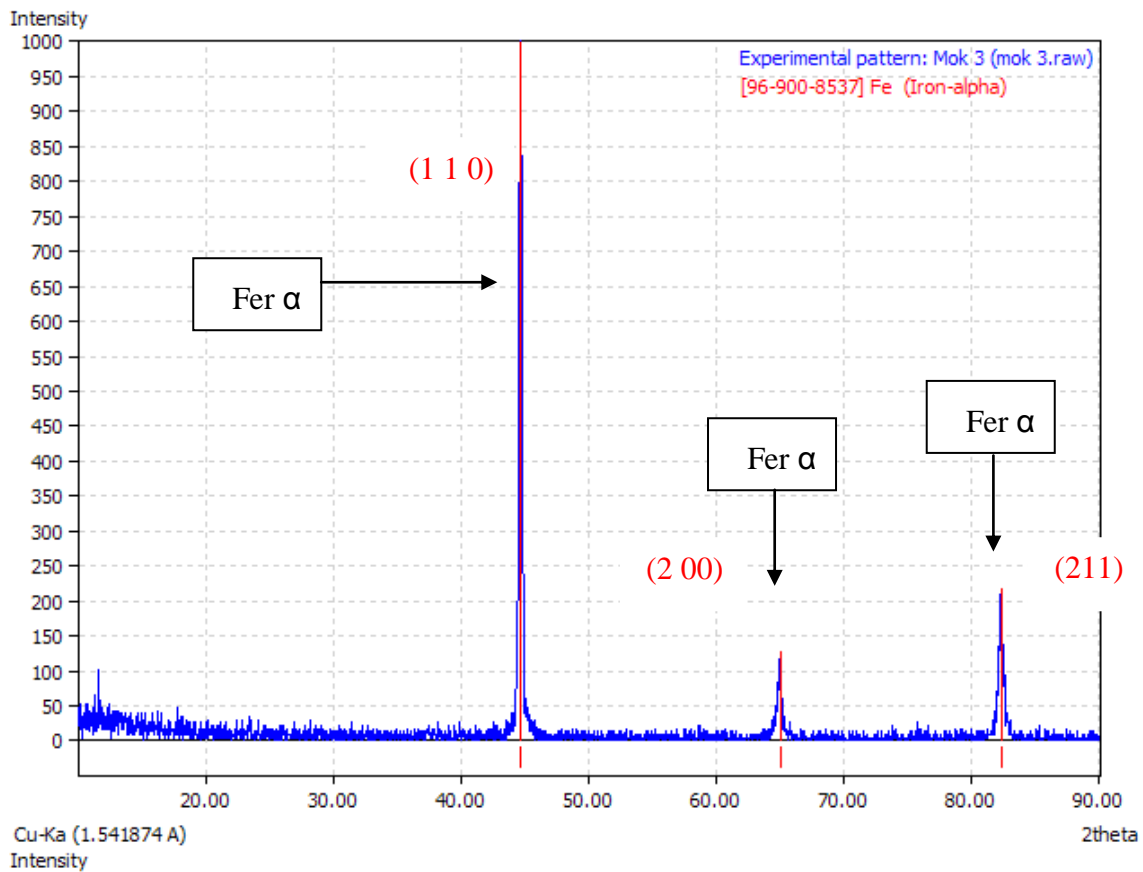


Fig. IV.11: Spectre de diffraction des rayons X de l'échantillon référence (acier 42 CrMo4).

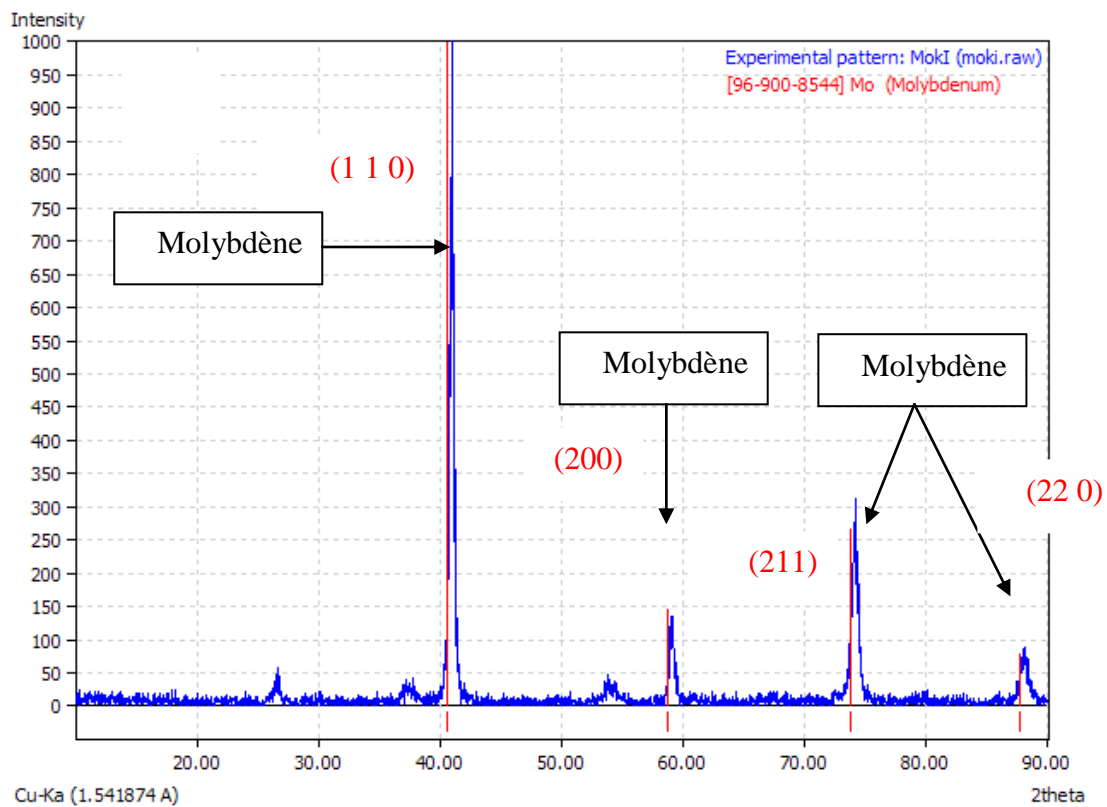


Fig.IV.12: Spectre de diffraction de rayons X du molybdène déposé sur l'acier 42 CrMo4.

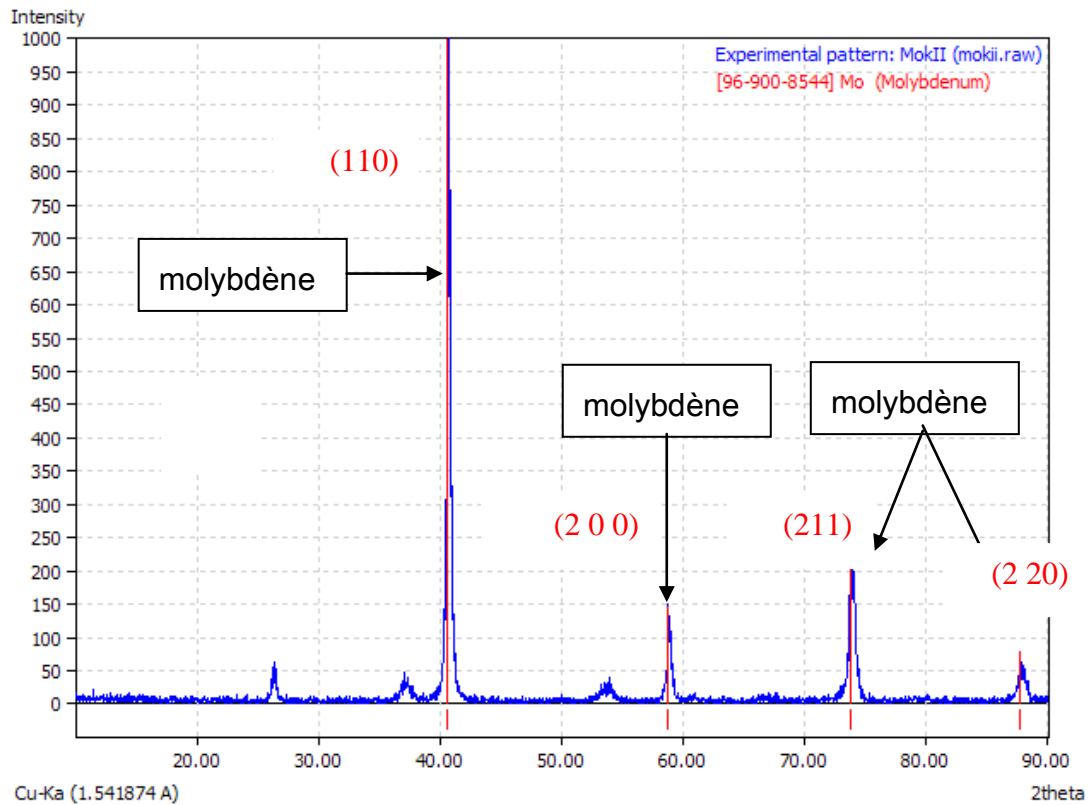


Fig. IV.13: Spectre de diffraction des rayons X effectué sur le dépôt de l'échantillon revêtu par le molybdène + acier d'accrochage.

IV-4. Microdureté Vickers

Pour bien confirmer les résultats de l'étude microstructurale et des DRX de l'acier 42CrMo4, des profils de microdureté Vickers ont été réalisés sur les deux échantillons (Fig. IV.14) et (Fig. IV.15).

L'échantillon de référence présente une dureté moyenne de 277.36 Hv. L'effet de métallisation sur la dureté des deux échantillons est bien remarqué:

a-Premier cas: Dureté de l'acier revêtu par le molybdène.

La courbe du profil de dureté de l'échantillon revêtu par le molybdène est présentée dans la figure IV.14. On constate qu'il ya deux pseudo-paliers. Le premier palier correspond à une dureté élevée (540- 480 Hv) et qui correspond au dépôt du molybdène qui possède une dureté élevée. Le second palier est limité dans l'intervalle suivant (350- 240 Hv).

Ce dernier palier est caractérisé par une légère baisse de la dureté jusqu'au cœur de l'acier.

Entre ces deux paliers, on a une chute de dureté de 480 350Hv. Cette chute correspond à la zone entre l'acier et le molybdène déposé et qui est hétérogène par rapport aux deux matériaux

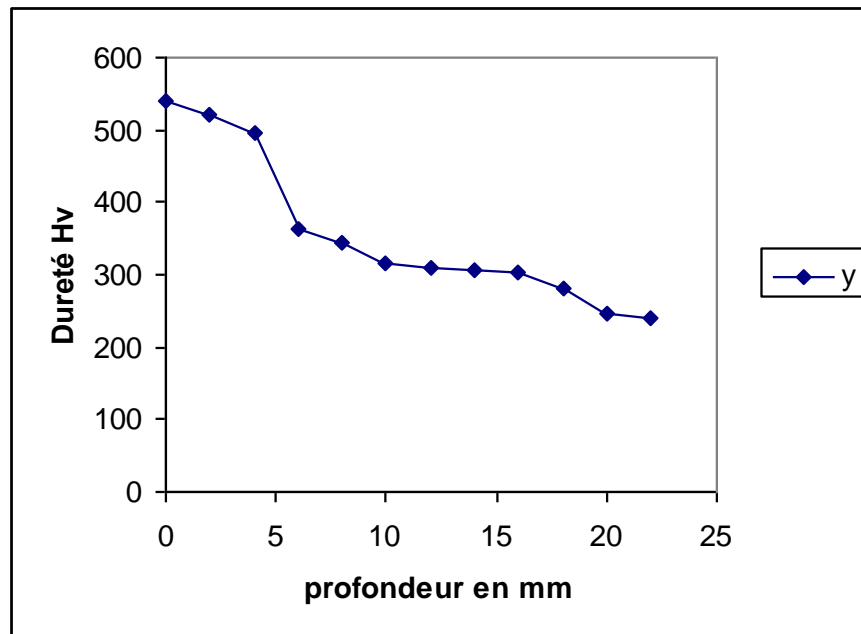


Fig. IV.14: Profil de dureté de l'échantillon revêtu par le molybdène.

b- Deuxième cas: Dureté de l'acier revêtu par le molybdène et l'acier d'accrochage.

Pour cet échantillon, on remarque la même variation de dureté (Fig.IV.15), mais avec des valeurs de dureté un peu élevées par rapport au cas précédent. Pour ce dernier cas, la dureté du métal déposé est plus élevée (735 Hv), ce qui montre la différence entre les deux dépôts. Par conséquent le dépôt du molybdène par l'utilisation d'une couche d'accrochage en acier donne un dépôt plus dur (Fig. IV.15).

Ces dernières valeurs de dureté Vickers ont été presque obtenues par Bradai et al [26], où la dureté dans le molybdène déposé varie de 600 à 670 Hv. Par contre les valeurs de dureté à l'interface varient de 400 à 430 Hv. Dans cette étude le molybdène est déposé sur un acier inoxydable 100 Cr6 en couche variant de 0.2 à 1 mm d'épaisseur.

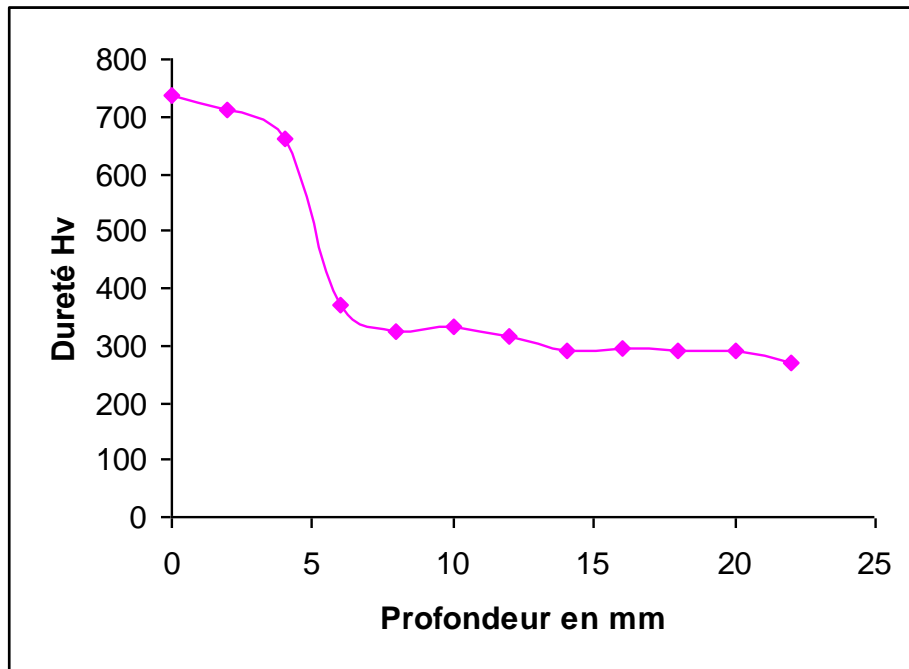


Fig. IV.15: Profil de dureté de l'échantillon revêtu par le molybdène et l'acier.

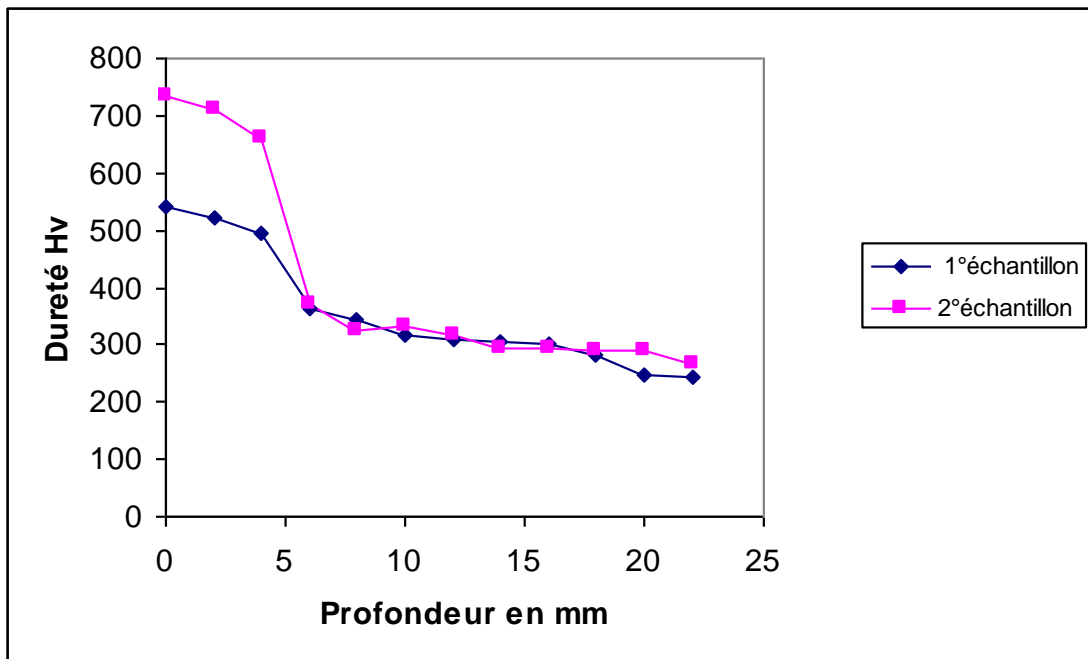


Fig. IV.16: Profil de dureté des deux échantillons.

Le tableau IV.1, rassemble les résultats des valeurs de dureté dans chaque zone pour les deux types d'échantillon.

zone	Echantillon revêtu par: molybdène	Echantillon revêtu par: molybdène et acier d'accrochage
Au dépôt	540 Hv	735 Hv
Prés de l'interface	344 à 495 Hv	370 à 660 Hv
Au cœur	280 Hv	290 Hv

Tableau IV.1 : Microdureté des deux échantillons dans différentes zones.

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire avait pour objet de comprendre le mécanisme de métallisation à la flamme en fil menée sur l'acier faiblement allié 42CrMo4.

Le rechargement (métallisation) est réalisé sur deux portées de la barre d'acier :

- première portée : métallisation à la flamme en fil en une seule couche de molybdène.
- deuxième portée : métallisation à la flamme en fil utilisant l'acier comme sous couche d'accrochage (Tab.III.2) et le molybdène.

A partir de l'étude microstructurale et mécanique menée sur cette alliage rechargé, nous avons exploité des techniques de caractérisation pour extraire les informations suffisantes qui nous permettent d'expliquer les modifications structurales observées.

L'étude détaillée des caractéristiques morphologiques des différentes structures formées lors de la métallisation à la flamme, a été entreprise avec la mise en œuvre de la microscopie optique et électronique à balayage. Elle visait principalement la caractérisation macroscopique de la couche superficielle du substrat lors de la métallisation ainsi que le suivi de la structure du cœur de la pièce à traiter.

Il a été montré que lors de la métallisation, une légère diffusion locale du molybdène s'est produite avec l'acier. Cette diffusion est justifiée par la diminution de la concentration du molybdène à partir de la surface jusqu'à une certaine profondeur. Elle a été à l'origine de l'augmentation de la dureté superficielle de la pièce jusqu'à 540 Hv (1° éch) et 735 Hv (2° éch).

La température est le paramètre le plus important dans ce processus de métallisation du fait que cette diffusion locale est avant tout un phénomène activé thermiquement.

Les propriétés mécaniques se sont améliorées beaucoup, dans la zone de dépôt, à l'interface et près de l'interface où on a enregistré 312 Hv (1° éch) et 315 Hv (2° éch).

L'observation au MEB a montré la présence des pores à l'intérieur du molybdène déposé.

Enfin et comme perspectives, nous pensons continuer cette étude pour répondre aux questions suivantes:

- Quelles méthodes de rechargement, métallisation à la flamme ou métallisation au plasma peut donner le meilleur rendement en tenant compte du facteur économique?

- Quelle nuance d'acier a le meilleur comportement vis-à-vis l'application d'un type de rechargement?

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] I.Lakhtine. Métallographie et traitement des métaux, 3^{eme} Edit., Edit. Mir, (1982)
- [2] J.P.PEYRE, C.TOURNIER, choix des traitements thermiques superficiels, éd. CETIM (1985)
- [3] J.BARRALIS, G.MAEDER, précis de métallurgie, éd. Nathan, Paris (1990)
- [4] D.GHIGLONE, F. CONVERT, C.TOURNIER, CETIM information, n° 84 (1984)
- [5] A.CONSTANT, G. HENRY, J.C.CHARBONIER, principe de base des traitements thermiques, thermodynamiques des aciers, éd. (1992)
- [6] J.I.Golstein, A.E MOREN, métallurgical trans.A. vol.9A, nov. (1978)
- [7] L. MAROT, thèse de doctorat, univ. Poitier, France (2001)
- [8] A.ROOS, B. MILLET, éd. Lavoisier, Paris (1982)
- [9] A. Proner. Revêtement par projection, (1999)
- [10] L. Hanlin et M. Ghislain, Bases théoriques de la projection thermique, LERMPS, M'sila (2004)
- [11] M. Ducos. Revêtement par projection, (1999)
- [12] E.FELDER, C.ANGELILIS, M.DUCCAROIR, M. IGNAT, P. MAZOT, propriétés mécaniques des films minces: problématiques et moyen de mesure, Annale de chimie sciences des matériaux, vol.23, sep (1998)
- [13] R.Bensimon, les aciers, 2 vol., Pyc, Paris (1971)
- [14] J.M Fabian, l'acier nouveau est arrivé, intermédiaire, juin (1990)
- [15] Association Technique de Traitement Thermique, Métallographie et Techniques d'analyses, Dunod, Paris (2004)
- [16] F.Maurice, L.Mery, R.Tixier, microanalyse et microscopie électronique à balayage, les éditions de physique d'Orsay-Paris ISBN (1978)
- [17] T.Gladman, Materials science and technology, constitution and proprieties of steels, vol.7, edited by R.W.CAHN 51992°
- [18] Metals Hand book, vol.10: Materials charaterization, ASM international, (1986)
- [19] A.J. Sedriks, corrosion, 42 (1986) 376
- [20] T.P. Hoor, J.Electrochem, soc.c. 17 (1970) 117
- [21] K.Hashimoto, K.Asomiond, K.Terramoto, con.sci 19 (1973)3
- [22] J.R Ambrose, corrosion, 34(1) (1978)27
- [23] P.C Searson et R.M Labmoon, corrosion 42(3) (1986)161

- [24] A.L Bichuya, Yu.A.Garasim, A.A.Velsku and M.I. Chaevski, Fiziko-khimicheskaya Mekhamka Materialov, vol.S, n° 6 pp.704-708 (1969)
- [25] M.K Bradai, A. Ati, Canadian journal of Physics, Issue S, vol. 86, (2008)
- [26] A.Boutouta et Z.Boumerzoug, effet de soudage par induction à haute fréquence sur un acier doux, conférence CND, Oran (2010)
- [27]G.Trolliard, S. Valette, A. Denoirjean et P. Lefort, Origine cristallographique de l'adhésion remarquable de dépôts plasma d'alumine sur acier préoxydé, Laboratoire SPCTS, Limoges, France (2006)
- [28] B. Etcheverry, Thèse de doctorat, Polytech.Toulouse, France (2006)
- [29] Z.Larouk, N.Rouag, Sciences et technologies, n° 27, vol.A, juin (2008)
- [30] Y.Danis, rechargement par soudage TIG, sem., SNS (2009)
- [31] M.Fukomoto, Y. Huang, proceeding of 15 th international thermal spray conference, p.401-406, mai (1998)
- [32] C.Robert, A. Vardelle, proceeding of 15 th international thermal spray conference, p.729-740, mai (1998)
- [33] J.M.Leger, F. Rémy, F. Pesme, influence des gaz sur la projection plasma. Revue surfaces n° 262, mai-juin (1996)
- [34] C.Leroux, les microstructures ou nitrurations epsilon, Trait. Therm., n°196, p.29-35, nov. (1985)
- [35] P.Benaben, chromage, Responsable du service Trait. De surface, centre SMS (1999)

العمل المقدم في هذه الأطروحة هدفه التعرف على تقنيات التحميل المطبقة على عمود مرفقي من سبيكة الصلب 42CrMo4 ثم متابعة تطورا لبنى الداخلية وكذا المميزات الميكانيكية للعينتين.

أجريت عملية التحميل على عينتين:

- العينة الأولى: عينة محملة بمادة الموليبدان فقط.

- العينة الثانية: عينة محملة بطبقة من صلب الاشتباك و الموليبدان.

تحديد مميزات عملية التحميل تركز على عدة عوامل، اهمها: البنية، الالتصاق، الكثافة(المسامات) و الصلادة.

باستعمال تقنيات التمييز مثل المجهر الضوئي، المجهر الماسح الالكتروني، التحليل الطيفي السيني و الصلادة، تمكنا من تحديد الخصائص البنيوية للنموذجين، المكونات الكيميائية في مختلف المناطق و الخصائص الميكانيكية للسطوح اثر انتشار الموليبدان.

الكلمات الدليلية: تلبس، تحميل، الالتصاق، المجهر الماسح الالكتروني، التحليل الطيفي السيني، الانتشار المحلي.

Résumé:

Le travail présenté dans ce mémoire avait pour objet de comprendre le mécanisme de métallisation à la flamme (rechargement) menée sur un vilebrequin de la nuance d'acier 42CrMo4 et suivre l'évolution de la microstructure interne et des propriétés mécaniques.

L'opération de rechargement est réalisée sur deux échantillons:

- 1° échantillon: échantillon revêtu par le molybdène.
- 2° échantillon: échantillon revêtu par le molybdène et l'acier d'accrochage.

La caractérisation du rechargement s'est basée sur l'étude de: la structure, l'adhérence, la densité (porosité) et la dureté.

Avec des techniques de caractérisation telles que la microscopie optique et électronique à balayage, la diffraction des rayons X et la microdureté, on a pu déterminer la microstructure des échantillons traités, la composition chimique dans les différents endroits et les propriétés mécaniques des surfaces (dureté) suite à une diffusion locale du molybdène.

Mots clés: métallisation, rechargement, adhérence, microscopie électronique à balayage, la diffraction des rayons X, diffusion locale.

