



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Amar Thelidji- Laghouat

FACULTE : Technologie

DEPARTEMENT : Génie Mécanique

DOMAINE : Sciences et Technologies.

FILIERE : Génie Mécanique

OPTION : Génie Des Matériaux

MEMOIRE DE MASTER

Thème

*Réalisation des revêtements par Diffusion
Thermo Réactive (TRD) sur un acier
100Cr6*

Présenté par :

BENHAFFAF IBRAHIM ELKHALIL
GRINAT MAMMAR

Encadre Par :

Allaoui Omar

Jury de soutenance :

Nom et Prénom	Qualité
Noureddine Mustapha	Président
Zidelmal Sami	Examineur
Allaoui Omar	Promoteur

Promotion : 2021/2022

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

رِسَالَةٌ إِهْدَاءٍ

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ وَالصَّلَاةَ وَالسَّلَامَ عَلَى أَشْرَفِ
الْمُرْسَلِينَ

أما بَعْدَ

نَهْدِي هَذَا النُّجَاحَ إِلَى عَائِلَتِنَا وَنَشْكُرُهُمْ عَلَى تَضَحِّيَاتِهِمْ
مُ وَصَبْرِهِمْ

وَتَشَجِيعِهِمْ لَنَا خِلَالَ كُلِّ هَذِهِ

السَّنَوَاتِ مِنَ الدِّرَاسَةِ وَنُهْدِي هَذَا النُّجَاحَ

إِلَى إِخْوَانِنَا وَجَمِيعِ أَصْدِقَائِنَا وَنَسْأَلُ اللَّهَ سُبْحَانَهُ وَتَعَالَى
أَنْ يَجْعَلَ هَذَا خَالِصًا لِرُؤُوسِهِ

الكَرِيمِ وَأَنْ يَجْعَلَ نَبْرَاسًا لِكُلِّ طَالِبِ عِلْمٍ

يَا رَبِّ الْعَالَمِينَ

رِسَالَةٌ شُكْرٍ وَتَقْدِيرٍ

بِسْمِ اللَّهِ وَالصَّلَاةِ وَالسَّلَامِ عَلَى رَسُولِ اللَّهِ صَلَّى اللَّهُ عَلَيْهِ وَسَلَّمَ نَحْمَدُ اللَّهَ تَعَالَى
بِأَنَّ وَفَقْنَا إلتِمَامَ هَذَا الْعَمَلِ الْمُتَوَاضِعِ وَنَسْأَلُ اللَّهَ تَعَالَى أَنْ يَكُونَ مِنَ الْعِلْمِ
الَّذِي يَنْتَفِعُ بِهِ غَيْرُنَا.

بَعْدَ أَنْ حَمِدْنَا اللَّهَ تَعَالَى نَوَدُّ أَنْ نَتَقَدَّمَ بِجَزِيلِ الشُّكْرِ ألسْتاذِنَا وَمُؤَطِّرِنَا وَمَرْبِينَا
عَلَاوِي عُمَارَ

الَّذِي سَاهَمَ مَعَنَا كَثِيرًا بِالنَّصْحِ وَالتَّوْجِيهِ وَإِرْشَادِنَا وَضَحَى
بِجَهْدِهِ وَوَقْتِهِ مِنْ أَجْلِ أَنْ نَتِمَّ الْعَمَلُ فِي الْوَقْتِ الْمُنَاسِبِ اطالَ اللَّهُ عُمُرَهُ وَجَزَاهُ
لِلَّهِ كُلُّ خَيْرٍ

كَمَا لَا نُنْسَى الدُّكْتُورَ

دِهِينَةَ حَسِينِ & رِضْوَانَ بَرَكَاتِ & فَرَحاتِ سَعَادِ
الَّذِينَ كَانَتْ لَهُمُ الْبَصْمَةُ فِي هَذَا الْعَمَلِ الْمُتَوَاضِعِ مِنَ الْجَانِبِ الْمَخْبَرِيِّ.
وَنَشْكُرُ كَذَلِكَ الْأَخْتَ

هَاجَرَ عَبْدَ الْعَالِيِّ وَحَيْرِيَّةَ بَرَاحِ
الَّتَيْنِ كَانَا لَهَا الْفَضْلُ فِي الْجَانِبِ الْمَعْلُومَاتِيَّةِ.

LISTE DES FIGURES :

LISTE DE Figure :

Figure I.1 : Schéma de principe de la pulvérisation	7
Figure 1.2 : Schéma de principe de dépôt en phase vapeur chimique (CVD), réacteur à paroi chaude	8
Figure I.3 : principe fondamental de la projection thermique	9
Figure II.1 : Poudres de base utilisées pour la préparation des mélanges pour le traitement TRD.....	26
Figure II.2 : figure représente le découpage d'échantillon de métal 100Cr6.....	27
Figure II.3 : Machine de polissage et échantillons après polissage.....	28
Figure II.4 Les différentes marques des échantillons afin de les distinguer.....	28.
Figure II.5 : Préparation des creusets avant l'introduction dans le four	29
Figure II.6 : Mettre l'échantillon dans le four	30
Figure II.7 : les traiter échantillons après le traitement thermique.....	31
Figure II.8 : tronçonneuse à disque électrique	31
Figure II.9 Résine Sk200 utilisée pour l'enrobage des échantillons.....	33
Figure II.10 microscope optique LIECA DMLM	32
Figure II.11 Microscope Electronique à Balayage	34
Figure II.12 : le microduromètre Mitutoyo MVK-H2	36
Figure II.13 : pénétrateur Vickers en pyramide de diamant	37
Figure III.1 : Micrographie en MO montrant la couche de carbure obtenue par la poudre contenant du chrome pur « Cr » comme élément de formateur de carbure.....	38
Figure III.2 : Micrographie en MEB montrant la couche de carbure obtenue par la poudre contenant du chrome pur « Cr » comme élément de formateur de carbure.....	38
Figure III.3 : Micrographie en MO montrant la couche de carbure obtenue par la poudre contenant du ferro-chrome pur « Fe-Cr » comme élément de formateur de carbure.....	39
Figure III.4 : Micrographie en MEB montrant la couche de carbure obtenue par la poudre contenant du ferro-chrome pur « Fe-Cr » comme élément de formateur de carbure.....	39
Figure III.5 : Micrographie en MO montrant la couche de carbure obtenue par la poudre contenant du ferro-titane pur « Fe-Ti » comme élément de formateur de carbure.....	40
Figure III.6 : Micrographie en MO montrant la couche de carbure obtenue par la poudre contenant du ferro-titane pur « Fe-Ti » comme élément de formateur de carbure.....	40

Liste de Tableau :

Tableau I.1 : Représentation schématique des différentes filières de revêtements métalliques.....	5
Tableau I.2 Revêtements de carbure qui peuvent être formés sur le fer et l'acier par revêtement TRD	15
Tableau I.3 Revêtements de nitrure qui peuvent être formés sur le fer et l'acier par Revêtement TRD	16
Tableau I.4 Avantages et inconvénients des différents procédés de revêtement	19
Tableau I.5 caractéristiques des différents procédés de revêtement	20
Tableau II.1 : composition chimique de l'acier 100Cr6.....	25
Tableau II.2. Poudres utilisées dans ce travail avec leurs pourcentages	25.

SOMMAIRE

DÉDICACE

REMERCIEMENT

RÉSUMÉ

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES FIGURES

INTRODUCTION

CHAPITRE 1 : Recherche Bibliographique

I. I.1. Classification des traitements thermochimiques par diffusion.....	3
I.1.1. Traitement par diffusion de métalloïde	3
I.1.2. Traitement par diffusion de métaux	3
I.2. Traitement de conversion.....	4
I.2.1. Conversions chimiques	4
I.2.2. Conversions électrochimiques ::... ..	4.
I.2.3. Conversions par voie gazeuse	4
I.3. Les revêtements	5
I.3.1. Revêtements réalisés avec faible effet thermique	5
a- Revêtements réalisés en milieu aqueux	5
b- Revêtements réalisés en milieu gazeux	6
c- Revêtements réalisés par projection.....	8
I.4. Principe de la méthode de revêtement TRD	9
I.4.1. Mécanisme et types de revêtement.....	11
I.4.1 Types de revêtements formés	12
1.4.1.1 Revêtement en carbure	12
1.4.1.2 Revêtement en nitrure	14
I.5 Types de revêtements (carbure et de nitrure) qui peuvent être formés.....	15
I.6 Procédés de revêtement	16
I.7 Procédures pratiques de revêtement.....	21
I.7.1 Revêtement du carbure	21
I.7.1.1 Type de réactifs de revêtement.....	21
I.7.1.2 Type de substrats	21
I.7.1.3 Durcissement du substrat.....	22
I.7.1.4 Traitement pour le procédé d'immersion dans un bain de sel	22
I.7.2 Revêtement de nitrure	23
I.7.2.1 Type de réactifs de revêtement.....	23
I.7.2.2 Type de substrats	23
I.7.2.3 Durcissement des substrats	23
I.7.2.4 Traitement pour le procédé d'immersion dans un bain de sel	23
I.8 Applications	23

CHAPITRE II PROCEDURES ET TECHNIQUES EXPERIMENTALES

II.1 Matériau utilisé comme substrat	25
II.2 Préparation des échantillons avant le traitement TRD	26
II.3 Préparation des échantillons avant le traitement TRD.....	26
II.3.1 Processus de tronçonnage	26
II.3.2 Polissage	27
II.4 Préparation des creusets.....	28
II.4.1 Introduction dans le four	29.

II.4.2 Traitements thermiques TRD.....	30
II.5 Préparation des échantillons après les traitements TRD	30
II.5.1 Découpage	30
II.5.2 Enrobage	31
II.5.3 Polissage des échantillons pour l'observation.....	32
II.5.3.1 Attaque chimique	32
II.6 Observation	32
II.6.1 Microscopie optique.....	32
II.6.2 Microscope Electronique à balayage.....	34
II.7 Microdureté	35.
 CHAPITRE III : Résultats et Discussions	
III.1. Caractérisation microstructurale	38
Conclusion générale	38

INTRODUCTION GENERALE

Le procédé de dépôt et de diffusion thermo-réactifs (TRD) est une méthode basée sur le traitement thermique pour former des revêtements, avec des couches compactes de carbures, de nitrures ou de carbonitrures, sur certains matériaux contenant du carbone et de l'azote, notamment l'acier [2] [4].

Les revêtements réalisés par TRD peuvent avoir une plus grande épaisseur et une plus grande force d'adhérence aux substrats par rapport aux revêtements produits par dépôt chimique en phase vapeur (CVD) ou par dépôt physique en phase vapeur (PVD) [2,4,8].

Les revêtements TRD sont formés en raison de la forte affinité des éléments formateurs de carbure (CFE) et des éléments formateurs des nitrures (NFE) dans les réactifs de revêtement avec les atomes de carbone ou d'azote existants dans les substrats des pièces à revêtir. La croissance de revêtements plus épais peut être réalisée par un apport continu de carbone ou d'azote par diffusion thermique de l'intérieur du substrat vers la surface, à cause du gradient de concentration. Le degré d'affinité des éléments formateurs de carbure (CFE) et des éléments formateurs des nitrures (NFE) dans les réactifs avec le carbone ou l'azote ne demande que peu d'énergie libre pour la formation de carbures ou de nitrures. Parmi les éléments formant des carbures pouvons citer : le titane, le zirconium, le hafnium, le vanadium, le niobium, le tantale, le chrome, le tungstène, le molybdène et le manganèse. Tous ces éléments sont également éléments formateurs de nitrures. Il a été confirmé que des revêtements de carbure et de nitrure de ces éléments peuvent être formés sur des matériaux à base de fer, de nickel et de cobalt, à condition de bien choisir les réactifs de revêtement, les matériaux de substrat et les matériaux de base [2].

L'objectif principal de ce travail est d'essayer de réaliser des revêtements en carbure sur la surface d'un substrat en acier 100Cr6 par le procédé TRD à travers trois différents mélanges de poudres contenant le Chrome « Cr », le Ferro-Chrome « Fe-Cr » et le Ferro-Titane « Fe-Ti » comme éléments formateurs de carbure (CFE). La comparaison

des couches produites en termes de qualité de couche, épaisseur de la couche et la dureté de la couche réalisée, nous permet d'évaluer les trois traitements effectués.

En plus de l'introduction et la conclusion, la présentation du mémoire est faite, en trois chapitres :

- Le premier chapitre est consacré à la recherche bibliographique sur les revêtements et les dépôts par traitements thermochimiques en général et la déposition thermo-réactifs (TRD) en particulier.
- Dans le deuxième chapitre nous nous étalerons sur l'étude expérimentale dans laquelle nous avons préparé nos échantillons et les différents mélanges de poudres avant d'entamer les traitements TRD. La présentation des moyens de caractérisation des couches obtenues par les traitements TRD comme la Microscopie Optique « MO », la Microscopie Electronique à Balayage « MEB », ainsi que les mesures de microdureté font partie de ce chapitre.
- Pour le troisième chapitre nous allons présenter et discuter les résultats obtenus par le traitement thermo-réactif de diffusion/déposition (TRD) sur l'acier 100Cr6. Notre étude va baser principalement sur la faisabilité de formation des couches carbures avec les mélanges de poudres préparées.

CHAPITRE 1
Etude bibliographique sur les traitements
thermochimiques « TRD »

I.1. Classification des traitements thermochimiques par diffusion :

Dans cette filière, le matériau d'apport est un métalloïde ou un métal avec comme finalité, dans le premier cas d'améliorer la tenue à la fatigue et éventuellement la résistance à l'usure, dans le seconde cas, d'améliorer la résistance à la corrosion ou à l'oxydation. On trouvera également dans cette filière les traitements d'implantation et de mélange ionique qui sont le résultat d'un procédé physique de diffusion.

I.1.1. Traitement par diffusion de métalloïde :

On regroupe dans ce domaine tous les procédés de traitement thermochimique tels que cémentation, boruration, nitruration, oxydation, et les procédés mixtes tels que carbonituration et oxynituration. Ces derniers sont actuellement en plein essor notamment dans la mécanique et l'industrie automobile.

Le domaine des traitements thermochimiques est largement utilisé dans l'industrie de la mécanique et notamment l'industrie des transports pour les pièces fortement sollicitées dans la transmission de puissance, ainsi que dans le domaine de l'outillage sollicité également sur le plan mécanique avec des facteurs thermiques et physicochimiques. Il s'agit dans tous les cas d'améliorer les propriétés fonctionnelles de tenue à la fatigue sous toutes ces formes (fatigue dans la masse, fatigue thermique et fatigue superficielle). Certains traitements thermochimiques comme la nitruration peuvent conduire à une amélioration des propriétés fonctionnelles de résistance à l'usure. Certains traitements mixtes comme l'oxynituration peuvent conduire à une amélioration conjointe de la résistance à l'usure et de la tenue à la corrosion [2].

I.1.2. Traitement par diffusion de métaux :

On regroupe dans ce domaine les traitements de diffusion des métaux comme le chrome ou l'aluminium, pour améliorer la résistance à la corrosion et à l'oxydation des aciers et des alliages base nickel (cas de l'aluminium) ou la résistance à l'action conjointe de la corrosion et de l'usure (cas de la chromisation). Il existe aussi des traitements mixtes de chrom aluminisation pour améliorer encore plus la résistance à l'oxydation notamment des alliages base nickel. Ces traitements, déjà relativement anciens car utilisant des techniques d'apport métallique par emploi de ciments solides, sont d'une large diffusion dans l'industrie aéronautique et la mécanique [4].

I.2. Traitement de conversion :

Il s'agit d'une filière de traitements pour laquelle le métal d'apport réagit superficiellement avec le substrat pour conduire à une amélioration structurale. Ces traitements sont le résultat, soit d'une attaque chimique, soit d'une oxydation par voie électrolytique ou par voie sèche, soit d'une fonctionnalisation par voie électrochimique ou par plasmas froids.

I.2.1. Conversions chimiques :

Cette filière de traitements est d'une large diffusion car constituée de procédés peu coûteux et faciles à mettre en œuvre. On peut citer comme principaux traitements la phosphatation et la chromatisation sur aciers et alliages d'aluminium, L'oxalation sur aciers inoxydables, le brunissage sur aciers et le mordantage sur alliages de magnésium. On peut également regrouper dans cette filière les traitements par technique « sol-gel » qui s'appliquent au trempé dans des solutions avec ultérieurement gélification de la surface.

I.2.2. Conversions électrochimiques :

Cette filière de traitements est également d'une large diffusion dans le domaine des métaux fortement oxydables comme les alliages d'aluminium, de titane, de magnésium et à un degré moindre les aciers inoxydables. Il s'agit de la filière d'oxydation anodique, à laquelle on peut associer la sulfuration en sels fondus et la fonctionnalisation par greffage de différents types de molécules, notamment des molécules organiques, en vue de constituer un « primaire d'adhérence ».

I.2.3. Conversions par voie gazeuse :

On va trouver dans cette filière de traitement la coloration par oxydation sèche et la fonctionnalisation des surfaces par plasmas froids.

La **coloration** par voie sèche s'applique essentiellement aux aciers inoxydables en vue de leur donner un aspect esthétique pour des applications en architecture. Ce traitement est réalisé, soit par voie thermique classique, soit par technique de plasmas froids, avec la formation de composés CrO_x de faible épaisseur donnant la couleur par voie interférentielle.

I.3. Les revêtements :

C'est la filière de loin la plus importante puisqu'elle représente plus de 60% du chiffre d'affaires des traitements et revêtements de surface (hors peinture). Le classement des différentes techniques peut se faire, soit par le milieu (liquide ou gazeux), soit par la température (mettant en jeu ou non des phénomènes de diffusion, voire de dilution, entre dépôt et substrat) [2].

Filière de revêtement	Conditionnement	Structure interface	Procédés
Faible effet thermique	Milieu aqueux	Pas de déplacement de l'interface	Galvanoplastie, chimie, réduction chimique
Faible effet thermique	Milieu gazeux	Pas de déplacement de l'interface	Dépôts PVD, PACVD
Faible effet thermique	pulvérulente sous forme Apport métal	Pas de déplacement de l'interface	Projection Thermique
Fort effet thermique	Milieu gazeux	Déplacement par diffusion	Dépôts CVD, (statique, dynamique)
Fort effet thermique	Voie liquide, enduction	Déplacement par diffusion	Dépôts en bain de sel, métal fondu, bouillies, émaillage
Fort effet thermique	Apport métal sous forme fil ou poudre	déplacement par dilution	Rechargement TIG, MIG, plasma, laser

Tableau I.1 : Représentation schématique des différentes filières de revêtements métalliques.

I.3.1. Revêtements réalisés avec faible effet thermique :

Sont classés dans cette filière les revêtements obtenus en milieu aqueux (galvanoplastie, déplacement, réduction chimique), en milieu gazeux (PVD, PACVD), ainsi que les techniques de projection thermique.

A- Revêtements réalisés en milieu aqueux :

Il s'agit de la filière comprenant les dépôts réalisés par galvanoplastie, par déplacement et par réduction chimique.

- Dépôts réalisés par galvanoplastie :

L'importance économique de cette filière est très grande puisqu'elle intéresse à elle seule environ 25% de l'ensemble des revêtements et traitements de surface. Elle permet d'obtenir de nouvelles performances sur les matériaux métalliques comme la résistance à la corrosion, la tenue au frottement et à l'usure, l'aspect, la conductibilité. Les métaux qui peuvent être déposés sont : nickel, le chrome, le cadmium, le cuivre, le zinc et l'étain, sans oublier les métaux nobles (Au et Ag).

Les dépôts d'alliages ou Co- dépôts sont actuellement en plein essor, ainsi que la réalisation de dépôts composites par incorporation dans le revêtement de particules dures (SiC) ou facilitant le glissement.

Le procédé électrolytique autorise les revêtements localisés au tampon pour les pièces de grande taille ou le rechargement de pièces usées. Il autorise également le traitement en continu sur tôle d'acier dans l'industrie sidérurgique (lignes d'électrozingage). L'emploi de dispositifs à circulation forcée (fort débit d'électrolyte) ou à courants pulsés permet d'augmenter les vitesses et la qualité des dépôts [8].

Les domaines d'utilisation de cette filière sont très nombreux, dans l'industrie mécanique, l'agroalimentaire, la plasturgie et la chimie, la production d'énergie et la sidérurgie, ainsi que l'industrie des transports et l'aéronautique. Cette filière regroupe deux familles de dépôts selon l'épaisseur réalisée :

- Les couches minces, d'épaisseur inférieure ou égale à 10 μm ,
- Les couches moyennes, d'épaisseur comprise entre 10 et 200 μm .

- Dépôts réalisés par réduction chimique :

Il s'agit dans cette filière de dépôts obtenus par réduction chimique autocatalytique, essentiellement dans les cas du nickel. Ces revêtements sont obtenus par réduction de sulfates de nickel au moyen d'hypophosphites ou de borohydrures avec incorporation de phosphore ou de bore dans le dépôt de nickel. Il est possible d'obtenir des niveaux de dureté importants par traitement thermique. Soit vers 200 °C dans le cas des alliages d'aluminium, soit vers 400°C dans le cas des aciers pour assurer au substrat métallique les fonctionnalités de résistance à la corrosion, au frottement et à l'usure. Il est possible de réaliser des dépôts composites par incorporation de particules dures (SiC) ou réduisant le frottement.

L'épaisseur des dépôts réalisés par réduction chimique est au plus de quelques dizaines de μm . Cette filière est utilisée principalement dans l'industrie mécanique, la chimie, la plasturgie et la production d'énergie, essentiellement sur aciers (au carbone et inoxydables) et alliages d'aluminium [1].

a- Revêtements réalisés en milieu gazeux :

Sont regroupés dans cette filière les dépôts physiques en phase vapeur (PVD), chimiques en phase vapeur assistés par plasma (PACVD) et obtenus par projection.

- Dépôts physique en phase vapeur (PVD) :

Les techniques employées pour réaliser ces dépôts sont, soit l'évaporation thermique simple, soit l'évaporation thermique assistée par plasma (dépôt ionique), soit la pulvérisation cathodique, soit l'évaporation par arc, les dépôts obtenus par différences techniques sont faible épaisseur (3 à $20\mu\text{m}$). Il s'agit de métaux si l'atmosphère résiduelle dans les équipements est neutre (Ar) et de composés définis si l'atmosphère résiduelle est réactive (carbures, nitrures, oxydes).

Les dépôts peuvent être réalisés en statique dans des enceintes appropriées ou en continu sur des équipements avec sas permettant de passer de la pression atmosphérique à la pression de travail en quelques unités avec des vitesses de défilement compatibles avec des productivités industrielles. Les domaines d'utilisation de cette filière sont très nombreux, dans l'industrie mécanique, la forge et le travail des métaux en feuilles, la plasturgie, la production d'énergie, la métallurgie et la sidérurgie, ainsi que l'industrie des transports et l'aéronautique [9].

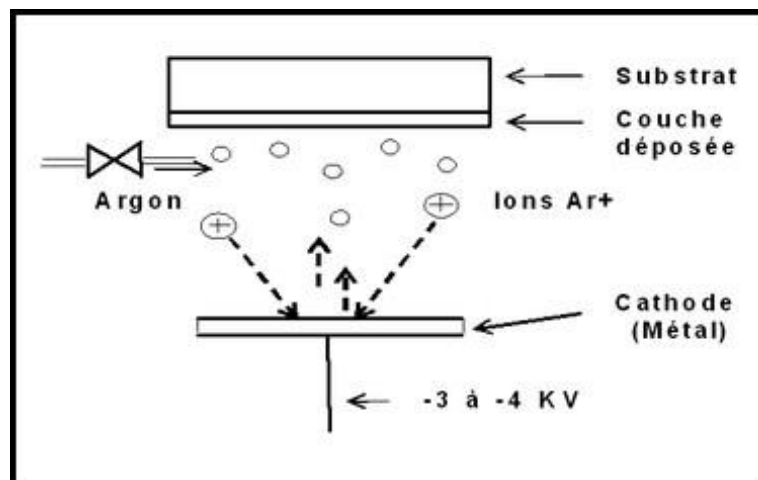


Figure I.1 : Schéma de principe de la pulvérisation.

- Dépôts chimiques assistés par plasma (PACVD) :

L'utilisation des plasmas froids permet de faciliter la décomposition d'une phase vapeur et d'abaisser les températures de traitement à des niveaux compatibles avec la plupart des substrats métalliques utilisés pour applications mécaniques (aciers traités, voire alliages d'aluminium). Cette technique permet la synthèse de composés définis (oxydes, carbures, nitrures, carbone adamantin...) sur des épaisseurs faibles, généralement inférieures à 10 µm. Ses domaines d'utilisation sont nombreux dans l'industrie mécanique, la forge et le travail des métaux en feuilles, l'usinage, les biomatériaux et l'industrie automobile. La réalisation de multicouches permet d'assurer à ces dépôts un caractère multifonctionnel, par exemple sur résistance conjointe à l'usure et à l'oxydation [10].

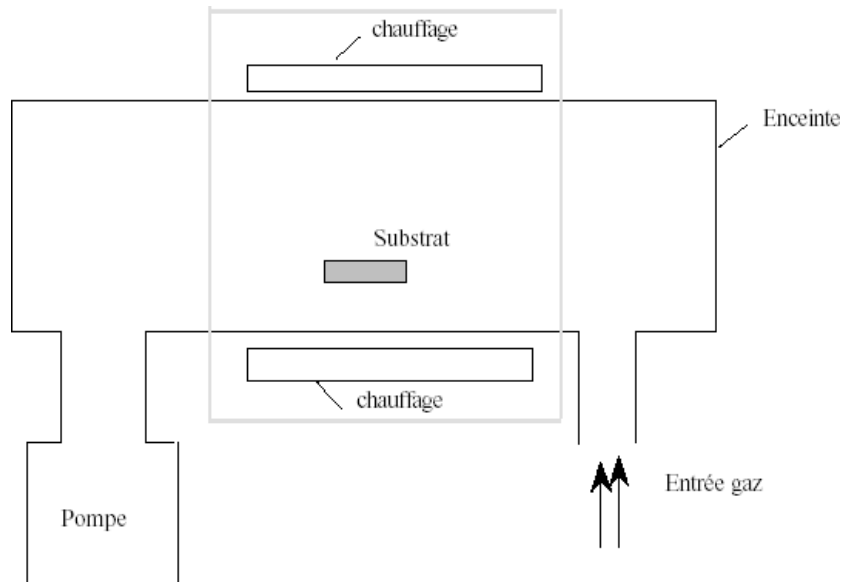


Figure 1.2 : Schéma de principe de dépôt en phase vapeur chimique (CVD), réacteur à paroi chaude.

b- Revêtements réalisés par projection :

Cette filière de traitements regroupe plusieurs techniques d'apport d'énergie thermique au métal du dépôt sous forme pulvérulente pour l'amener à l'état pâteux sur le substrat métallique : chalumeau oxyacétylénique, torche plasma, canon à détonation et dispositif à tir continu (HVOF ou High Velocity Oxygen Fuel). Ces procédés dits de « métallisation » permettent de déposer sur des épaisseurs pouvant atteindre plusieurs centaines de µm, soit des métaux (molybdène, alliages MCrAlY), soit des cermets (mélanges ZC-Co par exemple), soit des céramiques (zircone stabilisée à l'yttrium ou alumine). Les pro-

priétés d'usage visées sont la résistance à la corrosion dans les métaux fondus (zinc, étain et aluminium notamment).

Les domaines d'utilisation de cette filière sont très nombreux, dans l'industrie mécanique, la production d'énergie, l'industrie verrière, la métallurgie et la sidérurgie, ainsi que l'industrie des transports et l'aéronautique. Dans ce dernier domaine en particulier, des travaux sont actuellement conduits aux États Unis pour substituer ce type de revêtement aux dépôts électrolytiques de chrome. Il faut signaler également les projections d'hydroxyapatite (HAP) sur alliages métalliques (aciers inoxydables, alliages de titane) pour faciliter leur biointégration dans les tissus osseux [11-12].

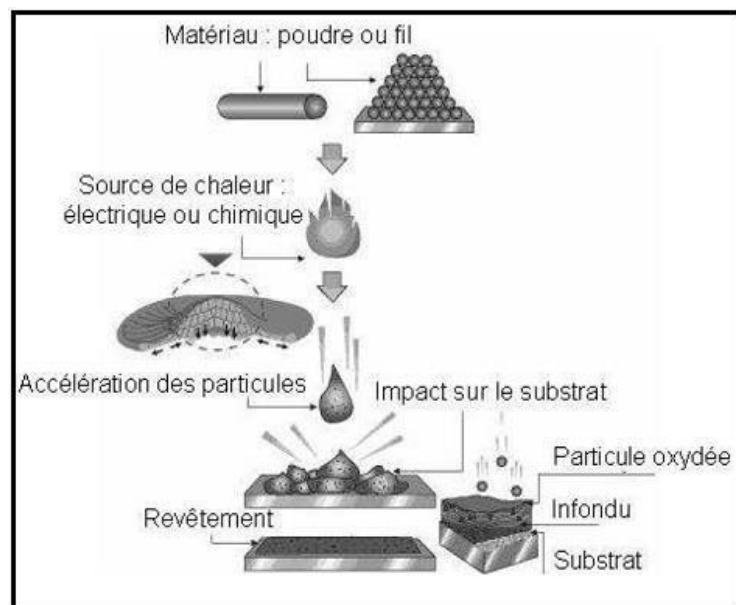


Figure I.3 : principe fondamental de la projection thermique.

I.4.Principe de la méthode de revêtement TRD

Le dépôt Thermo-réactif (TRD) est un traitement thermochimique de surface, qui permet de produire des couches compactes de carbures, de nitrures et de carbonitrures, principalement sur des substrats en acier. Pendant le traitement, une pièce contenant du carbone et/ou de l'azote est mise en contact avec un milieu contenant des éléments formateurs de carbure (CFE) et/ou des éléments formateurs de nitrure (NFE), à température élevée.

De fines particules de carbure ou de nitrure se forment à la surface de la pièce en raison de la liaison chimique instantanée entre le carbone ou l'azote de la pièce et les

CFE/NFE du milieu de revêtement. Les noyaux de carbure ou de nitrure évoluent en un revêtement épais en raison de la réaction continue entre le CFE/NFE du milieu de revêtement et les atomes de carbone ou d'azote qui diffusent vers le front de réaction à la surface du revêtement depuis l'intérieur de la pièce à travers le revêtement.

La force motrice de la réaction chimique entre le CFE/NFE et le carbone ou l'azote est la forte affinité du CFE/NFE avec le carbone ou l'azote. La réaction qui forme des revêtements épais est alimentée par la diffusion thermique du carbone ou de l'azote de l'intérieur vers la surface, c'est-à-dire de la teneur la plus élevée vers la teneur la plus faible. Par conséquent, la vitesse de diffusion du carbone ou de l'azote dans les substrats est le principal facteur déterminant l'épaisseur des revêtements TRD.

Il est largement connu que la vitesse de diffusion du carbone est suffisamment élevée dans les plages de températures de cémentation de l'acier mais trop faible aux températures de nitruration des aciers. Cependant, l'azote peut diffuser dans les plages de température de nitruration de manière à produire des couches de nitrure suffisamment épaisses. Le revêtement TRD peut donc produire à la fois des revêtements de carbure aux températures de cémentation de l'acier et des revêtements de nitrure aux températures de nitruration. Pendant le revêtement, la couche se développe vers l'extérieur sous l'influence de la diffusion de C ou de N depuis l'intérieur de la pièce à la surface.

En supposant que la consommation de CFE/NFE à partir du milieu de revêtement est reconstituée rapidement, la vitesse de croissance du revêtement est déterminée par la vitesse d'arrivée de C ou de N au front de réaction. Les étapes déterminant le taux réactionnel dans ce transport peuvent être :

- La diffusion de C ou de N à travers le revêtement ;
- La diffusion de C ou de N à travers la matrice vers l'interface substrat/revêtement ou
- La dissolution des carbures ou des nitrures présents dans le substrat et fournissant le C ou N à la matrice.

En général, la diffusion de C ou de N à travers un carbure ou un nitrure est beaucoup plus lente que la diffusion à travers une matrice d'austénite ou de ferrite. Par

conséquent, la croissance du revêtement est très probablement contrôlée par la diffusion de C ou de N à travers le revêtement.

Les CFE/NFE capables de former des revêtements (CFE/NFE actifs) sont disponibles sous forme de sels fondus et de mélanges de CFE/NFE contenant des poudres de matériaux et des activateurs, généralement des halogénures, qui sont chauffés dans des récipients étanches (procédé de poudre) ou dans des lits en bain fluidisé (Procédé en lit fluidisé).

I.4.1. Mécanisme et types de revêtement

Si les CFE et les NFE dans les réactifs de revêtement sont maintenus en contact avec les substrats de la pièce à des températures élevées, ils se lient instantanément chimiquement au carbone ou à l'azote sur les surfaces exposées pour former des grains de carbure ou de nitrure sur les surfaces de contact en raison d'une grande affinité, c'est-à-dire de petits changements d'énergie libre pour la formation de carbure ou de nitrure.

Les grains de carbure ou de nitrure ainsi formés forment des revêtements épais sur les surfaces du substrat par réaction continue entre les CFE/NFE dans les réactifs de revêtement et les atomes de carbone ou d'azote à la surface des revêtements qui sont successivement alimentés à partir des niveaux plus profonds des substrats en raison à la diffusion thermique. Par conséquent, le taux de diffusion du carbone ou d'azote dans les substrats est l'un des facteurs les plus importants pour le taux de croissance des revêtements. Le grand taux de diffusion du carbone nécessaire pour créer des revêtements épais est atteint dans les plages de température pour le durcissement de l'acier, mais pas dans la plage de revenu de l'acier.

Cependant, l'azote peut diffuser plus facilement à basse température, de sorte que des couches de nitrure suffisamment épaisses peuvent être créées dans des plages de température normalement utilisées pour le revenu à haute température des aciers.

Ainsi, un traitement TRD peut produire des revêtements de carbure à des températures d'austénitisation/durcissement et peut produire des revêtements de nitrure aux températures de revenu sous-critiques inférieures pour les aciers.

Le revêtement TRD sur des aciers à faible teneur en carbone nitrurés peut produire des couches de carbonitrure à des taux de croissance élevés car il utilise à la fois du carbone et de l'azote. De plus, cela peut réduire la possibilité d'une chute de dureté sous les

revêtements de carbure qui pourrait être causée par une diminution de la teneur en carbone. De cette manière, les revêtements de nitrure formés à basse température doivent être strictement appelés carbonitrides car ils peuvent comprendre du carbone en plus de l'azote.

Le revêtement TRD produit des couches de carbures, de nitrures et de carbonitrides sur les métaux du substrat, tels que les alliages à base de fer, de nickel et de cobalt. Les revêtements TRD peuvent également être produits sur des carbures et des nitrures solides, tels que le carbure de silicium (SiC) et le nitrure de silicium (Si₃N₄), tant que les CFE/NFE dans les réactifs de revêtement ont une plus grande affinité pour le carbone ou l'azote que ceux du CFE/NFE dans les substrats (Réf 5). Un carbone solide, tel que le graphite, peut également avoir des revêtements en carbure.

1.4.1 Types de revêtements formés

1.4.1.1 Revêtement en carbure

Les éléments formant des carbures présentent de faibles variations d'énergie libre pour la formation de carbures se combinent facilement avec le carbone pour former des carbures. Ces éléments sont également appelés éléments formant des nitrures car ils présentent également de faibles variations d'énergie libre pour la formation de nitrures [17].

Les principaux atomes de carbone qui peuvent se déplacer librement dans les substrats sont ceux des phases de la matrice (cristal d'austénite dans les aciers ou phases de liant métallique dans les cermets, y compris les carbures cimentés). Les atomes de carbone élaborant les particules de carbure dans les substrats, remarquablement dans les aciers à outils fortement alliés et les cermets de carbure, peuvent également contribuer à la fabrication de revêtements de carbure, en fonction des changements relatifs d'énergie libre pour la formation de carbure dans les éléments de carbure du revêtement et les éléments de carbure du substrat.

Ce n'est que lorsque les éléments de formation de carbure dans les particules de carbure des substrats présentent des changements d'énergie libre pour la formation de carbure plus importants que ceux des revêtements de carbure qu'un revêtement de carbure peut être déposé sur les particules de carbure des substrats. Dans les aciers à outils, les revêtements de carbure de chrome peuvent se déposer sur les particules de carbure de

tungstène ou de molybdène (généralement représentés par M₆C, M = fer et autres éléments) mais pas sur les particules de carbure de vanadium (MC) [3].

Par conséquent, les carbures présentant des changements d'énergie plus faibles pour la formation de carbures ne peuvent pas contribuer directement à la formation de carbures. Cependant, ces particules de carbure dans les aciers et les carbures cimentés travaillent pour le revêtement de carbure en fournissant des atomes de carbone dans la matrice par leur dissolution dans les phases de la matrice aux températures de revêtement. Les températures de revêtement plus élevées entraînent une plus grande dissolution des particules de carbure et de plus grandes quantités de carbone dans les phases de la matrice. de carbone dans les phases de la matrice [17].

Pendant la formation des revêtements de carbure sous une combinaison limitée de type de carbures de revêtement, de composition chimique des substrats et de températures de revêtement, une certaine quantité d'éléments formant des carbures peut diffuser dans les substrats pour former des couches de solution solide ou des couches composées d'éléments majeurs dans les substrats et les éléments formant des carbures, tels que Fe-Cr, Fe-V et NbNi₃ [17].

Les revêtements se forment sur les phases de la matrice en trois étapes : (1) nucléation et croissance primaires, (2) génération de grains très fins sur celles-ci, et (3) croissance vers des revêtements plus épais par dépôt successif de grains colonnaires ou de grains équi-axiaux avec des orientations aléatoires ou une forte orientation [5].

Le même comportement de nucléation et de croissance est également observé sur les particules de carbure dans les substrats.

La vitesse de croissance des revêtements de carbure est principalement contrôlée non pas par la teneur totale en carbone des substrats mais par la teneur en carbone dans la phase de la matrice des aciers et dans la phase du liant des cermets. des aciers et dans la phase liante des cermets, aux températures du revêtement. de revêtement. Avec l'augmentation des températures de revêtement, plus de grains de carbure se dissolvent dans les phases de la matrice pour augmenter la teneur en carbone, ce qui donne des revêtements plus épais. Les taux de diffusion thermique du carbone dans les phases de la matrice sont plus élevés à des températures de revêtement plus élevées. de la matrice à des températures de revêtement plus élevées accélèrent également la croissance des revêtements. Comme dans de nombreux autres traitement de diffusion thermique, la

croissance des revêtements est proportionnelle à la racine carrée du temps de revêtement (A. A.). racine carrée du temps de revêtement [6].

Les revêtements ainsi formés sont très denses, ce qui signifie qu'aucun pore macroscopique ne peut être observé par les microscopes optiques. L'observation au microscope électronique des sections transversales fracturées démontre que les revêtements sont constitués des grains de carbure très fins [17].

I.4.1.2 Revêtement en nitrure

Le mécanisme de formation du revêtement de nitrure est similaire à celui du carbure. Cependant, il existe de grandes différences en termes d'applications industrielles. Cela est dû au fait que presque aucun matériau de substrat pratique comprenant de l'azote, à l'exception des céramiques nitrurées comme le silicium [17].

Il n'existe pas de métaux industriels contenant une quantité suffisante d'azote. Cependant, la nitruration sur les aciers à des températures de 450 à 600C est un moyen efficace pour fournir suffisamment d'azote sur les substrats en acier. Et, contrairement aux revêtements de carbure les revêtements de carbure, les revêtements de nitrure sur les aciers nitrurés peuvent être réalisés à des températures de revêtement similaires à celles de la nitruration. Températures de revêtement similaires à celles de la nitruration, en conservant la dureté originale du substrat obtenue par la trempe et la nitruration ultérieure [7].

Ce fait confère une valeur industrielle au procédé TRD en éliminant le problème de distorsion inhérent au revêtement à haute température sur des substrats en acier. La combinaison chimique combinaison chimique entre les éléments formateurs de nitrures dans dans le réactif de traitement et l'azote dans l'acier font des nitrures sur les substrats et provoque la croissance de couches plus épaisse jusqu'à ce que la quantité d'azote à la surface des substrats surface des substrats s'épuise par la formation de couches de nitrure et se déplace vers l'intérieur des substrats par diffusion thermique. Les revêtements 4-10 mm d'épaisseur ont été mis en pratique [17].

I.5 Types de revêtements (carbure et de nitrure) qui peuvent être formés

CFE et NFE signifient que les éléments forment des carbures/nitrures qui ont un changement d'énergie de Gibbs de formation plus négatif que les carbures/nitrures du substrat. D'un point de vue thermodynamique, cela permet la formation de revêtements de carbures/nitrures plus stables que les carbures/nitrures du substrat. Parmi les EFC/NFE pour les substrats à base de fer, on trouve le titane (Ti), le zirconium (Zr), le hafnium (Hf), le vanadium (V), le niobium (Nb), le tantale (Ta), le chrome (Cr), le tungstène (W), le molybdène (Mo) et le manganèse (Mn).

Les tableaux I.1 et I.2 énumèrent les revêtements qui ont été formés sur le fer et les aciers lors de recherches en laboratoire par la méthode du bain de sel et la méthode de la poudre [1].

Tableau I.2 Revêtements de carbure qui peuvent être formés sur le fer et l'acier par revêtement TRD :

Carbure/nitrure éléments de formation	Bain de borax	Bain de chlorure	Lit fluidisé et conditionnement des poudres
Ti	TiC	TiC	TiC
Zr	Fe-B	–	ZrC
Hf	Fe-B	–	N/A
V	VC	V ₂ C, VC	V ₂ C, VC
Nb	NbC	NbC	NbC
Ta	TaC	TaC	N/A
Cr	Cr ₂₃ C ₆ , Cr ₇ C ₃	Cr ₂₃ C ₆ , Cr ₇ C ₃	Cr ₂₃ C ₆ , Cr ₇ C ₃
Mo	–	MoC	(Fe, Mo) ₆ C, (Fe, Mo) ₃ C
W	(Fe, W) ₆ C	W ₂ C, WC	(Fe, W) ₆ C, (Fe, W) ₃ C
Mn	M ₇ C ₃	–	Mn ₅ C ₂

- : Aucune couche formée

N/A : Non disponible

Tableau I.3 Revêtements de nitrure qui peuvent être formés sur le fer et l'acier par
Revêtement TRD :

éléments de formation de Carbure/nitrure	Bain de borax	Bain de chlorure	Lit fluidisé et Poudres
Ti	Fe-B	TiN	TiN
Zr	Fe-B	Zr-N	ZrN
Hf	Fe-B	N/A	N/A
V	VN	VN, V ₂ N	VN
Nb	NbN, Nb ₄ N ₃	Nb ₂ N	NbN
Ta	Fe-B	TaN	N/A
Cr	Fe-B	CrN, Cr ₂ N	CrN, Cr ₂ N
Mo	-	Mo ₂ N	MoN, Mo ₂ N
W	Fe-B	W ₂ N	WN, W ₂ N
Mn	Fe-B	Mn ₄ N	N/A

- : Aucune couche formée

N/A : Non disponible

Il convient de souligner que le procédé TRD produit des revêtements sur la surface des pièces par l'utilisation exclusive du carbone/azote déjà présent dans le substrat ; l'élément principal du substrat ne participe pas à la formation du revêtement. La raison en est que la diffusion vers l'extérieur du carbone/azote par un mécanisme de diffusion interstitielle est beaucoup plus rapide que la diffusion vers l'intérieur du CFE/NFE par un mécanisme de substitution. Il n'y a généralement pas de diffusion dans les substrats d'éléments provenant des réactifs de revêtement, contrairement aux méthodes conventionnelles de cémentation par diffusion [1].

1.6 Procédés de revêtement

Les CFE/NFE actifs peuvent être produits soit dans des sels fondus, soit en générant des gaz contenant des CFE/NFE qui sont produits par la réaction entre des halogénures solides et des particules solides contenant des CFE/NFE dans des chambres de réaction telles que des boîtes d'emballage de poudre et des lits fluidisés [17].

Les méthodes suivantes d'application du revêtement TRD sont recommandées après examen de la facilité de réalisation de revêtements de haute qualité, des possibilités de commercialisation des réactifs, des coûts de production, de l'efficacité de l'application et de la qualité des produits selon Les propriétés des revêtements et la demande de produits revêtus sur les marchés.

Les méthodes suivantes ont été employées avec succès dans le passé et actuellement et seront mises en production dans un proche avenir. [17] :

- Immersion dans un bain de borax à haute température, en utilisant des CFE dans du borax : carbure de vanadium, carbure de niobium, carbure de chrome et leurs alliages comme (V, Nb)C, (V, Nb, Cr)C et ainsi de suite, ainsi que des revêtements multicouches de ces carbures.
- Immersion en lit fluidisé à haute température, utilisant des poudres de métaux contenant des CFE/NFE, poudres d'oxyde d'aluminium comme matériau du lit fluidisé fluidisation, et des particules de composés halogénés ou d'halogénures gazeux comme activateurs : Vanadium carbure de vanadium.
- Méthodes d'emballage de poudre à haute température, utilisant des poudres de métaux contenant du CFE/NFE, des poudres d'oxyde d'aluminium comme composés neutres, et des poudres de composés halogénés comme activateur : Carbure de vanadium et carbure de chrome.
- Immersion dans un bain de sel à basse température sur des aciers pré-nitrurés, en utilisant des poudres de métaux contenant des ENF dans un sel de chlorure : Nitrure de chrome sur les couches pré-nitrurées.
- Immersion en lit fluidisé à basse température sur des aciers pré-nitrurés, en utilisant des poudres de métaux contenant des ENF, des composés halogénés gazeux comme activateurs, et de la poudre d'oxyde d'aluminium comme matériaux de fluidisation : Nitrure de chrome sur les couches pré-nitrurées.

Le revêtement de carbure à haute température par bain de borax a maintenant trouvé une acceptation substantielle dans divers domaines dans le monde entier. Le revêtement de carbure à haute température par bain fluidisé a également été accepté comme alternative au procédé par bain de sel, qui pose des problèmes de nettoyage des résidus de sel et d'élimination des masses de sel qui peuvent devenir difficiles à enlever des petits trous longs dans les pièces. Le revêtement nitrure basse température en bain de sel de

chlorure pénètre progressivement dans applications dans les industries du moulage, du forgeage à chaud et de l'emboutissage des métaux. Le revêtement de nitrure à basse température en lit fluidisé commence maintenant à être utilisé dans un plus grand nombre d'applications dans les mêmes domaines, comme les filières d'extrusion [17]. Différents types d'aciers sont utilisés comme substrats de pièces à usiner. Cependant, les carbures cémentés, Stellite, et les fontes sont également utilisés pour des applications spéciales [17].

Sélection des procédés de revêtement. Les tableaux 1 et 2 montrent les avantages et les inconvénients ainsi que les caractéristiques des différents procédés. Les avantages les plus importants des procédés à bain de sel sont la facilité d'obtenir une trempe simultanée des substrats en acier par différentes méthodes de trempe. Le procédé offre une grande flexibilité non seulement pour le choix de la méthode de trempe, mais aussi pour les matériaux des substrats, les tailles et les formes des pièces, et les temps de traitement. Il est donc très polyvalent pour les petits outils de production, tels que les matrices, les moules, etc, outils de production de petite taille, tels que les matrices, les moules, et divers gabarits et pièces d'usure à utiliser dans la production de masse. [17]. Dans les procédés à bain de sel, un temps appréciable est nécessaire pour éliminer les réactifs salins solidifiés dans les trous longs et minces des pièces. Les procédés à lit fluidisé présentent certains avantages par rapport aux procédés à bain de sel, par exemple, le contrôle facile de dimensions très précises, telles que moins de 10 mm (0,4 mil), grâce à une excellente uniformité thermique. Cependant, ces procédés nécessitent un équipement de revêtement beaucoup plus coûteux [17].

Le plus grand avantage des procédés à basse température est de minimiser les problèmes de distorsion. Cependant, les revêtements de nitrure réalisés par les procédés TRD à basse température sont inférieurs aux revêtements de carbure en termes de qualité de revêtement. carbure en termes de dureté du revêtement et, par conséquent et donc de résistance à l'usure abrasive [17].

Les tableaux I.3 et I.4 regroupent les avantages et les inconvénients des différents procédés de revêtement TRD, ainsi que les caractéristiques technologiques de réalisation du procédé.

Tableau I.4 Avantages et inconvénients des différents procédés de revêtement :

Procédé de revêtement	Avantage	Inconvénient
*Bain de sel à haute température Processus	*Équipement moins coûteux *Qualité stable du revêtement *Durcissement par trempe par différentes méthodes *Large applicabilité en ce qui concerne le substrat matériaux, la forme et la taille	*Entretien du bain nécessaire *Les réactifs salés doivent être éliminés par lavage *Problème de distorsion *Non-uniformité de la température *Environnement de travail élevé
*Procédé à lit fluidisé à haute température	*Pas besoin de laver les réactifs *Qualité stable du revêtement *Meilleur pouvoir de projection *Température d'enrobage uniforme *Contrôle dimensionnel étroit	*Equipement le plus coûteux *Une bonne conception de l'équipement est nécessaire pour le substrat. durcissement de l'acier
*Procédé de poudre à haute température	*Faible déformation de la forme * Un équipement moins coûteux	*Revêtement instable * Possibilité de collage de poudre de réactif *Grande déformation *Grande non-uniformité de la température *Post-durcissement nécessaire pour obtenir une grande dureté élevée
* Processus en Bain de sel à basse température	*Équipement le moins coûteux *Pas de distorsion	*Prénituration requise *Entretien du bain nécessaire *Les sels réactifs doivent être éliminés par lavage (plus facile que les sels à haute température)
*Procédé à lit fluidisé à basse température	*Pas besoin de laver les réactifs *Température de revêtement uniforme *Pas de distorsion	*Prénituration nécessaire *Qualité du revêtement instable *Equipement coûteux
*Procédé de conditionnement en poudre à basse Température	*Équipement moins coûteux *Pas de distorsion	*Prénituration nécessaire *Grande déviation de température

Tableau I.5 caractéristiques des différents procédés de revêtement :

Procédé de revêtement	Durcissement du support	Méthode de refroidissement/trempe	Post-traitement nécessaire	Problème de qualité
Bain de sel à haute température à haute température	Pendant le refroidissement après l'opération de revêtement	Huile, sel, air ou gaz non oxydant refroidissement	Laver à l'eau chaude et/ou polir le sel réactif couvert	*Une dureté élevée du substrat peut être assurée. * Contre-mesures requises pour les formes de pièces susceptibles d'entraîner des déformations (géométries fines, longues, compliquées). *Contre-mesures nécessaires pour les tolérances inférieures à ± 20 mm. * Durée nécessaire à l'enlèvement d'un trou borgne profond rempli de sel.
Haute température en lit fluidisé	Pendant le refroidissement après l'opération de revêtement	Refroidissement du gaz dans une chambre de refroidissement	Retirez la poudre de réactif attachée en brossant	*Le durcissement du substrat ne peut pas être fait plus facilement que le processus de bain de sel. *Le contrôle dimensionnel est plus facile que le processus de bain de sel. *Le retrait de la poudre de réactif des trous profonds peut être plus facile.
Haute température de poudre processus	Pas de durcissement ou préliminaire durcissement	Généralement impossible	Retirer la poudre de réactif attachée en culbutant le baril	*Le traitement d'un grand nombre de petites pièces est plus facile. *Formation instable des revêtements *Main-d'œuvre nécessaire pour ramasser les pièces dans les poudres de revêtement. *Possibilité d'endommager les pièces par l'impact des poudres réactives.
Bain de sel à basse température à basse température	Trempe préliminaire et ensuite la nitruration	Pas nécessaire	Laver à l'eau chaude et/ou polir les sels réactifs couverts	*Prénitruration de haute qualité requise
Basse température à lit fluidisé	Trempe préliminaire et ensuite la nitruration	Pas nécessaire	Retirer la poudre de réactif attachée en culbutant le baril	*Prénitruration de haute qualité requise Dommages possibles par l'impact des poudres réactives
Basse température conditionnement en poudre processus	Trempe préliminaire et ensuite la nitruration	Pas nécessaire	Retirer la poudre de réactif attachée en culbutant le baril	*Le traitement d'un grand nombre de petites pièces est plus facile. *Prénitruration de haute qualité requise *Formation instable des revêtements *Main d'œuvre nécessaire pour ramasser les pièces dans les poudres de revêtement.

I.7 Procédures pratiques de revêtement

I.7.1 Revêtement du carbure

I.7.1.1 Type de réactifs de revêtement

Les éléments de revêtement en carbure peuvent être fournis aux surfaces du substrat sous la forme de différents réactifs : (a) sel fondu, (b) gaz, et (c) particules solides. Pour (b), les gaz halogénés des éléments formateurs de carbure et pour (c), les gaz halogénés générés à des températures élevées par des réactions entre les éléments formateurs de carbure dans les poudres et les halogénures dans les composés activateurs. Dans (c), on peut appliquer à la fois la méthode de conditionnement des poudres et la méthode du four fluidisé (Nakanishi, 1992 ; 4] ; cette dernière est utilisée pour la production en série de poinçons de perçage. Dans (a), le sel fondu tel que les chlorures ou le borax ajoutés à la poudre des éléments formant le carbure peuvent produire les revêtements. Dans tous les cas, les réactifs sans composés carbonés sont utilisables. Les fours utilisés pour les traitements thermiques ordinaires des métaux, à savoir les fours à bain de sel, les fours à atmosphère gazeuse, les fours à lit fluidisé et les fours de chauffage des boîtes d'emballage de poudre, peuvent être utilisés [4].

I.7.1.2 Type de substrats

Le fer et les aciers comprenant plus de 0,2 % de carbone et pouvant être durcis par trempe et carbures cémentés sont principalement utilisés. Le revêtement de carbure peut également être formé sur du carbure de silicium et du graphite [4].

I.7.1.3 Durcissement du substrat

Les températures de revêtement du carbure sont généralement choisies pour être supérieures aux températures d'austénitisation des aciers (1 083-1 373 K) afin de durcir les substrats par trempe. Une dureté plus élevée du substrat est recommandée pour éviter d'endommager les revêtements pendant l'entretien, qui peuvent être induits par une déformation plastique des substrats sous une charge mécanique élevée. Charge mécanique élevée. Le durcissement par trempe des substrats en acier est appliqué pendant le refroidissement à partir des températures de revêtement. Elle peut également être effectuée lors de l'opération de post-durcissement. Des opérations de revêtement répétées opérations de revêtement répétées peuvent également être employées. La cémentation préliminaire pour les substrats en acier est parfois appliquée pour augmenter taux de croissance des revêtements et l'augmentation de la teneur en carbone dans de carbone dans les substrats sous les revêtements, ce qui permet d'augmenter la

dureté des substrats et leur capacité de charge. dureté des substrats et une plus grande capacité de charge. La trempe à l'huile, la trempe en bain de sel et le refroidissement à l'air sont recommandés pour la trempe. La trempe à l'huile, la trempe en bain de sel et le refroidissement à l'air sont recommandés pour la trempe [4].

1.7.1.4 Traitement pour le procédé d'immersion dans un bain de sel

L'immersion dans des bains de sels fondus à base de borax est le procédé le plus largement utilisé parmi les différentes méthodes de revêtement TRD. Les températures sont généralement choisies pour être compatibles avec les températures d'austénitisation de chaque type de substrat en acier. Les durées d'immersion vont de 0,5 à 10 h pour obtenir une épaisseur de couche optimale de 5 à 15 mm pour la plupart des applications. Les fours à bain de sel à chauffage externe sans protection par des gaz inertes sont généralement utilisés. Après la trempe et le durcissement, on procède à un revenu. Le lavage du sel attaché est nécessaire. La finition de la surface par polissage est nécessaire avant et après le traitement TRD pour obtenir les meilleurs résultats dans les applications de protection contre l'usure [4].

1.7.2 Revêtement de nitrure

1.7.2.1 Type de réactifs de revêtement

(a) Sel fondu, (b) gaz, et (c) particules solides sont disponibles [4].

1.7.2.2 Type de substrats

Les céramiques de nitrure telles que le nitrure de silicium peuvent être utilisées comme substrats pour le revêtement de nitrure à haute température. Le fer et les aciers sont utilisés pour le revêtement de nitrure à basse température [4].

1.7.2.3 Durcissement des substrats

Une trempe préliminaire des substrats en acier est recommandée pour assurer une grande capacité de charge [4].

1.7.2.4 Traitement pour le procédé d'immersion dans un bain de sel

Le procédé comprend l'immersion dans des bains de sel à base de chlorure à base de chlorure maintenus à 773-873 K. Des fours à bain de sel à chauffage externe sans protection par des gaz inertes sont généralement utilisés. Après leur sortie des bains, les pièces sont généralement refroidies à l'air, suivies d'un lavage pour éliminer le sel fixé. La surface La finition de la surface par polissage est nécessaire avant et après l'opération de revêtement pour obtenir les meilleurs résultats en matière de protection contre l'usure [4].

Pour obtenir les meilleurs résultats dans les applications de protection contre l'usure. Les durées d'immersion varient de 0,5 à 8 heures afin d'obtenir une épaisseur de couche de nitrure optimale. Pour obtenir une épaisseur de couche de nitrure optimale de 5-10 mm pour la plupart des applications. Le choix de la profondeur de nitruration et des de revêtement (temps, température et type de substrat) déterminent l'épaisseur des couches de nitrure et la couche nitrurée (couche de composé et couche de diffusion) après le revêtement la couche nitrurée (couche composée et couche de diffusion) après le revêtement et les propriétés mécaniques des aciers revêtus [4].

I.8 Applications

Le procédé TRD est utilisé dans des applications pratiques depuis le début des années 1970 au Japon, juste après le développement du procédé de bain de borax fondu, qui a permis d'utiliser des équipements simples et moins coûteux pour obtenir les excellentes propriétés des pièces revêtues. Ils ont maintenant trouvé une acceptation substantielle dans divers domaines industriels dans le monde entier. Les principales applications peuvent être énumérées comme suit :

- Outillage de production, tel que les matrices et les moules, et divers types de pièces d'usure utilisées dans le traitement des matériaux par exemple, le forgeage de métaux, l'emboutissage de tôles, compactage des poudres, le moulage (moulage des plastiques, moulage du caoutchouc, moulage du verre) [9-16].
- Outils et lames de couteau pour couper et cisailer [4].
- Divers types de composants de machines de traitement des matériaux - emboutissage de tôle, forgeage, moulage, compactage de poudre, moulage de plastique, moulage de caoutchouc, moulage de verre, découpe et cisaillement, soudage, assemblage, peinture, filage et tissage, impression, transformation des aliments [1, 4, 17].
- Composants de diverses machines et équipements automobiles, machines pneumatiques, convoyeurs à bande [1, 4, 17].

Les aciers à outils sont utilisés pour l'outillage et les pièces d'usure des équipements de production. Les carbures cémentés sont utilisés pour le forgeage à froid. Pour les pièces d'équipement de consommation, les aciers de construction, y compris les aciers à roulement, sont généralement utilisés. La demande de fonte est faible.

Parmi les différentes méthodes de traitement de surface dans la catégorie des traitements thermiques, seuls les revêtements TRD forment des couches compactes de carbure et de nitrure. En outre, la plus grande force d'adhérence due à la liaison métallurgique et l'épaisseur plus élevée du revêtement ont renforcé la polyvalence des revêtements TRD. Ils peuvent être utilisés dans des situations où l'usure abrasive et le grippage sévère par des charges mécaniques élevées pourraient autrement causer des dommages, par exemple, dans les tôles d'acier par des charges mécaniques élevées pourraient autrement causer des dommages, par exemple, dans l'emboutissage de tôles d'aciers à haute résistance à la traction [1, 4, 17].

Il convient toutefois de garder à l'esprit que les opérations de revêtement TRD pour les pièces présentant des tolérances dimensionnelles serrées nécessitent des connaissances spécialisées en matière de traitement thermique et des compétences importantes en ingénierie, si l'on veut les mettre en œuvre avec succès [1, 4, 17].

CHAPITRE II

Procédures et Techniques Expérimentales

II.1 Matériau utilisé comme substrat

Le matériau utilisé comme substrat dans cette étude est un acier à roulement 100Cr6 avec la composition chimique indiquée dans le tableau II.1. L'acier 100Cr6 est principalement utilisé pour la production de bagues de roulement et d'éléments de roulement.

Tableau II.1 : composition chimique de l'acier 100Cr6

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	Al	Co	Fe
1.05	0.35	0.45	0.0029	0.0033	1.55	0.182	0.170	0.072	0.030	0.01	Balance

II.2 Préparation des poudres avant le traitement TRD

Les trois poudres utilisées pour la réalisation des traitements TRD envisagés dans ce travail sont constituées, comme n'importe quelle poudre destinée à la cémentation en milieu solide, d'une source contenant l'élément formateur de carbure, un activateur et un diluant pour empêcher le frittage de la poudre. Les trois poudres utilisées dans ce travail avec leurs pourcentages sont données dans le **Tableau II.2**

Tableau II.2 Poudres utilisées dans ce travail avec leurs pourcentages

N° de la poudre	Source de l'élément formateur de carbure (40%)	Activateur (15%)	Diluant (45%)
01	Le chrome « Cr »	NH ₄ Cl	Al ₂ O ₃
02	Le Ferro-Chrome «.Fe- Cr »	NH ₄ Cl	Al ₂ O ₃
03	Le Ferro-Titane «.Fe- Ti»	NH ₄ Cl	Al ₂ O ₃



Figure II.1 : Poudres de base utilisées pour la préparation des mélanges pour le traitement TRD

II.3 Préparation des échantillons avant le traitement TRD

II.3.1 Processus de tronçonnage

Dans cette étape, des morceaux de 1,5 cm d'hauteur sont découpés d'un cylindre de 2 cm de diamètre de l'acier 100Cr6. L'opération de découpage a été effectuée de façon très lente pour ne pas affecter la microstructure initiale de l'acier qui va être utilisé comme substrat dans les traitements envisagés. Cette opération de découpage a été réalisée au niveau de l'atelier de génie mécanique de l'université de Laghouat.

La figure II.2 montre le cylindre de l'acier 100Cr6 et les trois échantillons découpés.



Figure II.2 : figure représente le découpage d'échantillon de métal 100Cr6

II.3.2 Polissage

Dans cette étape de préparation des échantillons, nous utilisons une polisseuse (la figure II.3) pour d'éliminer les contaminations et les rayures profondes de la surface afin de faciliter la diffusion des atomes des éléments formateurs de carbure. Après chaque degré de polissage avec plusieurs écailles, on a commencé par 180, puis 400, puis 800, puis 1200, jusqu'à 2000, en tenant compte de l'arrosage permanent en l'eau pour s'assurer que les échantillons ne sont pas affectés par la chaleur causée par le frottement. Cette étape est réalisée dans le Laboratoire du Département de Génie mécanique de l'Université de Laghouat. Cette étape nous amène à l'étape suivante qui nous permet d'ajouter les poudres préalablement préparées.



Figure II.3 : Machine de polissage et échantillons après polissage

II.4 Préparation des creusets

Dans ce stade, nous avons introduit chaque échantillon dans un creuset en acier contenant une poudre des trois poudres citées dans le Tableau II.2.

Premièrement, nous avons marqué les échantillons en rayant chaque échantillon, et ceci afin de les distinguer les uns des autres à la sortie du four car les moules et les échantillons sont similaires comme le montre la figure suivante :

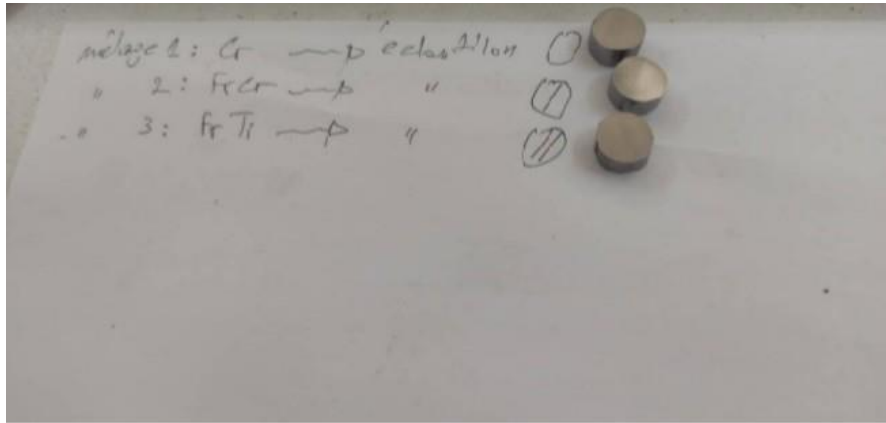


Figure II.4 : Les différentes marques des échantillons afin de les distinguer

Deuxièmement, nous avons placé les trois échantillons :

Chaque échantillon est à l'intérieur d'un moule spécial et nous l'immergeons de tous côtés avec la poudre préparée à l'avance comme indiqué sur la figure suivante :



Figure II.5 : Préparation des creusets avant l'introduction dans le four

Troisièmement, après le nettoyage des échantillons, comme indiqué précédemment, nous avons couvé les moules avec une couverture spéciale, puis vous scellez les abrasions avec de l'argile pour éviter la perméabilité à l'air à l'intérieur, ce qui provoque l'oxydation des échantillons.

II.4.1 Introduction dans le four

Après toutes ces préparations les creusets sont introduites dans le four à 950 °C pour une durée de 4 heures.



Figure II.6 : Mettre l'échantillon dans le four

II.4.2 Traitements thermiques TRD :

Dans cette étape avancée de l'étude, nous allons traiter les échantillons placés dans les moules par la chaleur. Tout d'abord, nous avons réglé le four à une température de 950°C, puis nous mettons les trois moules à l'intérieur pendant quatre heures, suivi d'un prélèvement de ces échantillons et d'un refroidissement progressif pour éviter l'apparition de choc thermique du four.

Le four utilisé est celui du Laboratoire du service mécanique de l'Université de Laghouat et qui peut atteindre une température de 1100 °C avec une précision de ± 5 °C.

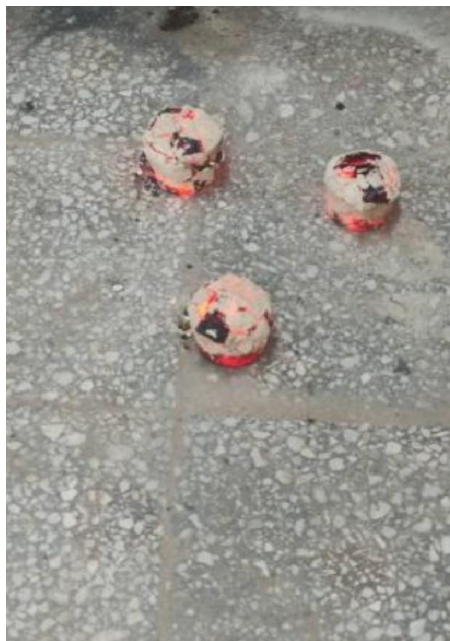


Figure 2.7 : les traiter échantillons âpre le traitement thermique

II.5 Préparation des échantillons après les traitements TRD :

II.5.1 Découpage

Après le nettoyage des surfaces des trois échantillons des poudres restant à leur surface, nous avons découpé les échantillons traités transversalement pour pouvoir observer la couche formée en surface.

L'opération de découpe a été effectuée avec la balle de cisaillement au milieu de leur surface avec l'échantillon refroidi à l'eau à en même temps pour éviter d'endommager la structure interne des sites de coupe, puis les échantillons sont séchés pour réduire l'oxydation.



Figure II.8 : tronçonneuse à disque électrique

II.5.2 Enrobage

Pour éviter la détérioration des couches formées en surface des substrats traités pendant les opération de polissage avant l'observation en microscopie optique et électronique à balayage, nous devons enrober les échantillons par une résine relativement dure. La résine utilisée dans notre cas est la résine Sk200.

Présentation de la résine Sk200 :

Il s'agit d'un ensemble complet pour reconstruire les pièces manquantes en fibre de verre et en plastique, composé de résine polyester, avec renfort en mastic, tissu en fibre de verre et verre à mélanger. Ensuite nous finirons les moules que nous aurons préparés (goudrons plastiques) puis nous mettrons les échantillons à l'intérieur de ceux-ci sur leur surface découpée : suivi de l'âge des moules avec la résine préparée, sans oublier la numérotation de chaque échantillon pour les distinguer les uns des autres autret les laisser sécher pendant minutes comme indiqué sur la figure correspondante



Figure II.9 : Résine Sk200 utilisée pour l'enrobage des échantillons

II.5.3 Polissage des échantillons pour l'observation

Dans ce stade, vous répétez les mêmes étapes que précédemment pour le polissage initial avec l'ajout de nouvelles étapes. Après polissage avec un papier de verre d'une échelle de 1200, on augmente son polissage sur une échelle de 2000 : 3000. Enfin, on ajoute à cette étape de l'alumine sur un chiffon et on la sèche au sèche-cheveux. La surface est à l'état miroir. Cette étape nous amène à l'étape suivante, qui est l'examen MEB MO.

II.5.3 Attaque chimique :

Avant de faire un examen microscopique avec MEB, MO nous devons faire une attaque chimique sur nos échantillons afin de bien voir le drapeau de surface

1. Nous préparons d'abord la solution d'attaque chimique dans le laboratoire du département où cette solution s'appelle Nital avec sa composition 4% (4 ml d'acide nitrique et 96 ml d'éthanol).
2. Deuxièmement, nous ajoutons cette solution aux surfaces de nos échantillons afin qu'elle reste en surface pendant un maximum de 45 secondes pour éviter d'endommager la surface. Là où cette attaque chimique travaille à corroder la surface, et c'est ce qui fait de nous des terrains différents à la surface, ce qui nous permet de voir la surface plus clairement au microscope optique et électronique.

II.6 Observation

II.6.1 Microscopie optique :

Dans notre étude, nous avons utilisé un microscope optique (LIECA DMLM) équipé d'une caméra à haute résolution oculaire 10x et 20x, 50x, 100x. La figure 2.10 présente une photo du microscope optique utilisé.



Figure II.10 : microscope optique LIECA DMLM

Ce microscope est conçu pour effectuer trois tâches :

- Créer une image agrandie de l'échantillon.
- Distinguer certains détails de l'image.
- Rendre l'image finale visible à l'œil humain ou à la caméra.

L'un des principaux inconvénients de la microscopie optique est la limite de résolution relativement importante, une autre limitation de la microscopie optique est le faible contraste produit lorsque la lumière passe à travers un échantillon très mince ou réfléchi par des surfaces avec un haut degré de réflectivité.

Pour améliorer le contraste de la microscopie optique, différentes techniques optiques ont été développées comme : la lumière polarisée, l'imagerie à contraste de phase, le contraste d'interférence différentielle, l'éclairage à fluorescence, l'éclairage à fond noir, l'éclairage Rheinberg, le contraste de modulation Hoffman et l'utilisation de divers filtres optiques en gélatine.

II.6.2 Microscope Electronique à balayage :

Les images de microscopie électronique à balayage ont été prises en utilisant un microscope électronique à balayage TESCAN VEGA3, ce type d'instrument est destiné à agrandir la surface de l'échantillon mieux que la microscopie optique, de même, l'observation en microscopie électronique présente plusieurs avantages :

- Meilleure résolution par rapport à la microscopie optique.
- Profondeur de champ supérieure.
- La possibilité de la réalisation des microanalyses chimiques de spectrométrie à dispersion d'énergie (EDS).

Un microscope électronique à balayage se compose de :

- Une colonne optique électronique montée sur la chambre échantillon.
- Un circuit de pompage pour l'obtention d'un vide secondaire.
- Des détecteurs permettant de capter les différents signaux émis par l'échantillon.
- Un écran vidéo pour l'observation des images.
- Une électronique pour gérer l'ensemble des fonctions.



Figure II.11 : Microscope Electronique à Balayage

Cet instrument est contrôlé par ordinateur et les images numérisées sont surveillées par un ordinateur connecté à l'instrument.

Le principe de fonctionnement de le microscope électronique à balayage consiste à utiliser un faisceau focalisé d'électrons de haute énergie, plus précisément, des électrons accélérés transportant une quantité importante d'énergie cinétique qui est dissipée dans une variété de signaux. Ces signaux sont produits par les interactions électron-échantillon provenant des électrons incidents décélérés dans l'échantillon solide, on peut distinguer plusieurs signaux comme :

- Les électrons secondaires.
- Les électrons rétrodiffusés.
- Les électrons rétrodiffusés diffractés.
- Les rayons X.

Grâce à ces signaux, différentes informations peuvent être révélées tels que la morphologie et la composition chimique. Les électrons rétro structurés et secondaires sont principalement utilisés pour l'imagerie d'échantillons. Plus précisément, les électrons secondaires qui sont très important pour montrer la morphologie et la topographie des échantillons.

De plus, nous avons effectué une analyse par rayons X à dispersion d'énergie (EDX) avec un détecteur de rayons X pour déterminer la composition de la surface des échantillons, dans cette technique les rayons X sont utilisé pour identifier la composition élémentaire des matériaux.

Les techniques EDX sont généralement associées à la microscopie électronique, et plus précisément ici, au microscope électronique à balayage. Les données générées par cette technique sont présentées sous forme de spectres montrant des pics correspondant aux éléments constituant la vraie composition de l'échantillon.

II.7 Microdureté

Le test de microdureté est un test mécanique des propriétés des matériaux qui est utilisé dans la conception technique, l'analyse des structures et le développement des matériaux. Le but principal de l'essai de dureté est de déterminer l'aptitude d'un matériau à une application donnée, ou le traitement particulier auquel le matériau a été soumis.

A cause de son facilité, ce test présente la méthode d'inspection la plus courante pour les métaux et alliages. Le terme test de microdureté fait généralement référence à des empreintes statiques réalisées avec des charges ne dépassant pas 1 kgf.

Dans ce teste, le pénétrateur peut être de type pyramide de diamants Vickers, ou pyramide de diamants allongé Knoop, nous avons choisi le pénétrateur Vickers pour les raisons suivantes :

- Le pénétrateur Vickers pénètre environ deux fois plus profondément que le pénétrateur Konotop.
- Diagonale d'indentation Vickers d'environ 1/3 de la longueur de la diagonale Knoop major.

- Le test Vickers est moins sensible aux conditions de surface que le test Knoop.
- Le test Vickers est plus sensible aux erreurs de mesure que le test Knoop.
- Le teste Vickers est mieux pour les petites zones arrondies.

Pour réaliser ce teste, nous avons utilisé plusieurs charge pour calculer la dureté par un microduromètre Mitutoyo MVK-H2, mais nous pas obtenu le résultat.

La microdureté est calculée comme une moyenne des valeurs obtenues en trois empreintes. De même, la variation de dureté a été déterminée pour chaque échantillon en fonction de la distance à la surface. Semblable aux processus de préparation utilisés dans la caractérisation microscopique l'échantillon en coupe trans- versale a été monté, rectifié et poli.

La microdureté de l'échantillon en coupe transversale a ensuite été mesurée à travers l'épaisseur de la couche de diffusion, en conséquence, un graphique de la microdureté en fonction de la profondeur de la surface a été tracé.

La figure II.11 Présente une photo de la microduromètre utilisé pour mesurer les valeurs de microdureté.



Figure II.12 : le microduromètre Mitutoyo MVK-H2

La figure II.12 montre une représentation schématique d'un pénétrateur en pyramide de diamant de type Vickers.

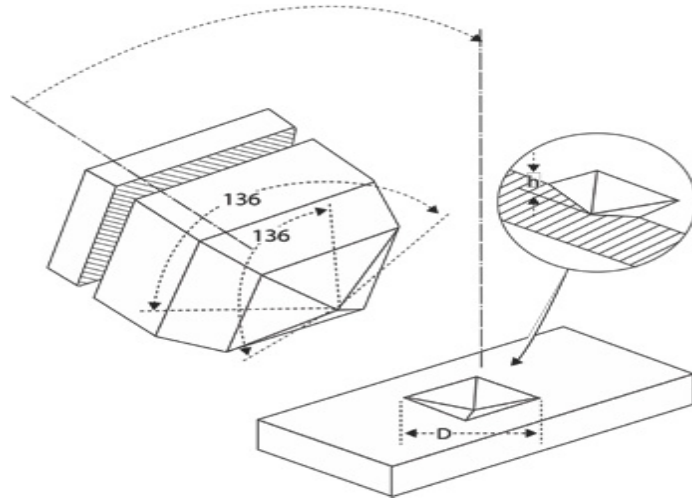


Figure II.13 : pénétrateur Vickers en pyramide de diamant

Où :

F = Charge exprimé en kgf.

d = Moyenne arithmétique des deux diagonales.

d1 et d2 exprimé en mm

HV = la valeur de dureté atteinte par essais de Vickers.

$$HV = 1.845 \frac{F}{d^2} \text{ approximativement}$$

$$HV = \frac{2 F \sin \frac{136}{d}}{d^2}$$

CHAPITRE III

Résultats et Discussions

Dans ce chapitre, nous allons présenter et discuter les résultats obtenus par le traitement thermo-réactif diffusion/déposition (TRD) sur un acier au carbone de nuance 100Cr6 / AISI 52100.

Notre étude est principalement basée sur la faisabilité de former des couches de carbures avec les mélanges de poudres qu'on a préparé (chapitre précédent) et la caractériser par la suite.

Nous travaillons sur les couches de carbure de chrome CrC et de carbure de titane TiC qui ont été formées à la surface de l'acier 100Cr6 par diffusion thermo-réactive (TRD).

Le processus de TRD a été réalisé à des températures de 950 °C pendant 4 heure en utilisant trois poudres (Cr, Fe-Cr et Fe-Ti) de taille nanométrique.

Les revêtements ont été caractérisés par microscopie optique et microscopie électronique à balayage (MEB), spectroscopie des rayons X à dispersion d'énergie (EDS), mesures de microdureté.

Les trois milieu de revêtement composé de 40 % de (Chrome / ferro-chrome / ferro Titanium) + 45 % d' Al_2O_3 + 15 % de NH_4Cl .

Al_2O_3 a été utilisé comme charge inerte pour éviter le frittage entre les poudres, et le H_4Cl a été utilisé comme activateur.

III.1. Caractérisation microstructurale

Les figures III.1 et III.2 montrent la couche obtenue par la poudre contenant le chrome pur

« Cr » comme élément de formateur de carbure obtenu par microscopie optique et par microscopie électronique à balayage.

Les figures III.3 et III.4 montrent la couche obtenue par la poudre contenant le ferro-chrome « Fe-Cr » comme élément de formateur de carbure obtenue par microscopie optique et par microscopie électronique à balayage, alors que les figures III.5 et III.6 montrent la couche obtenue par la poudre contenant le ferro-titane « Fe-Ti ».

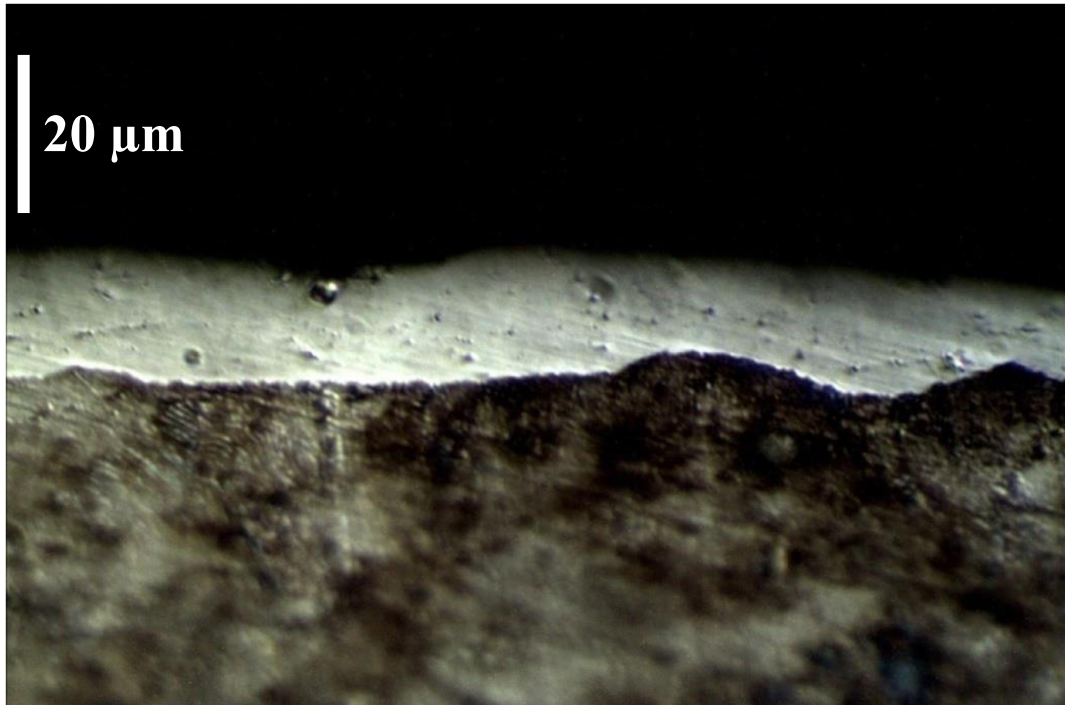


Figure III.1 : Micrographie en MO montrant la couche de carbure obtenue par la poudre contenant du chrome pur « Cr » comme élément de formateur de carbure.

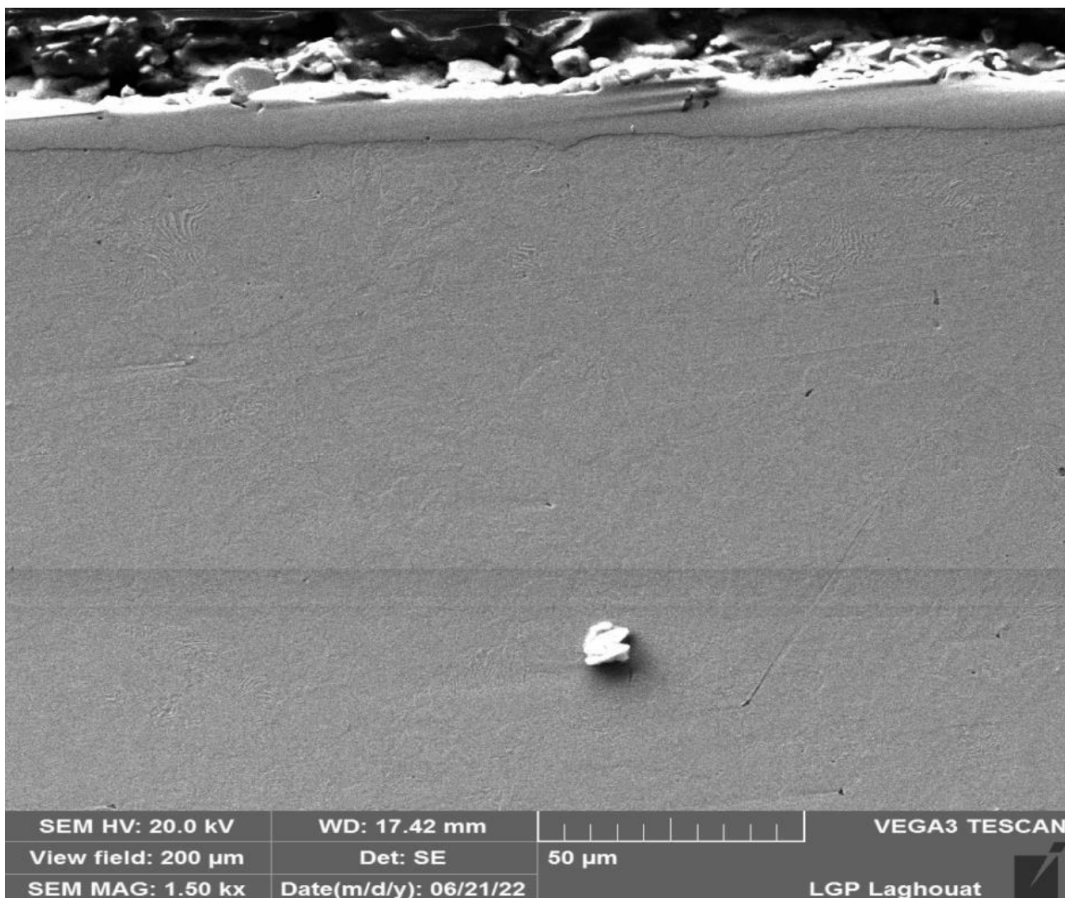


Figure III.2 : Micrographie en MEB montrant la couche de carbure obtenue par la poudre contenant du chrome pur « Cr » comme élément de formateur de carbure.

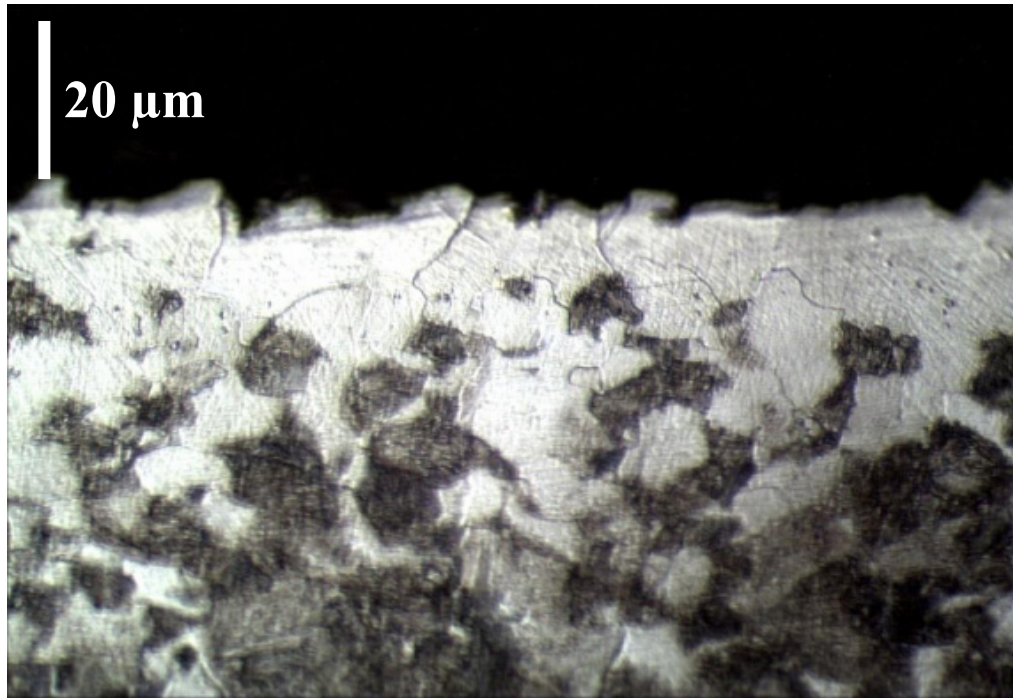


Figure III.3 : Micrographie en MO montrant la couche de carbure obtenue par la poudre contenant du ferro-chrome pur « Fe-Cr » comme élément de formateur de carbure.

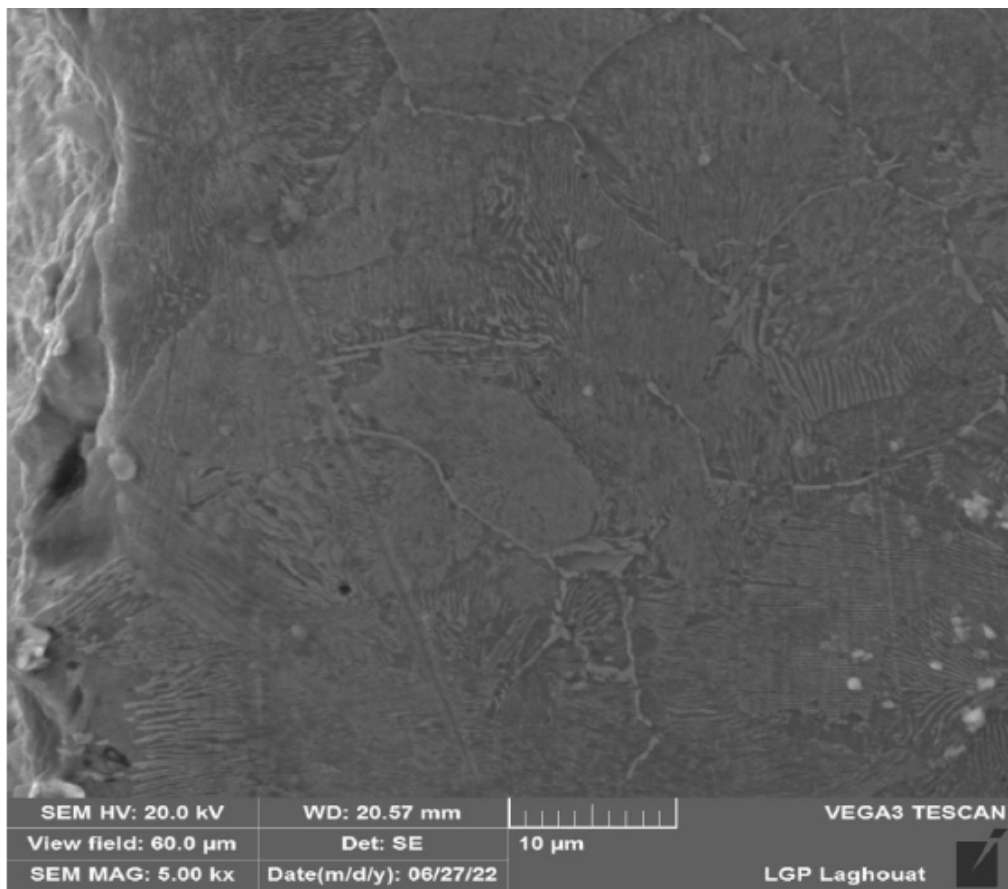


Figure III.4 : Micrographie en MEB montrant la couche de carbure obtenue par la poudre contenant du ferro-chrome pur « Fe-Cr » comme élément de formateur de carbure.

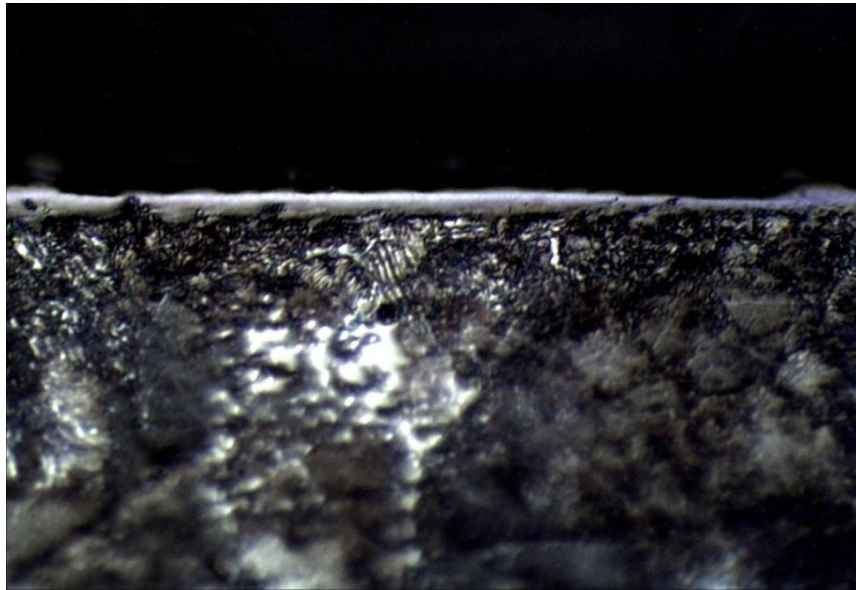


Figure III.5 : Micrographie en MO montrant la couche de carbure obtenue par la poudre contenant du ferro-titane pur « Fe-Ti » comme élément de formateur de carbure.

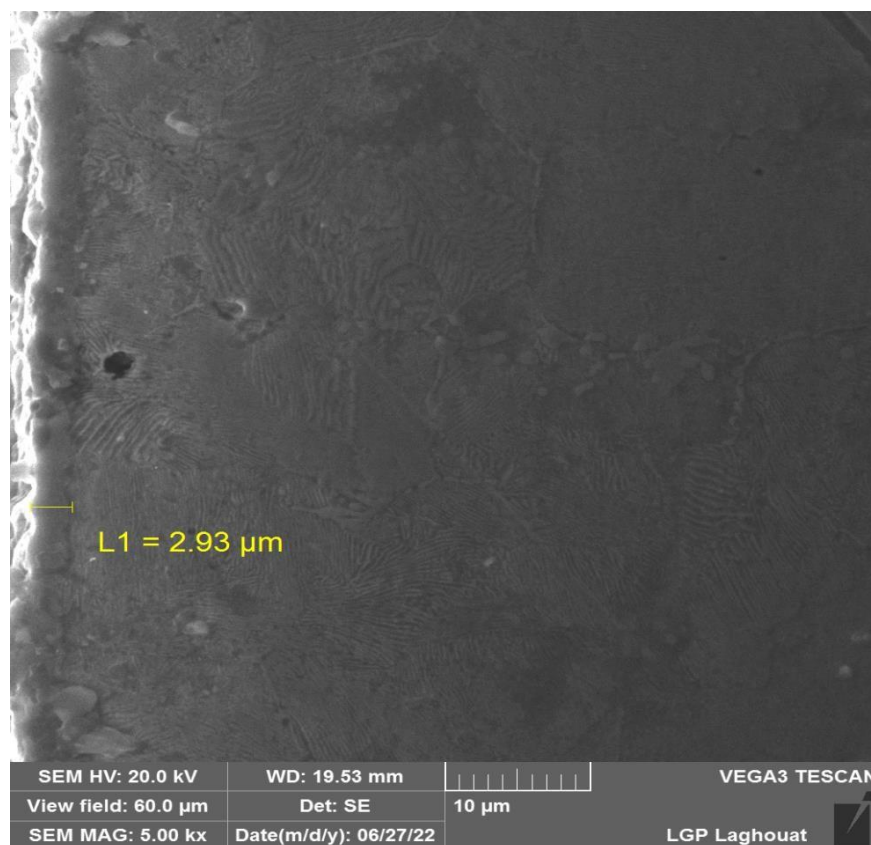


Figure III.6 : Micrographie en MEB montrant la couche de carbure obtenue par la poudre contenant du ferro-titane pur « Fe-Ti » comme élément de formateur de carbure.

Sur les deux figures III.1 et III.2, on peut facilement distinguer la présence d'une couche complètement différente du substrat. L'épaisseur de cette couche est de l'ordre de 13 μm .

Sur les deux figures III.3 et III.4, on constate qu'il y a eu un changement au niveau de la surface, mais on ne peut pas confirmer l'existence d'une couche proprement dite. Pour pouvoir confirmer la présence d'une couche proprement dite ou non, il faut faire des analyse ponctuelles et des diffractions de rayons x dans cette zone. Vu que ces moyens ne sont pas disponibles pour l'instant, nous ne pouvons rien conclues.

Par contre pour les deux figures III.6 et III.6, nous pouvons dire qu'il y a eu formation d'une couche très mince de l'ordre de 3 μm .

Donc, nous pouvons dire que la poudre du chrome pur a conduit à la meilleure couche de carbure.

Vu la faible épaisseur des couches réalisées, nous avons trouvé des difficultés énormes à faire les essais de microdureté.

Conclusion générale

Les résultats obtenus dans ce travail nous permettent d'avancer les conclusions et les remarques suivantes :

- Le procédé TRD est capable de produire des revêtements plus ou moins denses de carbures
- Les revêtements formés sont composés de fines particules compactes de carbures et présentent généralement une plus grande épaisseur et une meilleure adhérence aux substrats
- Les revêtements obtenus conduisent à de grandes duretés de l'ordre de 1500 Hv
- Ce procédé peut donc être utilisé pour répondre à un large éventail de demandes industrielles

Références bibliographiques

- [1]. **(E.J. Mittemeijer, 2015)** Eric J. Mittemeijer and Marcel A.J. Somers, The thermo-reactive deposition and diffusion process for coating steels to improve wear resistance, The thermo-reactive deposition and diffusion process for coating steels to improve wear resistance, The thermo-reactive deposition and diffusion process for coating steels to improve wear resistance, 2015, p 703-735
- [2]. **(J. Dossett and G.E. Totten 2013)** J. Dossett and G.E. Totten, Thermoréactive Deposition/Diffusion Process for Surface Hardening of Steels, Steel Heat Treating Fundamentals and Processes, ASM Handbook, Vol 4A, 2013, p 725–740
- [3]. **(T. Arai, 1993)** T. Arai, Behavior of nucleation and growth of carbide layers on alloyed carbide particles in substrates in salt bath carbide coating. Thin Solid Films 229, 171–179 (1993)
- [4]. **(T. Arai, 2013)** T. Arai and Kawasaki-shi, Thermo-Reactive Deposition and Diffusion Process, Encyclopedia of Tribology, 2013, p3655–3662
- [5]. **(T. Arai and S. Moriyama 1994)** T. Arai, S. Moriyama, Growth behavior of vanadium carbide coatings on steel substrates by a salt bath immersion coating process. Thin Solid Films 249, 54–61 (1994)
- [6]. **(T. Arai 1979)** T. Arai, Carbide coating process by use of molten borax bath in Jap. J. Heat Treat. 1(2), 15–22 (1979)
- [7]. **(T. Arai 1990)** T. Arai, Development of carbide and nitride coating by thermo-reactive deposition and diffusion, in Surface Modification Technologies III, (The Minerals, Metals, & Material Society, Neuchatel Switzerland, 1990), p. 587
- [8]. **(K. Nakanishi, 1992)** K. Nakanishi, H. Takeda, H. Tachikawa, T. Arai, Fluidized bed carbide coating process – development and application, in The 8th International Congress on Heat Treatment of Materials, Kyoto, Japan, 1992, p 507
- [9]. **(Y. Sugimoto, 1995)** Y. Sugimoto, Y. Ohta, and T. Arai, Low Temperature Salt Bath Chromium Carbonitride Coating Method, J. Surf. Finish. Soc. Jpn., Vol 46 (No. 12), 1995, p 1119–1124
- [10]. **(T. Arai, 1988)** T. Arai, H. Fujita, Y. Sugimoto, and Y. Ohta, Vanadium Carbonitride Coating by Immersing into Low Temperature Salt Bath, Heat Treatment and Surface Engineering, G. Krauss, Ed., ASM International, 1988, p 49–53
- [11]. **(Y. Tsuchiya, 1997)** Y. Tsuchiya, H. Kawaura, K. Hashimoto, H. Inagaki, and T. Arai, Core Pin Failure in Aluminum Die Casting and the Effect of Surface Treatment, Trans. 19th International Die Casting Congress and Exposition, Nov 3–6, 1997 (Minneapolis, MN), North American Die Casting Association, p 315–323

-
- [12]. **(T. Arai and N. Komatsu, 1977)** T. Arai and N. Komatsu, Carbide Coating Process by Use of Salt Bath and Its Application to Metal Forming Dies, Proc. 18th International Machine Tool Design and Research Conference, Sept 14–16, 1977, p 225–231
- [13]. **(T. Arai and T. Iwama)** T. Arai and T. Iwama, Carbide Surface Treatment of Die Cast Dies and Die Components, Paper G-T81-092, Proc. 11th International Die Casting Congress/Exposition, Society of Die Casting Engineers, June 1981
- [14]. **(P. Hairy, 1997)** P. Hairy and M. Richard, Reduction of Sticking in Pressure Die Casting by Surface Treatment, Paper T97-102, Proc. 19th International Die Casting Congress/Exposition, Nov 3–7, 1997 (Minneapolis, MN), p 307–314
- [15]. **(S. Hotta, 1995)** S. Hotta, K. Saruki, and T. Arai, Fatigue Strength at a Number of Cycles of Thin Hard Coated Steels with Quench-Hardened Substrates, Surf. Coat. Technol., Vol 73, 1995, p 5–13
- [16]. **(T. Arai, 1981)** T. Arai, Carbide Coating Process by Use of Molten Borax, Part II: Process and Application to Cold Forging Dies in Japan, Wire, Vol 31 (No. 5), 1981, p 208–210
- [17]. **(J.L. Dossett et G.E Totten , 2013)** Totten, G. E., Dossett, J. L., Kobasko, N. I., Dossett, J., & Totten, G. E. (2013). Quenching of Steel. ASM Handbook, 4, 91-157.