
République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur
Et de la recherche scientifique
UNIVERSITE Abderrahmane MIRA BEJAIA
Faculté de Technologie
Département de Génie Mécanique

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Génie des matériaux

Présenté Par :

OUARET Nadjat

Thème

**Caractérisation d'un dépôt en cermet obtenu par la technique
HVOF**

Soutenu le mardi 04/06/2024 à 10h30 devant le jury composé de :

Pr. SADEDDINE.A.H	Président
Pr. BRADAI M.A	Examineur
Dr. YOUNES R	Rapporteur
Mlle. BOUDJIT S	Invitée

Année Universitaire 2023-2024

***R*emerciements**

Je tiens tout d'abord à remercier Dieu qui nous a donné la santé, la volonté et le courage d'accomplir ce travail.

Mes vifs remerciements vont à Mr R. YOUNES, notre promoteur, pour son aide, ces critiques constructives, ses explications et suggestions pertinentes et pour la qualité de ses orientations tout au long de ce travail et pour avoir apporté tant de soins à la réalisation de ce mémoire.

Je remercie Mlle BOUDJIT. Sarra, pour son aide, et ses orientations tout au long de ce travail.

Je remercie également les membres de jury qui m'ont fait honneur en acceptant d'examiner et de juger notre travail.

Sans oublier mes camarades de la promotion génie des matériaux pour leurs encouragements.

Sans oublier l'équipe du hall de technologie de l'université de Bejaia

Dédicace

Je dédie ce travail à mes chers parents

Mon Père

L'épaule solide, l'œil attentif compréhensif et la personne la plus digne de mon
estime et de mon respect

Aucune dédicace ne saurait exprimer mes sentiments, tes encouragements, ta
confiance et ton amour m'ont donné la force et la motivation pour atteindre ce
moment. Ta présence à mes côtés est un précieux cadeau que je chérirai
toujours. Merci d'être mon rocher et mon inspiration, que dieu vous préserve,
je t'aime plus que les mots ne puissent le dire.

Ma Mère

Vous m'avez donné la vie, la tendresse et le courage pour réussir ;
tout ce que je peux t'offrir ne pourra exprimer l'amour et la reconnaissance
que je vous porte. J'avoue vraiment que vous êtes pour moi la lumière qui
me guide vers le chemin de la réussite. C'est à vous que je dois mon succès

En témoignage, je vous offre ce modeste travail pour vous remercier de vos
sacrifices consentis et pour l'affection dont vous m'avez toujours témoignée.

A mes Frères

Vous êtes toujours dans mon cœur. Je vous remercie d'être l'épaule sur laquelle
je peux toujours compter

 **Merci** 

OUARET NADJET

Sommaire

Introduction générale	1
-----------------------------	---

Chapitre I : Recherche bibliographique

I. Introduction	3
I.1. Projection thermique	3
I.1.1 Invention et évolution de la projection thermique	3
I.1.2 Principe générale.....	4
I.1.3 Différents types de procédés de projection thermique	5
I.1.3.1 Projection à l'arc électrique	5
I.1.3.2 Projection flamme	6
I.1.3.2.1 Les procédés flamme poudre et flamme fil.....	7
I.1.3.2.2 La torche à gaz	8
I.1.3.2.3 Le procédé flamme poudre	8
I.1.3.2.4 Le procédé flamme fil	8
I.1.3.3 Projection à détonation	9
I.1. 3.4 Projection plasma.....	10
I.1.3.5 Projection HVOF	10
I.1.3.6 Projection HVAF.....	13
I. 1.4 les dépôts	13
I.1.4.1 Les dépôts obtenus par projection thermique.....	13
I.1.4.2 Ecrasement de particules projetées sur le substrat.....	13
I.1.4. 3 Paramètres de projection influant sur le dépôt.....	14
I.1.4.4 Structure générale des revêtements réalisés par projection thermique.....	15
I.1.4.3.1 Structure métallurgique.....	16

Sommaire

I.1.4.3.2 oxydes.....	16
I.1.4.3.3 La densité	16
I.1.4.3.4 Dureté.....	17
I.1.4.3.5 Adhérence	17
I.1.4.5. Différents types de revêtements.....	17
I.1.5 Préparation de surface.....	18
I.1.5.1 Dégraissage.....	18
I.1.5.2 Décapage.....	17
I.1.5.3 Le sablage.....	18
I.1.5.4 Préchauffage.....	18
I.1.6. Les cermets Cr ₃ C ₂	18
I.1.6.1 Définition d'un cermet.....	18
I.1.6.2 Structure de carbures de carbure de chrome	19
I.1.6.3 Les propriétés de carbure de chrome.....	20
I.6.3.1. Dureté.....	21
I.6.3.2. Usure.....	21
I.6.3.3. Frottement.....	21
I.6.3.4. Résistance à la corrosion.....	21
I.1.6.5 Les types de carbures de chrome.....	22
I.1.7 Les carbures.....	23

Chapitre II : Matériaux et technique expérimentale

II. Matériaux et techniques expérimentales.....	24
II.1 Introduction.....	24

Sommaire

II.2 Matériaux utilisés.....	24
II.2.1 Le substrat.....	24
II.2.2 Dépôts réalisés.....	24
II.2.3 Caractéristiques des dépôts.....	24
II.4 Présentation des échantillons.....	25
II.4.1 Elaboration des échantillons.....	25
II.4.2. Préparation des surfaces à revêtir.....	25
II.4.2.1. Dégraissage.....	26
II.4.2.2 Grenaillage.....	26
II.4.2.3 Préchauffage.....	26
II.5 Réalisation des dépôts.....	27
II.5.2. Pistolet utilisé.....	27
II.6. Observation métallographique.....	27
II.6.1 Préparation des échantillons pour l'observation métallographique.....	27
II.6.2 Essai de micro dureté.....	28
I.6.3 Microscope optique.....	29
II.6.4 Le traitement thermique.....	30
II.6.5 Diffraction des rayons X (D.R.X).....	31
II.6.6 Corrosion.....	32
II.6.6.1. Technique de la masse perdue.....	32
II.6.7 Caractérisation de la rugosité.....	33

Chapitre III : Résultats et discussion

III.1 Introduction.....	35
-------------------------	----

Sommaire

III.2 caractérisation structurales et microstructurales des dépôts.....	35
III.2.1 microscope optique.....	35
III.3 Analyse structurale par diffraction des rayons X.....	36
III.4 Profilometrie.....	39
III.5 propriétés mécanique des dépôts CR3C2.....	41
III.7 le comportement à la corrosion de revêtements CR3C2.....	42
Conclusion générale.....	47

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau II.1: Analyse du substrat par la fluorescence des rayons	24
Tableau II.2: composition chimique (en % poids) de carbure de chrome	25
Tableau II. 3 : propriété générale sur les carbure de chrome	25
Tableau III. 3 : Les résultats de la perte de masse	42

Introduction générale

Introduction générale

Introduction générale :

Dans le domaine industriel, l'endommagement des pièces est un problème majeur qui impacte à la fois leur durabilité et leur performance. L'usure, qui est la détérioration des surfaces par des interactions mécaniques, peut se manifester sous diverses formes telles que l'usure par adhésion, abrasion ou fatigue. Le frottement, quant à lui, représente la résistance au mouvement entre deux surfaces en contact et peut être atténué par l'utilisation de lubrifiants ou de revêtements spécifiques. La corrosion est une autre forme de dégradation qui survient lorsque les matériaux réagissent chimiquement avec leur environnement, pouvant être minimisée grâce à des matériaux résistants, des revêtements ou des ajustements environnementaux. Ces phénomènes requièrent une attention particulière pour maintenir l'intégrité et l'efficacité des équipements industriels.

La caractérisation d'un dépôt en carbure de chrome réalisé par la technique HVOF est une étape cruciale pour garantir sa qualité et ses performances dans diverses applications industrielles. L'analyse de la microstructure, généralement effectuée à l'aide de techniques telles que la microscopie optique, permet d'évaluer la densité du revêtement, la distribution des grains de carbure, ainsi que la présence d'éventuelles imperfections ou porosités. La mesure de la micro dureté, souvent réalisée à l'aide de tests comme le test Vickers ou Rockwell, est indicative de la résistance à l'usure et à l'abrasion du revêtement. L'analyse de la composition chimique, réalisée par des techniques comme la spectroscopie de fluorescence X ou la spectrométrie de masse, assure la conformité du dépôt avec la composition chimique désirée, avec une homogénéité à travers son épaisseur est essentielle pour assurer la durabilité et la fiabilité du revêtement dans des conditions réelles. Les tests de résistance à la corrosion et à l'oxydation exposent le revêtement à des environnements agressifs, tandis que la mesure de l'épaisseur du revêtement garantit une protection efficace du substrat contre l'usure et la corrosion. En combinant ces différentes méthodes, une caractérisation complète du dépôt en carbure de chrome est obtenue, assurant ainsi sa qualité et sa performance optima

Pour structurer notre recherche, nous avons organisé ce travail en trois chapitres distincts.

Le premier chapitre de l'étude fournit un examen approfondi des méthodes de projection thermique, se concentrant spécifiquement sur la technique HVOF (High-VelocityOxygen Fuel). Il détaille la morphologie des revêtements, les approches de préparation de surface, les différents types de revêtements, et les principes des cermets, tout en abordant les propriétés particulières du carbure de chrome.

Introduction générale

L'étude met en évidence l'importance d'une caractérisation minutieuse des revêtements réalisés par HVOF pour évaluer leurs propriétés physiques et mécaniques, une démarche essentielle pour déterminer leur efficacité dans divers contextes industriels.

Le deuxième chapitre de l'étude décrit en détail les techniques et méthodes expérimentales utilisées, ainsi que les matériaux employés pour créer les dépôts. Il inclut l'analyse de la microstructure à l'aide d'un microscope optique, la diffraction des rayons X (DRX), les tests de microdureté, les études de résistance à la corrosion, l'utilisation d'un profilomètre,

Dans le troisième chapitre résultats et discussions nous regroupons les différents résultats obtenus ainsi que nos interprétations. Suivis d'une conclusion générale récapitulant l'ensemble des résultats significatifs obtenus.

L'objectif de cette étude pour assurer que le revêtement respecte les normes de qualité et de performance nécessaires pour des applications industrielles spécifiques. Ce processus implique de vérifier la conformité du revêtement aux spécifications techniques comme la composition chimique, l'épaisseur, la microstructure et la dureté. Il sert également à évaluer la qualité en identifiant les défauts structurels comme la porosité ou les fissures qui pourraient compromettre sa durabilité et sa performance. En outre, la caractérisation permet de prédire la résistance du revêtement face à l'usure, l'abrasion, la corrosion et l'oxydation, et de peaufiner les procédés de fabrication pour optimiser la qualité et l'efficacité des revêtements futurs.

Chapitre I

Recherche bibliographique

I. Introduction :

La projection thermique est un procédé industriel qui consiste à déposer un revêtement métallique sur une surface en utilisant la chaleur. On peut le faire de différentes manières, mais l'idée générale est de fondre le matériau de revêtement, généralement sous forme de poudre ou de fil, et de le projeter sur la surface à revêtir à l'aide d'un jet d'air comprimé ou d'une flamme. Cela peut être utilisé pour améliorer les propriétés de surface d'un matériau, comme sa résistance à l'usure, sa résistance à la corrosion ou ses propriétés isolantes.

I.1 Projection thermique :

I.1.1 Invention et évolution de la projection thermique :

L'apparition du revêtement par projection thermique date de 1909 avec l'invention de Schoop. Portant sur la projection de plomb fondu à l'aide d'un vaporisateur, puis de plomb en poudre à Travers une flamme. Les premières applications industrielles sont apparues en 1914 dans le Domaine militaire (projection d'étain sur la face arrière d'obus), dans celui de l'anticorrosion (Dépôts d'aluminium), ou encore en décoration (dépôt de bronze). Dès 1914 également des Essais de projection par arc électrique furent réalisés [1]

A partir de 1915 deux types de source enthalpie ont été développés, Le premier utilise l'énergie de la combustion et le second l'énergie d'une décharge électrique continue [2].

Dans les années 60, apparurent les premiers pistolets plasma agui permettent de fondre les Matériaux plus réfractaires (céramiques, carbures). Les années 70 montrent le développement De la projection plasma sous faible pression résiduelle. Elle permet d'exploiter le procédé pour l'obtention de dépôts métalliques denses sans présence d'oxydes et avec une meilleure adhérence [3-4].

Tous les secteurs d'activités sont aujourd'hui concernés par la projection thermique. Si la Protection anti corrosion reste le cas d'applications le plus fréquent, certains secteurs comme l'automobile présentent des applications multiples. La plus grande partie des revêtements est utilisée pour protéger les pièces de moteurs (environ 64%), dans des outils de coupe (17%) et Comme protection contre l'usure (14.6%) [5]

I.1.2 Principe générale [6] :

La projection thermique est un traitement de surface par voie sèche visant à améliorer les propriétés du matériau, la résistance à l'usure et aux frottements, les propriétés thermiques, la protection contre la corrosion, la biocompatibilité...

Tous les systèmes de projection thermique utilisent un gaz vecteur servant à accélérer et transporter de fines particules (typiquement 5 à 100 micromètres) d'un matériau fondu sur une surface à recouvrir. Les gouttelettes se déposent à la surface et se solidifient, c'est l'accumulation des particules sur le substrat qui crée le revêtement. Les liaisons entre le Substrat et la couche déposée sont donc entièrement mécaniques, le matériau à déposer peut-être sous forme de poudre, fil ou baguette. L'apport d'énergie se fait de deux façons : la flamme et l'arc électrique, la projection thermique consiste à utiliser une source d'énergie en vue de fondre et d'accélérer un matériau fragmenté (avant ou après fusion) à l'exception de la Projection à froid basée uniquement sur la déformation du matériau. Les différents procédés en projection thermique sont définis principalement par la source d'énergie mise en œuvre (Combustion, décharge électrique). Le procédé est conditionné par des transferts thermiques et/ou cinétiques entre le matériau projeté et la source enthalpie utilisée. L'énergie cinétique est communiquée à la particule par la vitesse et la viscosité du mélange gazeux de projection.

La construction du revêtement résulte de l'empilement des particules sur le substrat. L'équilibre entre l'énergie cinétique et thermique des particules est donc prépondérant pour la qualité du revêtement.

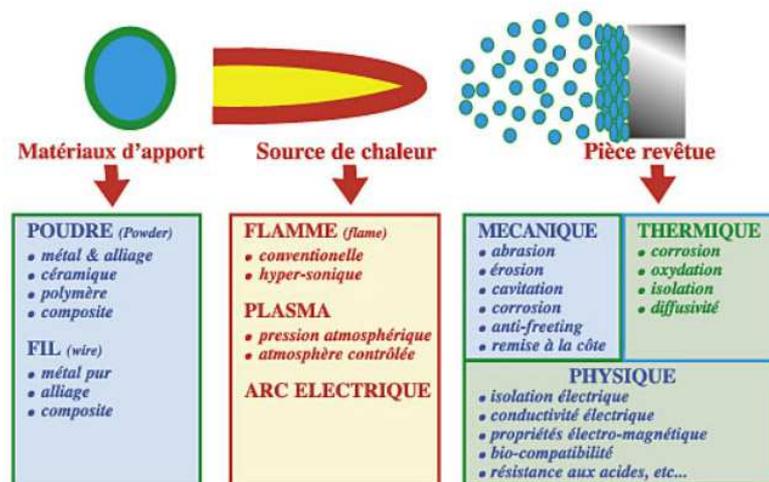


Figure I. 1 : Le principe de la projection thermique

I.1.3 Différents types de procédés de projection thermique :

On distingue deux types de source de chaleur :

- L'arc électrique
- La flamme

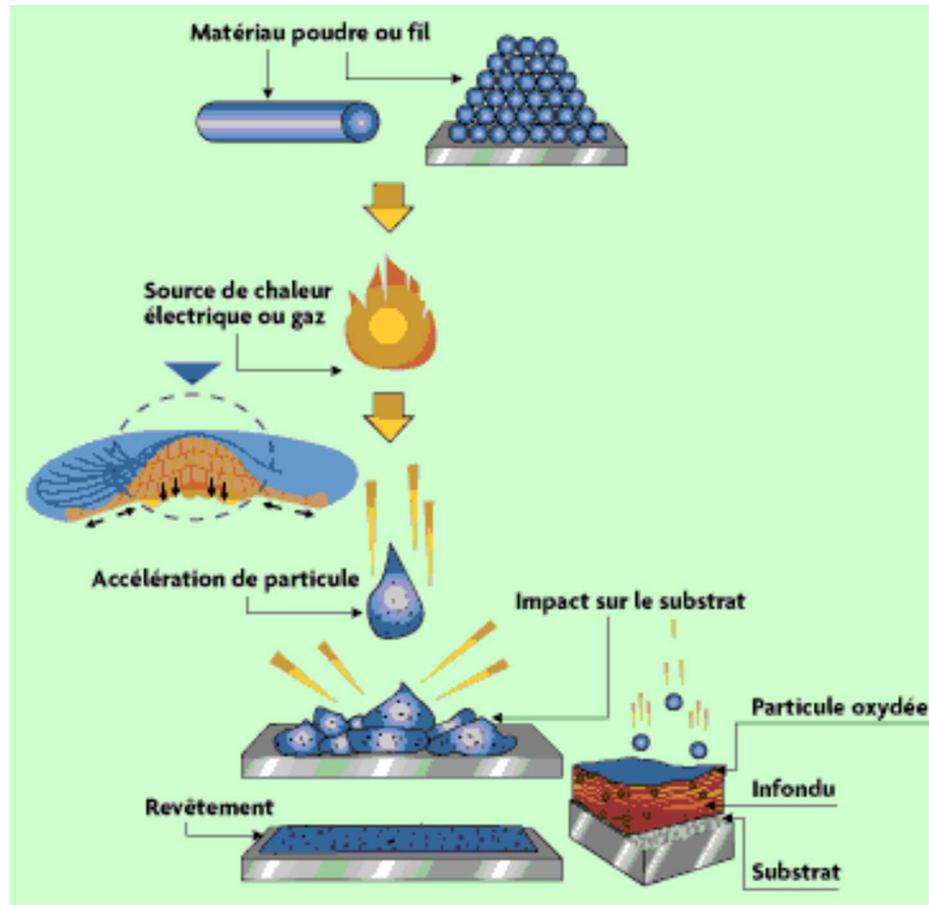


Figure I.2 : le procédé de projection thermique

I.1.3.1 Projection à l'arc électrique :

Le principe de ce procédé de projection thermique consiste à faire éclater un arc électrique entre deux fils ductiles consommables tout en atomisant le matériau fondu aux deux extrémités par un jet de gaz comprimé (air/azote) qui projette la matière liquide sur un Substrat. Les pistolets à arc électrique sont alimentés par des générateurs à courant continu avec des tensions d'arc comprises autour de 30 V, pour des intensités de courant allant de 35 À 350 A. Ils sont constitués de deux parties : un module où sont montées les deux bobines et équipé d'un premier

système d'entraînement des fils et la partie pistolet où se passe l'interaction entre les fils et leur traitement thermique. Les fils sont conditionnés en bobines et sont tirés, au travers de gaines souples, par des molettes d'entraînement intégrées au pistolet et donc aussi par le système d'entraînement primaire sur le premier module. Ce type d'équipement est communément appelé « push-pull ». A l'intérieur du pistolet, les fils sont guidés par deux tubes permettant de positionner les fils avant leur entrée dans la zone de Fusion et d'assurer la polarité du courant électrique aux fils. Une buse située derrière l'extrémité des fils dirige le flux de gaz comprimé à grande vitesse vers l'extrémité des fils en Fusion pour générer l'atomisation des particules. La température de l'arc créé entre les fils est d'environ 6000 K, température suffisante pour traiter les différents métaux mais qui induit aussi de par sa valeur une vaporisation relativement importante et un chauffage excessif des gouttelettes. [7]

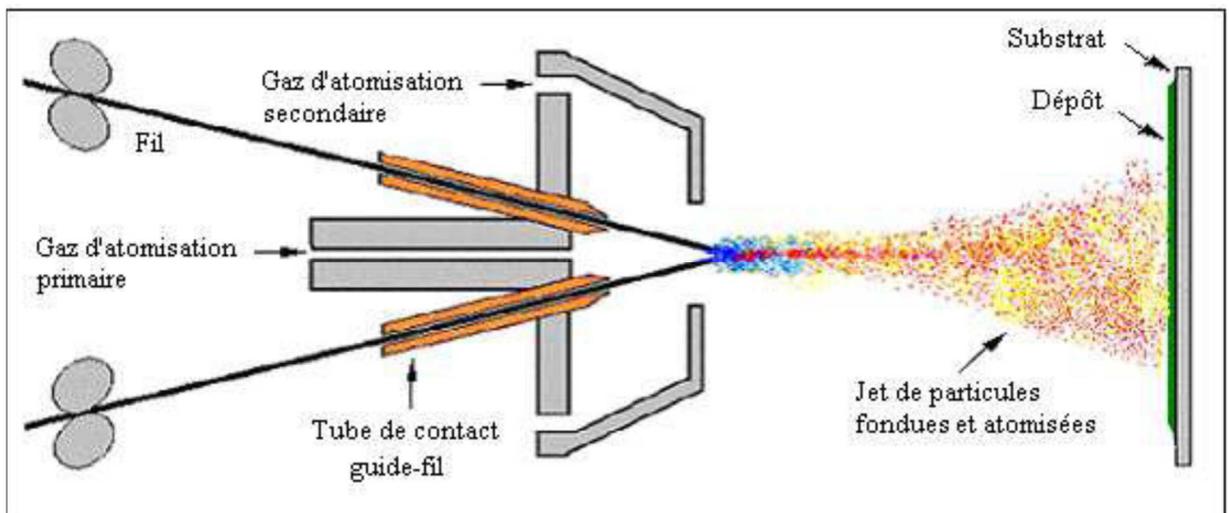


Figure I.3 : Schéma projection thermique par arc électrique

I.1.3.2 Projection flamme :

Ce procédé consiste à utiliser comme énergie une réaction chimique de combustion. En fonction de la propagation de la réaction chimique différentes techniques sont utilisées : la Projection flamme conventionnelle avec une vitesse d'éjection des gaz de l'ordre de 100 à 150 m/s et la projection flamme à haute vitesse dite HVOF (High Velocity Oxygène Fuel) basée sur la combustion continue de gaz introduits sous pression à fort débit à travers un divergent de type Laval, ce qui conduit à une vitesse d'éjection variant entre 1500 et 2500 m/s induisant une plus grande compacité et adhérence des dépôts.

La projection à la flamme est une technique largement employée dans le monde compte tenu de sa simplicité et de son faible coût d'équipement. Les pistolets à flamme sont principalement utilisés pour projeter les matériaux sous forme de poudre, de fils ou de baguettes. Le principe est fondé sur l'introduction du matériau à déposer dans la flamme [figure I.4].

Les principaux mélanges de gaz enthalpiques sont : acétylène/oxygène, hydrogène/oxygène ou propane/oxygène. Ils permettent d'atteindre des températures de flamme de 3200°C, 2700°C et 2400°C respectivement à la stœchiométrie. Le projectile subit des échanges thermique et cinétique dans la flamme et est donc fondu et accéléré avant d'être déposé en fines gouttelettes (« splats » en appellation anglaise) sur la surface à revêtir [8].

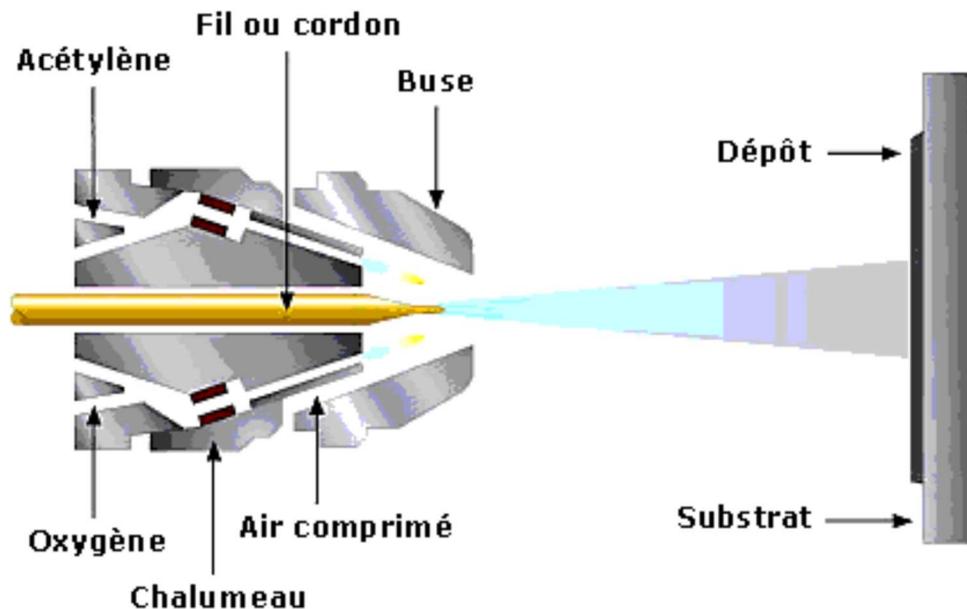


Figure I.4 : Schéma de principe de la projection thermique à flamme.

I.1.3.2.1 Les procédés flamme poudre et flamme fil :

La source de chaleur est ici la combustion des gaz, La température de la flamme va de 2800°C à 3150°C. Cette méthode est adaptée à la projection de matériaux à bas point de fusion. Une poudre est introduite dans la flamme et est véhiculée par l'énergie cinétique transmise par les Gaz en combustion. [6]

I.1.3.2.2 La torche à gaz :

Est le moins onéreux et le plus facile d'emploi, la poudre tombe puis est entraînée par les gaz de combustion vers la flamme qui fait fondre la poudre et chauffe le substrat.

La torche à gaz est utilisée pour rattraper des côtes, pour les problèmes d'abrasion et de corrosion, les poudres utilisées sont des alliages auto fusibles c'est à dire à base de **Ni** ou de **Co** avec du chrome, du bord ou du silicium et parfois des carbures.

I.1.3.2.3 Le procédé flamme poudre :

Sans échauffement du substrat par la flamme, le pistolet flamme poudre réalise des dépôts de quelques dixièmes de millimètres d'épaisseur. Le matériau d'apport est le même que précédemment mais la projection d'aciers, d'alliages à bas point de fusion, de céramiques où de polymères est aussi possible. Le procédé flamme poudre est utilisé pour l'isolation thermique, l'usure ou encore la corrosion.

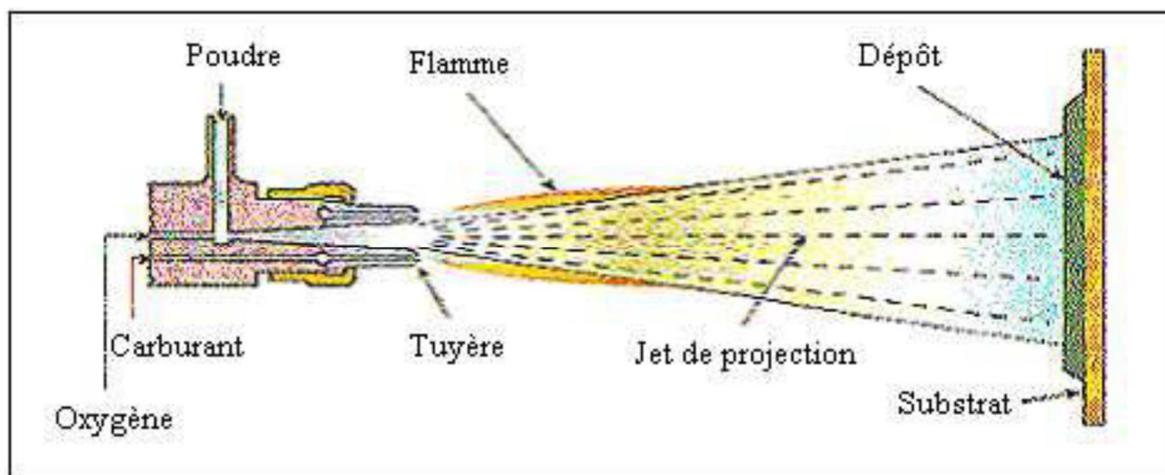


Figure I.5: Schéma de fonctionnement d'un pistolet flamme poudre. [9]

I.1.3.2.4 Le procédé flamme fil :

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. 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 [6].

I.1.3.3 Projection à détonation :

Le procédé est connu sous le nom de D-Gun (détonation gun). Le dispositif principal est un canon à détonation, où la réaction d'oxydation se produit avec une vitesse supérieure à la vitesse du son [Figure I-6]. Le canon est constitué d'un tube de diamètre 21 à 25 mm et d'une longueur d'environ 1m fermé d'un côté. Il est équipé d'un système de soupapes pour injecter les gaz et la poudre ainsi que d'un dispositif d'allumage entièrement automatisé. La poudre est injectée en même temps que le mélange des gaz (généralement acétylène/oxygène). L'onde de choc de l'explosion amorcée par une étincelle propulse la poudre tout au long du canon avec une vitesse proche de 1000 m/s. [11]

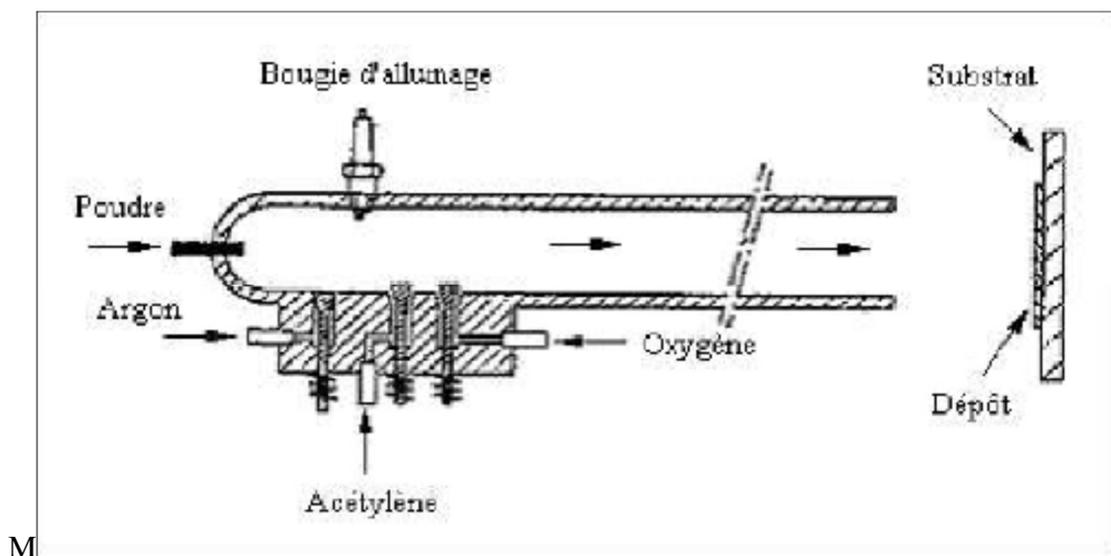


Figure I.6 : principe du canon à détonation [11].

Les allumages sont reproduits avec une fréquence de 4 à 10 tirs par seconde et successivement suivis d'un balayage du canon avec un gaz neutre. Le revêtement obtenu possède un faible taux de porosité (moins de 1%) et une très bonne adhérence (80 MPa) mais il est limité à une épaisseur qui ne dépasse pas 300 μm . [10]

I.1.3.4 Projection plasma :

Le plasma est initialement amorcé par une source extérieure comme un arc de décharge électrique à haute tension. Cet arc crée une zone localement conductrice entretenue par les courants induits. La génération du plasma se passe dans un tube généralement en quartz qui est entouré par un inducteur appliquant un champ magnétique alternatif à haute fréquence. L'injection des particules est effectuée axialement à l'aide d'un injecteur refroidi par l'eau. La vitesse d'écoulement du gaz est directement liée au diamètre intérieur de la torche (de l'ordre de 50 mm) et entraîne un séjour plus long des particules dans le plasma, ce qui permet de fondre les particules de grande taille ($\sim 100 \mu\text{m}$). L'utilisation de la projection plasma HF est possible sous atmosphère inerte ou réductrice dans une gamme de pression située entre 10 et 200 kPa. Il est possible d'y utiliser un divergent de type de Laval qui permet d'atteindre une vitesse d'écoulement supersonique pour une pression de chambre d'environ 6 kPa. La torche reste immobile pendant la projection, donc c'est le substrat qui doit être déplacé [11].

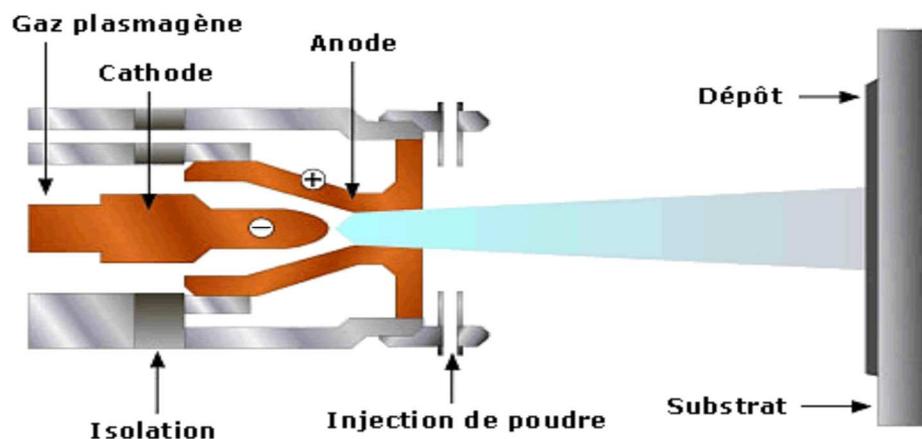


Figure I.7: Schéma de principe de la projection plasma [1].

I.1.3.5 Projection HVOF :

Le procédé de projection high-velocity-oxyfuel (HVOF) a été inventé en 1958 par Smith et al., puis commercialisé en 1974 Par Browning [12].

Cette technique à flamme est aussi dite "supersonique" vu la vitesse des particules très élevée qui la caractérise.

Deux procédés ont été développés, leur différence tenant essentiellement à des critères d'ordre économique. Ceux dit "moyenne pression" : L'HVOF qui fonctionnent avec un mélange oxygène/carburant gazeux (propane, propylène, etc...). Ces appareils opèrent à des pressions de combustion comprises entre 2 et 4 MPa.

Et ceux dit "haute pression" l'HVAF : High Velocity Air Fuel, qui fonctionnent quant à lui avec un mélange oxygène/carburant liquide (kérosène etc...). Ces appareils développent des pressions de combustion de l'ordre de 8 MPa. L'augmentation de la pression de combustion, provoque une légère augmentation de la température des particules et une forte élévation de la vitesse d'impact. Cette dernière est comprise entre 700 et 900 m/s, il en résulte des revêtements beaucoup plus denses.

(La figure I.8) schématise le principe de fonctionnement d'une torche HVOF. Le processus utilise comme combustible une combinaison d'Oxygène (comburant) avec divers gaz (Carburants), comme l'Hydrogène, le Propylène, le Propane, le Méthane.

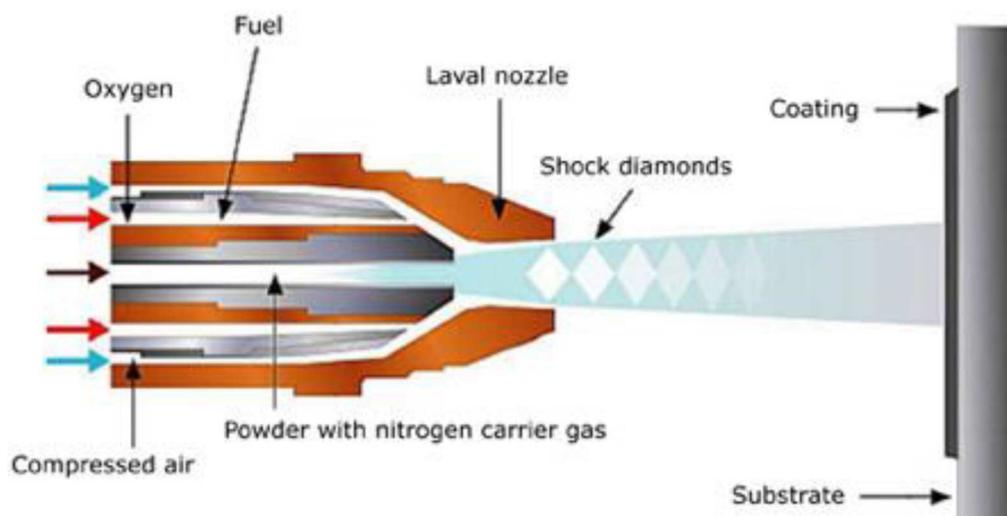


Figure I.8 : Principe de fonctionnement de la torche HVOF.

Le principe est basé sur une réaction de combustion à haute pression dans une chambre prévue à cet effet. Il en résulte une flamme caractérisée par une température comprise entre 2500 et 3200°C, et des écoulements gazeux très énergétiques et extrêmement rapides (plusieurs fois la vitesse du son). Les poudres à pulvériser sont injectées, par un gaz porteur neutre, axialement dans les gaz chauds en extension. Puis elles sont fondues à des températures

comprises entre 1500 et 2500K. Elles sont alors accélérées à travers une tuyère "convergente-divergente" et propulsées à des vitesses comprises entre 300 et 600 m/s. Le pistolet de projection est refroidi par un circuit d'eau, concentrique à la chambre de combustion et à la tuyère d'éjection. La vitesse de la particule atteinte par les procédés HVOF est tellement élevée que de multiples 'shockdiamonds' sont observés, indiquant sa nature supersonique [12].

Le procédé de projection HVOF peut être employé avec différentes torches. Le choix de cette dernière se réalise suivant la microstructure et les propriétés recherchées du revêtement. Ces différentes torches peuvent être séparées en quatre importantes parties [12] :

- Les systèmes 'Top Gun' où une combustion interne des gaz est dirigée vers la chambre où la mixture du gaz porteur et des particules injectée est accomplie. Figure 1.9 (a).
- Dans les systèmes 'Jet Kote' l'injection simultanée de la poudre dans la chambre de combustion, où la mixture de façon continu, brûle et chauffe les particules. Figure 1.9 (b).
- Les systèmes 'DJ', leur combustion est limitée, dans laquelle on injecte le jet de poudre avec le gaz porteur. Figure 1.9 (c).
- Et les systèmes 'JP 5000' qui utilisent des carburants liquide à haute pression avec une injection radiale des poudres. La figure I.9 (d) illustre ce modèle.

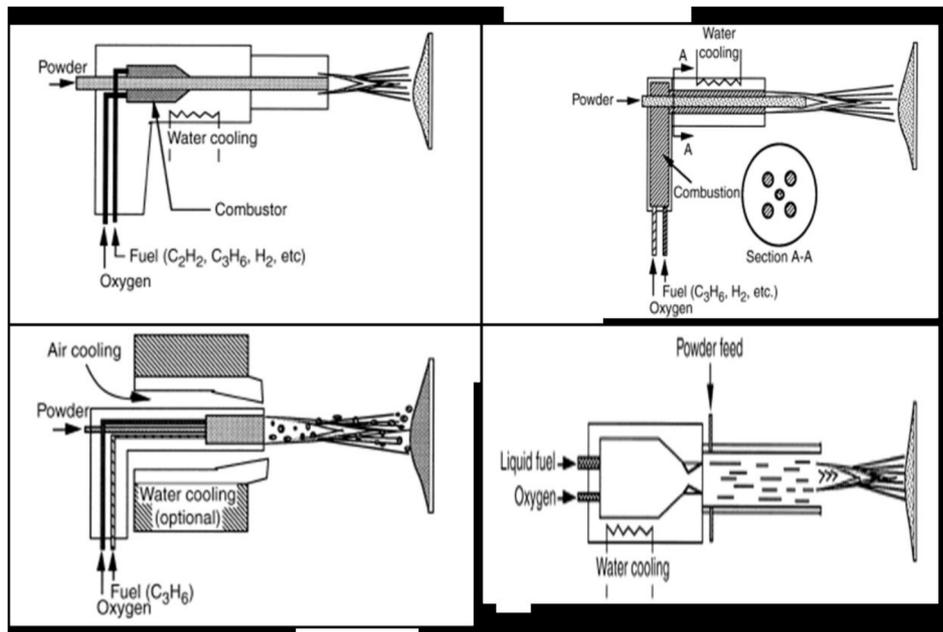


Fig. I.9. Les différentes torches de projection HVOF : Top Gun (a), Jet kote (b), Diamond jet (c) et JP5000 (d) [13].

I.1.3.6 Projection HVAF :

Le processus à grand vitesse air carburant, appelé communément HVAF, est un processus de pulvérisation thermique utilisé pour le dépôt de revêtement à haute performance de carbures cémentés et de poudre métallique. Cette technique est largement utilisée pour la protection des pièces contre l'abrasion, l'érosion et la corrosion

I. 1.4 les dépôts :

I.1.4.1 Les dépôts obtenus par projection thermique :

Les dépôts formés par projection thermique sont obtenus par empilements successifs de gouttelettes de matériau fondu ou à l'état pâteux. La structure ainsi formée est du type lamellaire. Afin de réaliser un bon accrochage mécanique, la surface des pièces à revêtir est préalablement préparée pour en augmenter la rugosité et permettre aux particules de s'ancrer dans les irrégularités de surface.

L'adhésion est assurée par ancrage mécanique du matériau qui pénètre dans les microcavités et irrégularités de surface du substrat avant la solidification.

Les dépôts sont généralement stratifiés, s'ils ne sont pas traités a posteriori. Ils sont poreux, la porosité provenant soit de microcavités dues à un empilage imparfait des gouttelettes, soit de gaz enfermés pendant la solidification. Le taux de porosité varie de moins de 1 % à 25 % les procédés et les matériaux utilisés. Les dépôts comportent des inclusions telles que des oxydes ou encore d'autres matériaux provenant des chalumeaux eux-mêmes, des particules infondues ou partiellement fondues n'ayant pas subi un cycle thermique complet (en raison de leur taille ou de leur cheminement dans la source de chaleur. [1]

I.1.4.2 Ecrasement de particules projetées sur le substrat :

Lorsqu'une particule fondue s'écrase sur le substrat, elle prend une forme lamellaire grâce à l'étalement latéral du liquide sous les pressions présentes dans la particule (**figure I.10**).

L'énergie cinétique de la particule se transforme en déformation visqueuse et en énergie de surface à la fin de l'écrasement. L'écrasement de la particule peut être divisé en trois étapes : Impact initial, étalement de la particule et enfin refroidissement et solidification. [15]

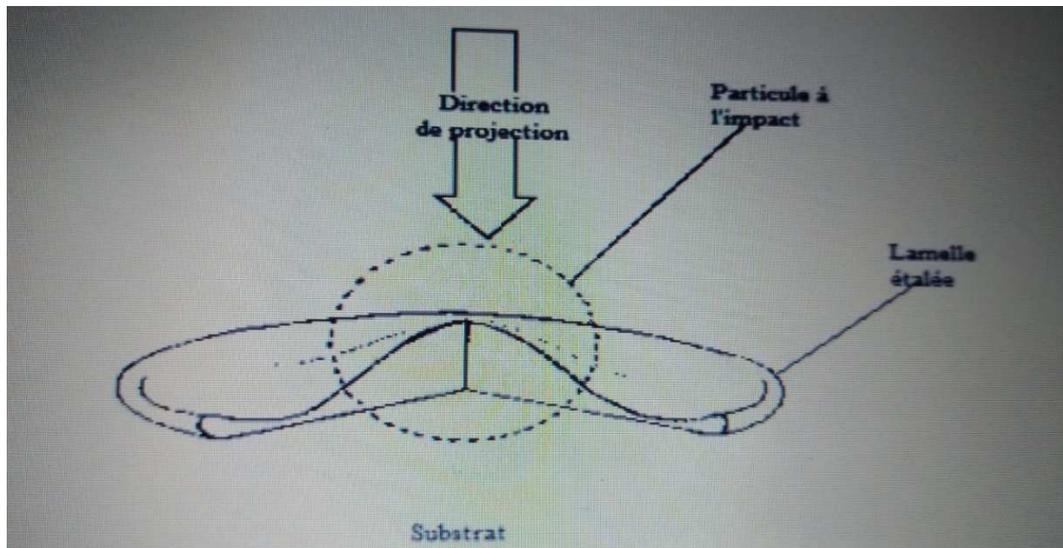


Figure I.10 : Schéma d'écrasement de la particule

I.1.4. 3 Paramètres de projection influant sur le dépôt :

- **Débit des gaz :** Un excès d'oxygène (flamme oxydante) augmente l'oxydation du dépôt, donc sa dureté réduit sa résistance mécanique. Le dépôt devient fragile et difficile à usiner. Un excès du taux d'acétylène (flamme carburante) entraîne un charbonnage du revêtement. Dans les deux cas, on note l'usure prématurée des buses [16].

- **Pressions des gaz :** Une pression trop forte des gaz augmente les pertes de métal donc toutes les consommations (Dissipation d'énergie).

- **Diamètre du fil ou du cordon :** Un diamètre de fil ou de cordon plus grand augmente le grain du dépôt et les pertes.

- **Vitesse du fil ou du cordon :** Trop grande, elle augmente la cadence et la grosseur du grain. Trop faible, elle augmente l'oxydation du dépôt.

- **Pression de l'air :** (air comprimé vecteur de la projection). Son accroissement diminue la Grosseur du grain mais augmente l'oxydation du dépôt.

- **Distance de projection :** Trop faible, elle crée des turbulences, des pertes et des défauts d'adhérence et surchauffe du dépôt trop grand, elle augmente le refroidissement des grains et entraîne une mauvaise adhérence.

- **Angle de projection** : En principe perpendiculaire, la projection oblique augmente les pertes et diminue l'adhérence.

- **Vitesse de balayage** : Trop rapide, elle augmente les pertes de métal et donne des épaisseurs de dépôt trop minces trop lente, elle donne des épaisseurs de dépôt irrégulières et élève la température du support.

- **Vitesse de rotation** : Trop rapide, elle entraîne un rebondissement des particules et une Pollution du dépôt trop lente, elle entraîne une surchauffe du dépôt et une couche trop épaisse du revêtement.

- **Refroidissement** : Trop rapide, il génère le délaminage des couches trop lent, il entraîne une Surchauffe et donc une augmentation de l'oxydation du dépôt [16].

1.4.4 Structure générale des revêtements réalisés par projection thermique :

Les revêtements thermiquement réalisés ont une caractéristique commune qui est la structure, lenticulaire ou lamellaire de leurs grains. Cette dernière résulte de la rapidité de solidification Des petites particules ou globules aplaties, entrant en impact avec la surface froide du substrat.

La projection thermique utilise de l'air à une grande proportion pour pulvériser le métal Fondu, cette opération donne lieu à des interactions chimiques, en particulier l'oxydation des Particules et donc la création d'une coquille d'oxyde sur la surface cible [19].

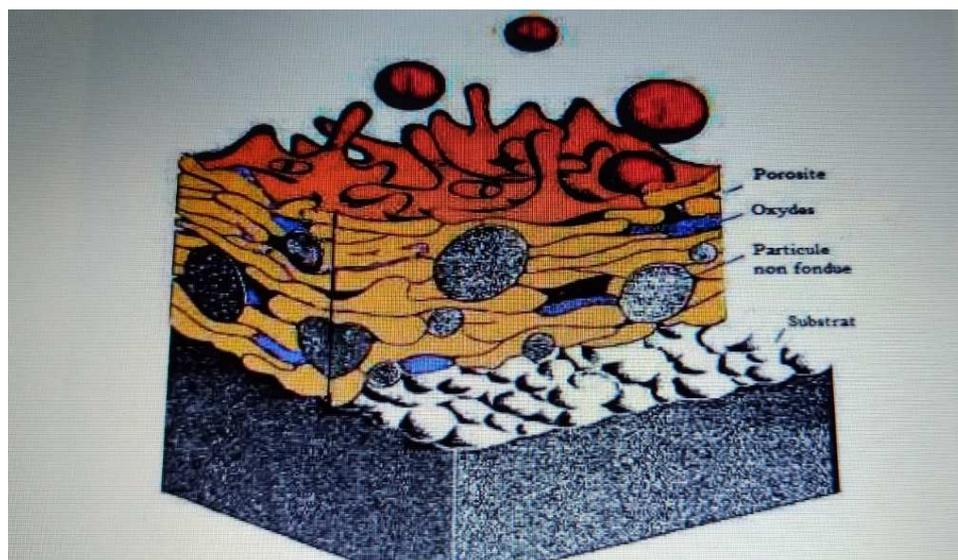


Figure I.11: Schéma de principe de formation d'un dépôt élaboré par la projection thermique

Les revêtements sont caractérisés par plusieurs facteurs : la structure métallurgique, oxydes, la densité, la dureté et adhérence des dépôts.

I.1.4.3.1 Structure métallurgique :

Les dépôts sont généralement stratifiés s'ils ne sont pas traités postérieurs. Ils sont poreux, la Porosité provenant soit de microcavités dues à un empilage imparfait des gouttelettes, soit de Gaz enfermés pendant la solidification. Le taux de porosité varie de moins de 1% à 25% suivant Les procédés et les matériaux utilisés. Les dépôts comportent des inclusions telles que des Oxydes ou encore d'autres matériaux provenant des chalumeaux eux-mêmes, des particules infondues ou partiellement fondues n'ayant pas subi un cycle thermique complet (en raison de Leur taille ou de leur cheminement dans la source de chaleurs). [13]

I.1.4.3.2 Oxydes :

Dans la projection thermique, l'oxygène pompé est en combustion total tandis que l'oxygène de l'air combiné aux hautes températures rencontrées dans le transfert des particules liquide, Peut donner naissance à des réactions d'oxydation avec les particules réactives [19].

I.4.3.3 La densité :

Les dépôts projetés à chaud dans l'air sont poreux. Cette porosité est plus ou moins importante suivant le mode de projection. La dimension des particules et leur vitesse ont une influence importante en ce qui concerne la densité des dépôts. Pour les dépôts métalliques, cette densité est également fonction de taux d'oxydes formés pendant la projection. [18]

I.1.4.3.4 Dureté :

La dureté est la faculté de résistance qu'offre un corps à sa pénétration par un autre corps. Elle est caractérisée par un nombre qui dépend du genre d'essai exécuté (essai à la bille brinell, essai de dureté à la bille basés sur la méthode de comparaison, essai de dureté Vickers, essai de dureté Rockwell, etc...) [13] Les matériaux projetés thermiquement sont constitués de particules juxtaposées, liées entre elles. Ceci se traduit en générale par une dureté, elle est généralement influencée par le degré de cohésion entre particules, les duretés intrinsèques des particules, le taux de porosité et les inclusions d'oxydes. L'impact des particules suivantes sur température d'un acier projeté à 1500°C, chute rapidement à 100°C [17].

I.1.4.3.5 Adhérence :

Les revêtements adhèrent au substrat par un phénomène mécanique. Suivant les procédés et les Matériaux, l'adhérence varie de 20 à 115 Mpa. Dans les cas où elle s'avère insuffisante (cas des Projections d'oxydes par exemple), on utilise des sous couches d'accrochage. [14]

I.1.4.5. Différents types de revêtements :

Plusieurs revêtements sont utilisés sur la surface des outils de coupe pour améliorer leurs performances d'usage. En fonction de leur composition, de leur structure et de leurs performances, les revêtements peuvent être classés comme suit :

- Revêtement dur conventionnel
- Revêtement en alliage multi-composants
- Revêtement multicouche
- Revêtement super treillis
- Revêtement super dur
- Revêtement composite
- Revêtement souple

I.1.5 Préparation de surface :

La préparation de surface est une étape que l'on peut qualifier de très importante pour réussir une bonne adhésion du revêtement sur la surface de la pièce dans la projection thermique [17].

I.1.5.1 Dégraissage :

Le dégraissage est à la base de tous les traitements de surface. Son objectif est d'éliminer les matières grasses et également les poussières et autres agents formant une couche intermédiaire de faible cohésion [19]. Le dégraissage s'effectue soit par dissolution en milieu de solvants Organiques, soit par saponification (donc en milieu alcalin).

I.1.5.2 Décapage :

Le nom générique du décapage regroupe les procédés éliminant les couches d'oxydes anhydres formées en haute température alors que le dérouillage concerne les oxydes hydratés de la Corrosion naturelle. Les méthodes de décapage sont chimiques, électrochimique, mécanique ou Thermique. Les méthodes chimiques et électrochimiques utilisent des solutions

agressives acides ou alcalines ou encore des oxydants forts. Dans la plupart des cas une mauvaise préparation de surface est l'origine d'un traitement de surface défaillant [14].

I.1.5.3 Le sablage :

Le sablage est un prétraitement mécanique permettant la création d'un état de surface rugueux. Après le nettoyage des pièces, il est nécessaire de créer une rugosité sur la surface à revêtir afin de permettre aux particules en fusion ou à l'état pâteux de venir épouser les anfractuosités de la surface et de réaliser ainsi un bon accrochage mécanique. [19]

I.1.5.4 Préchauffage :

Le préchauffage des surfaces est un moyen d'amélioration des propriétés interraciales. L'augmentation de température peut se faire avec une flamme qui, appliquée à l'arrière de l'échantillon (lorsque cela est possible), permet d'éviter toute détérioration de la surface (dépôts possibles de suies et de produits de combustion). Il est également possible d'utiliser des résistances chauffantes pour augmenter la température de la surface. [20]

I.1.6. Les cermets Cr_3C_2 :

I.1.6.1 Définition d'un cermet :

Cermet est un terme formé de deux syllabes : « cer » vient de céramique et « met » de métal. Ce sont des matériaux élaborés par la métallurgie des poudres, constitués par des particules de composés métalliques durs (carbures, nitrures, carbonitrures) liées par un métal (généralement du nickel). Les premiers cermets développés dans les années 1920 étaient basés sur le carbure de titane / carbure de molybdène avec un liant de nickel, et ont été caractérisés par la faible résistance à la flexion et la haute fragilité. Toutefois, dans les années 1960 des améliorations ont été apportées avec l'ajout de molybdène au liant, ceci a permis d'augmenter la ténacité du cermet. Quelques années plus tard, l'ajout de carbonitrures métalliques a contribué à améliorer la résistance à l'usure, la résistance aux chocs thermiques et a diminué la déformation plastique. En 2003, de nouveaux grades de micro grains de cermet ont été introduits, y compris un PVD : revêtement qui a offert une plus grande stabilité thermique et la capacité de travailler à des vitesses de coupe élevées. La structure de ces micro grains de cermets a doublé la résistance à la flexion, tandis que la résistance à la rupture reste comparable à d'autres cermets. Cette nouvelle génération de cermets est également capable d'usiner en coupe interrompue chose qui n'était pas possible avant. Actuellement, les cermets sont composés de TiC, TiN, TiCN, Mo₂C, WC, VC, TaC, NbC, Ni et Co.

Les propriétés d'utilisation des cermets dépendent pour une grande part des proportions des différents composants cités ci-dessus, notamment des teneurs en TiC, TiN et TiCN et du rapport $N / (C + N)$ qui, dans la dernière génération de cermets, est supérieur à 0,3. Le tableau I.5 montre l'influence du rapport $N / (C + N)$ sur les propriétés des cermets. La taille des particules dures a également une grande influence sur les propriétés des cermets. Des grains fins améliorent la ténacité et la résistance aux chocs thermiques.

I.1.6.2 Structure de carbures de chrome :

Les carbures de chrome sont, à la température ambiante, constitués essentiellement par des mélanges de chrome et de carbone. Mais la superposition de ces deux constituants peut prendre des formes très différentes selon les conditions dans lesquelles ils ont pris naissance. Les structures de carbure de chrome peuvent ainsi être extrêmement variées, elles sont mises en évidence par les techniques de la métallographie. Celles-ci comportent l'examen d'une surface du métal très soigneusement polie et attaquée par des réactifs convenables qui mettent en évidence, par des différences dans l'intensité de l'attaque, les divers constituants de carbure de chrome. L'examen se fait à l'aide d'un microscope optique. Des procédés un peu différents permettent l'examen au microscope électronique avec des grossissements beaucoup plus grands. On a pu constater que les propriétés de carbure de chrome étaient essentiellement fonction de cette structure, par conséquent, l'obtention d'une structure convenable est la clé qui permet d'attribuer à composer les propriétés désirées. Des additions de chrome améliorent les propriétés mécaniques et la résistance à la corrosion, et cet élément est très employé, en teneur variant de 0.25 à 30%, suivant l'application précise que l'on veut faire. Il se combine de préférence avec le carbone, et le carbure qui en résulte,

(Généralement le carbure orthorhombique Cr_3C_2 lorsque la teneur est modérée, ou le carbure cubique Cr_4C quand la teneur est forte) se dissout dans le Fe_3C restant pour former un carbure double, dur et stable. Par suite, le chrome diminue la décarburation et corrige la tendance graphitisante dans les aciers à forte teneur en carbone.

Ces structures dépendent des conditions dans lesquelles le carbure de chrome a été refroidi depuis le moment où, chauffé au-dessus du point de transformation. En particulier, suivant la vitesse de refroidissement, on peut avoir, dans le cas de faibles vitesses, une répartition dans le chrome de particules très petite de carbone, ou, au contraire, dans le cas de plus grandes vitesses, une superposition des deux constituants en éléments extrêmement fins, discernables seulement avec de très forts grossissements [21].

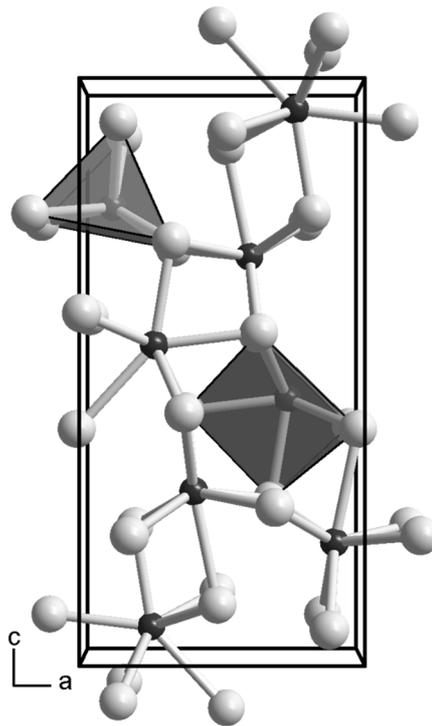


Figure I.12 : Structure de carbures de chrome

I.1.6.3 Les propriétés de carbure de chrome :

L'évaluation des possibilités d'utilisation des divers matériaux dans les états variables auxquels ils peuvent être amenés par des traitements se fait en déterminant un certain nombre de grandeurs relatives aux diverses propriétés du métal. Les plus courantes, sinon les plus importantes, se rattachent, d'une part, à la résistance, c'est-à-dire à la résistance opposée aux déformations, d'autre part, à la ductilité, c'est-à-dire à la capacité de se déformer sans se rompre. Ces deux qualités étant dans une certaine dépendance [22-23].



Figure I.13 : carbures de chrome

I.6.3.1. Dureté :

Parmi les grandeurs les plus couramment déterminées, nous citons d'abord la dureté, qui s'exprime comme une résistance à l'enfoncement. La dureté du carbure de chrome varie selon La qualité du chrome déposé, par électrolyse par exemple, la valeur est de (1500-1800) HV0,1.

I.6.3.2. Usure :

L'usure est provoquée par un enlèvement de matière d'une surface en contact et en Mouvement relatif avec une autre surface. La composition, la microstructure, la topographie de la surface, la présence ou l'absence de lubrifiant ou d'autres médias, la charge, la vitesse de Contact, et la température, sont des facteurs déterminant taux d'usure. Le carbure de chrome a Une résistance excellente de l'usure adhésive, l'usure abrasive et l'usure érosive. En général, La durée de vie moyenne des pièces revêtues en carbure de chrome est multipliée par 5 à 10 Fois. Les couches de protection contre l'usure obtenues conviennent particulièrement pour des Applications à hautes températures et elles ont parfaitement fait leurs preuves dans l'industrie Chimique ainsi que dans l'aviation.

I.6.3.3. Frottement :

Le carbure de chrome possède un très faible coefficient de frottement, qui en fait un très bon Matériau pour les frottements dans les usages industriels et notamment les frottements à sec. Le carbure de chrome maintien la résistance à l'usure par frottement à des températures allant Jusqu'à 482 °C.

I.6.3.4. Résistance à la corrosion :

La résistance à la corrosion des carbures de chrome est en général très bonne. Son pouvoir De protection contre la corrosion est considérablement amélioré par une sous-couche de Nickel. Pratiquement les carbures de chrome se distinguent par leur très haute stabilité Chimique et thermique. Ils résistent à tous les agents chimiques (sauf l'acide chlorhydrique), Même à une haute température. Ils sont inoxydables jusqu'à 800 °C [22-23].

I.1.6.5 Les types de carbures de chrome :

Le carbure de chrome existe sous différentes formes, notamment le Cr_3C_2 , le Cr_7C_3 et le Cr_{23}C_6 , qui ont des structures cristallines et des propriétés spécifiques. Le chrome forme des

carbures intermédiaires de type M_7C_3 et $M_{23}C_6$, qui sont largement utilisés dans l'industrie pour leurs propriétés de résistance à l'usure et à la corrosion

. En outre, le carbure de chrome peut être allié avec des bases nickel ou chrome, ce qui élargit ses applications et ses propriétés

. Par conséquent, les différents types de carbures de chrome offrent une gamme de propriétés et d'utilisations, les rendant précieux dans divers domaines industriels

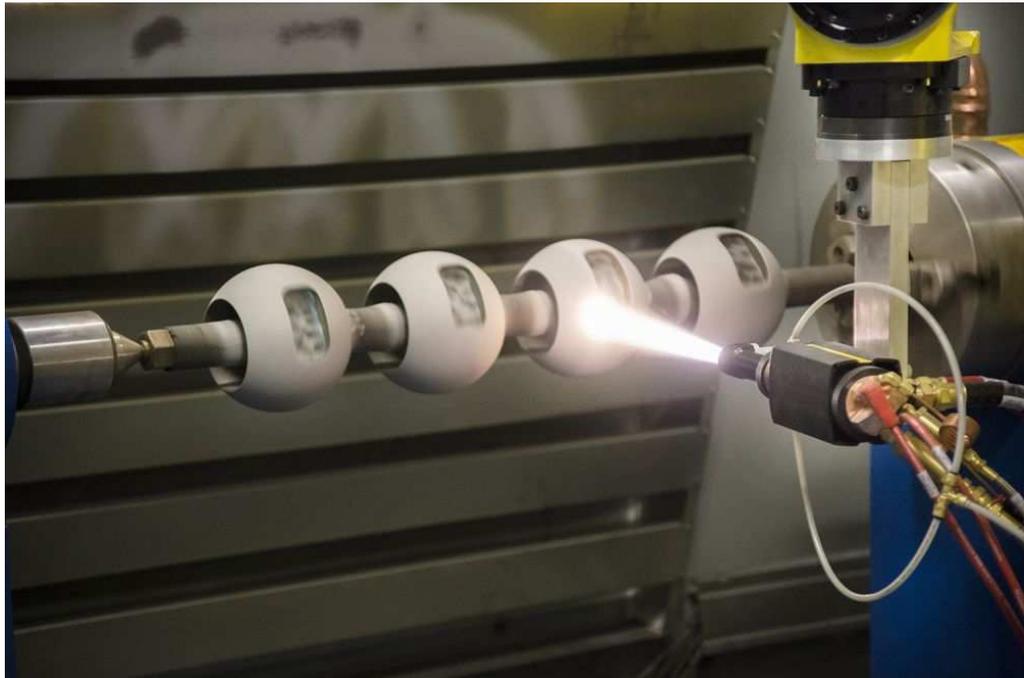


Figure 14 : projection HVOF carbure de chrome

I.1.7 Les carbure :

Plusieurs types de carbures précipitent dans les superalliages à base de nickel : les carbures primaires de types MX (NBC, Ti (C, N)), et les carbures secondaires de type M_6C et $M_{23}C_6$.

Les carbures ou carbonitrides primaires se forment lors de la solidification du lingot. Ceux - ci précipitent dans les espaces interdendrique dans lesquels s'est créés une ségrégation des éléments comme le Niobium, le Molybdène et le Titane. Les carbures et les carbonitrides ont une taille similaire que peut atteindre $10\ \mu\text{m}$, mais ils présentent des morphologies différentes : globulaire pour les carbures et cubique pour les carbonitrides. Toutefois ces deux

phases adoptent la même structure cristalline B1 de réseau cubique à faces centrées. La température desolvus des carbures primaires est supérieure à la température de solidus (voir même de la température de liquides) de l'alliage, ce qui fait qu'ils restent présents même après traitement thermique à haute température de l'alliage [24].

Les carbures secondaires apparaissent lors de maintiens à haute température. Leur composition est de type M_c , et $M_{23}C_6$, ou M est une combinaison des éléments Chrome, Molybdène et fer . La précipitation des carbures primaires permet, dans certains alliages, notamment ceux élaborés par métallurgie des poudres, d'ancrer les joints de grains et de limiter leur mobilité. La précipitation des carbures secondaires sur les joints de grains permet également d'améliorer la tenue en fluage des alliages, lorsqu'ils ne forment pas un film continu dans les joints, en limitant le glissement des joints de grains.

Chapitre II :
Matériaux et techniques
expérimentales

II. Matériaux et techniques expérimentales :

II.1 Introduction :

L'objectif de notre travail est de réaliser des dépôts en carbure de chrome sur un substrat en acier inoxydable Par la technique de projection thermique. Le procédé utilisé est celui de laProjectionà la flamme supersonique (HVOF).

Dans un deuxième temps, on présente les différentes techniques de caractérisation : La fluorescence rayon X, l'analyse structurale par la Diffraction X (DRX), microscope optique et la caractérisation mécanique basée sur les tests de dureté des différents dépôts

II.2 Matériaux utilisé :

II.2.1 Le substrat :

Le substrat utilisé pour réaliser les dépôts est un acier inoxydable de type X30Cr13. Sa composition chimique est obtenue grâce à la fluorescence X (PTAPC Bejaia) représentée dans le tableau II.1.

Eléments	Fe	C	Cr	Ni	Mn
Composition %	Bal	0.3	13	0.8	0.4

Tableau II.1 : Analyse du substrat par la fluorescence des rayons

II.2.2 Dépôts réalisés :

Dans notre travail nous avons utilisés la poudre de carbure de chrome type CrC qui est principalement utilisé comme revêtement protecteur. Il se prête facilement à cet usage étant donné sa parfaite adhérence sur le métal de base et il offre une résistance cathodique à la corrosion. Ce dépôt a été projeté sur les surfaces des échantillons par le pistolet de projection thermique HVOF.

II.2.3 Caractéristiques des dépôts :

La composition chimique, et les différentes applications et caractéristiques de cette poudre qu'on a utilisée pour nous dépôts est représenter dans le tableau suivant :

Elément chimique	Composition %
Chrome	Bal
Carbone	15 – 17%
Oxygène	<0.6%

Tableau II.2 : composition chimique (en % poids) de carbure de chrome

Type matériau	Poudre carbure de chrome
Composition	CrC
Méthode de production	Frittage agglomération
Morphologie	Sphérique
Densité	3.2 Gr/cm ³
Application	Corrosion and resistance à l'usure a haute temperature

Tableau II. 3 : propriété générale sur le carbure de chrome

II.4 Présentation des échantillons :

II.4.1 Elaboration des échantillons :

Les échantillons utilisés pour la projection thermique, ont été usinés sur une fraiseuse au niveau du hall de technologie ou on à effectuer :

- Découpage, dans le but de réaliser la forme de l'échantillon ;
- Un fraisage, de surface avec une fraiseuse conventionnelle ;

Les échantillons élaborés présentent la forme suivante :



Figure II.1 : Echantillon élaboré après projection

II.4.2. Préparation des surfaces à revêtir :

Après avoir élaboré les échantillons, on a effectué les différentes opérations de préparation de surface comme suit :

II.4.2.1. Dégraissage :

Le dégraissage est l'élimination des huiles et diverses particules ou poussières déposés volontairement ou non à la surface de l'acier pendant les opérations de stockage et mise en forme.

II.4.2.2 Grenailage :

Il s'agit d'un procédé de préparation de surface consistant à projeter à l'aide d'une lance sous pression un abrasif sur la pièce à nettoyer.

Le but du grenailage est d'une part d'éliminer les oxydes présents en surface de la pièce et d'autre part d'augmenter la rugosité de surface afin d'obtenir une meilleure adhérence de l'émail.

II.4.2.3Préchauffage :

Un léger préchauffage de la pièce à traiter, est toujours conseillé afin d'augmenter le pouvoir d'adhérence, une modification mécanique et une modification de la mouillabilité de la surface par un effet d'oxydation. En effet, les caractéristiques mécaniques de la plupart des matériaux chutent avec l'augmentation de la température.

Il peut aussi être employé pour la dessiccation de certaines pièces poreuses, imprégnées en profondeur d'eau ou de graisse ou d'huile.

II.5 Réalisation des dépôts :

II.5.2. Pistolet utilisé :

Il existe différents types de pistolets HVOF, qui se distinguent par la technique utilisée pour atteindre des vitesses élevées. Dans ces études, on a utilisé la torche HVOF Tafa Model 8200 HP/HVOF Gun. Cette torche utilise une chambre de combustion refroidie par un circuit d'eau sous pression ainsi qu'une tuyère allongée. Le carburant liquide est le propylène, celui est injecté sous ci est sous pression dans la chambre avec de l'oxygène. La combustion génère une flamme à haute pression qui s'échappe par la tuyère, acquérant ainsi une vitesse élevée.

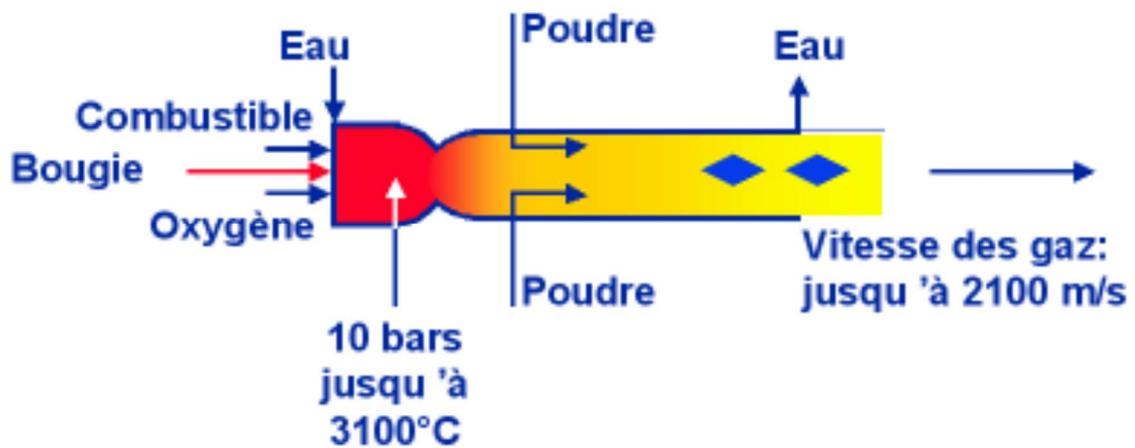


Figure II.2 : Principe de fonctionnement d'un pistolet HVOF

II.6. Observation métallographique :

II.6.1 Préparation des échantillons pour l'observation métallographique :

L'observation microscopique a nécessité un polissage fin de la surface de la coupe du dépôt à observer. Le polissage mécanique est obtenu en utilisant une polisseuse qui vise à rendre les surfaces uniformes. Il consiste à abraser la surface à l'aide de papiers abrasif de grade progressif (400, 600, 800, 1000, 1500).



Figure II.3 : Polisseuse mécanique à papier abrasif.

II.6.2 Essai de micro dureté :

La microdureté est une mesure de la résistance opposée par la surface d'un matériau à la pénétration d'un pénétrateur plus dur, sous faible charge (0.1 N à 10 N).

L'ensemble des observations métallographiques et les essais de microdureté Vickers sous 200gr ont été réalisés au microduromètre Zwick HV 10 (Figure II.4). Il est équipé d'une caméra CCD, l'ensemble est relié à un ordinateur qui permet le traitement des images et la mesure des empreintes de microdureté.



Figure II.4 : Dispositif du microduromètre Zwick HV10 piloté par ordinateur

Dans les essais de microdureté Vickers, le pénétrateur est une pyramide en diamant à base carrée dont l'angle au sommet entre deux faces triangulaires vaut 136° (Figure II.4).

I.6.3 Microscope optique :

La métallographie est la technique de détermination de la microstructure des métaux en les observant au microscope optique. Il est ainsi possible de déterminer la nature de la structure, la répartition des phases, la taille et la forme des grains, la nature et la teneur des inclusions, la présence d'éventuels traitements thermiques, la direction des lignes de glissement, dans le cas de déformations de l'échantillons ou de traitements de surface. Une simple observation d'un objet métallique ne donnera aucune information précise autre que l'état de surface.



Figure II.5 : microscope optique

II.6.4 Le traitement thermique :

Après avoir effectué les dépôts, les revêtements de carbures de chrome ont subi des post-traitements. Ces post-traitements impliquent un chauffage à des températures de 1100°C pour différents échantillons, avec un temps de maintien d'une heure, suivi d'un refroidissement à l'air ambiant. Ce processus est crucial pour assurer une bonne adhérence du revêtement, ainsi qu'une structure cristalline et des propriétés mécaniques optimales. En exposant les échantillons à des températures élevées, les liaisons interatomiques sont renforcées, ce qui favorise une meilleure intégration du revêtement avec le substrat. Le refroidissement à l'air permet ensuite de stabiliser la structure cristalline du revêtement, garantissant ainsi ses performances à long terme.



Figure II.6: Four à moufle utilise au niveau du hall technologie.

Le but de ces post-traitements est de :

- Mettre le matériau dans un état proche de l'équilibre thermodynamique ;
- Recristalliser la matrice, on dit qu'il guérit les défauts ;
- Activer les impuretés implantées ;
- Améliorer l'adhérence des dépôts.

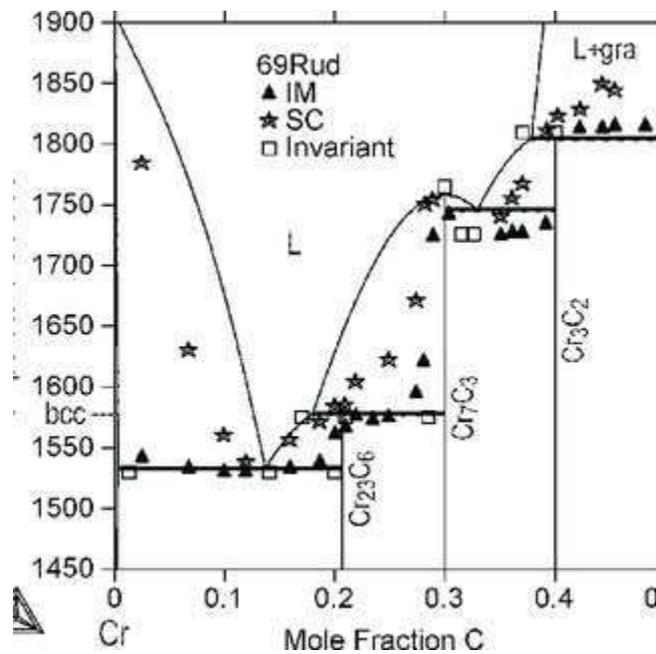


Figure II .7 : Diagramme de phase C Cr

II.6.5 Diffraction des rayons X (D.R.X) :

Les diagrammes de diffraction RX ont été enregistrés à l'aide d'un diffractomètre de type X'PERT PRO MRD de chez PANalytical, de PTAPC de Béjaia, équipé d'un tube RX à anode en cuivre (**Figure II.8**). Les composantes $K\alpha_1$ et $K\alpha_2$ sont filtrées par un monochromateur courbe en graphite monté dans le faisceau secondaire. La forte présence de défauts dans ce type de matériaux engendre un bruit de fond important ; pour améliorer la statistique de comptage et augmenter le rapport pics/fond continu, un temps d'acquisition de 40 s par pas angulaire de $0,04^\circ$ a été utilisé sur l'intervalle s'étalant entre 35° et 100° (2θ).

L'identification des phases cristallines présentes est faite par comparaison des raies observées avec celles des phases appropriées contenues dans la base de données PDF2[27]



Figure II.8: Dispositif Diffraction X : X'PERT PRO MRD de chez PANalytical.

II.6.6 Corrosion :

II.6.6.1. Technique de la perte de masse :

Les mesures de perte de poids sont une première approche de l'étude de la corrosion de nos échantillons dans une solution marine. Cette méthode présente l'avantage d'être d'une mise

en œuvre simple et de ne pas nécessiter un appareillage important. Cette méthode consiste à mesurer la perte de masse Δm de nos différents dépôts pendant un temps d'immersion de l'échantillon dans une solution corrosive.

Cette méthode dont le dispositif est représenté par la figure. (II.9) nécessite de laboratoire

Suivant :

- Échantillons en aciers
- Béchers
- Balance de précision de sensibilité de 0.0001g
- solution marin

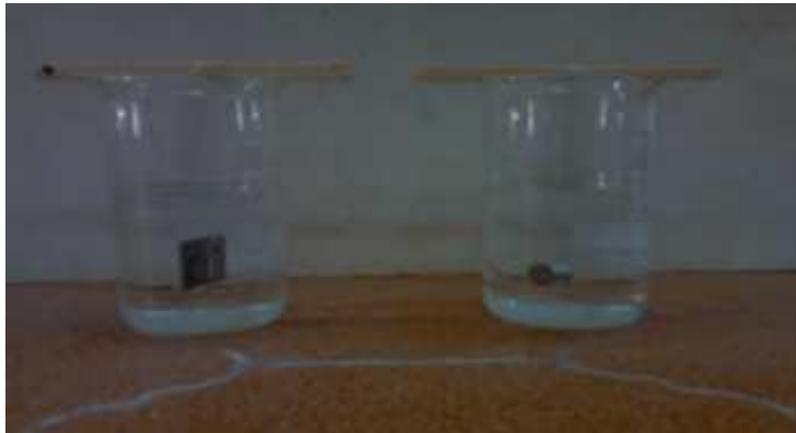


Figure II.9 : la technique de la masse perdue par corrosion dans une solution marine

II.6.7 Caractérisation de la rugosité :

Le profilomètre est un instrument de mesure de la rugosité de surface. Voici les étapes générales pour mesurer la rugosité à l'aide d'un profilomètre :

1. Préparation de la surface : La surface à mesurer doit être propre et sèche pour éviter toute influence extérieure sur les résultats.

2. Calibration de l'instrument : Avant de commencer les mesures, il est important de calibrer l'instrument pour s'assurer de la précision des mesures.

3. Placement de l'échantillon : Placez l'échantillon sur la plateforme de mesure et assurez-vous qu'il est bien fixé.

4. Configuration des paramètres : Configurez les paramètres de mesure selon les spécifications de l'échantillon, y compris le mode de mesure (profil linéaire, zone de mesure, etc.) et la plage de mesure (amplitude et longueur de mesure).

5. Mesure : En utilisant un bras de mesure motorisé, le profilomètre balaye la surface de l'échantillon et enregistre les données de profil de la rugosité.

6. Analyse des données : Une fois les mesures terminées, les données peuvent être analysées pour obtenir les statistiques de rugosité telles que la hauteur moyenne (R_a), la rugosité maximale (R_z), etc.

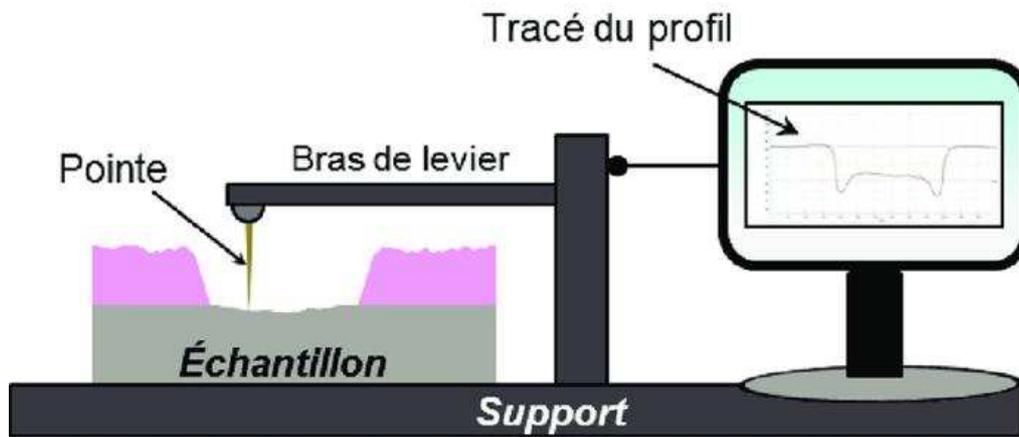


Figure II.10: Profilomètre

Chapitre III

Résultats et discussions

III.1. Introduction :

Après avoir vu les matériaux étudiés, les méthodes de caractérisation ainsi que les équipements mis en œuvre, nous présenterons dans le présent chapitre les résultats obtenus par les différentes techniques, et leurs interprétations.

III.2 caractérisation structurales et microstructurales des dépôts

III.2.1 microscope optique :

L'analyse de la structure micrographique des dépôts sous traitement thermique à 1100 °C, et sans traitement thermique, réalisée par le microscope optique est donnée sur la Figure III.1 et Figure III.2 ci-dessous

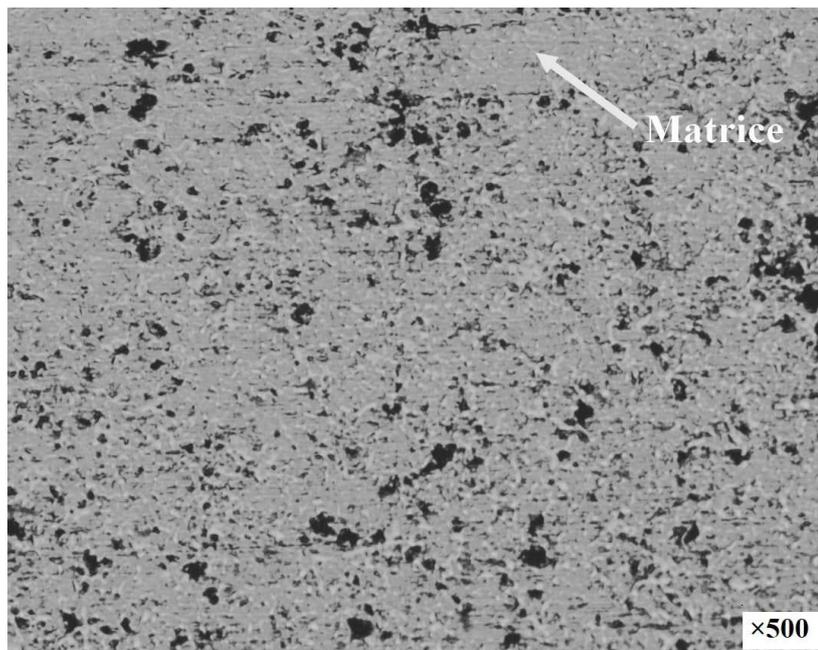


Figure III.1: Microstructure du dépôt avec traitement thermique à 1100 C°

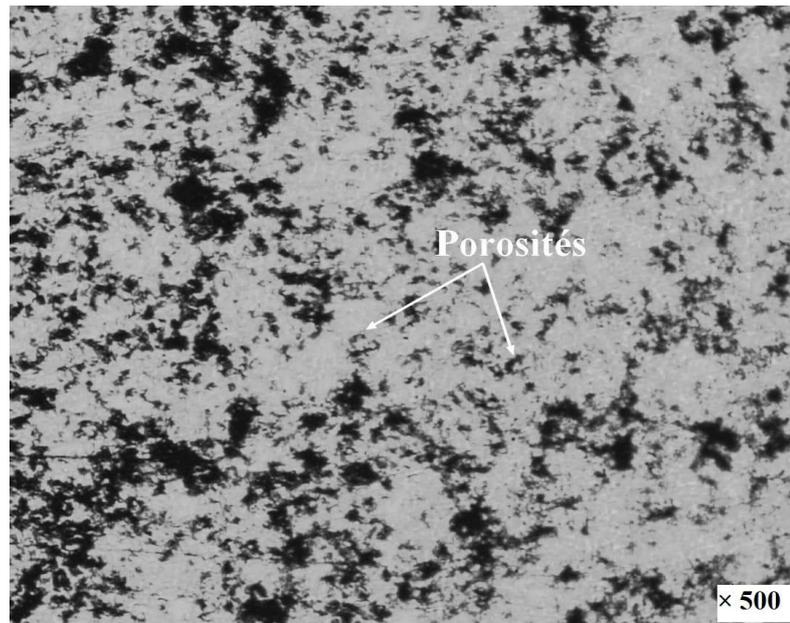


Figure III.2 : Microstructure du dépôt sans traitement thermique

Les figures ci-dessus illustrent la microstructure du revêtement en carbure de chrome.

➤ On remarque la microstructure du dépôt sans post-traitement, présente plus de porosités que les microstructures des dépôts traités à 1100°C, qui sont dues probablement au piégeage de l'air entre les différentes couches déposées, et la matrice de carbure de chrome Cr_3C_2

➤ Les dépôts traités à 1100°C sont soumis à un processus de traitement thermique. Ce traitement favorise la diffusion des éléments et réduit les porosités. À cette température, les matériaux ont le temps de se recombinaison et d'éliminer les imperfections, comme les vides, ce qui améliore leur densité et leur microstructure.

III.3 Analyse structurale par diffraction des rayons X :

III.3.1 : Analyse structurale par diffraction des rayons X des dépôts élaborés :

La diffraction des rayons X (XRD) est une technique analytique non destructive polyvalente utilisée pour analyser les propriétés physiques telles que la composition des phases, la structure cristalline, la taille des cristallites, la déformation du réseau, l'orientation privilégiée et l'épaisseur de couche.

Les analyses structurales des dépôts Cr_3C_2 sans traitement et traités à $1100\text{ }^\circ\text{C}$, sont données par les figures **Figure III.3** **Figure III.4**

III.3.2 :Analyse structurale par diffraction des rayons X des depots non traités :

L'analyse structurale par diffraction des rayons X des depots non traités sont illustré dans la Figure III.3 Les spectres de diffraction des rayons X pour les depots non traités ont révélés la presence d'un carbure de chrome de formule Cr_7C_3 de structure Orthorhombique, on peut noter également l'apparition d'un oxyde de chrome type CrO_2 de structure tétragon, la diffraction des rayons X a révélé la formation d'un autre carbures type Cr_3C_2 .

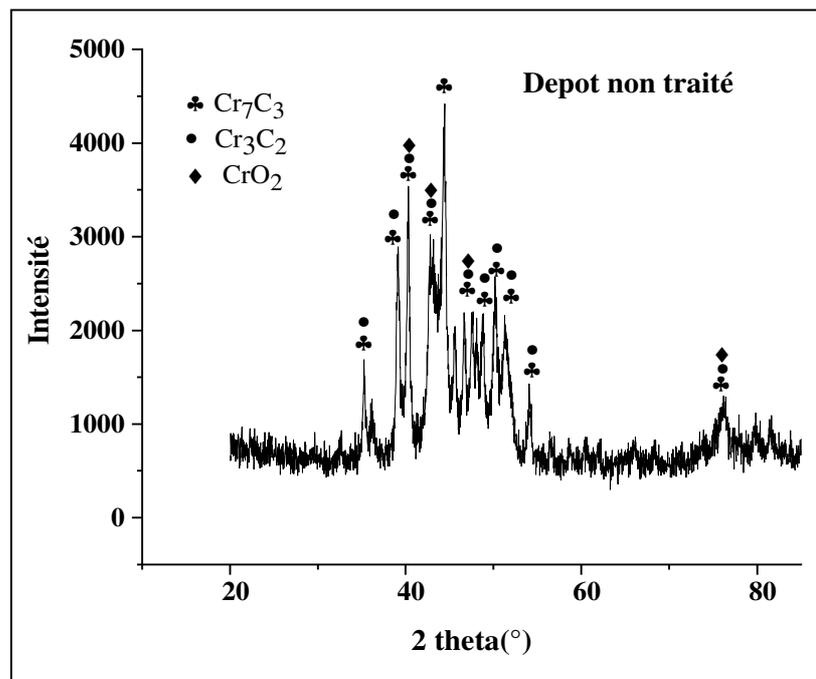


Figure III.3 : Spectre de diffraction des rayons X pour les dépôts non traités

III.3.3:Analyse structurale par diffraction des rayons X des depots traités :

L'analyse structurale par diffraction des rayons X des depots traités thermiquement à $1100\text{ }^\circ\text{C}$ sont illustré dans la Figure III.4 Les spectres de diffraction X des revêtements traités thermiquement à $1100\text{ }^\circ\text{C}$, ont révélé la présence des phases communes, où différent-elles en

termes de quantité de masse Figure III.4. Carbure de chrome type Cr_3C_2 de structure orthorhombique, un oxyde de chrome de type Cr_2O_3 .

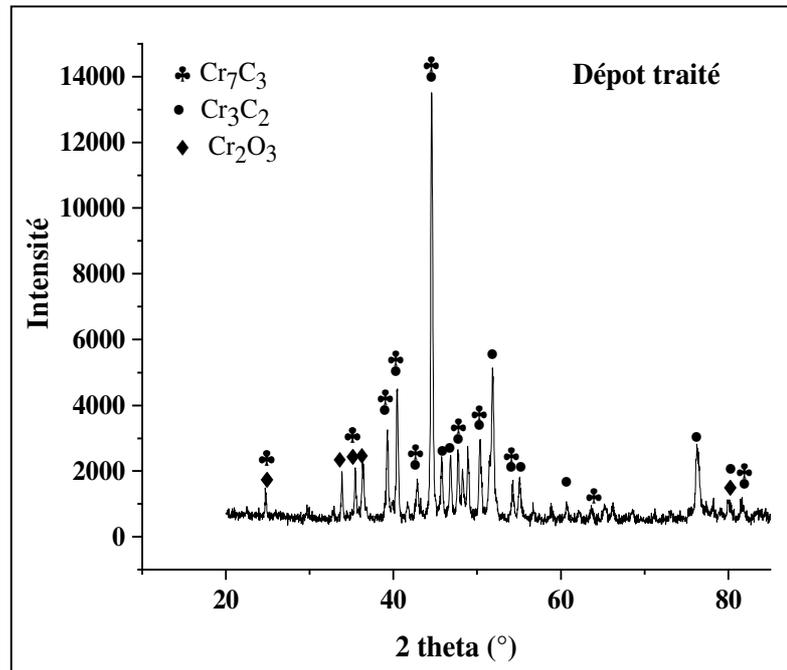


Figure III.4: Spectre de diffraction des rayons X pour les dépôts traités

III.3.4 Quantification des phases des deux dépôts (traité et non traité) :

La quantification des phases des dépôts non traités nous montre que ce dépôt est constitué essentiellement de la phase majoritaire, principale Cr_7C_3 avec une teneur relative de 64 % (Figure III.5) et des traces d'oxyde de faible teneur 3%, comparativement aux dépôts traités thermiquement à 1100 °C on remarque que la phase Cr_7C_3 diminue, et la phase Cr_3C_2 devient plus dominante avec une teneur relative de 46.3 %. Pour les revêtements traités thermiquement on constate que l'oxyde formé (Cr_2O_3) est d'une proportion de 37.3% plus élevée que celui formé pour les dépôts non traités.

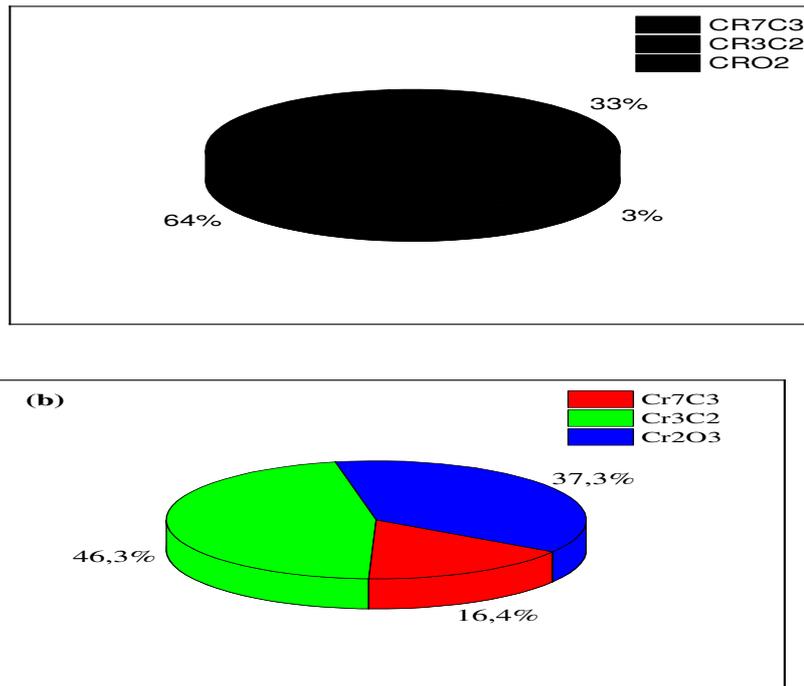


Figure III.5 : Quantification des phases pour les deux dépôts : a) non traités, b) traité à 1100°C

III.4 Profilométrie :

Figure III.6 et Figure III.7 présenteront un profil de rugosité de dépôt Cr₃C₂ avec traitement Thermique.

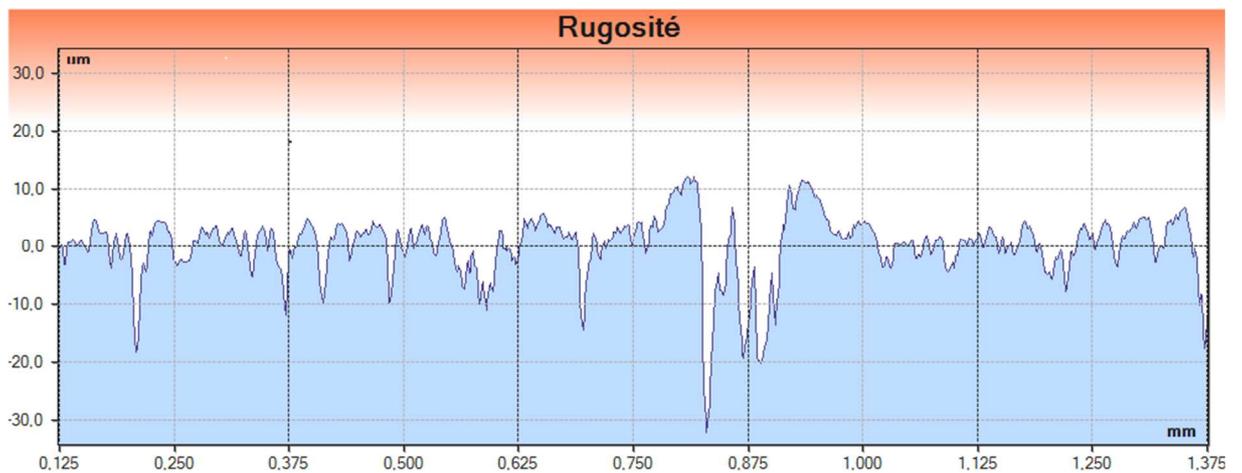


Figure III.6 : Profil de rugosité de dépôt Cr₃C₂ avec traitement thermique

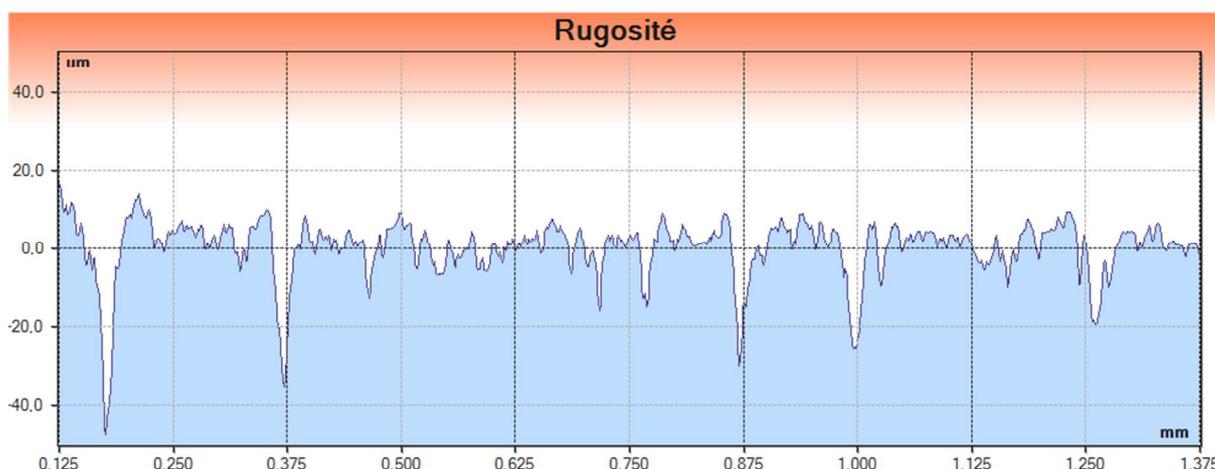


Figure III.7: Profil de rugosité de dépôt Cr_3C_2 sans traitement thermique

Figure III.6 et Figure III.7 mentionnent l'existence d'une profondeur maximale atteignant $-40,80\mu\text{m}$ et $-30,20\mu\text{m}$. Cela signifie que la surface du revêtement présente de profondes dépressions et irrégularités. Les profondeurs de $-40,80\mu\text{m}$ et $-30,20\mu\text{m}$ indiquent que certaines zones du revêtement sont déprimées par rapport à la référence de surface. Cela peut être dû à des conditions de pulvérisation inégales, à des imperfections du matériau ou à d'autres facteurs liés au processus de revêtement.

On note que les hauteurs maximales du graphique sont d'environ $10,10\mu\text{m}$ et $18\mu\text{m}$. Cela indique la présence de hauts pics ou crêtes à la surface du revêtement. La hauteur maximale suggère que certaines zones du revêtement dépassent de manière significative la norme de surface. Cela peut être dû à un dépôt irrégulier de matière lors de la projection thermique, à la formation de particules ou d'agglomérats en surface, ou à d'autres phénomènes similaires.

Les paramètres de rugosité R_a (valeur de rugosité moyenne arithmétique) et R_z (profondeur de rugosité maximale) sont généralement utilisés pour évaluer les surfaces.

R_a : mesure l'écart moyen entre les pics et les creux de surface sur la longueur d'échantillonnage spécifiée.

R_z : quant à lui, mesure la profondeur maximale de la vallée par rapport à la surface de référence sur une longueur d'échantillon donnée.

Revêtement avec traitement thermique : $R_a = 3,960\mu\text{m}$, $R_z = 28,336\mu\text{m}$

Revêtement sans traitement thermique : $R_a = 4,905\mu\text{m}$, $R_z = 40,668\mu\text{m}$

En résumé, l'interprétation des résultats suggère que la rugosité du revêtement post pulvérisé

N'est pas uniforme. La présence de creux importants peut indiquer des défauts du matériau ou de conditions de pulvérisation inégales, tandis que la présence de pics élevés indique un dépôt inégal ou la formation de particules et d'agrégats sur la surface.

III.5 propriétés mécanique des dépôts Cr_3C_2 :

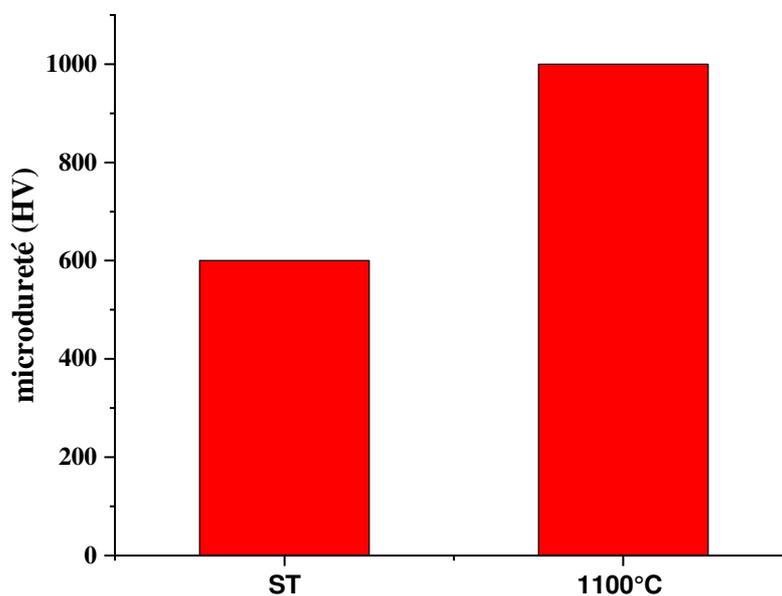


Figure III. 8 : la micro dureté des échantillons traités et sans traitement thermique

Les résultats de micro dureté indiquent la dureté superficielle d'un matériau, mesurés à l'échelle microscopique. Dans notre cas, on a deux valeurs de micro dureté pour un même matériau, l'une correspondant à un dépôt avec traitement thermique et l'autre sans traitement

- Pour le dépôt non traité : 600 HV
- Pour le dépôt traité : 1000 HV

La dureté accrue du dépôt traité (1000 HV) par rapport au dépôt non traité (600 HV) indique

Une amélioration significative des propriétés mécaniques du matériau après traitement. Cette augmentation de dureté peut être attribuée à divers facteurs, tels que la modification de la structure cristalline, la présence de phases plus dures ou une densification du matériau due au traitement.

Les résultats indiquent que le traitement a eu un effet bénéfique sur la dureté du dépôt, le rendant plus résistant et durable dans des applications où la dureté superficielle est importante.

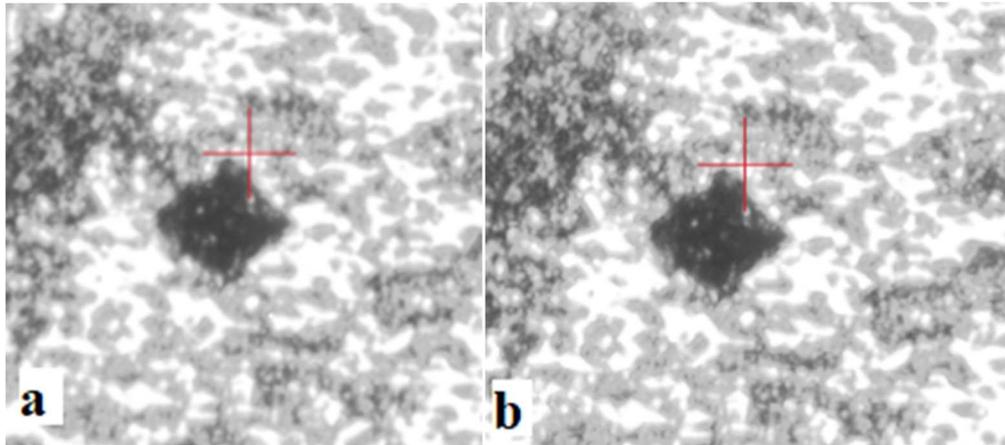


Figure 9 :Les empreintes micro dureté

(a) : dépôt sans traitement thermique

(b) : dépôt avec traitement thermique

III.7 le comportement à la corrosion de revêtements Cr_3C_2

III.7.1 Détermination la perte de masse :

Après avoir effectué la pesé des échantillons a chaque occasion (voir le tableau III.1) nous avons obtenu la perte de masse en utilisant la formule suivante :

$$\Delta m = m_i - m_f / S$$

	Cr ₃ C ₂ (avec traitement)		Cr ₃ C ₂ (sans traitement)	
<i>m</i> ₀ (g)	18 ,40 g		20,34 g	
5jours	<i>m</i> ₁ = 18,49g	$\Delta m_1 = 0,04 \text{ g}$	<i>m</i> ₁ = 20,38 g	$\Delta m_1 = 0,017 \text{ g}$
10jours	<i>m</i> ₂ = 18,60g	$\Delta m_2 = 0,088 \text{ g}$	<i>m</i> ₂ = 20,57 g	$\Delta m_2 = 0,102 \text{ g}$
15jours	<i>m</i> ₃ = 18,61g	$\Delta m_3 = 0,093 \text{ g}$	<i>m</i> ₃ = 20,58 g	$\Delta m_3 = 0,106 \text{ g}$
25 jours	<i>m</i> ₄ = 18,63g	$\Delta m_4 = 0,10 \text{ g}$	<i>m</i> ₄ = 20,50g	$\Delta m_4 = 0,071 \text{ g}$
30jours	<i>m</i> ₅ = 18,67g	$\Delta m_5 = 0,12 \text{ g}$	<i>m</i> ₅ = 20,55g	$\Delta m_5 = 0,093 \text{ g}$

Tableau III.1 : Les résultats de la perte de masse

Dans cette partie nous allons étudier la perte de masse sous forme de courbes pour les différents échantillons avec un dépôt traité et dépôt non traité.

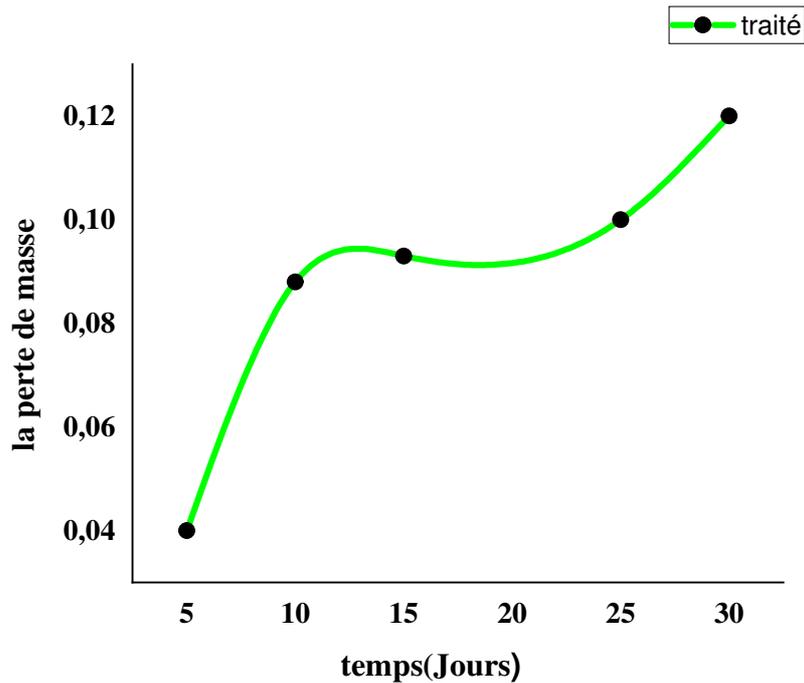


Figure III.10 : la courbe de perte de masse pour échantillon traité

Il semble que la perte de masse de l'échantillon augmente progressivement tout au long du traitement thermique et ce jusqu'à la fin de l'essai de 30 jours. Cela suggère que le traitement thermique entraîne une diminution constante de la masse de l'échantillon sur cette période de temps donnée.

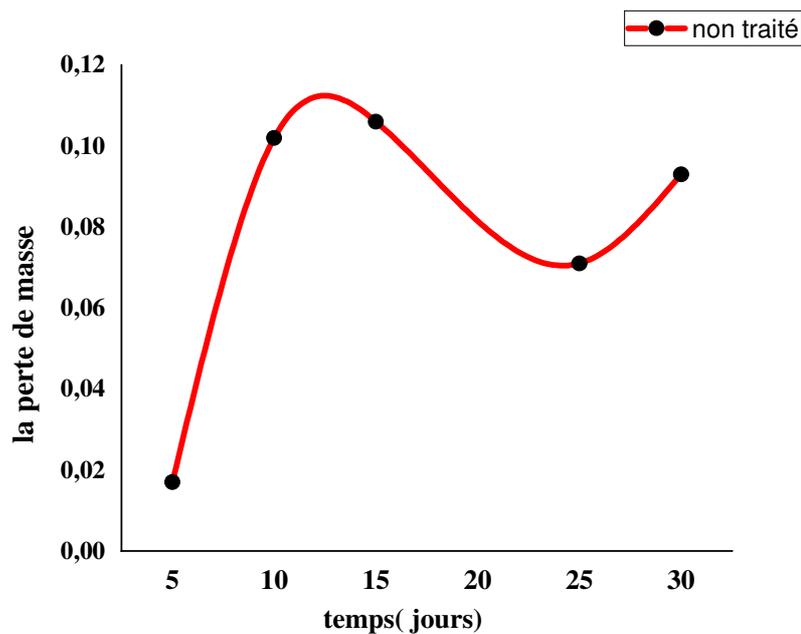


Figure III.11: la courbe de perte de masse pour échantillon sans traitement thermique

L'observation indique que la perte de masse de l'échantillon sans traitement thermique suit un comportement fluctuant au cours du temps. Initialement, il y a une augmentation rapide de la perte de masse, atteignant un pic à 0,106 g. Ensuite, cette perte de masse diminue jusqu'à atteindre 0,071 g, avant d'augmenter à nouveau. Ce comportement pourrait être indicatif de différents processus physiques ou chimiques affectant l'échantillon, à l'oxydation, ou d'autres facteurs environnementaux qui peuvent influencer la masse de l'échantillon de manière non linéaire.

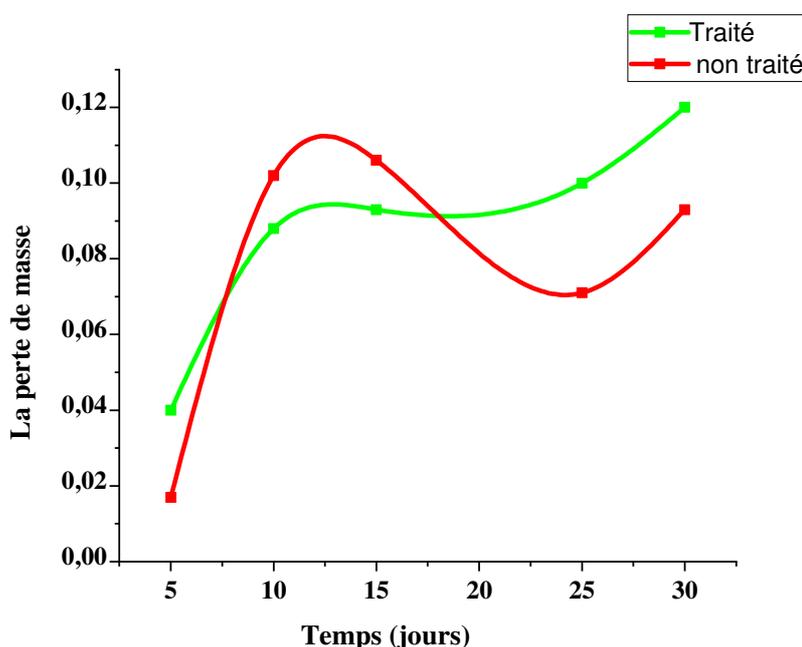


Figure III.12: courbe comparative de perte de masse pour deux échantillons

[5 à 15 Jours] : on remarque que la perte de masse d'échantillon sans traitement thermique est plus élevée et augmente rapidement jusqu'à la valeur maximale (0,106g), par contre la perte de masse d'échantillon avec traitement thermique est moins basse.

[20 à 30 Jours] : la perte de masse d'échantillon traité est plus importante que celle de la perte de masse d'échantillon sans traitement thermique

L'augmentation de la masse des échantillons, qu'ils aient été traités thermiquement ou sans traitement, après immersion dans une solution saline 3.5 % de NaCl

On remarque augmentation de la perte de masse de deux échantillons avec traitement thermique et sans traitement thermique pendant 30 jours, Ceci s'explique probablement due à des processus tels que la corrosion, la dissolution et les réactions chimiques qui altèrent la composition ou la structure des matériaux constitutifs de l'échantillon.

Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale :

Ces dernières années, le procédé de projection thermique est devenu une technique courante dans le domaine des traitements de surface, largement utilisé pour augmenter la durée de vie des pièces mécaniques. Cette méthode permet de réaliser divers revêtements métalliques sur des pièces mécaniques. Ces revêtements ont pour but de protéger la surface d'une pièce mécanique (substrat), de lutter contre la corrosion et l'usure. En effet, elle permet de résoudre de nombreux problèmes inhérents aux matériaux, à condition de bien maîtriser les paramètres de projection.

Notre travail avait pour objectif d'étudier la caractérisation d'un dépôt de carbure de chrome Cr₃C₂, élaboré par la technique HVOF, sur un acier inoxydable largement utilisé dans l'industrie mécanique.

Au vu des résultats obtenus et de leurs interprétations, on peut dire que :

- Les caractérisations par microscope optique, ont mis en évidence le rôle de la nouvelle morphologie obtenue après projection thermique à technique HVOF dans l'amélioration des propriétés mécaniques particulièrement la résistance à l'usure par abrasion de l'acier inoxydable.
- Les mesures de micro dureté des échantillons, ont montré que le dépôt avec traitement thermique à 1100 C° présente des valeurs les plus élevées par rapport au dépôt sans traitement thermique.
- Les résultats montrent une augmentation de la perte de masse de deux échantillons avec traitement et sans traitement thermique pendant 30 jours, après immersion dans une solution saline.
- Les résultats suggèrent que la rugosité n'est pas uniforme. La présence de creux importants peut indiquer des défauts du matériau ou de conditions de pulvérisation inégales, tandis que la présence de pics élevés indique un dépôt inégal ou la formation de particules et d'agrégats sur la surface.
- Les observations des différentes analyses structurales par diffraction des rayons X (DRX) du carbure de chrome (des dépôts traités et dépôts non traités) :
- Les observations des différentes analyses structurales par diffraction des rayons X (DRX) du carbure de chrome (des dépôts traités et dépôts non traités) :

Conclusion générale

- ✓ La présence d'un carbure de chrome de formule Cr_7C_3
- ✓ L'apparition d'un oxyde de chrome type CrO_2
- ✓ Révèle la formation d'un autre carbures type Cr_3C_2 .
- ✓ Un oxyde de chrome de type Cr_2O_3
- ✓

Références
Bibliographiques

Références Bibliographique

- [1] A. Prôner, revêtement par projection thermique, techniques de l'ingénieur : traité matériaux métalliques, 1999 vol M 1645 PP1-20.
- [2] M.U.Schoop, Apparatus for spraying molten metal and other fusible substances. Application filed February 19, 1914 and US Patent 1,133,507 Patented Mar, (1915).
- [3] E. Muehlbrger, Method and apparatus for effecting high-energy dynamic coating of substrates, US patent 3,839,618 oct, 1, 1974..
- [4] E. Muehlberger. A high energy plasma coating process, Welding Institute, 7-th International Metal Spraying Conference, (1974) 245-256.
- [5] R. W Smith, R. Novak, Advances and applications in U.S. thermal spray technology. I. Technology and materials, Powder metallurgy international, Vol. 23(3) (1991) 147-155.
- [6] BOUSSAFEL, Hacene et LAKHALI, Houssem. *Elaboration et caractérisation des couches minces de TiO₂ déposées sur un acier 316L par la méthode PVD-MAGNETRON*. 2016. Thèse de doctorat. Ecole Nationale Supérieure des Mines et de la Métallurgie. Amar Laskri. Annaba.
- [7] HLIOUI, Sami. *Étude d'une Machine Synchrone à Double Excitation Contribution à la mise en place d'une plate-forme de logiciels en vue d'un dimensionnement optimal*. 2008. Thèse de doctorat. Université de Technologie de Belfort-Montbéliard.
- [8] Smith C.W., "The basic principles of flamespraying." Science and Technology of Surface Coating, 1974, pp. 262-270.
- [9] BRADAI, Mohand Amokrane, YOUNES, Rassim, SADEDDINE, Abdelhamid, *et al*. Propriétés structurales et mécaniques des dépôts à base Nickel projetés thermiquement par le procédé à flamme. 2015.

Références Bibliographique

- [10] SOKOLOV DmitryEvguenievitch, Thèse de doctorat, Contribution au développement de la projection thermique à très faible pression, Université de technologie de Belfort, 10 mars 2009.
- [11] Olivier PREZIOSA, Elaboration par projection thermique de barrières de diffusion inement structurées dans le cadre de l'élaboration d'aluminium et étude de leurs performances, Thèse pour l'obtention de grade de docteur en science et génie des matériaux, Université de Limoges (2010).
- [12] Materials Engineering Institute courses. ASM International, Materials Park, OHIO. S. Bouaricha (2002)
- [13] Handbook of Thermal Spray Technology. J. Davis. ASM International (2004)
- [14] Site web <http://www.gordonengland.co.uk>, Nature of Thermal Spray Coatings.
- [15] R. YOUNES, thèse doctorat « étude du comportement mécanique et microstructural des revêtements en céramique obtenue par projection thermique³ », université de béjaia.2016
- [16] TLILI, Samira. *Elaboration et Caractérisation des Revêtements durs de Molybdène et des Couches Nitrocarbures Déposés sur une Fonte Grise*. 2013. Thèse de doctorat. Université Badji Mokhtar de Annaba.
- [17] CHABROL-F. SCHUSTER, Caractérisation et contrôle des couches (1998).
- [18] A. LAMRAOUI, thèse de doctorat « traitement de surface par texturation laser : une alternative "propre" de préparation de surface pour la projection thermique », Université de Belfort-Montbéliard, France, 2011.
- [19] Y. Danlos, thèse de doctorat « Etude de l'association laser-projection thermique pour l'optimisation de revêtements », Université de Belfort-Montbéliard, France, 2009.
- [20] BENALI, Mokhles. *Effet du traitement thermique des fibres sur les propriétés des composites bois-polymère*. 2016. Thèse de doctorat. Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue.
- [21] BADJI, Riad. *Influence des traitements thermiques à haute température sur l'évolution de la texture et de la microstructure des soudures d'acier inoxydable duplex 2205*. 2008. Thèse de doctorat. Université Paris-Nord-Paris XIII.

Références Bibliographique

- [22] CÔTÉ, Colin. Analyse comparative de deux méthodes d'analyse de cycle de vie simplifiée (ACVS) utilisables pour la conception de produits. 2006.
- [23] KWON, S. C., KIM, M., PARK, S. U., *et al.* Characterization of intermediate Cr-C layer fabricated by electrodeposition in hexavalent and trivalent chromium baths. *Surface and Coatings Technology*, 2004, vol. 183, no 2-3, p. 151-156.
- [24] BACHRAOU, Rahma. *Etude de l'oxydation à haute température d'un alliage réfractaire à base de Nickel*. 2016. Thèse de doctorat. Ecole Nationale Supérieure des Mines et de la Métallurgie. Amar Laskri. Annaba.

Résumé :

Cette étude se concentre sur la caractérisation des dépôts de carbure de chrome obtenus par la technique de projection thermique HVOF. Elle a mis en lumière l'importance de cette caractérisation pour évaluer la qualité et les performances des revêtements. Différentes techniques, telles que la métallographie, la diffraction des rayons X, la microdureté et le profilomètre, sont utilisées pour obtenir une compréhension approfondie des propriétés des dépôts. Les résultats obtenus peuvent contribuer à l'optimisation des procédés de projection thermique et à répondre aux exigences des applications industrielles.

Abstract:

This study focuses on the characterization of chromium carburetor deposits obtained by the HVOF thermal spraying technique. It highlighted the importance of this characterization for evaluating the quality and performance of coatings. Different techniques, such as metallography, X-ray diffraction, microhardness and profilometer, are used to obtain an in-depth understanding of the deposit properties. The results obtained can contribute to the optimization of thermal spraying processes and to meet the requirements of industrial applications.

ملخص

تركز هذه الدراسة على توصيف رواسب مكرين الكروم التي تم الحصول عليها بواسطة تقنية الرش وسلط الضوء على أهمية هذا التوصيف لتقييم جودة وأداء الطلاءات. تُستخدم تقنيات HVOF الحراري مختلفة، مثل علم المعادن، وحيود الأشعة السينية، والصلابة الدقيقة، ومقياس الملف الشخصي، للحصول على فهم متعمق لخصائص الرواسب. يمكن أن تساهم النتائج التي تم الحصول عليها في تحسين عمليات الرش الحراري وتلبية متطلبات التطبيقات الصناعية.