



République Algérienne Démocratique et Populaire



Ministère de l'Enseignement Supérieur Et de la recherche scientifique

Université Abderrahmane Mira - Bejaia

Faculté de Technologie

Département de Génie Mécanique

Mémoire Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Génie des matériaux

Présenté par :

SAIT Nadjat

Thème

Effet de traitement thermique sur le comportement électrochimique des revêtements Cr_2O_3 obtenus par le procédé de projection thermique HVOF

Soutenu le 11-06-2025 devant le jury composé de :

Pr. RABOUHI .H

Président

Pr BRADALM

Rapporteur

Pr. YOUNES. R

Examinatrice

Dr. BOUKLOUCHE. I

Invité

Année Universitaire 2024/2025

Populaire et Démocratique Algérienne République
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Déclaration sur l'honneur
Engagement pour respecter les règles d'authenticité scientifique dans
l'élaboration d'un travail de recherche

Arrêté ministériel n° 1082 du 27 décembre 2020 (*)
fixant les règles relatives à la prévention et la lutte contre le plagiat

Je soussigné,

Nom : Sait
Prénom : Naïjet
Matricule : 1919.33.00.97.81
Spécialité et/ou Option : Génie des Matériaux
Département : Génie Mécanique
Faculté : Science et Technologie
Année universitaire : 2024/2025

et chargé de préparer un mémoire de (Licence, Master, Autres à préciser) :

Intitulé : Effet de Traitement Thermique sur le
..... Comportement électrochimique des revêtement Cr₂O₃
..... obtenu par le procédé de projection thermique HVOF

déclare sur l'honneur, m'engager à respecter les règles scientifiques, méthodologiques,
et les normes de déontologie professionnelle et de l'authenticité académique requises dans
l'élaboration du projet de fin de cycle cité ci-dessus.

Fait à Béjaïa le
08/07/2025

Signature de l'intéressé

(*) Lu et approuvé

(*) Arrêté ministériel disponible sur le site www.univ-bejaia.dz/formation (rubrique textes réglementaires)

Remerciements

Remerciements

Avant toute chose, je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers Dieu, qui m'a accordé la santé, la volonté et le courage nécessaires pour mener à bien ce travail.

Je souhaite tout d'abord adresser mes remerciements les plus chaleureux à mon promoteur, Monsieur YOUNES RASSIM, pour ses conseils éclairés, sa disponibilité constante et son soutien sans faille. Son accompagnement m'a permis de mener cette recherche avec sérénité et confiance.

J'associe également à ces remerciements Monsieur BOUKLOUCHE Issam, pour la pertinence de ses conseils et l'orientation précieuse qu'il m'a apportée tout au long de cette étude.

Ma reconnaissance la plus sincère va aussi aux membres du jury, qui m'ont fait l'honneur de lire ce mémoire et d'enrichir ce travail par leurs observations, suggestions et la richesse de leur expérience.

Sur un plan plus personnel, je dédie ce mémoire à mes parents, ainsi qu'à mon frère et ma sœur, pour leur amour inconditionnel, leur patience et leur soutien indéfectible tout au long de mon parcours.

Enfin, je remercie du fond du cœur toutes celles et ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail, même si leur nom n'est pas mentionné ici.

Merci à vous tous !

Dédicace

Dédicace

*Je souhaite commencer ces dédicaces par une pensée toute particulière à mes
parents.*

*À mon père et à ma mère, véritables piliers de ma vie, j'exprime ma profonde
gratitude pour leur patience, leur amour et leur soutien indéfectible. Merci à eux,
du fond du cœur.*

À mes frères et sœurs,

À l'ensemble de mes enseignants,

À tous mes amis,

*Ainsi qu'à toute la promotion de la deuxième année Master Génie des Matériaux
2024/2025,*

Recevez chacun mes remerciements les plus sincères.

Sommaire

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I : Elément bibliographiques	
Introduction	2
I : La projection thermique	2
I.1 : Historique	2
I.2 : Principe du procédé	3
I.3 : Différents types de projection	3
I.3.1 : projection flamme	3
I.3.2 : projection flamme poudre	4
I.3.3 : Projection flamme fil	4
I.3.4 : flamme hypersonique	5
I.3.5 : projection au canon à détonation	5
I.3.6 : HVOF	6
I.3.7 : Projection par arc électrique entre 2 fils	7
I.3.8 : Projection plasma	8
I.3.9 : Caractéristiques des différentes techniques de la projection thermique	9
I.4 : Différentes technique de préparation de surface	9
I.4.1 : Influence de la rugosité	10
I.4.2 : Dégraissage	10
I.4.3 : sablage	10
I.4.4 : Préchauffage	11
I.5 : Construction d'un dépôt	11
I.5.1 : Etalement des particules	11

I.5.2 : Phénomènes d'oxydation	13
I.5.3 : Oxydation des gouttelettes	14
I.6 : Paramètres de projection influant sur le dépôt	15
I.7 : L'oxyde de chrome	16
I.7.1 : Structure cristalline	16
I.7.2 : Propriétés chimiques et thermiques	18
I.7.3 : Application industrielles du Cr_2O_3	18

Chapitre II : Matériaux et Techniques Expérimentales

Introduction	20
II.1 : Matériaux utilisé	20
II.1.1 : Substrat	20
II.1.2 : Dépôt réalise	20
II.2 : Elaboration d'échantillons	20
II.2.1 : Pistolet de projection utilisée (HVOF)	21
II.3 : Traitement thermique	21
II.4 : Caractérisation métallographique	23
II.4.1 : Polissage	23
II.4.2 : la morphologie.....	23
II.4.3 : Diffraction des rayons X (DRX).....	24
II.5 : Caractérisation mécanique	25
II.5.1 : Micro dureté Vickers	25
II.5.2 : Profil mètre	25
II.6 : Comportement à la corrosion.....	26
II.6.1 : la perte de masse	27

Chapitre III : Résultats et discussions

III.1 : Introduction.....	28
III.2 : Analyse structurale par diffraction des rayons X.....	28
III.3: Microscope optique	28
III.4 : La micro dureté	29
III.5 : Profil mètre	30
III.6 : Comportement à la corrosion.....	32
III.6.1 : Potentiel à l'abandon.....	33
III.6.2 : les droits de TAFEL.....	34
III.6.3 : la perte de masse.....	36

Liste des figures

Liste des figures

Figure I.1 : principe de la projection thermique.....	3
Figure I.2 : schéma de procédé flamme poudre.....	4
Figure I.3 : Schéma de procédé flamme-fil.....	5
Figure I.4 : principe de fonctionnement d'un canon à détonation.....	6
Figure I.5 : principe de fonctionnement de HVOF.....	7
Figure I.6 : schéma de principe du fonctionnement arc électrique entre deux fils.....	8
Figure I.7 : un schéma de procédé de projection plasma.....	9
Figure I.8 : Type de morphologie de particules projetées.....	12
Figure I.9 : image par microscopie à balayage de l'étalement de lamelles de CuAl sur une surface rugueuse.....	13
Figure I.10 : schéma de principe de la construction de dépôt par projection thermique.....	15
Figure I.11 : poudre d'oxyde de chrome Cr_2O_3	16
Figure I.12 : la structure de Cr_2O_3 . Les atomes d'oxygène sont aux sommets des octaèdres et les cations sont au centre des octaèdres.....	17
Figure II.1 : principe de fonctionnement d'une pistole HVOF.....	21
Figure II.2 : four utilisé au niveau du hall technologie.....	22
Figure II.3 : échantillon refroidi à l'air	22
Figure II.4 : échantillon refroidir dans le four.....	23
Figure II.5 : polisseuse mécanique à papier abrasif.....	23
Figure II.6 : microscope optique.....	24
Figure II.7: Dispositif Diffraction X : X'PERT PRO MRD de chez PANalytical.....	24
Figure II.8 : machine de micro dureté Vickers.....	25
Figure II.9 : Profil mètre.....	25
Figure II.10 : les échantillons dans la solution.....	26

Figure II.11 : a) potentiostat/galvanostat type PGP201, b) d'une cellule électrochimique à trois électrodes.....	26
Figure III.1 : spectre de diffraction des rayons x pour le dépôt non traité.....	28
Figure III.2 : spectre de diffraction des rayons x pour le dépôt traité à 800°C.....	29
Figure III.3 : microstructure du dépôt sans traitement thermique.....	29
Figure III.4 : microstructure du dépôt avec traitement thermique à 800°C.	30
Figure III.5 : les empreintes des l'échantillon traité.....	30
Figure III.6 : les empreintes des l'échantillon non traité.....	31
Figure III.7 : la microdureté des échantillons traité et non traité.....	31
Figure III.8 : Profil de rugosité de dépôt Cr ₂ O ₃ sans traitement thermique.....	32
Figure III.9 : Profil de rugosité de dépôt Cr ₂ O ₃ avec traitement thermique.....	33
Figure III.10 : potentiel à l'abandon en fonction du temps.....	34
Figure III.11 : Courbes de polarisation potentiodynamique.....	35
Figure III.12 : la perte de masse en fonction du temps pour l'échantillon non traité	36
Figure III.13 : la perte de masse en fonction du temps pour l'échantillon traité.....	37
Figure III.14 : la perte de masse en fonction du temps pour l'échantillon non traité et traité à 800°C.....	37
Figure III.15 : Morphologie de la corrosion de Cr ₂ O ₃ non traité après 38j d'immersion.....	38
Figure III.16 : Morphologie de la corrosion de Cr ₂ O ₃ traité après 38j d'immersion.....	39

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau I.1 : compare les principales caractéristiques des différentes techniques de la projection thermique.....	9
Le tableau I.2 : quelques propriétés physique-chimique de l'oxyde de chrome.....	18
Tableau II.1 : composition chimique de l'acier inoxydable X37Cr11 déterminée par fluorescence X	20
Tableau II.2 : composition chimique (en %) d'oxyde de chrome.....	20
Tableau III.1 : la rugosité de dépôt non traité.....	32
Tableau III.2 : la rugosité de dépôt traité.....	33
Tableau III.3 : paramètres électrochimique de(le substrat, le revêtement Cr_2O_3 sans traitement et le revêtement Cr_2O_3 avec traitement).....	35
Tableau III.4 : la perte de masse pour l'échantillon non traité.....	36
Tableau III.5 : la perte de masse pour l'échantillon traité.....	36

Introduction Générale

Introduction Générale

Dans de nombreuses industries, les aciers sont largement utilisés en raison de leurs excellentes propriétés mécaniques, leur disponibilité et leur coût relativement faible. Cependant, lorsqu'ils sont exposés à des environnements toxiques, notamment à haute température, en milieu corrosif ou soumis à de fortes contraintes mécaniques, ces matériaux subissent des phénomènes de dégradation tels que l'usure, l'oxydation ou la corrosion. Ces mécanismes de dégradation peuvent considérablement affecter la durée de vie et la fiabilité des composants métalliques.

Face à ces contraintes, la protection de surface devient une solution essentielle pour améliorer la résistance des matériaux. Parmi les différentes techniques disponibles, les revêtements par projection thermique ont suscité un intérêt croissant. La projection thermique à haute vitesse (HVOF – high velocityoxy-fuel) constitue une méthode particulièrement efficace, adhérentes et résistantes à l'usure et à la corrosion.

Dans ce contexte, l'oxyde de chrome (Cr_2O_3) s'est imposé comme un matériau de choix pour les revêtements protecteurs, en raison de ses excellentes propriétés physico-chimiques, telles que sa dureté élevée, sa stabilité thermique et sa résistance à la corrosion. Pour améliorer encore les performances du revêtement, surtout contre la corrosion, on a appliqué un traitement thermique après la projection. Ce traitement a été réalisé à une température de 800°C . Il permet de changer la structure interne du revêtement et d'améliorer sa dureté ainsi que sa résistance à la corrosion.

Notre étude a pour objectif d'analyser l'effet du traitement thermique sur le comportement électrochimique d'un revêtement à base de Cr_2O_3 , appliqué par la technique de projection thermique HVOF. Pour cela, nous avons réalisé une série de tests, notamment des mesures de dureté, de rugosité et de résistance à la corrosion, avant et après traitement thermique à 800°C .

Le travail est organisé en trois chapitres :

- ✓ Chapitre I présente les informations de base sur la projection thermique et l'oxyde de chrome.
- ✓ Chapitre II présente les matériaux et les techniques utilisées pour analyser les résultats.

- ✓ Chapitre III montre les résultats obtenus et compare les échantillons traité et non traité.

Chapitre I

Etude bibliographique

Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation des principaux éléments bibliographiques relatifs aux principaux thèmes abordés dans cette mémoire. On présentera en premier lieu un aperçu de la projection thermique, des différents procédés de projection thermique et formation des revêtements obtenus par projection thermique. En second lieu, des généralités sur le matériau d'apport (Cr_2O_3) seront exposées, suivies d'une présentation des revêtements à base d' Cr_2O_3

I : La projection thermique

I.1 : Historique

La projection thermique est l'une des plus anciennes techniques de revêtement de surface. Son développement remonte à plus de 100 ans, avec les travaux de l'ingénieur suisse Max Ulrich Schoop. En observant l'impact de balles de plomb sur un mur en béton, il eut l'idée d'utiliser la projection de métal fondu pour recouvrir des surfaces. Il débute avec un creuset de métal fondu et de l'air chauffé, puis en 1911, il perfectionne la technique en intégrant un chalumeau et du métal sous forme de poudre par un fil métallique, donnant naissance au premier pistolet de projection. Trois ans plus tard, il brevète le procédé de projection par arc électrique entre deux fils, ouvrant la voie à de nombreuses applications industrielles, notamment dans la protection contre la corrosion, la réparation et le rechargement. Ce procédé, connu sous le nom de <<schoopage>>, se répand rapidement à l'échelle mondiale.

Par la suite, deux types de sources d'énergie sont développés : l'une basée sur la combustion et l'autre sur les décharges électriques. La combustion domine d'abord avec l'apparition, dans les années 1950, du canon à détonation (D-gun Coatings), breveté par praxair surface technologie. Puis, l'essor des matériaux réfractaires, notamment dans l'aérospatial, mène à l'adoption de la projection plasma. Facilitée par l'amélioration des générateurs de plasma. Dès 1960, la technologie APS (Atmosphérique plasma spaying) se popularise grâce à l'amélioration de la longévité des torches.

Dans les années 1970, la projection plasma sous faible pression (VPS ou LPPS) voit le jour avec les travaux de muehlberger. Ce procédé permet d'obtenir des dépôts métalliques denses avec une meilleure adhérence et sans oxydation. Enfin, en 1983, la technique HVOF (High velocityOxy-Fuel), développée par Browning Engineering, apporte une nouvelle avancée, offrant des revêtements résistants aux hautes températures, notamment pour les turbines à gaz du secteur aéronautique et spatial.[1]

I.2 : Principe du procédé

La projection thermique est un procédé de traitement de surface qui consiste à chauffer un matériau sous forme de poudre, de fil ou de baguette jusqu'à ce qu'il atteigne un état fondu ou semi-fondu en utilisant une source de chaleur telle qu'une flamme, un arc électrique ou un plasma. Puis à le projeter à grande vitesse sur un substrat afin de créer un revêtement. La (Figure I.1) représente un schéma de principe de la projection thermique.[2]

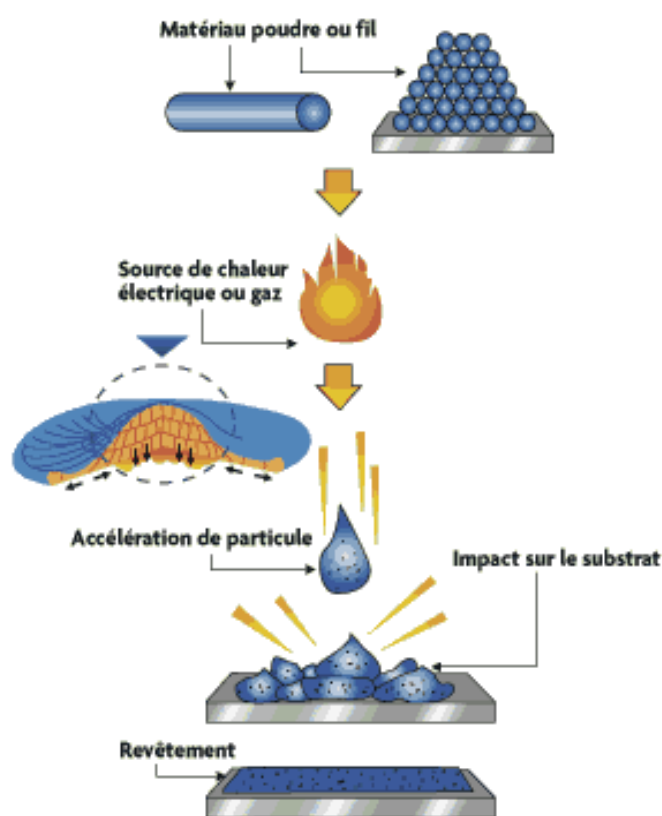


Figure I.1 : principe de la projection thermique

I.3 : Différents types de projection

Il existe plusieurs types de projection thermique, classés selon la source d'énergie utilisée pour chauffer et accélérer les particules. Voici les principaux types de projection thermique :

I.3.1 : projection flamme

La projection par flamme est un procédé qui consiste à projeter des matériaux ayant un point de fusion inférieur 2800°C et ne sublimant pas, en utilisant l'énergie thermique produite

par la combustion d'un carburant et d'oxygène, à une température variant de 2800°C à 3150°C. On distingue deux types de projection par flamme (la projection flamme poudre et la projection flamme fil). [3]

I.3.2 : projection flamme poudre

Dan ce procédé, on utilise une flamme pour chauffer et propulser des particules de poudre vers une surface à recouvrir. La flamme peut atteindre environ 3000°C, mais les particules projetées restent généralement en dessous de 2000 °C. Elles se déplacent lentement à environ 50 m/s.

La buse est placée à une distance de 100 à 200 mm de la surface, ce qui permet aux particules de rester suffisamment longtemps dans la flamme pour fondre avant d'atteindre le substrat. Ce procédé permet de déposer une fin couche de matériau, de quelques centièmes à quelques dixièmes de millimètre, avec une vitesse de dépôt de 2 à 3 kg/h. l'échauffement de la surface reste limite moine de 250 °C ce qui évite d'endommager le support.

Les matériaux les plus utilisés sont des alliages spéciaux, souvent à base de nickel ou de cobalt, avec du bore, du silicium et parfois des particules dures comme des carbures. Certains matériaux organiques peuvent aussi être appliqués avec cette technique. [4]

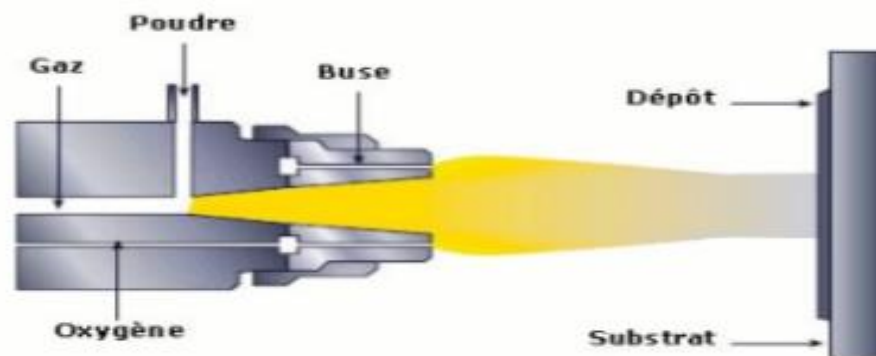


Figure I.2 : schéma de procédé flamme poudre

1.3.3 : Projection flamme fil

Dans ce procédé le matériau d'apport utilisé est sous forme de fil, de cordon, ou de baguette. Il fonctionne avec les mêmes gaz que la projection flamme poudre, mais on ajoute de l'air comprimé pour pulvériser le métal fondu. Les particules projetées vont plus vite

(environ 150m/s), l'extrémité du fil ou de la baguette peut chauffer jusqu'à 95% de la température de la flamme, ce qui permet aussi de projeter des céramiques.

La quantité de matériau déposée varie entre 1kg/h et plus de 30kg/h, selon le type de matériau, la taille du fil ou de la baguette, et le résultat souhaité. [4]

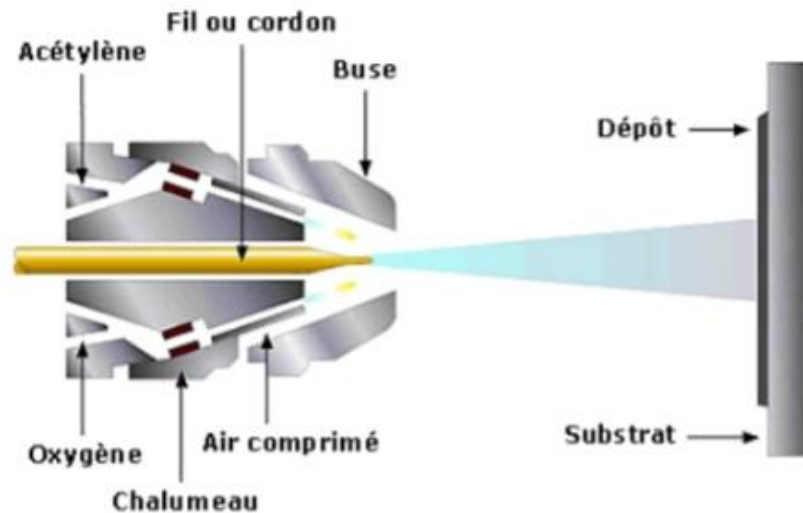


Figure I.3 : Schéma de procédé flamme-fil

I.3.4 : flamme hypersonique

Cette projection tient son nom de la vitesse très élevée de sortie des gaz qui se situe entre Mach 1 et Mach 2, et est présentée par deux procédés qui sont :

- La projection hypersonique à tir discontinu : canon à détonation.
- La projection hypersonique à tir continu : HVOF (High Velocity Oxy Fuel). [3]

I.3.5 : projection au canon à détonation

Dans ce procédé, un mélange gazeux, généralement oxygène-acétylène, est enflammé pour créer une détonation. Cette explosion des particules de matériau, transportées par un gaz inerte, à travers un canon refroidi à l'eau. En atteignant une vitesse de 900 à 1300 m/s, ces particules sont envoyées sur la surface à traiter. Entre chaque tir, le canon est nettoyé avec un jet d'azote. Ce processus permet de former un revêtement dense et solide, avec une porosité inférieure à 1% et une excellente adhérence plus de 80 MPa. [5]

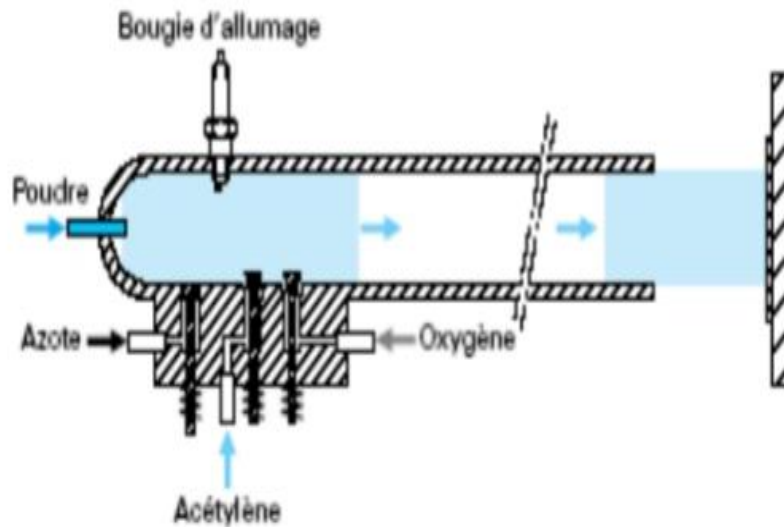


Figure I.4 : principe de fonctionnement d'un canon à détonation

I.3.6 : HVOF

La technique de projection HVOF (high velocityoxyfuel) est également qualifiée de supersonique en raison de la vitesse extrêmement élevée des particules qui la caractérisent.

Le processus repose sur une réaction de combustion à haute pression se produisant dans une chambre spécialement conçue à cet effet. Cette réaction génère une flamme dont la température varie entre 2500 et 3200 °C, accompagnée d'écoulements gazeux très énergétique et ultra-rapide, pouvant dépasser plusieurs fois la vitesse du son. Les poudres destinées à la pulvérisation sont introduites axialement dans ces gaz en expansion à l'aide d'un gaz porteur neutre. Une fois injectées, elles sont portées à des températures comprises entre 1500 et 2500 K, puis accélérées à travers une tuyère convergent-divergente, atteignant des vitesses allant de 300 à 600 m/s.[3]

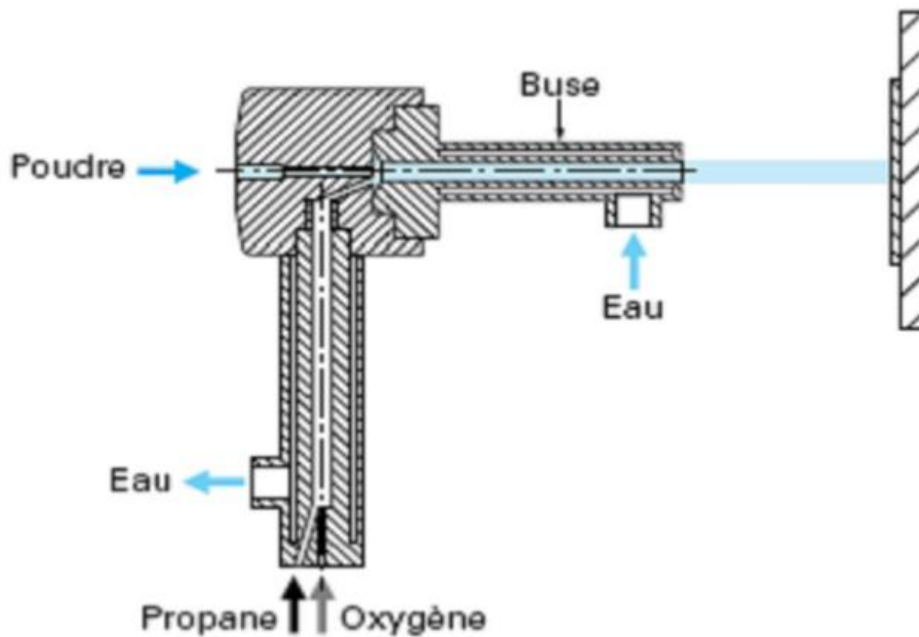


Figure I.5 : principe de fonctionnement de HVOF.

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 extrêmement élevée des particules projetées par les procédés HVOF entraîne l'apparition de multiples (shockdiamonds), signe caractéristique d'un écoulement supersonique. [3]

I.3.7 : Projection par arc électrique entre 2 fils

La projection par arc fil consiste à créer un arc électrique entre deux fils métalliques, qui servent de matériau d'apport. La chaleur de l'arc fait fondre ces fils, et un jet d'air comprimé pulvérise le métal en fines gouttelettes pour le projeter sur une surface. Les pistolets utilisés pour cette technique fonctionnent avec un courant continu (25 à 40 V, 100 à 500 A). Ils sont composés de deux parties :

- Une pour entraîner les fils
- L'autre pour les faire fondre et projeter le matériau.

Les fils, enroulés en bobines, sont acheminés par un système de rouleaux vers la zone de fusion. Un flux d'air comprimé, soufflé derrière le point où les fils se croisent, accélère la pulvérisation du métal en fusion. Pour améliorer le dépôt, un second gaz peut être injecté autour du premier jet d'air. [6]

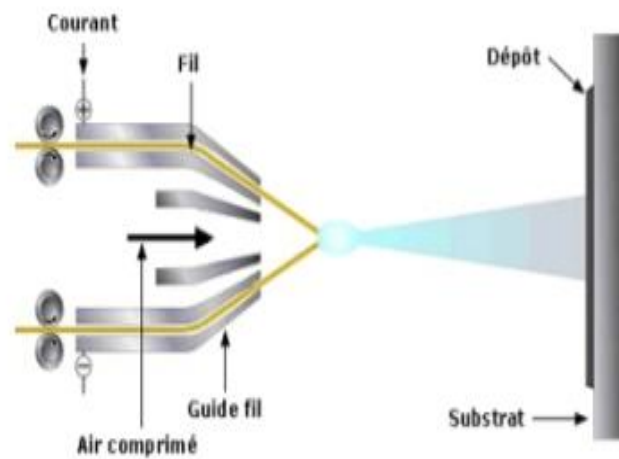


Figure I.6 : schéma de principe du fonctionnement arc électrique entre deux fils

I.3.8 : Projection plasma

Le plasma est d'abord déclenché par une source externe, comme un arc électrique à haute tension. Cet arc crée une zone conductrice qui est maintenue grâce aux courants induits. Le plasma se forme dans un tube en quartz entouré par un inducteur qui génère un champ magnétique à haute fréquence. Les particules sont injectées par un dispositif refroidi à l'eau, en passant par l'axe du tube. La vitesse du gaz dépend du diamètre de la torche (environ 50mm), ce qui prolonge la durée de séjour des particules dans le plasma et permet de faire fondre les plus grosses (environ 100 μ m).

Cette technique de projection plasma à haute fréquence peut être réalisée sous une atmosphère inerte ou réductrice, avec une pression comprise entre 10 et 200 KPa. Un divergent de type Laval peut être utilisé pour atteindre des vitesses supersoniques lorsque la pression de la chambre est d'environ 6KPa. Pendant la projection, la torche reste fixe, c'est donc le support qui doit être déplacé. [7]

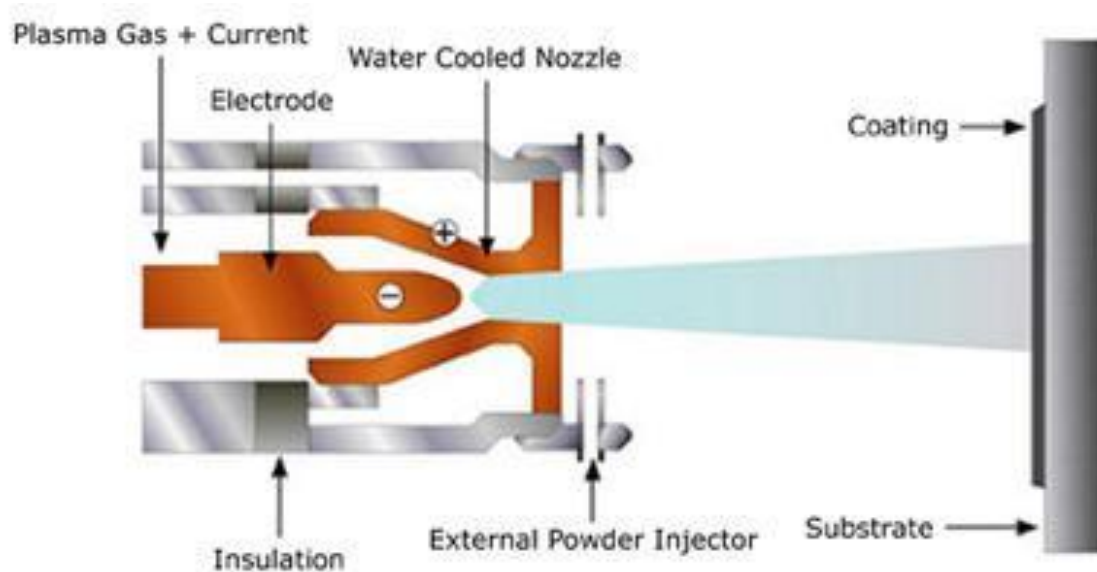


Figure I.7 : un schéma de procédé de projection plasma

I.3.9 : Caractéristiques des différentes techniques de la projection thermique

caractéristique	Projection flamme	Arc électrique	plasma	HVOF	Canon à détonation
Température de flamme °C	3000	6000	12000	3000	3000
Vitesse des particules m/s	40 à 150	250	200	700	950
Taux horaire de dépôt kg/h	1 à 20	5 à 30	1 à 4	3 à 5	3 à 5
Rendement moyen %	50 à 70	80	70	70	70
Taux de porosité %	10 à 20	8 à 15	1 à 10	0.5 à 2	0.5 à 2
Force d'adhérence MPa	20 à 40	40	30 à 70	50 à 80	50 à 80
Epaisseur déposée mm	0.1 à 1.5	0.2 à 3	0.05 à 1.5	0.05 à 1	0.05 à 1

Tableau I.1 : compare les principales caractéristiques des différentes techniques de la projection thermique. [8]

I.4 : Différentes technique de préparation de surface

Les techniques de préparation mécanique sont les plus courantes en projection thermique et aussi les plus faciles à applique. La plus répandue consiste à projeter des particules abrasives (grenaillage) sur la surface à revêtir pour l'éroder et augmenter sa rugosité. Ce procédé élimine aussi les impuretés et la couche d'oxyde éventuelle. Les particules utilisées ont un diamètre de 400 à 1400 μm et peuvent générer une rugosité supérieure à 10 μm . Cependant, il faut faire attention, car la projection à haute pression peut entraîner l'incrustation de particules dans le matériau, ce qui réduit l'adhérence du revêtement.

C'est pourquoi un nettoyage par ultrasons est souvent réalisé après le grenaillage et avant la projection. D'autres méthodes, comme le jet d'eau à haute pression ou la neige carbonique, permettent d'éviter ces contaminations lors de la préparation de surface. [9]

I.4.1 : Influence de la rugosité

Pour qu'un revêtement adhère bien, il ne suffit pas que la surface soit propre. Il faut aussi créer une accroche mécanique. Cela peut se faire par sablage ou par usinage, qui enlève de la matière et crée un relief. Ce relief permet de :

- Augmenter la surface de contact entre le support et le revêtement.
- Créer des aspérités où le revêtement pourra mieux s'ancrer.

La rugosité influence directement l'adhérence du revêtement, le coefficient de frottement, et la vitesse de formation de l'interface métal-céramique. [3]

I.4.2 : Dégraissage

Le dégraissage est une étape essentielle avant tout traitement de surface. Il sert à enlever les graisses, la poussière et autres impuretés qui forment une fine couche sur le matériau. Ce nettoyage peut se faire de deux façons : soit en utilisant des solvants pour dissoudre les impuretés, soit en utilisant une solution alcaline pour les transformer en savon et les éliminer. [7]

I.4.3 : sablage

Le sablage est un procédé qui consiste à projeter des grains à grande vitesse sur une surface pour la traiter. Cette projection se fait soit avec de l'air comprimé, soit avec une turbine qui utilise la force centrifuge. Les grains frappent la surface à plusieurs reprises, modifiant ainsi

ses propriétés. Il existe différents types de projectiles et plusieurs méthodes de projection, et de nombreux paramètres influencent le résultat obtenu. [3]

I.4.4 : Préchauffage

Il est recommandé de chauffer légèrement la pièce avant le traitement pour améliorer l'adhérence du revêtement. C'est essentiel surtout pour les revêtements en poudre et les plastiques, qui ne conduisent pas bien la chaleur.

Le préchauffage sert aussi à sécher les pièces poreuses contenant de l'eau, de la graisse ou de l'huile en profondeur, quand le nettoyage ne suffit pas. [8]

I.5 : Construction d'un dépôt

Le principe de la formation d'un dépôt par projection thermique est basé sur l'empilement et la solidification de lamelles formées par l'étalement des particules fondues ou semi fondues projetées sur le substrat préalablement préparé. La construction du dépôt est une étape importante de la projection plasma car elle influe directement sur les propriétés du dépôt.

La morphologie et la taille des lamelles gouvernent la qualité de la cohésion du dépôt, la microstructure, la taille et la distribution des pores ainsi que les contraintes résiduelles. [9]

I.5.1 : Etalement des particules

L'étalement des particules est un phénomène complexe influencé par divers paramètres, notamment les caractéristiques propres à la particule (morphologie, vitesse, température...) ainsi que l'état de surface du substrat ou du dépôt au moment de la projection (matériau, rugosité, température...). De nombreuses études ont tenté de caractériser ce phénomène en définissant, par exemple, la morphologie des lamelles en fonction des conditions de projection (Figure I.8).

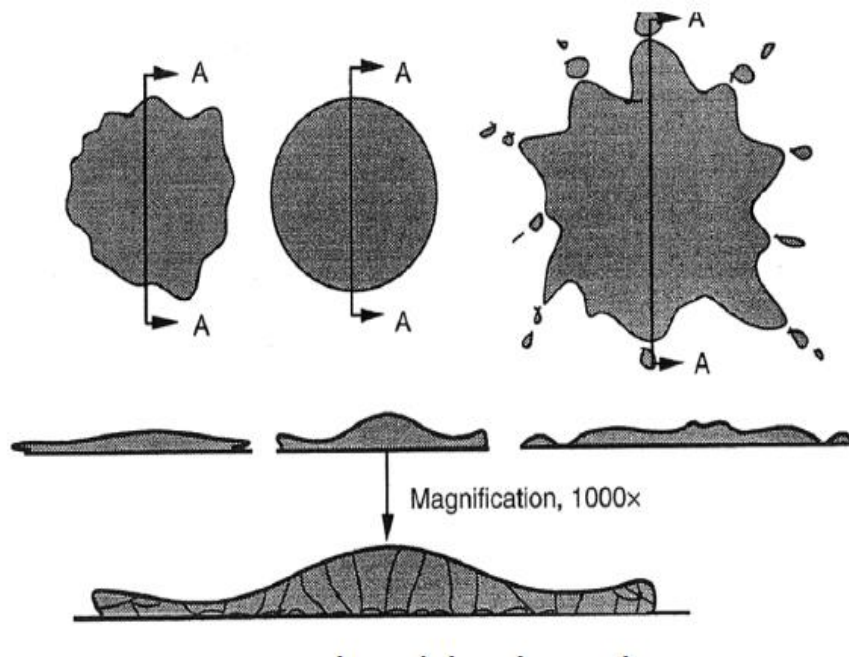


Figure I.8 : Type de morphologie de particules projetées

Elles ont également décrit le phénomène de <<splashing>>, qui correspond à l'éclatement des particules lors de l'impact, généralement causé par une vitesse excessive. Ces études ont permis d'identifier les conditions optimales pour obtenir une morphologie de lamelles satisfaisante. Toutefois, la plupart d'entre elles ont été menées sur des substrats lisses, qui, bien que facilitant l'observation, ne reflètent pas toujours les conditions réelles.

En outre, certaines particules atteignent la surface à l'état solide en raison d'une injection différente, les empêchant de fondre totalement ou partiellement dans le plasma. Lors de la formation du dépôt, ces particules infondus (Figure I.9) peuvent soit rebondir sur la surface, soit être piégées dans le dépôt. Lorsqu'elles restent emprisonnées, elles engendrent des défauts d'empilement, notamment sous forme de pores. [9]

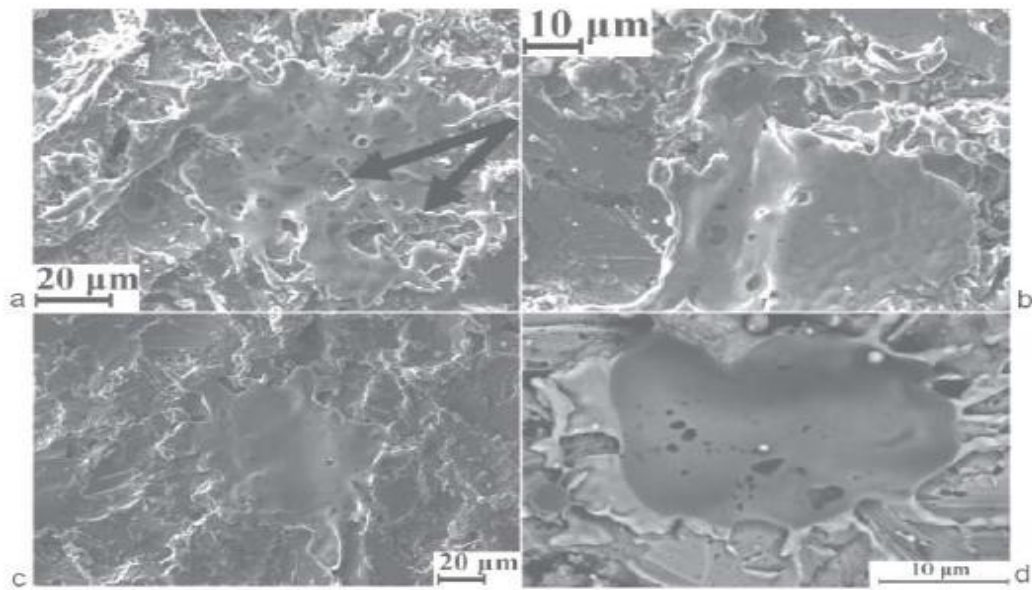


Figure I.9 : image par microscopie à balayage de l'étalement de lamelles de CuAl sur une surface rugueuse

I.5.2 : Phénomènes d'oxydation

Lors de la projection thermique, l'oxygène injecté est entièrement consommé dans la combustion, tandis que l'oxygène présent dans l'air, associé aux hautes températures rencontrées lors du transfert des particules liquides, peut engendrer des réactions d'oxydation avec les particules réactives. Plusieurs études ont mis en évidence la présence d'oxydes dans les dépôts de ces matériaux. Ces oxydes peuvent améliorer certaines propriétés, telles que la résistance au frottement, la résistance à la rupture en compression, ainsi que la mouillabilité et l'adhésion des dépôts métalliques. Toutefois, ces phases secondaires peuvent également altérer certaines caractéristiques des dépôts. Il est donc essentiel de comprendre les mécanismes sous-jacents à ces réactions afin de mieux contrôler la formation des phases secondaires et d'optimiser la qualité des dépôts. Par ailleurs, il est possible de distinguer différentes zones d'oxydation selon les conditions spécifiques du procédé.

Dans le procédé de projection flamme-fil, les phénomènes d'oxydation peuvent se produire à différents stades :

- l'oxydation des gouttelettes métalliques chauffées en vol,
- l'oxydation durant la formation des lamelles sur le substrat,

- l'oxydation de la surface du dépôt lors de son refroidissement.

Cependant, ce dernier mécanisme reste généralement négligeable en raison de la température modérée du substrat, comprise entre 100 et 200°C. [9]

I.5.3 : Oxydation des gouttelettes

L'oxydation des gouttelettes en vol est un phénomène influencé par plusieurs paramètres :

-La composition du matériau projeté.

-La température des gouttelettes.

La durée de vol des particules, qui dépend de leur vitesse et de la distance de projection, La concentration en oxygène autour des gouttelettes, La vitesse des réactions d'oxydation, Les mécanismes de diffusion de l'oxygène jusqu'au cœur des particules.

L'oxygène présent dans le jet provient à la fois du gaz d'atomisation lorsqu'il s'agit d'un gaz oxydant, comme l'air, et de l'air ambiant entraîné à la sortie du jet.

Deux processus principaux sont responsables de l'oxydation des particules en vol :

-La diffusion de l'oxygène au sein des gouttelettes fondues.

-Les mouvements de convection générés dans la gouttelette liquide sous l'effet du gaz d'atomisation.

-L'oxydation des lamelles,

-L'oxydation entre deux passes successives,

La structure finale du dépôt (Figure I.14) peut être monomodale ou bimodale. Dans une projection conventionnelle, le dépôt est constitué de lamelles, de particules non fondues ou partiellement fondues, ainsi que de porosités, toutes ces caractéristiques étant de taille micrométrique. Une structure bimodale est obtenue lorsque des particules nanométriques agglomérées sont projetées. Elle combine des zones fondues avec des caractéristiques micrométriques et des particules non fondues ou partiellement fondues de structure nanométrique. En revanche, les dépôts issus de la projection de particules nanométriques en suspension possèdent une structure monomodale entièrement nanostructure. [9]

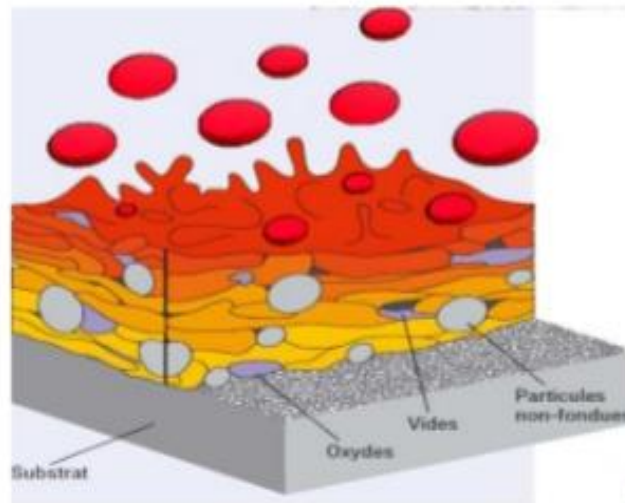


Figure I.10 : schéma de principe de la construction de dépôt par projection thermique.

I.6 : Paramètres de projection influant sur le dépôt

- **Débit des gaz :** Trop d'oxygène (flamme oxydante) durcit le dépôt et le rend cassant, ce qui le rend difficile à usiner. Trop d'acétylène (flamme carburante) provoque un dépôt de carbone. Dans les deux cas, les buses s'usent plus vite.
- **Pression des gaz :** Une pression trop élevée entraîne des pertes de métal et une consommation d'énergie accrue.
- **Diamètre du fil ou du cordon :** Un fil plus gros donne un dépôt avec des grains plus larges et augmente les pertes de matériau.
- **Vitesse du fil :** Si elle est trop élevée, le dépôt a des grains plus gros. Si elle est trop faible, le dépôt s'oxyde davantage.
- **Pression de l'air :** Plus elle est forte, plus les grains sont fins, mais l'oxydation du dépôt augmente.
- **Distance de projection :** Trop courte, elle cause des turbulences, des pertes, une mauvaise adhérence et une surchauffe. Trop longue, elle refroidit trop les grains et diminue l'adhérence.
- **Angle de projection :** Idéalement perpendiculaire. Un angle incliné augmente les pertes et réduit l'adhérence.

- **Vitesse de balayage** : Trop rapide, elle réduit l'épaisseur du dépôt et augmente les pertes. Trop lente, elle rend l'épaisseur irrégulière et chauffe trop le support.
- **Vitesse de rotation** : Trop rapide, elle cause un rebondissement des particules et un dépôt pollué. Trop lente, elle entraîne une surchauffe et un dépôt trop épais.
- **Refroidissement** : Trop rapide, il provoque un décollement des couches. Trop lent, il augmente la surchauffe et l'oxydation du dépôt. [3]

I.7 : L'oxyde de chrome

L'oxyde de chrome(III) est le composé chimique de formule Cr_2O_3 . C'est l'un des principaux oxydes du chrome. On le trouve naturellement dans un minéral rare, l'eskolaïte. Il est utilisé comme pigment. On l'obtient en chauffant à 500°C . Il existe plusieurs oxydes de chrome, mais les plus courants sont :

Oxyde de chrome(III) – Cr_2O_3 (le plus stable et le plus utilisé).

Oxyde de chrome(II) – CrO (rare et instable).

Oxyde de chrome(VI) – CrO_3 (toxique et utilisé comme oxydant puissant). [10]



Figure I.11 : poudre d'oxyde de chrome Cr_2O_3

I.7.1 : Structure cristalline

L'eskolaïte cristallise dans un système rhomboédrique. Sa maille de base contient deux unités de Cr_2O_3 . On peut aussi le présenter sous forme hexagonale, où la maille contient six unités de Cr_2O_3 . Son groupe d'espace est $R3c$. en notation hexagonale, les atomes de chrome

sont en position 12c et ceux d'oxygène en 18e. le chrome possède une symétrie ponctuelle 3 (ou C_3 selon la notation de Schönflies).

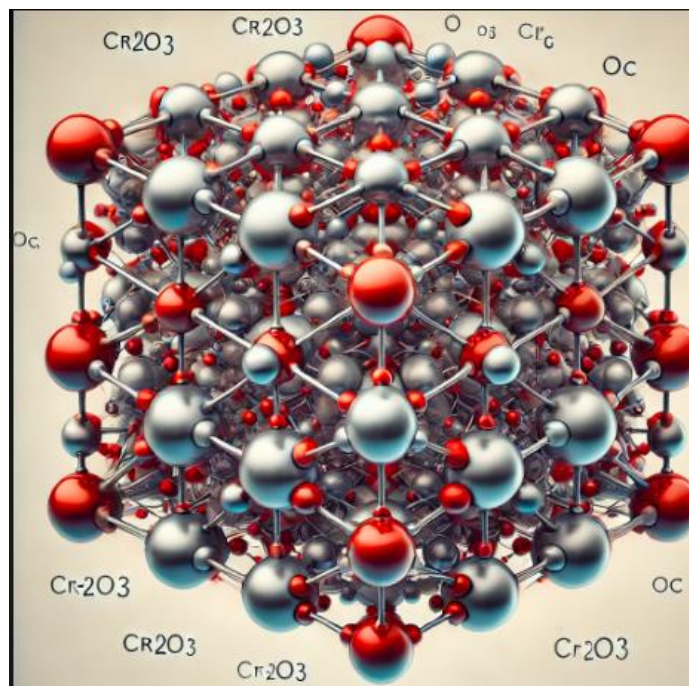


Figure I.12 : la structure de Cr_2O_3 . Les atomes d'oxygène sont aux sommets des octaèdres et les cations sont au centre des octaèdres.

La structure cristalline de Cr_2O_3 (corindon, groupe $R3c$). Elle montre les atomes de chrome (Cr) en couleur métallique et les atomes d'oxygène (O) en rouge, avec leur coordination octaédrique.

La maille cristalline du Cr_2O_3 est celle du corindon Al_2O_3 :

$$a : 4.958 \text{ \AA}$$

$$c : 13.599 \text{ \AA}$$

$$\alpha=\beta=90^\circ, \gamma=120^\circ$$

L'oxyde de chrome (Cr_2O_3) se présente sous forme de poudre verte avec une masse molaire de 151,99 g/mol et une densité de 5,22 g/cm³. Il possède également une dureté de 8 à 9 sur l'échelle de Mohs, le rendant presque aussi dur que le corindon. Son module de Young, compris entre 250 et 300 GPa, témoigne de sa grande rigidité et de sa résistance mécanique élevée. [11]

I.7.2 : Propriétés chimiques et thermiques

Le tableau I.2. Représente quelques propriétés physique-chimique de l'oxyde de chrome.

Propriétés chimiques Et thermiques	Formule brute	Cr_2O_3
	Masse molaire	$151,9904 \pm 0,0021 \text{ g/mol}$
	Masse volumique	5 220 kg/m
	Solubilité	Insoluble
	Température de fusion	2 435 °C
	Température d'ébullition	4 000 °C
	Etat Physique	Poudre ver
	Odeur	Inodore
	Conductivité thermique	6-10 W/m·K (faible)

Le tableau I.2 : quelques propriétés physique-chimique de l'oxyde de chrome.[12]

Ces excellentes propriétés en font un revêtement de choix pour les utilisations dans des applications sévères telles que les corps de pompes, les pistons, éléments de forage ...

I.7.3 : Application industrielles du Cr_2O_3

L'oxyde de chrome (Cr_2O_3) a de nombreuses applications industrielles grâce à ses propriétés remarquables : dureté élevée, résistance à l'usure et à la corrosion, stabilité thermique et chimique

Revêtements de protection :

L'oxyde de chrome est largement utilisé en traitement de surface pour les revêtements céramiques et thermiques, offrant une protection efficace des pièces mécaniques contre l'usure et la corrosion. Grâce au dépôt par projection thermique, notamment par plasma ou HVOF, il permet d'obtenir des revêtements denses et résistants, appliqués sur des composants soumis à des conditions sévères tels que les roulements, pistons, vannes et turbines. De plus, ces revêtements jouent un rôle essentiel en tant que barrière anti-corrosion, notamment dans les environnements agressifs des industries pétrochimiques et aérospatiales, où ils protègent efficacement contre l'oxydation et l'érosion chimique.

Matériaux réfractaires :

L'oxyde de chrome est utilisé dans l'industrie métallurgique en tant que composant des briques réfractaires, améliorant la résistance des fours à haute température utilisés en sidérurgie et cimenterie. Il est également employé dans l'industrie verrière, où il renforce la résistance thermique et chimique des creusets et moules, assurant une meilleure durabilité face aux contraintes du verre en fusion.

Applications tribologiques :

L'oxyde de chrome est utilisé comme lubrifiant solide, en étant mélangé à des huiles et graisses pour réduire l'usure et prolonger la durée de vie des composants soumis à la friction. Il est également intégré dans les matériaux composites, notamment les polymères et céramiques, afin d'améliorer leur résistance à l'usure, les rendant plus performants dans des environnements exigeants.

Pigments et colorants :

L'oxyde de chrome est utilisé comme pigment pour apporter une couleur verte intense aux céramiques, verres et émaux, tout en assurant une excellente stabilité thermique et chimique. Il est également employé dans les encres et peintures, où sa résistance aux UV et aux conditions environnementales garantit une durabilité et une teinte stable dans le temps. [12]

Chapitre II

Matériaux Et Techniques Expérimentale

Introduction

Dans cette partie ce travail est consacré à décrire les dispositifs expérimentaux utilisés pour l'élaboration des dépôts de Cr_2O_3 . Le procédé utilisé est celui de la Projection à 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.1 : Matériaux utilisés

II.1.1 : Substrat

Le substrat utilisé pour les dépôts est acier inoxydable de type X37Cr11. Sa composition chimique, déterminée par fluorescence des rayons X (PTAPC Bejaia). Est présentée dans le tableau II.1.

Eléments	Fe	C	Cr	Ni	Mn
Composition %	Ref	0.37	11	2.24	0.7

Tableau II.1 : composition chimique de l'acier inoxydable X37Cr11 déterminée par fluorescence X

II.1.2 : Dépôt réalisé

Dans notre travail nous avons utilisés la poudre d'oxyde de chrome Cr_2O_3 qui utilisé comme revêtement, grâce à ses excellents propriétés mécanique, chimique et thermique.

Elements	Cr_2O_3	Autres
Cr_2O_3	99.8	0.2

Tableau II.2 : composition chimique (en %) d'oxyde de chrome.

II.2 : Elaboration d'échantillons

Les échantillons destinés à la projection thermique ont été usinés avec une fraiseuse dans le hall de technologie. Les étapes réalisées sont :

- Découpage pour obtenir la forme souhaitée de l'échantillon.
- Fraisage de la surface à l'aide d'une fraiseuse conventionnelle.

Une fois les échantillons prêts, différentes opérations de préparation de surface ont été effectuées :

- Dégraissage : Cette étape consiste à éliminer les huiles, la poussière et autres impuretés accumulées sur l'acier pendant le stockage et la mise en forme
- Grenaillage : Un abrasif est projeté sous pression sur la surface de l'échantillon à l'aide d'une lance. Cette opération permet d'enlever les oxydes présents en surface et d'augmenter la rugosité pour améliorer l'adhérence du revêtement.
- Préchauffage : Un léger préchauffage est recommandé pour améliorer l'adhérence du revêtement, modifier les propriétés mécaniques et la mouillabilité de la surface par oxydation et sécher certaines pièces poreuses imprégnées d'eau, de graisse ou d'huile

II.2.1 : Pistolet de projection utilisé (HVOF)

Dans cette étude, on a utilisé la torche HVOF TAFA Model 8200 HP/HVOF. Elle possède une chambre de combustion refroidie par un circuit d'eau sous pression et une tuyère allongée. Le carburant liquide, le propylène, est injecté sous pression avec de l'oxygène dans la chambre. La combustion produit une flamme à haute pression qui s'échappe par la tuyère à grande vitesse.

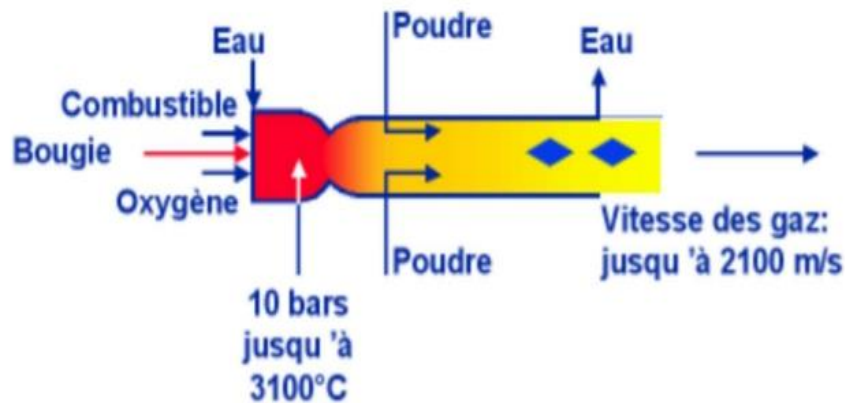


Figure II.1 : principe de fonctionnement d'une pistole HVOF

II.3 : Traitement thermique

Après avoir effectué les dépôts, les revêtements d'oxyde de chrome ont subi des post-traitements, Ces post-traitements impliquent un chauffage à des températures de 800°C pour différents échantillons, avec un temps de maintien de 45 min suivi de deux modes de refroidissement :

Refroidissement à l'air et refroidissement au four. Les observations ont révélé un délaminage du revêtement après refroidissement à l'air, tandis que l'échantillon refroidi au four est resté intact



Figure II.2 : four utilise au niveau du hall technologie.

La figure **II.3** montre l'état du dépôt traité à 800°C suivi d'un refroidissement à l'air



Figure II.3 : échantillon refroidi à l'air

La figure **II.4** montre l'état du dépôt traité à 800°C suivi d'un refroidissement au four

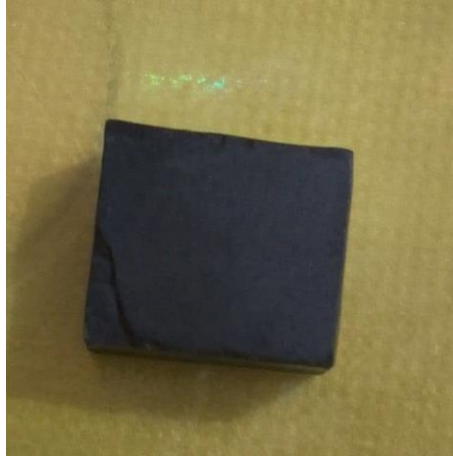


Figure II.4 : échantillon refroidi dans le four.

II.4 : Caractérisation métallographique

II.4.1 : Polissage

Le polissage est une étape essentielle avant l'observation microscopique des surfaces, car il permet de mieux révéler les grains et les phases. On abraser la surface à l'aide de papier abrasif de différents granulométries (400,600,800,1000,1500,2000) en utilisant une polisseuse.



Figure II.5 : polisseuse mécanique à papier abrasif.

II.4.2 : la morphologie

On utilise le microscope optique pour déterminer la nature de la structure, la répartition des phases ainsi que la taille et la forme des grains. Les étapes suivantes sont suivies pour l'observation métallographique :

- Polissage

- Mise sous tension et réglage de l'éclairage
- Sélectionner le grossissement



Figure II.6 : microscope optique.

II.4.3 : Diffraction des rayons X (DRX)

Les diagrammes de diffraction des rayons X ont été obtenus à l'aide d'un diffractomètre X'PERT PRO MRD de PANalytical, situé au PTAPC de Bejaïa. Cet appareil est équipé d'un tube à rayons X avec une anode en cuivre. Les composantes $K\alpha_1$ et $K\alpha_2$ sont séparées grâce à un monochromateur en graphite placé dans le faisceau secondaire.



Figure II.7: Dispositif Diffraction X : X'PERT PRO MRD de chez PANalytical.

En raison des défauts présents dans ces matériaux, un bruit de fond important est généré. Pour améliorer la qualité des mesures et mieux distinguer les pics du bruit, un temps d'acquisition de 40 secondes par pas angulaire de $0,04^\circ$ a été appliqué sur une plage allant de 10° à 100° (2θ).

II.5 : Caractérisation mécanique

II.5.1 : Micro dureté Vickers

La micro dureté permet de mesurer la résistance d'un matériau à la pénétration d'un pénétrateur en diamant de forme pyramidale à base carrée, avec un angle de 136° entre les faces opposées. L'empreinte laissée par le pénétrateur est observée à l'aide d'une caméra de micro dureté qui reliée à un ordinateur permet d'analyser l'empreinte et de calculer la dureté Vickers.

Au niveau de Hall Technologie (Bejaïa), nous avons utilisé la micro dureté avec une force de 3N (trois essais pour calculer la moyenne) et déterminé la dureté de notre dépôt.



Figure II.8 : machine de micro dureté Vickers

II.5.2 : Profil mètre

Nous avons mesuré la rugosité et le profil de surface de notre dépôt à l'aide d'un profil mètre mécanique à contact. Cet appareil utilise un stylet qui suit la surface et enregistre les variations de hauteur.



Figure II.9 : Profil mètre

II.6 : Comportement à la corrosion

Le comportement à la corrosion des échantillons a été étudié dans une solution de 3.5% NaCl représentative d'un environnement marin. Les échantillons ont été testés et enrobés dans une résine époxy pour créer une surface active de 1 cm² (figure II.10).



Figure II.10 : les échantillons dans la solution.

Les essais ont été réalisés en utilisant un potentiostatgalvanostat type (PGP201). Piloté par ordinateur à travers le logiciel VoltaMaster1. Une cellule de corrosion électrochimique classique à trois électrode a été utilisée : une contre électrode à plaque de platine, une électrode de référence calomel saturé (SCE) et l'échantillon servant d'électrode de travail (figure II.10).



a

b

Figure II.11 : a) potentiostat/galvanostat type PGP201, b) d'une cellule électrochimique à trois électrodes

La période de stabilisation était d'environ 20 min pour cette configuration. Pour évaluer la résistance en balayant le potentiel de -1.5v à +1v avec une vitesse de balayage de 2mv/s.

Le potentiel de corrosion (E_{corr}), le courant de corrosion (I_{corr}) ainsi que la résistance de polarisation (R_p) ont été déterminés à partir de la courbe de polarisation potentiodynamique, par extrapolation des droites de Tafel dans les régions anodique et cathodique.

II.6.1 : la perte de masse

Pour réaliser des études de perte de masse sur le revêtement, nous avons recouvert toute la surface du substrat avec la résine afin de l'isoler du milieu extérieur. Ensuite, nous avons immergé l'échantillon, dont la masse est connue, dans une solution de NaCl 0.35%.

Après une période connue, nous avons vérifié la masse de notre échantillon et calculé Δm et le taux de corrosion. Cette activité a été réalisée plusieurs fois.

Avec : $\Delta m = m_0 - m_1$

Et : $\text{taux de corrosion} = \frac{87.6 \times \Delta m}{\rho \times A \times t}$

Où Δm : perte de masse en mg

ρ : densité du matériau en g/cm^3

A : surface exposée en cm^2

t : durée de l'essai en heures

Chapitre III

Résultats Et Discussion

III.1 : Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter et discuter les résultats de notre travail portant sur la diffraction des rayons x (DRX), la morphologie, le test de dureté ainsi que le test de corrosion.

Une comparaison sera faite entre l'échantillon traité thermiquement et celui non traité, afin de déterminer l'effet du traitement thermique sur ces échantillons.

III.2 caractérisation structurales et microstructurales des dépôts

III.2.1 microscope optique :

Les Figures III.1 et III.2 présentent l'analyse de la structure micrographique des dépôts Cr_2O_3 réalisé avec microscope optique avant et après traitement thermique

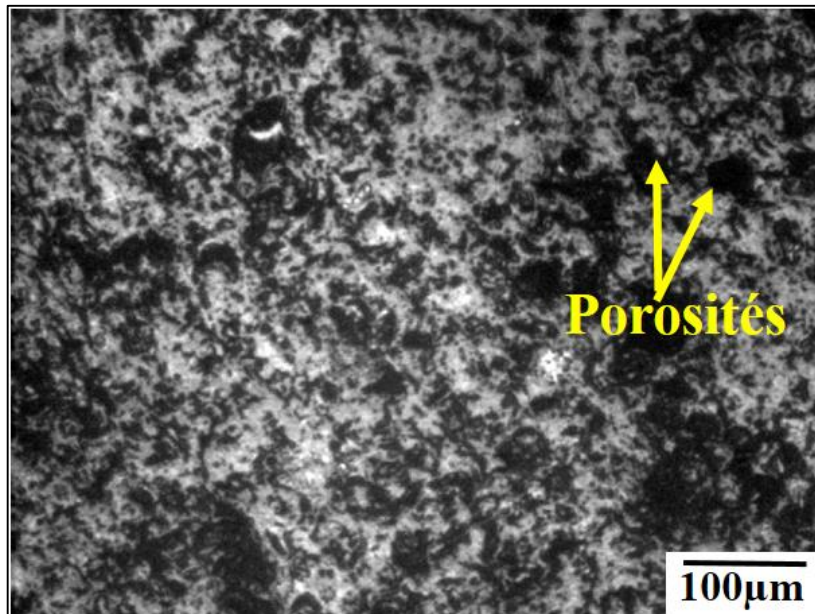


Figure III.1 : Microstructure du dépôt sans traitement thermique

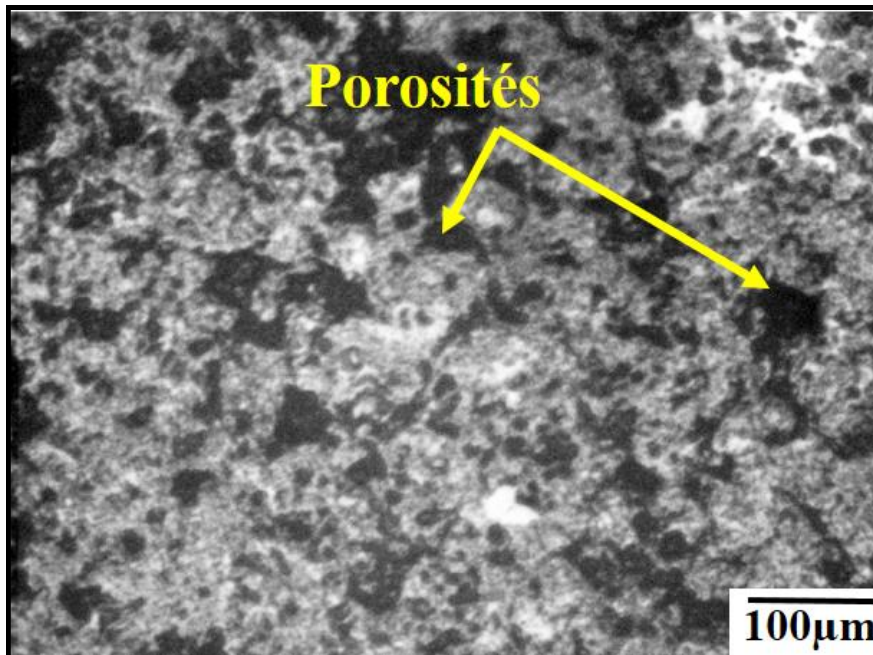


Figure III.2 : Microstructure du dépôt avec traitement thermique à 800°C

On observe que la microstructure du dépôt non traité thermiquement présente un taux de porosité plus élevé que celle du dépôt traité à 800°C. Cette porosité accrue est probablement due au piégeage d'air entre les différentes couches déposées, ainsi qu'à la nature de la matrice base de dépôt (Cr_2O_3). En revanche, le traitement thermique favorise la densification du matériau et réduit significativement la porosité.

III.3 : Analyse structurale par diffraction des rayons X

Les analyse structurales des dépôts Cr_2O_3 sans traitement et traité à 800°C, sont données par les figures III.3 et III.4 respectivement.

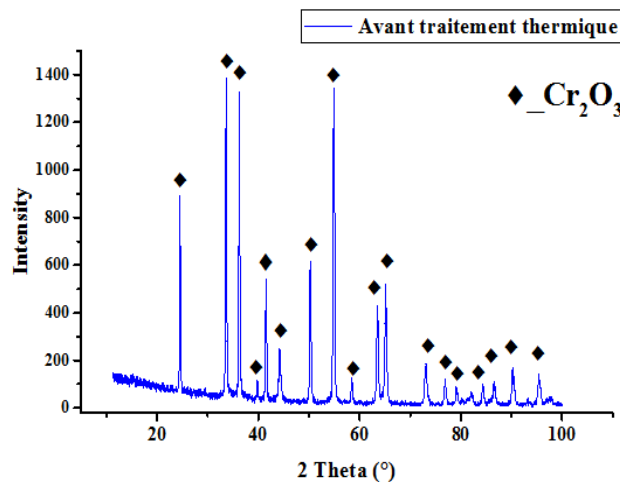


Figure III.3 : spectre de diffraction des rayons x pour le dépôt non traité.

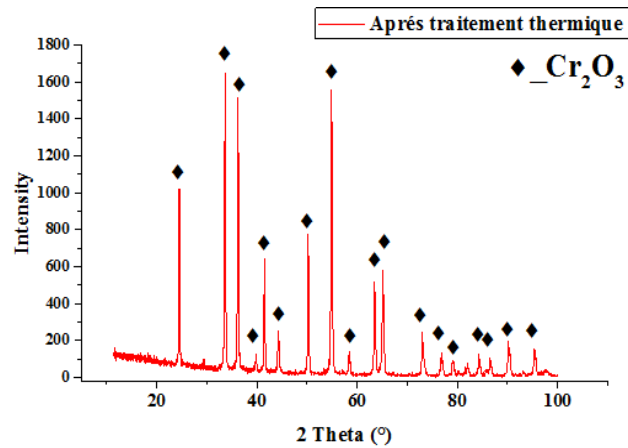


Figure III.4 : spectre de diffraction des rayons x pour le dépôt traité à 800°C.

Les spectres de diffraction des rayons X montrent que le dépôt non traité (figure III.3) est principalement composé de l'oxyde de chrome (Cr_2O_3) avec une structure cristalline bien définie.

Après un traitement thermique à 800 °C (Figure III.4), la composition en phases reste inchangée : seule la phase Cr_2O_3 est détectée. Toutefois, on observe une augmentation de l'intensité des pics associés à cette phase, ce qui témoigne d'une amélioration de la cristallinité du matériau. Par ailleurs, ce traitement également favoriser une croissance des cristallites : des grains de plus grande taille diffractent plus efficacement les rayons X, ce qui contribue à l'augmentation de l'intensité des pics observés

III.4 : La micro dureté

La micro dureté a été appliquée sur l'échantillon traité, avec trois essais effectués pour calculer la moyenne. La figure III.5 montre les empreintes des essais,

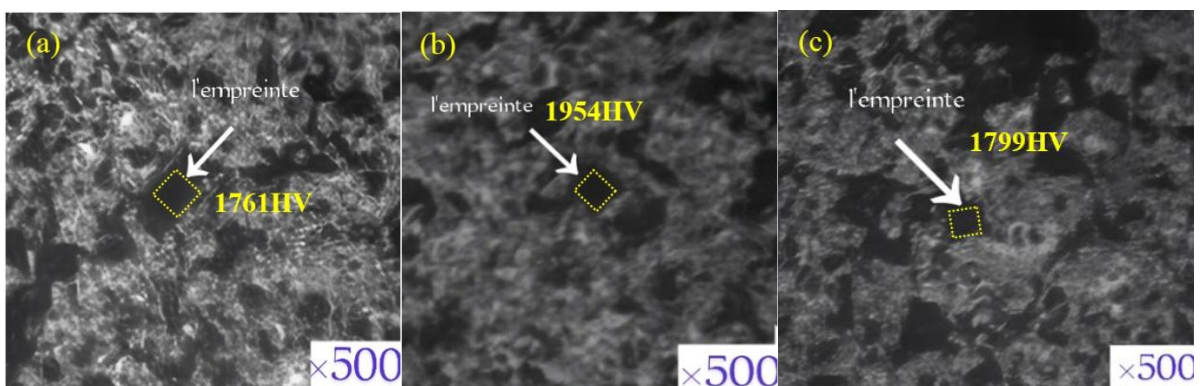


Figure III.5 : Les empreintes microdureté des échantillons traités thermiquement à 800°C.

Conclusion générale

Observant la figure III.5 on peut constater que les empreintes de la microdureté de ces revêtements sont plus larges que celle des revêtements traités, indiquant une dureté réduite. Cette réduction peut être causée par la croissance de la taille cristallite.

Pour l'échantillon non traité, trois essais ont également été réalisés, et les empreintes sont présentées dans la figure III.6

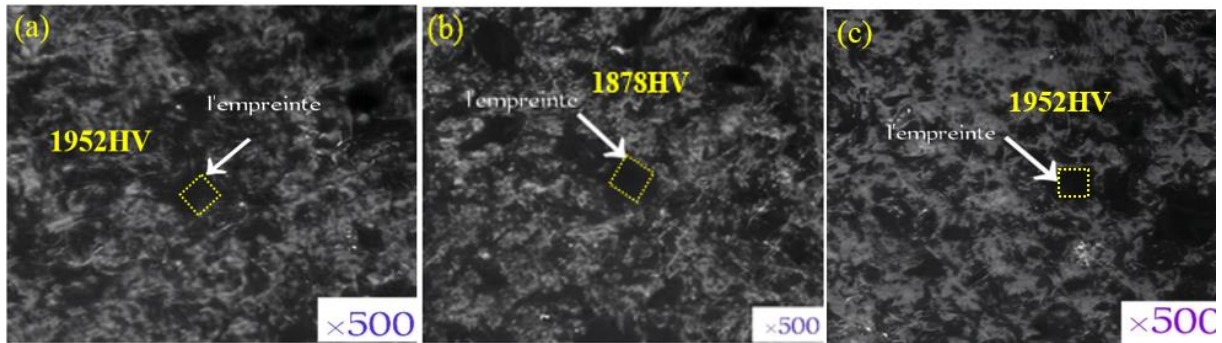


Figure III.6 : Les empreintes microdureté des échantillons non traités

D'après la figure on peut clairement constater que la taille des empreintes est relativement petite ce qui indique une dureté élevée, ce qui est typique pour les dépôts de l'oxyde de chrome

La microdureté moyenne des revêtements d'oxyde de chrome avant et après traitement thermique est représentée dans l'histogramme ci-dessous

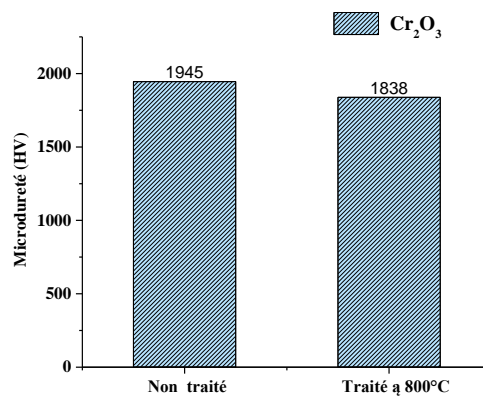


Figure III.7 : Microdureté moyenne des échantillons traités et non traités.

Le dépôt non traité thermiquement présente une dureté légèrement supérieure (1945 HV) par rapport au dépôt ayant subi un traitement thermique (1838 HV). Cela peut s'expliquer par modification de la microstructure due au traitement thermique.

III.5 : Profil mètre

La figure III.8 et le tableau III.3 présentent les résultats du profil mètre pour le dépôt Cr_2O_3 sans traitement thermique.



Figure III.8 : Profil de rugosité de dépôt Cr_2O_3 sans traitement thermique.

On remarque que la rugosité varie entre $-5.60\mu\text{m}$ et $+1.25\mu\text{m}$. Le profil indique également la présence de 5pics, et la surface est légèrement rugueuse.

Pour obtenir la valeur de rugosité, nous avons effectué trois mesures différentes et calculé la moyenne. Les résultats sont présentés dans le tableau III.1.

Ra	La valeur en μm
1	0.425
2	0.182
3	0.399
La moyenne	± 0.335

Tableau III.1 : la rugosité de dépôt non traité.

La figure III.9 et le tableau III.2 présentent les résultats du profilomètre pour le dépôt Cr_2O_3 traité à 800°C .

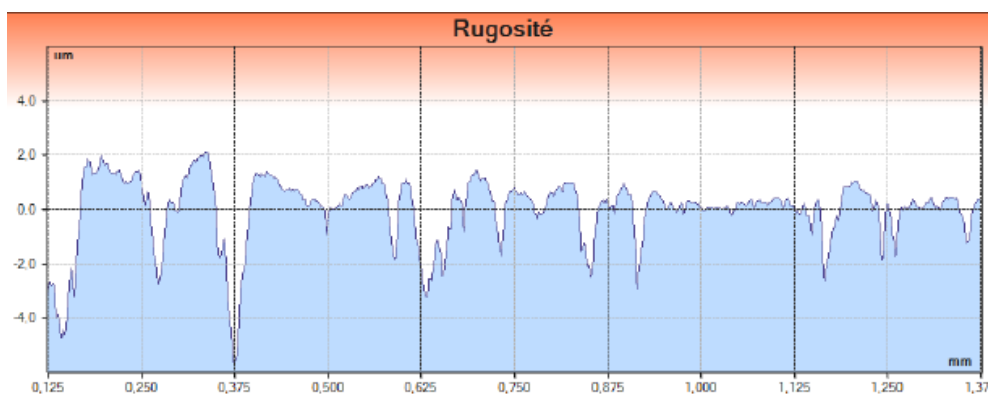


Figure III.9 : Profil de rugosité de dépôt Cr_2O_3 avec traitement thermique.

Le profil de rugosité présente des pics et indique une forte présence de porosité dans le dépôt, ce qui signifie que la surface de dépôt traité est légèrement rugueuse que celle de dépôt traité. Les valeurs de rugosité sont enregistrées dans le tableau III.2.

Ra	La valeur en μm
1	0.904
2	1.088
3	0.471
La moyenne	± 0.821

Tableau III.2 : la rugosité de dépôt traité.

D'après les figures et les tableaux, le traitement appliqué au revêtement a entraîné une augmentation de la rugosité de surface, passant de $\text{Ra}=0.335\mu\text{m}$ pour le revêtement non traité à $0.821\mu\text{m}$ après traitement.

Cette évolution suggère que le traitement a modifié la topographie de la surface. Une telle augmentation de la rugosité pourrait avoir un impact sur les propriétés fonctionnelles du revêtement, notamment en ce qui concerne la mouillabilité et les caractéristique tribologiques.

III.6 : Comportement à la corrosion

III.6.1 : Potentiel à l'abandon

Après les tests électrochimiques, nous avons obtenu des données que nous avons traitées avec logiciel Origin. Nous avons ainsi obtenu les courbes présentées dans la figure III.10. À partir de ces courbes nous avons déterminé le potentiel de corrosion à l'abandon pour chaque échantillon.

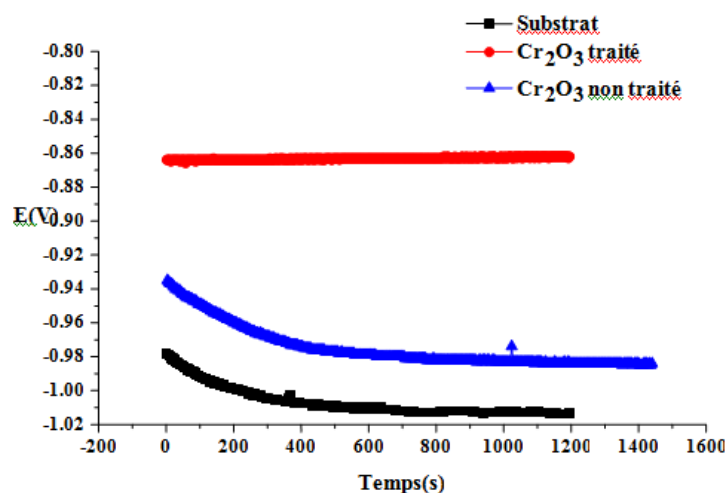


Figure III.10 : potentiel à l'abandon en fonction du temps

$E(\text{substrat}) = -1.01\text{V}$

$E(\text{Cr}_2\text{O}_3 \text{ non traité}) = -0.98\text{V}$

$E(\text{Cr}_2\text{O}_3 \text{ traité}) = -0.85\text{V}$

Les mesures du potentiel à l'abandon montrent que le substrat présente le potentiel le plus négatif (-1.01V), et le revêtement Cr_2O_3 sans traitement thermique présente un potentiel moins négatif (-0.98V), mais reste instable dans le temps ce qui révèle une protection limitée.

Le revêtement Cr_2O_3 avec traitement thermique affiche un potentiel relativement plus noble (-0.85V) et particulièrement stable, indiquant une excellente résistance à la corrosion grâce à l'effet passivant du traitement thermique.

III.6.2 : Courbes de polarisation potentiodynamique

La figure III.11 présente les courbes de polarisation potentiodynamique de 3 échantillons (le substrat, le revêtement Cr_2O_3 sans traitement et le revêtement Cr_2O_3 avec traitement).

Cette technique électrochimique permet de mesurer le courant de corrosion (I), le potentiel de corrosion (E) et la résistance de polarisation (R_p).

$$\text{Avec } R_p = \frac{\beta_a \times \beta_c}{2.303 \times I_{\text{corr}} \times (\beta_a + \beta_c)}$$

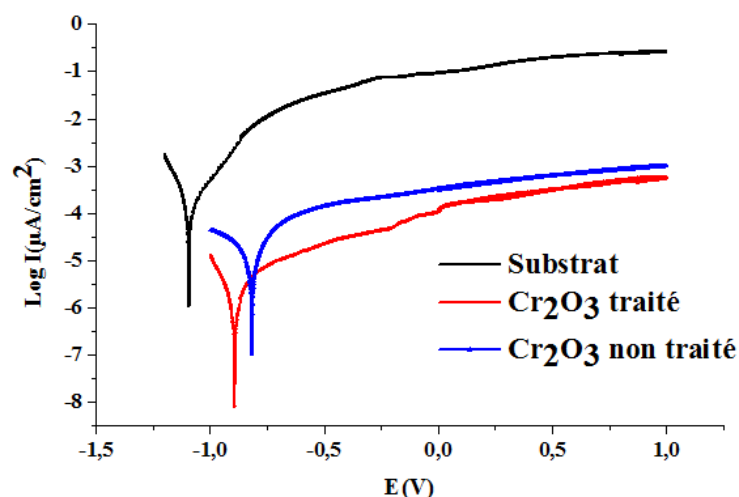


Figure III.11 : Courbes de polarisation potentiodynamique.

Eléments	β_a (V)	β_c (V)	$E_{(I=0)}$ (V)	i_{corr} (A /cm ²)	R_p ($\Omega.cm^2$)
Substrat	5.700	-12.670	-1.094	1.291E-4	13222.8
Cr ₂ O ₃ non th	4.067	-2.160	-0.816	1.887E-5	32462.6
Cr ₂ O ₃ th	6.346	-8.805	-0.893	1.514E-6	1057714.1

Tableau III.3 : paramètres électrochimique de(le substrat, le revêtement Cr₂O₃ sans traitement et le revêtement Cr₂O₃ avec traitement).

En remarque que :

1. i_{corr} de substrat $>$ i_{corr} de revêtement non traité $>$ i_{corr} de revêtement traité
2. R_p de substrat $<$ R_p de revêtement non traité $<$ R_p de revêtement traité

Donc le substrat se dégrade rapidement car il présente un courant de corrosion élevé et une faible résistance à la polarisation. Le revêtement Cr₂O₃ non traité offre déjà une meilleure protection que le substrat.

Cependant, le revêtement traité thermiquement à 800°C est le plus performant, il présente la plus faible densité de courant de corrosion et la résistance de polarisation la plus élevée. Cela signifie que le traitement thermique constitue une barrière très efficace contre la corrosion.

III.6.3 : Détermination la perte de masse :

Les résultats que nous avons obtenus pour la perte de masse, concernent l'échantillon non traité et traité à 800°C sont enregistrés dans les tableaux III.6, III.7 et les figures III.12, III.13.

Le duré	m0 (g)	m1(g)	Δm (mg)	Taux de corrosion (mm/an)
2j	21.8086	21.8090	0.4	1.16E-4
8j	21.8090	21.8077	1.3	
20j	21.8077	21.8054	2.3	
38j	21.8054	21.7991	6.3	

Tableau III.4 : la perte de masse pour l'échantillon non traité.

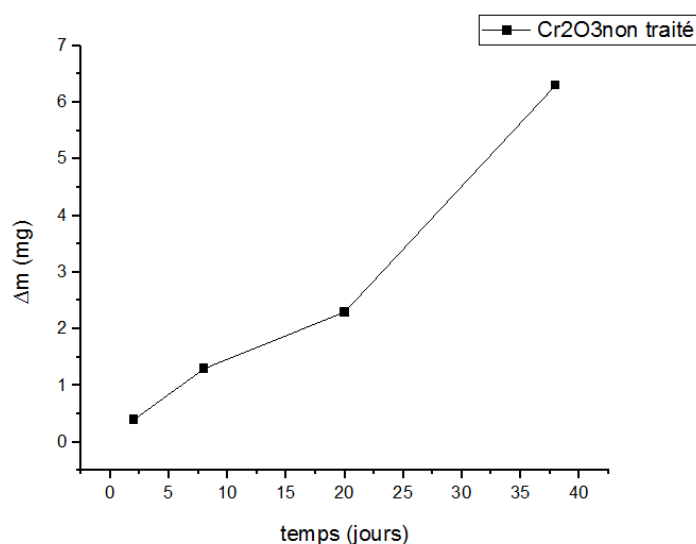
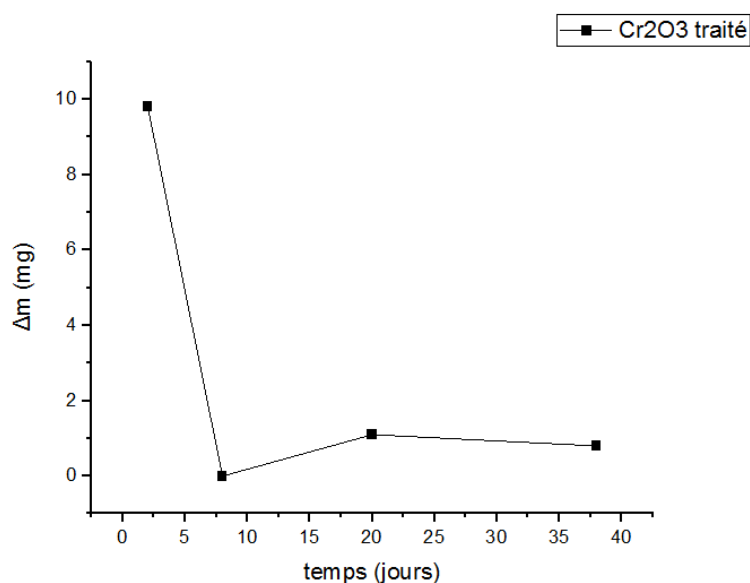


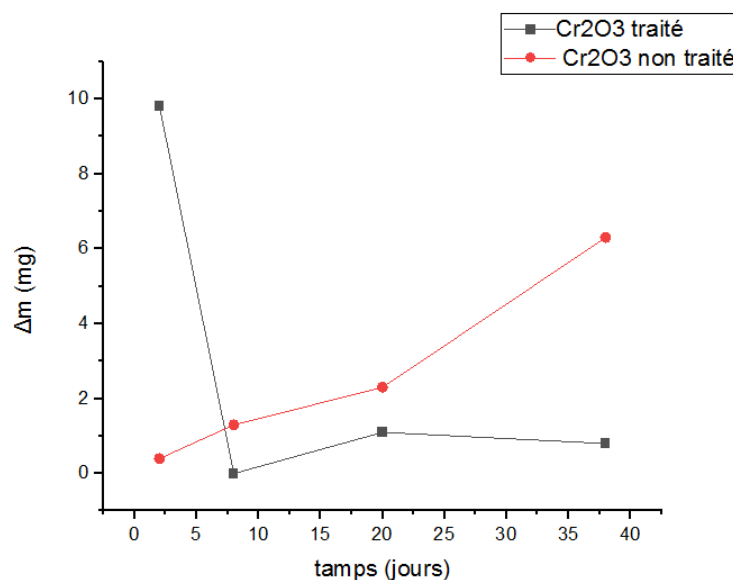
Figure III.12 : la perte de masse en fonction du temps pour l'échantillon non traité

On remarque que le Cr_2O_3 non traité, la perte de masse continue à augmenter avec le temps atteignant environs 6 mg après 38j, et le taux de corrosion correspondant est estimé 1.16E-4.

Le duré	m0 (g)	m1(g)	Δm (mg)	Taux de corrosion (mm/an)
2j	23.6514	23.6612	9.8	9.66E-5
8j	23.6612	23.6612	0	
20j	23.6612	23.6601	1.1	
38j	23.6601	23.6593	0.8	

Tableau III.5 : la perte de masse pour l'échantillon traité.**Figure III.13 :** la perte de masse en fonction du temps pour l'échantillon traité

L'échantillon Cr_2O_3 traité à 800°C la perte de masse reste stable au fil du temps avec une légère augmentation d'environ 0.8 mg après 38 jours, et le taux de corrosion correspondant est estimé $9.66\text{E}-5$.

**Figure III.14 :** la perte de masse en fonction du temps pour l'échantillon non traité et traité à 800°C

On remarque que la perte de masse d'échantillon sans traitement thermique est plus élevée et augmente rapidement jusqu'à la valeur maximale (6 mg), par contre la perte de masse d'échantillon avec traitement thermique est moins basse.

Le taux de corrosion de l'échantillon non traité est plus élevé par rapport à l'échantillon traité ce qui est en bon accord avec les résultats électrochimiques (la résistance de polarisation de Cr_2O_3 traité supérieur à celle de Cr_2O_3 non traité)

Donc le traitement thermique du Cr_2O_3 à 800°C améliore sa résistance à la corrosion. Ce traitement permet de réduire la perte de masse et de stabiliser le comportement du matériau dans le temps, contrairement à l'échantillon non traité qui présente une dégradation continue.

Les figures III.15 et III.16 montrent la morphologie de la surface d'un revêtement de Cr_2O_3 avant et après traitement thermique après 38 jours d'immersion dans une solution de 3.5 %NaCl

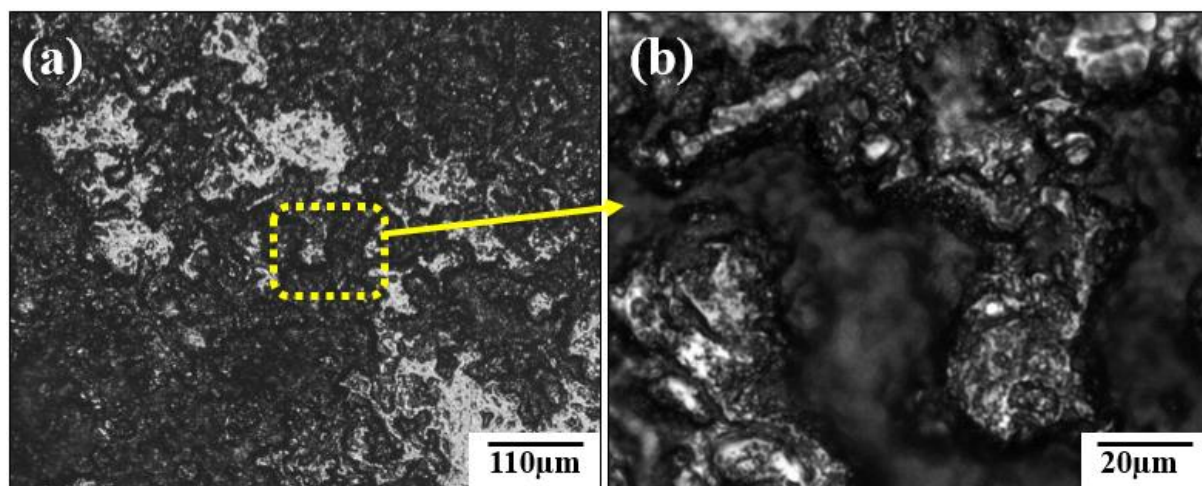


Figure III.15 : Morphologie de la corrosion de Cr_2O_3 non traité après 38j d'immersion

la surface du revêtement de Cr_2O_3 non traité montre des signes clairs de dégradation localisée. Comme illustré sur la figure III.15(a), la morphologie générale est marquée par une rugosité accrue, traduisant une corrosion non uniforme.

La figure III.15(b) révèle que les attaques sont concentrées au niveau des joints de grains, caractéristique typique d'un mécanisme de corrosion intergranulaire.

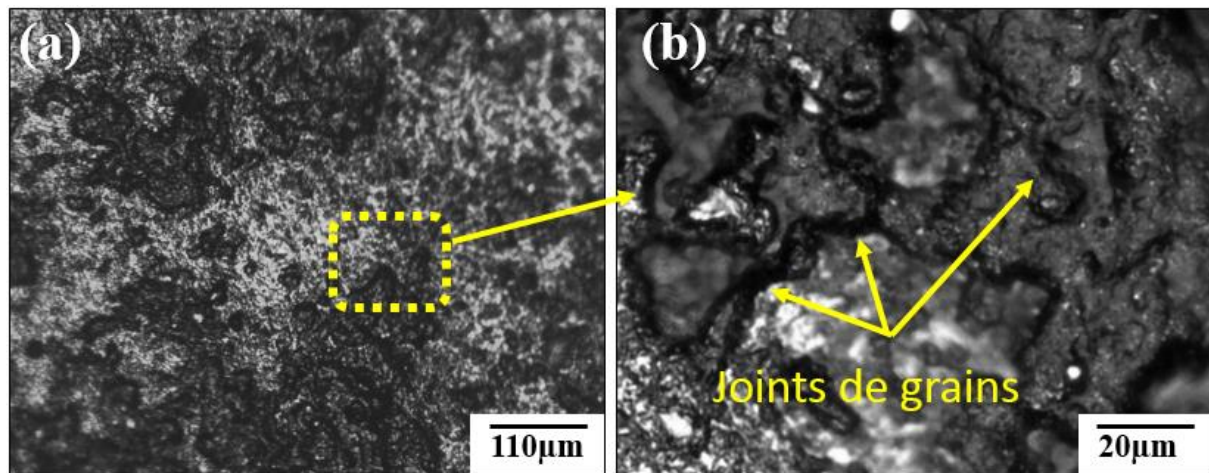


Figure III.16 : Morphologie de la corrosion de Cr_2O_3 traité après 38j d'immersion

La figure III.16(a) montre une distribution générale de la surface corrodée. On observe une rugosité hétérogène, indiquant une attaque localisée possible.

L'image à plus fort grossissement (figure III.16(b)) montre des joints de grains bien visibles, soulignés par les flèches. Cela indique que la corrosion a eu lieu de manière préférentielle au niveau des joints de grains, caractéristique typique d'un mécanisme de corrosion intergranulaire. Cette dégradation localisée peut être attribuée à la présence de défauts microstructuraux, tels que les interfaces grains/joints, qui agissent comme des sites préférentiels d'initiation de la corrosion.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Dans cette étude, nous avons examiné l'effet de traitement thermique à 800°C sur le comportement électrochimique d'un revêtement à base de Cr_2O_3 , obtenu par la technique de projection thermique HVOF. L'objectif était de mieux comprendre comment ce traitement influence les propriétés microstructurales, mécanique et électrochimique du revêtement.

Les résultats obtenus nous ont permis de tirer plusieurs conclusions importantes :

- le traitement thermique a amélioré la densité du revêtement en réduisant significativement la porosité, ce qui contribue à une meilleure protection de la surface.
- bien que la composition des phases ne soit pas modifiée, le traitement également favoriser une croissance des cristallites.
- une légère diminution de la micro-dureté a été observée après traitement thermique. (Sans traitement 1945 HV à 1838 HV après traitement) Cela peut s'explique par modification de la microstructure due au traitement thermique.
- le traitement a modifié la topographie de la surface. Une telle augmentation de la rugosité pourrait avoir un impact sur les propriétés fonctionnelles du revêtement, notamment en ce qui concerne la mouillabilité et les caractéristique tribologiques.
- le revêtement à base d'oxyde de chrome présente neutralement une bonne résistance à la corrosion, mais cette propriété a été encore améliorée grâce traitement thermique.

Références

- [1] SOKOLOV, Dmitry. Contribution au développement de la projection thermique à très faible pression (Thèse de doctorat). Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2009.
- [2] FANG, Dandan. Diagnostic et adaptation des trajectoires robotiques en projection thermique. (Thèse de doctorat). Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2010.
- [3] Ghilas, Bouzidi. Tenue à l'usure d'un revêtement en alumine obtenu par projection thermique flamme-fil (mémoire master) Université AbdeRahmane Mira- Bejaia, 2021.
- [4] LAMRAOUI, Amina. Traitement de surface par texturation laser: une alternative" propre" de préparation de surface pour la projection thermique (Thèse de doctorat). Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2011.
- [5] REDJDAL, Ouassila. Elaboration et caractérisation microstructurale, mécanique et électrochimique de dépôts FeCr réalisés par projection thermique sur substrat en acier de type XC38 (Thèse de doctorat) 2011.
- [6] MOIGN, Arnaud. Analyse du Cycle de Vie de supports en bois ou à base de bois, revêtus de métaux par projection arc-fil et de céramiques par projection plasma (Thèse de doctorat), Limoges, 2009.
- [7] Ouaret Nadjat, caractérisation d'un dépôt en cermet obtenu par la technique HVOF (mémoire master). Université AbdeRahmane Mira- Bejaia, 2024.
- [8] Tegguiche Zakaria, traitement de surfaces combinées d'un acier faiblement allié, Université Saad Dahleb-Blida, 2015.
- [9] Younes, Rassim . etude du comportement mécanique et microstructural des revêtements en céramiques obtenus par projection thermique (Thèse de doctorat) université AbdeRahmane Mira- Bejaia, 2016.
- [10] Hamza Hassaine, détermination des propriétés de surfaces des oxydes mixte Cr-Al à l'aide de la réaction de conversion de l'isopropanol, université de Blida 1, 2017.
- [11] Verger, Louisiane. Les oxydes de chrome dans les pigments et les décors de porcelaine. Diss. Université Pierre et Marie Curie-Paris VI, 2015.
- [12] DJAFRI, Dhiya Elhak. Etude structurale et électrique d'un matériau composite dopé par l'oxyde de chrome Cr_2O_3 (Thèse de doctorat).

Résumé

Les aciers possèdent un large domaine d'utilisation dans l'industrie, mais leur durabilité peut être limitée par l'usure et la corrosion. Pour améliorer la durée de vie des pièces en acier, un revêtement de surface a été appliqué dans cette étude. Il s'agit d'un revêtement en Cr_2O_3 déposé par projection thermique HVOF.

Un traitement thermique à 800°C a ensuite été appliqué sur le revêtement. Les propriétés suivantes ont été évaluées avant et après traitement thermique : propriétés structurales et microstructurales, microdureté et résistance à la corrosion. Les résultats ont montré que la rugosité augmente après traitement thermique, la dureté diminue, et la résistance à la corrosion s'améliore. Ces observations indiquent que le revêtement Cr_2O_3 appliqué par projection thermique HVOF constitue une solution efficace pour protéger les surfaces en acier contre la dégradation en environnement agressif.

Mots clés : HVOF, Cr_2O_3 , Traitement thermique, Corrosion

Abstract

Steels have a wide range of uses in industry, but their durability can be limited by wear and corrosion. To improve the service life of steel parts, a surface coating was applied in this study. This was a Cr_2O_3 coating deposited by HVOF thermal spraying.

The coating was then heat-treated at 800°C . The following properties were evaluated before and after heat treatment: structural and microstructural properties, microhardness and corrosion resistance. The results showed that roughness increased after heat treatment, hardness decreased and corrosion resistance improved. These observations indicate that Cr_2O_3 coating applied by HVOF thermal spraying is an effective solution for protecting steel surfaces against degradation in aggressive.

Keywords: HVOF, Cr_2O_3 , Heat treatment, Corrosion.

المخلص

يتمتع الفولاذ بمجموعة واسعة من الاستخدامات في الصناعة، ولكن يمكن أن تكون متانته محدودة بسبب التآكل ولتحسين العمر التشغيلي للأجزاء الفولاذية، تم تطبيق طلاء السطح في هذه الدراسة. كان هذا الطلاء عبارة عن طلاء Cr_2O_3 ترسيبه بالرش الحراري HVOF.

ثم تمت معالجة الطلاء بالحرارة عند درجة حرارة 800°C . تم تقييم الخصائص التالية قبل وبعد المعالجة الحرارية: الخصائص الهيكلية والبنية المجهرية والصلابة الدقيقة ومقاومة التآكل. أظهرت النتائج أن الخشونة زادت بعد المعالجة الحرارية، وانخفضت الصلابة وتحسنت مقاومة التآكل.

تشير هذه الملاحظات إلى أن طلاء Cr_2O_3 هو حل فعال لحماية أسطح الفولاذ من التدهور في المناطق القاسية

الكلمات المفتاحية : التآكل، المعالجة الحرارية، Cr_2O_3 ، HVOF.