

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 : CONSTRUCTION MÉCANIQUE

PAR :

HASNAOUI RAFIK

HAMITI YANIS

Thème

Caractérisations mécaniques et microstructurales d'un dépôt en NiCrBSi obtenu par deux procédés de projection thermique : Arc électrique et HVOF

Soutenu le 15-06-2023 devant le jury composé de :

Mr.	BRADAI M.A	Président
Mr.	YOUNES R	Rapporteur
Mr.	IDIR A	Examineur
Mr.	BOUKELOUCHE I	Invité

ANNÉE UNIVERSITAIRE 2022/2023

Remerciements

Remerciements

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

Nos vifs remerciements sont destinés 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.

Nous ne pouvons pas oublier de présenter notre gratitude à nos parents pour les efforts inlassables qu'ils ne cessent de déployer pour nous.

Nous remercions également les membres de jury qui nous font honneur en acceptant d'examiner et de juger notre travail.

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

Que tous ceux qui ont contribué à notre formation trouvent ici l'expression de nos sincères gratitude.

Enfin, un merci particulier à tous ceux qui nous ont apporté leur soutien.

Dédicace

Dédicace

Je dédie ce travail

A mes très chers parents

A mon frère et ma sœur

A tous mes proches

A tous les enseignants

A tous mes amis

HAMITI Yanis

Dédicace

Je dédie ce travail

A mes très chers parents

A mes frères et ma sœur

A tous mes proches

A tous les enseignants

A tous mes amis

HASNAOUI Rafik

Sommaire

Liste des figures

Liste des figures

Étude bibliographiques

Figure I.1	Les principaux procédés utilisés dans la projection thermique.....	05
Figure I.2	Principe de base de la projection thermique.....	06
Figure I.3	Schéma de principe du pistolet arc électrique.....	08
Figure I.4	Schéma de principe du pistolet flamme	10
Figure I.5	Schéma de principe du pistolet HVOF.....	12
Figure I.6	Les caractéristiques des paramètres qui influencent la projection thermique.....	15
Figure I.7	Prototype de torche utiliser en projection thermique	16
Figure I.8	Le procédé vitesse-températures de particules pour différents type de projection thermique	18
Figure I.9	Schéma de distance de projection dans le procédé de projection thermique. Tirée de (Fang, 2010).....	19
Figure I.10	Définie l'emplacement et la forme de buse	21
Figure I.11	Premier turboréacteur aéronautique avec des composants superalliage base nickel.....	23
Figure I.12	Principe générale de l'atomisation.....	25
Figure I.13	Schéma de principe de la pulvérisation cathodique.....	26
Figure I.14	Schéma de principe de réduction direct.....	27
Figure I.15	Différents type d'empilement dans les solides métallique	28
Figure I.16	maille cubique a face centre (CFC).....	29
Figure I.17	Nodule du nickel pur (99.9%), à côté d'un cube d'1 cm ³	30
Figure I.18	Forme allotropique de nickel beta.....	31
Figure I.19	Forme allotropique du nickel gamma.....	32
Figure I.20	Production et application sur le nickel.....	33

Liste des figures

Figure I.21	La microstructure du nickel gamma.....	33
--------------------	--	----

Matériaux et techniques

Expérimentales

Figure II.1	Image des échantillons obtenus après projection thermique.....	39
Figure II.2	Schéma de principe d'un pistolet a arc électrique type Arc Spray 234	41
Figure II.3	Schéma de principe d'un pistolet flamme HVOF	42
Figure II.4	Machines et équipements de prépolissage et polissage	43
Figure II.5	Microscope optique	44
Figure II.6	Dispositif Diffraction X	45
Figure II.7	Machines d'essai de micro-dureté Vickers (Zwick ZHU 2.5).....	48
Figure II.8	Profilomètre optique.....	49

Résultats et discussions

Figure III.1	Image par microscope optique pour l'échantillon Arc.....	50
Figure III.2	Image par microscope optique pour l'échantillon HVOF.....	51
Figure III.3	Image de Métallographie de l'échantillon HVOF	53
Figure III.4	Image de Métallographie de l'échantillon Arc.....	54
Figure III.5	Spectre de diffraction des rayons X et quantification des phases des revêtements en alliage à base de NiCrBSi (Spectre 1)	55
Figure III.6	Spectre de diffraction des rayons X et Quantification des phases des revêtements en alliage à base de NiCrBSi (Spectre 4).....	56
Figure III.7	Analyse de la dureté des deux échantillons par microdureté Vickers :	57

Liste des figures

	Distribution des valeurs Hv	
Figure III.8	L'allure typique de la courbe charge-décharge pour le procédé arc électrique	58
Figure III.9	L'allure typique de la courbe charge-décharge pour le procédé flamme HVOF	59
Figure III.10	L'allure typique de la courbe charge-décharge pour les deux procédés HVOF et arc électrique	60
Figure III.11	Les valeurs du module de Young obtenues pour chaque échantillon	62
Figure III.12	Le profil de rugosité obtenu après la projection thermique flamme HVOF	63
Figure III.13	Le profil de rugosité obtenu après la projection thermique à Arc électrique	64

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau II.1	Composition chimique du dépôt.	38
Tableau II.2	Composition chimique du substrat.	39
Tableau II.3	Paramètres de projection à l'arc.	40
Tableau II.4	Paramètres de projection à HVOF.	40
Tableau II.5	Présentation de différents échantillons réalisés.	40
Tableau III.1	Les valeurs obtenues par l'essai de la microdureté pour les deux échantillons.	61

Introduction générale

Introduction générale

L'objectif de cette recherche est probablement d'évaluer les propriétés mécaniques et microstructurales du dépôt obtenu par chaque procédé de projection thermique. Le dépôt NiCrBSi est souvent utilisé pour ses propriétés de résistance à la corrosion, de résistance à l'usure et de conductivité thermique comme les pièces mécaniques qu'on peut trouver dans des moteurs à combustion internes, l'arbre à cames et le vilebrequin.

Pour caractériser mécaniquement le dépôt, nous pouvons avoir utilisé des techniques telles que des essais de dureté, des essais de résistance à la traction, des essais de flexion ou des essais de fatigue. Ces tests permettent de mesurer les propriétés mécaniques du dépôt, telles que sa dureté, sa résistance à la traction, sa résistance à la flexion et sa durabilité en conditions de fatigue.

Quant à la caractérisation microstructurale, on a opté pour des techniques d'observation au microscope, telles que la microscopie optique ou la microscopie électronique à balayage (MEB), pour étudier la structure du dépôt à différentes échelles. Cela inclut l'examen de la taille et de la répartition des particules, la présence de fissures et la porosité des dépôts.

Les résultats de notre travail pourraient fournir des informations précieuses sur les performances des dépôts obtenus par les deux procédés de projection thermique et aider à déterminer quel procédé est le plus approprié pour certaines applications ou exigences spécifiques.

La projection thermique est une technologie de revêtement de surface largement utilisée dans diverses industries telles que l'aérospatiale, l'énergie, l'automobile et la construction, l'application d'une couche de protection améliore les propriétés de surface des pièces et des appareils.

Le premier chapitre donne un aperçu général de la projection thermique et décrit les principes de base et les applications de cette technologie. Il met en évidence également les avantages offerts par la projection thermique. Contenant une meilleure résistance à l'usure et à la corrosion et peut produire des revêtements de différentes épaisseurs.

Introduction général

Le deuxième chapitre se concentre sur les matériaux utilisés et les techniques expérimentales utilisées dans cette étude. Il consiste à détailler les dispositifs expérimentaux de projection thermique utilisés pour élaborer les dépôts, Les différentes techniques de caractérisation utilisées, Notamment l'analyse structurale par la diffraction des rayons X (DRX) et l'analyse microstructurale par microscopie électronique à balayage (MEB).

De plus, il discute l'utilisation de la microscopie optique comme outil d'observation des échantillons.

Le troisième chapitre présente les résultats obtenus et la discussion qui s'en suit. Ce chapitre donne un aperçu détaillé des méthodes utilisées pour étudier la porosité, les propriétés mécaniques et la rugosité des matériaux.

Diverses techniques de caractérisation telles que la microscopie optique. La diffraction des rayons X. la microdureté Vickers et les profilomètres peuvent être utilisées pour analyser et comprendre les propriétés des échantillons de revêtement par pulvérisation thermique. Il fournit une interprétation détaillée des résultats obtenus.

En conclusion, ce mémoire consiste à raisonner l'analyse approfondie des dépôts obtenus par projection thermique, en se concentrant sur la métallisation ITD. Les résultats et les considérations présentés dans cette étude contribueront à améliorer et optimiser les performance des matériaux de projection thermique dans diverses applications industrielles.

Chapitre I :

Recherche bibliographique

CHPITRE I

Caractérisation des dépôts obtenus par projection thermique

I.1 PROJRCION THERMIQUE

I.1.1 Historique de la projection thermique :

Tout commence au début du 20e siècle, vers 1912, lorsqu'un ingénieur suisse de Zurich, le Docteur Max Ulrich SCHOOP a eu idée était de réaliser des revêtements adhérents à partir d'impacts de particules issus d'une poudre chauffée venant s'écraser sur la pièce à traiter (substrat), pour réaliser des dépôts métalliques denses. Cette idée lui aurait été inspirée de l'observation de ses enfants tirant à la carabine sur le mur de son jardin où les balles de plomb formaient des impacts écrasés.

Au début des années 1900, Max Ulrich SCHOOP invente la projection thermique et faisant des expériences de pulvérisation de métal fondu (plomb) pour réaliser des enduits protecteurs.

En 1912, SCHOOP dépose son premier brevet couvrant l'utilisation d'un processus permettant de projeter du métal fondu vers un substrat, défini comme : « processus pour fondre des matériaux dans une zone de chauffage et de les propulser en état fondu et/ou ramolli par chaleur, sur une cible pour former un enduit ».

En 1913, SCHOOP remplace la poudre de métal par un fil métallique. Il incorpore un chalumeau sur l'appareil de projection. La métallisation fait un grand pas en avant, de plus, les revêtements étaient plus sains, du fait de la forte réduction des oxydes contenus dans le fil de métal.

Depuis 1914, le pistolet à fil et gaz n'a cessé de se perfectionner pour devenir un outil facile et sûr. Par la suite, SCHOOP remplaça le chalumeau par un arc électrique comme source de chaleur pour fondre le métal, qui était projeté par un jet d'air comprimé sur le substrat. Et en même année débute les premières applications industrielles de ces matériels sont faites, d'abord dans le domaine militaire (projection d'étain sur la face arrière d'obus), puis dans celui de l'anticorrosion (dépôt d'aluminium) et celui de la décoration (dépôt de bronze).

En 1915, SCHOOP fait des expériences concluantes sur la projection par arc électrique entre deux fils. Il dépose un brevet sur son principe.

En 1917, SCHOOP reçoit la récompense de John SCOTT, créée en 1834, qui honore le mérite des inventeurs, pour : « le procédé du brouillard en métal de SCHOOP ».

En 1917, SCHOOP reçoit la récompense de John SCOTT, créée en 1834, qui honore le mérite des inventeurs, pour : « le procédé du brouillard en métal de SCHOOP ». D'autres sont aussi récompensés tels que Marie CURIE, Guglielmo MARCONI, les frères WRIGHT et Thomas EDISON.

En 1924, Max Ulrich SCHOOP s'installe définitivement dans la renommée mondiale en donnant son nom au procédé de métallisation connu depuis sous le nom de « Schoopage ».

Dès 1930, la métallisation prit un essor considérable aux U.S.A, où des résultats encourageants furent obtenus sur des dépôts d'épaisseurs importantes, permettant d'envisager de rapporter du métal sur des pièces mécaniques usées. C'est le début de la technique dite de rechargement.

Dans les années 50, le développement du procédé a été caractérisé par l'étendue des matériaux projetés. Beaucoup de nouveaux alliages en métal ont été développés, en particulier pour l'utilisation dans les revêtements durs, ainsi que la pulvérisation de la céramique.

Jusqu'aux années 60, les deux procédés, par fil et par poudre, ont évolué séparément. Si le premier porte le nom de « Schoopage », la seconde porte couramment le nom de « Schori » dérivé du nom de Fritz SCHORI qui développa ce concept au début des années 30.

Dans les années 1980 est développé en URSS la technique de projection dynamique à froid (Cold Spray) à partir de l'observation accidentelle de la formation rapide de dépôts lors de l'érosion de particules exposées à un écoulement grande vitesse chargé de poudre fine [1].

I.1.2 Introduction à la projection thermique :

La projection thermique est un processus de revêtement de surface qui consiste à projeter des matériaux fondus ou semi-fondus sur une surface pour former une couche de revêtement protectrice. Cette technique est largement utilisée dans de nombreux secteurs industriels notamment l'aérospatiale, l'énergie, l'automobile et la construction pour améliorer les propriétés des surfaces des pièces ou des équipements.

La projection thermique peut être effectuée à l'aide de différents types de matériaux, tels que des métaux, des céramiques, des polymères, des alliages et des composites. Les matériaux

sont chauffés à des températures élevées à l'aide de diverses sources d'énergie, telles que des flammes, des arcs électriques, des plasmas et des faisceaux d'électrons. Les matériaux fondus ou semi-fondus sont ensuite propulsés à haute vitesse vers la surface de la pièce à l'aide d'air comprimé ou de gaz.

La projection thermique offre de nombreux avantages, notamment une amélioration de la résistance à l'usure, de la résistance à la corrosion, de la conductivité thermique et électrique, ainsi qu'une meilleure esthétique et une meilleure adhérence à la surface, et de même possède la capacité de produire des revêtements de différentes épaisseurs. Cette technique peut également être utilisée pour réparer ou restaurer des pièces endommagées ou usées.

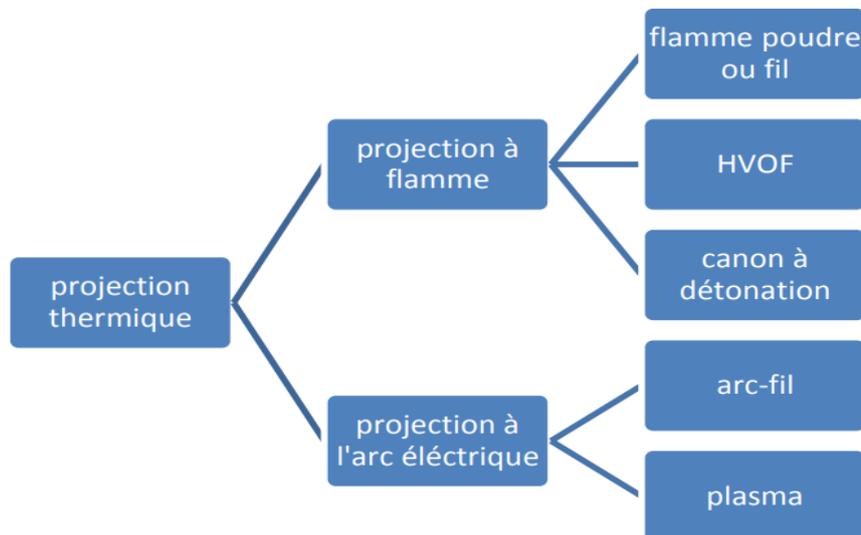


Figure I.1 : Les principaux procédés utilisés dans la projection thermique

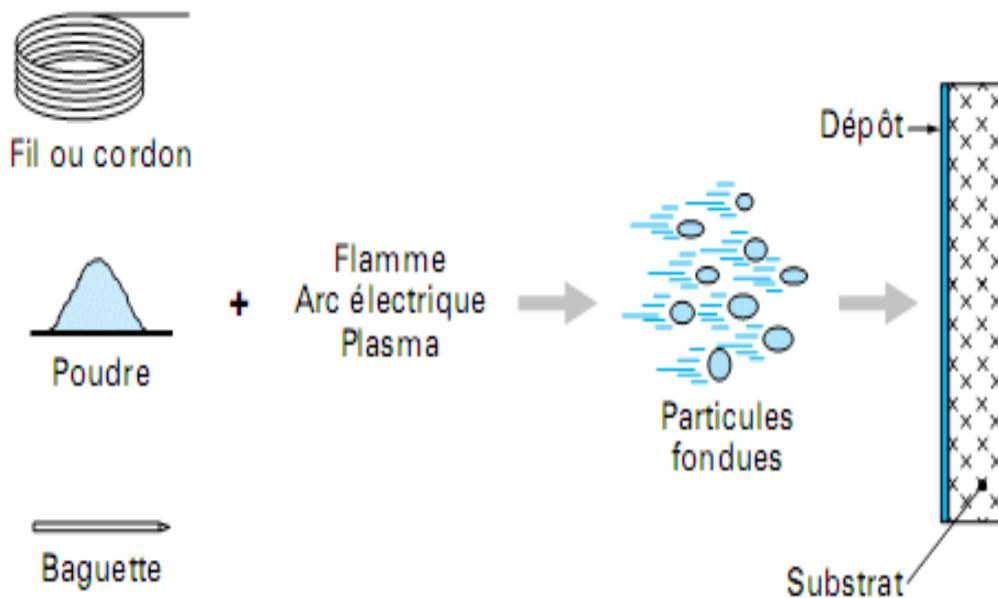


Figure I.2 : Principe de base de la projection thermique

I.1.3 Projection thermique a fil d'arc électrique

Le principe de la projection thermique a fil d'arc électrique consiste à faire jaillir un arc électrique entre deux électrodes (fils) consommables de même matériau que la surface comme source de chaleur, un jet d'air comprimé pulvérisant le métal fondu et le projetant sur le substrat.

Il s'agit d'un procédé de revêtement, à haut débit, généralement utilisé pour les applications de déposition de forte épaisseur et de restauration de surface. Aussi, il peut produire d'excellents revêtements métalliques tels que le molybdène, l'aluminium, le NiAl et le zinc utilisés pour la protection contre l'usure et la corrosion.

Le fil à arc peut être utilisé pour produire une large gamme de finitions de surface. Le procédé utilise un système bifilaire (système de transmission constitué de deux fils parallèles séparés par un isolant) chargé positif et négatif, puis utilise de l'air ou du gaz à haute pression pour atomiser et projeter le revêtement sur la surface de travail.

Les pistolets à arc électrique sont alimentés par des générateurs à courant continu, sous des tensions d'arc comprises entre 25 et 40 V, pour des intensités allant de 100 à 500 A.

Ils comprennent deux parties :

- Une partie entraînement du fil ;
- Une partie fusion/projection du métal fondu.

Les fils sont conditionnés en bobines et sont tirés, au travers de gaines souples, intégrées au pistolet et transformés par des moteurs électriques ou par des turbines à air. Dans le cas de fils très rigides ou de grandes distances entre pistolet et bobines (supérieures à 6 m), il est nécessaire d'associer à l'installation un système entraînement des fils par poussée, à l'entrée des gaines. Ce type d'équipement est appelé « push-pull ».

À l'intérieur du pistolet, les fils sont guidés par deux tubes contact permettant, le positionnement du fil avant entré dans la zone de fusion et, la transmission du courant électrique aux fils.

L'application d'un courant électrique sur les fils génère un arc électrique qui permet de les fondre (température d'environ 6 000 °C). Les fils fondus sont alors pulvérisés grâce à un jet d'air comprimé et projetés sur le substrat pour former le dépôt.

La température atteinte et l'énergie cinétique élevée acquise par les particules grâce au jet d'air comprimé ($V = 250$ m/s) permettent des projections avec des caractéristiques de dépôts performantes :

- Porosité de 5 à 10 % ;
- Épaisseur des dépôts de 0,2 à 3 mm ;
- Force d'accrochage : 20 à 40 MPa ;
- Taux horaire de dépôt de 5 à 30 kg/h.

Les seuls freins à son utilisation résident dans la nature des matériaux à projeter qui doivent être conducteurs, dans la structure... [1].

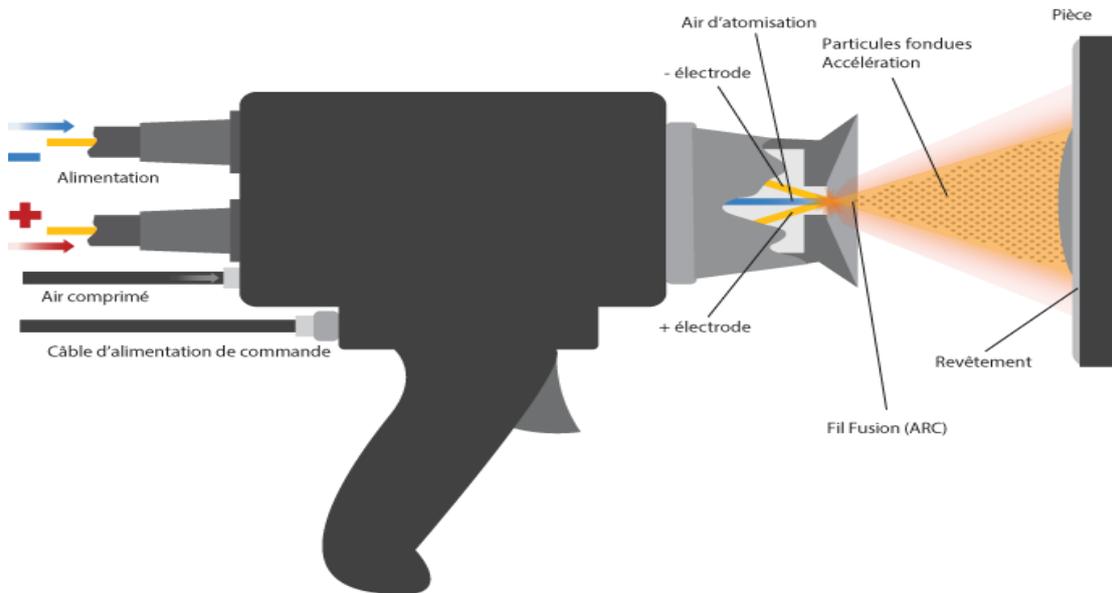


FIGURE I.3 : Schéma de principe du pistolet arc électrique

I.1.4 Projection thermique spray flamme:

La projection à la flamme constitue une alternative efficace et économique pour l'application de revêtements métalliques et en céramique dans un environnement moins exigeant.

Ce procédé est le plus simple des procédés de projection thermique. Il utilise la chaleur produite par la combustion d'un carburant gazeux pour fondre le matériau de revêtement [2].

I.1.4.1 Flamme Oxy-gaz à poudre :

Son principe consiste à introduire un matériau, sous forme de poudre, au centre d'une flamme oxy-combustible (généralement de l'acétylène ou du propane avec de l'oxygène) produite par un chalumeau et de le véhiculer grâce à l'énergie cinétique transmise par les gaz de combustion. Au cours de ce processus, un matériau consommable (généralement, une poudre ou un fil) est chauffé et propulsé sur un substrat pour former un revêtement.

Le pistolet de projection est équipé d'un chalumeau oxy-gaz de forme cylindrique alimenté en périphérie par les gaz de combustion (en général un mélange oxy-acétylène ou oxy-propane). La poudre est distribuée en son centre par gravité, ou par un distributeur désolidarisé du pistolet [3].

I.1.4.2 Flamme Oxy-gaz à 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.

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

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

La partie chalumeau : qui utilise des gaz de combustion identiques à ceux utilisés en flamme-poudre, soit oxygène + gaz combustible (généralement acétylène ou propane). Elle se compose d'un mélangeur, d'une buse à gaz annulaire et d'une buse à air.

La partie entraînement : du fil, qui peut être animée soit par un système à turbine, soit par un moteur à air comprimé, soit par un moteur électrique.

Ces différents types d'entraînement communiquent un mouvement de rotation à deux molettes enserrant le fil et le poussant au travers de la buse à gaz du chalumeau. Suivant le diamètre du fil, le serrage des molettes peut être obtenu par un système à ressort ou par une pression d'air [3].

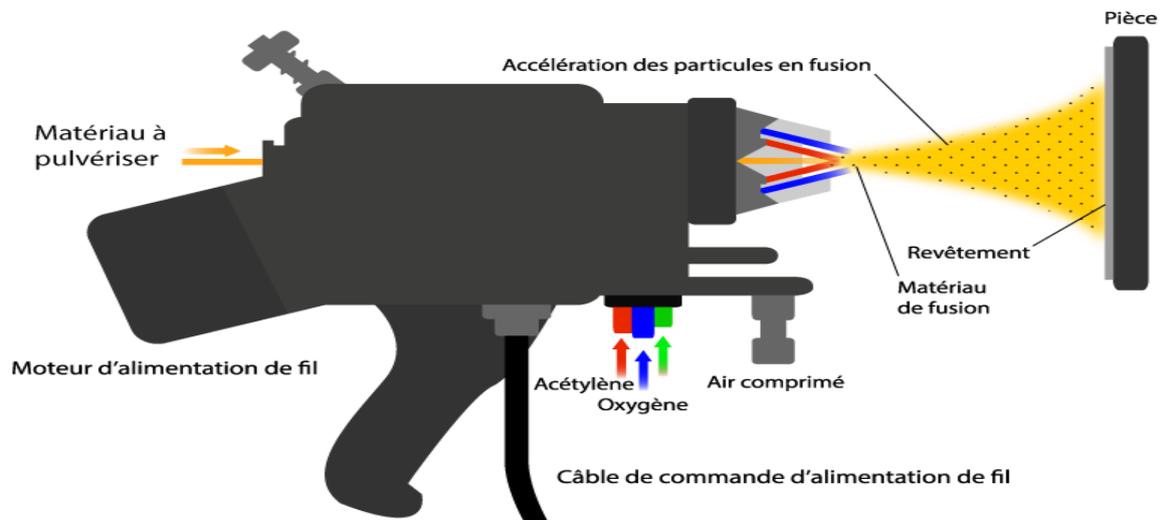


Figure I.4 : Schéma de principe du pistolet flamme

I.1.5 Projection thermique plasma

La projection plasma permet d'obtenir un revêtement de haute qualité en combinant une source de chaleur à température élevée et hautement énergétique avec un milieu de projection relativement inerte (généralement de l'argon) et des particules à vitesse élevée.

Plasma est un terme utilisé pour décrire un gaz qui a été chauffé à une température suffisante pour s'ioniser et devenir électriquement conducteur.

L'utilisation de cette technologie permet la projection de presque n'importe quel métal ou céramique sur de nombreux matériaux, avec une force d'assemblage exceptionnelle et réduction optimale de la déformation du substrat.

Bien que les termes de « flamme plasma » ou « jet de plasma » soient souvent utilisés, il s'agit en réalité d'un plasma « d'arc ».

Le plasma d'arc est une atmosphère fortement dissociée et ionisée, conductrice d'un courant d'électricité. Il faut savoir que dans tout arc électrique on trouve une gaine de plasma dont l'application n'est pas nouvelle.

La source de chaleur utilisée est un plasma thermique créée par l'ionisation partielle d'un gaz plasmagène. Le gaz, qui ne se trouve plus sous sa forme gazeuse, mais à l'état plasma, produit alors de hautes températures. La particularité de ce système de projection, est la très forte constriction imposée à l'arc, qui permet d'atteindre dans le plasma des températures très élevées.

L'énergie fournie et la température atteinte, dépendent directement de la puissance électrique fournie à la source, du débit masse et de la nature du gaz plasmagène ainsi que la géométrie de la torche (diamètre interne, forme de l'anode, mode d'injection du gaz). En ce qui concerne la nature du gaz, l'énergie contenue dans ce dernier se libère différemment avec l'augmentation de la chaleur.

L'eau est également utilisée comme milieu plasmatique, car dissociée dans l'arc, elle donne un plasma riche en hydrogène, donnant des puissances très supérieures aux plasmas de gaz [4].

I.1.6 Procédé de projection thermique HVOF

Les procédés HVOF se répartissent en deux familles :

Moyenne pression: qui fonctionne avec un mélange oxygène/carburant gazeux (propane, propylène...etc.).

Ces appareils opèrent à des pressions de combustion comprises entre 2 et 4 MPa.

Haute pression : qui fonctionnent avec un mélange oxygène/carburant liquide (kérosène, white spirit...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, mais surtout une forte élévation de la vitesse d'impact, comprise entre 700 et 900m/sec.

Ce procédé est principalement utilisé pour projeter des métaux (Inox, Chrome, Molybdène, Inconel, MCrAlY, NiCR), des alliages de métaux, des alliages auto-fusibles, des carbures et des cermets (WC-Co, TiC-Ni) ou des céramiques.

Les applications sont les protections anticorrosion et anti-usure, avec la possibilité de réaliser des dépôts de fortes épaisseurs (en plusieurs passes), dont la densité obtenue approche la densité théorique du matériau d'apport [5].

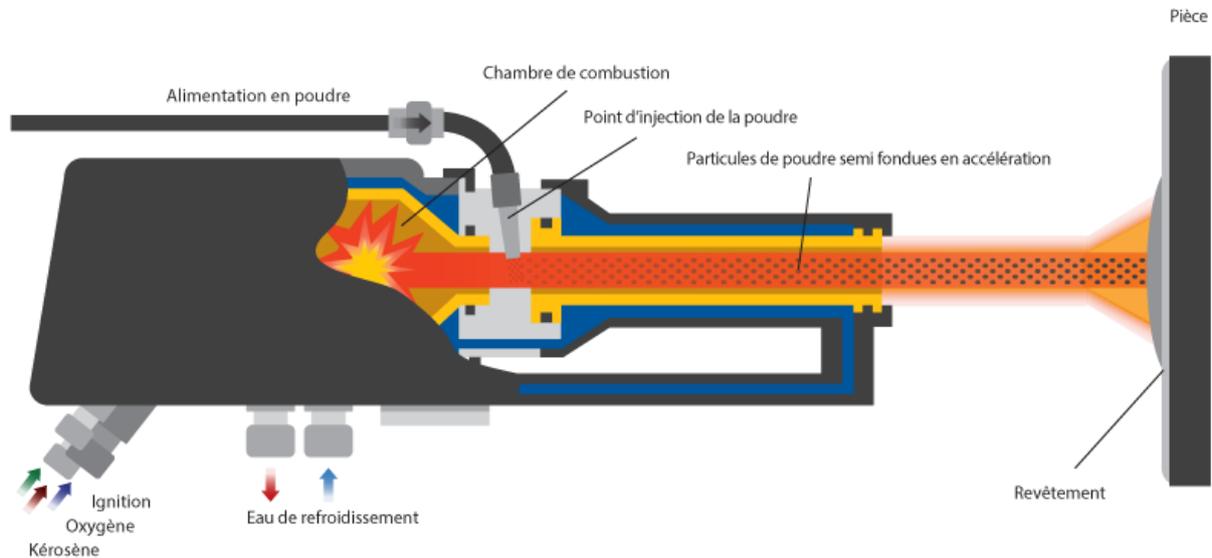


Figure I.5 : Schéma de principe du pistolet HVOF

I.1.7 Système de projection thermique HVOF

Le système de projection thermique HVOF (High Velocity Oxygen Fuel) comprend plusieurs composants clés qui fonctionnent ensemble pour produire un revêtement de haute qualité. Voici quelques-uns des composants les plus courants d'un système de projection thermique HVOF :

Le générateur de gaz combustibles : fournit le gaz combustible, généralement de l'hydrogène ou du propane, pour la combustion dans la chambre de combustion.

La chambre de combustion : où le gaz combustible et l'oxygène sont brûlés pour créer une flamme à haute température et haute pression.

La buse de projection : où le matériau de revêtement est introduit dans la flamme et projeté sur la surface à revêtir à haute vitesse.

Le système d'alimentation en poudre : fournit la poudre de matériau de revêtement à la buse de projection.

Le système de contrôle de gaz : assure un flux de gaz stable et constant tout au long du processus de projection.

Le système de contrôle de température : maintient la température de la flamme et du matériau de revêtement à des niveaux optimaux pour une projection de qualité.

Le système de contrôle de la pression : maintient une pression constante tout au long du processus de projection pour garantir un revêtement uniforme.

Les différents composants d'un système de projection thermique HVOF sont conçus pour fonctionner ensemble de manière coordonnée et efficace, afin de produire un revêtement de haute qualité qui répond aux spécifications de conception.

I.2 INFLUENCE DES PRINCIPAUX PARAMETRES DE PROJECTION THERMIQUE HVOF

La projection thermique HVOF (High Velocity Oxygen Fuel) est une technique de revêtement de surface qui implique la pulvérisation de matériaux à haute vitesse sur une surface à l'aide d'une flamme de combustible et d'un jet d'oxygène. Les paramètres de projection thermique HVOF jouent un rôle important dans la qualité du revêtement obtenu et les propriétés du matériau projeté. Voici quelques-uns des principaux paramètres de projection thermique HVOF et leur influence sur le processus de projection thermique et les propriétés du revêtement [6].

I.2.1 La pression de l'oxygène:

La pression de l'oxygène est un paramètre important pour la projection thermique HVOF car elle influence la combustion du carburant (généralement de l'hydrogène ou du propane) et la vitesse de projection des particules. Une pression plus élevée de l'oxygène peut améliorer la vitesse de projection et la qualité du revêtement [7].

I.2.2 La température de combustion:

La température de combustion est un paramètre important qui détermine la vitesse de projection des particules et la qualité du revêtement. Les températures plus élevées de la flamme peuvent améliorer la fusion et la cohésion de la poudre ce qui permet d'améliorer l'adhérence et la porosité du revêtement. Tandis que des températures excessivement élevées peuvent provoquer la décomposition de la poudre [8].

I.2.3 La vitesse de pulvérisation (vitesse de projection) :

Est un paramètre important car elle détermine la quantité de matériau projeté ainsi la quantité de chaleur générée et la température de la flamme. Des vitesses de combustion plus élevées peuvent produire des températures plus élevées, ce qui peut améliorer l'adhérence et la densité du revêtement. Cependant, des vitesses de combustion excessivement élevées peuvent également entraîner une détérioration de la qualité du revêtement en raison de l'agglomération des particules de poudres [9].

I.2.4 Composition de la poudre :

La composition de la poudre est importante car elle détermine la composition chimique et les propriétés du revêtement final. Différentes compositions de poudre peuvent être utilisées pour produire des revêtements résistants à la corrosion, résistants à l'usure ou résistants à la chaleur, en fonction des besoins spécifiques l'application [10].

I.2.5 Le matériau du substrat :

Le matériau du substrat est un paramètre important qui influence la qualité et la compatibilité du revêtement. Des substrats compatibles peuvent améliorer l'adhérence et la résistance à l'usure du revêtement [10].

I.2.6 Distance de projection :

La distance de projection est importante car elle détermine la vitesse et la taille des particules de poudre lorsqu'elles atteignent la surface à revêtir. Des distances plus courtes peuvent produire des revêtements plus denses et plus homogènes, tandis que des distances plus longues peuvent produire des revêtements plus poreux et rugueux [10].

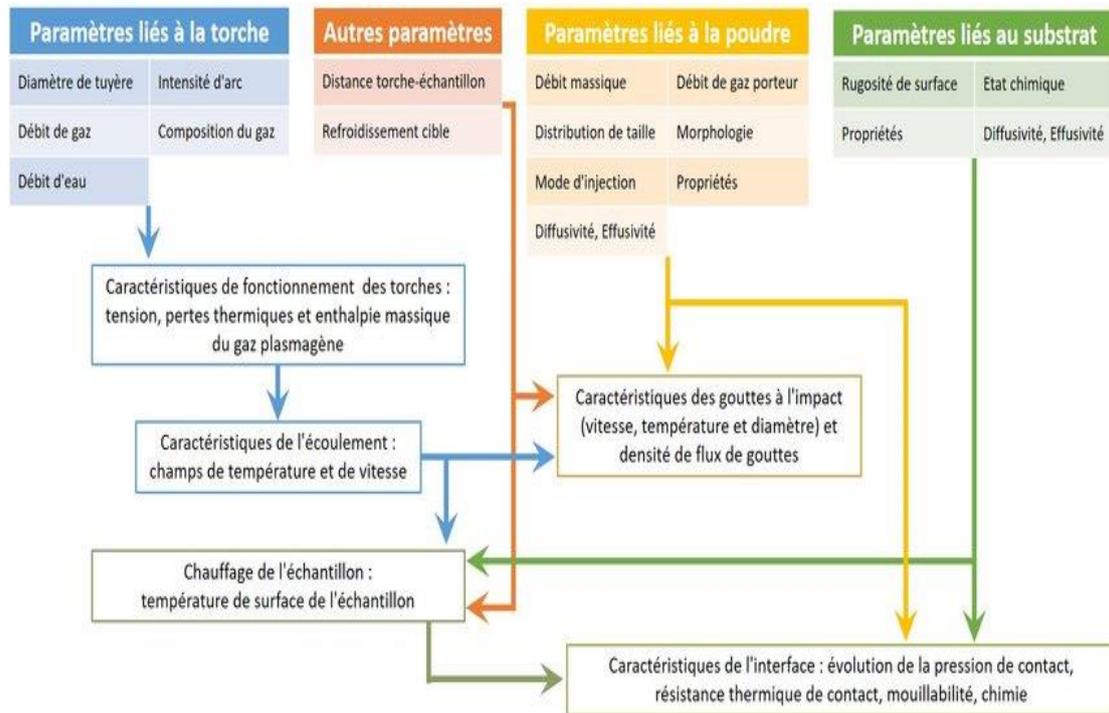


Figure I.6 : Les caractéristiques des paramètres qui influencent la projection thermique

I.3 Paramètres de la torche

Les paramètres de la torche en projection thermique varient en fonction du matériau à projeter et des caractéristiques de la surface à revêtir.

La torche est l'endroit où se mélangent les gaz avec la poudre alimentée et la combustion se produit. Le principal composant de la torche est la buse. Cette dernière se détériore après chaque utilisation et un arrangement est nécessaire après 16 heures de projection. Un surdimensionnement de la buse peut produire de chutes de pression des gaz ce qui causerait une réduction dans la vitesse des particules affectant la qualité des revêtements. La buse ainsi que les autres composants de la torche (la chambre de combustion et la tête de combustion) doivent être remplacés par des composants nouveaux après 60 heures d'utilisation [15].

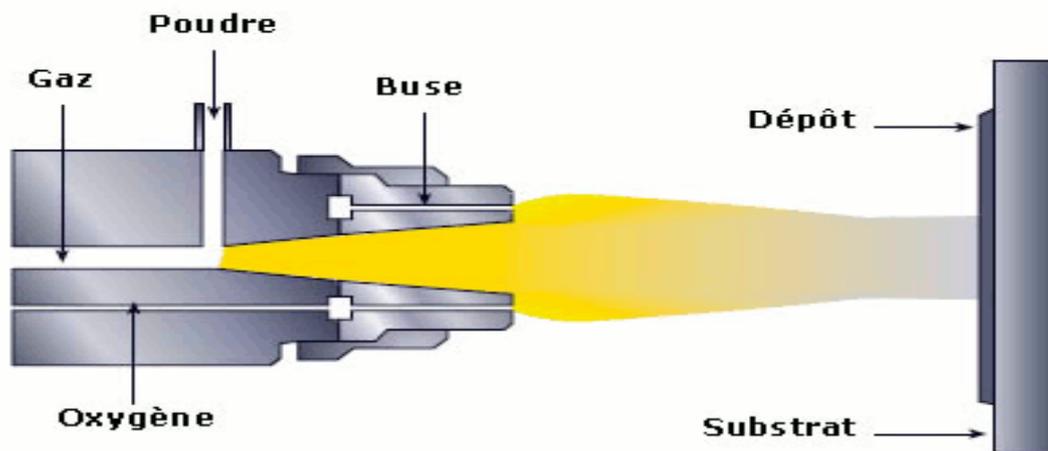


Figure I.7 : Prototype de torche utilisée en projection thermique

Cependant, voici quelques paramètres généraux à prendre en compte :

I.3.1 Débit de matières premières (Feedstock Spray Rate) :

Le débit de matières premières, également connu sous le nom de "Feedstock Spray Rate", est un autre paramètre important de la torche en projection thermique. Ce paramètre correspond à la quantité de matière première (sous forme de fil, de barre, de ruban ou de poudre) qui est introduite dans la torche et qui est transportée par le gaz porteur pour être projetée sur la surface à revêtir, le débit de matières premières est généralement mesuré en unités de volume par unité de temps, telles que les litres par minute (LPM) ou les pieds cubes par heure (CFH).

Le débit de matières premières peut affecter plusieurs aspects de la projection thermique, notamment :

I.3.1.1 Qualité du revêtement:

Un débit de matières premières mal ajusté peut entraîner un revêtement mince et irrégulier, ou au contraire un revêtement épais et non homogène.

I.3.1.2 Porosité:

Un débit de matières premières insuffisant peut entraîner une porosité excessive du revêtement, tandis qu'un débit trop élevé peut provoquer des éclaboussures excessives et donc également une porosité excessive.

I.3.2 La vitesse de particules

En projection thermique, la vitesse de particules est un paramètre important qui fait référence à la vitesse à laquelle les particules de matériau en fusion sont projetées à travers la torche et sur la surface de la pièce à revêtir.

La vitesse de particules est généralement mesurée en mètres par seconde (m/s) ou en pieds par seconde (ft/s). Elle dépend de nombreux facteurs, tels que la pression du gaz porteur, la taille des particules de matériau, la distance entre la torche et la pièce, et la puissance du dispositif de projection thermique.

Un taux de projection de particules élevé peut augmenter l'efficacité du revêtement et réduire le temps nécessaire pour couvrir une surface donnée, mais il peut également augmenter le risque de surchauffe et de fissuration de la surface de la pièce.

Un taux de projection de particules faible peut prendre plus de temps pour appliquer le revêtement, mais peut être nécessaire pour certains types de matériaux ou de pièces plus sensibles à la chaleur.

Il est important de noter que la vitesse de particules peut varier en fonction de nombreux facteurs, et doit être ajustée en fonction des exigences spécifiques de chaque application de projection thermique. Le contrôle précis de la vitesse de particules est donc un élément clé pour obtenir des revêtements de qualité et des résultats satisfaisants en projection thermique [8].

I.3.3 Température de particules :

La température des particules projetées est un paramètre important dans le processus de projection thermique car elle affecte directement la qualité et les propriétés du revêtement déposé.

Lorsque la torche de projection thermique est allumée, elle génère une flamme qui chauffe le matériau de projection, qui peut être sous forme de poudre, de fil, de ruban ou d'autres formes. Cette chaleur fond le matériau de projection, qui est alors projeté sur la surface à revêtir.

La température des particules projetées dépend de plusieurs facteurs, notamment la puissance de la torche, la composition du matériau de projection, la distance entre la torche et la surface à revêtir, la vitesse de projection et la taille des particules. En général, les températures des particules projetées peuvent varier de quelques centaines de degrés Celsius à plus de 3000 degrés Celsius, selon le type de matériau et le processus de projection thermique utilisé.

Une température élevée peut être nécessaire pour fondre certains matériaux de projection, tandis qu'une température plus faible peut être nécessaire pour éviter la dégradation du matériau ou la formation de pores dans le revêtement. Le choix de la température des particules projetées dépendra donc des propriétés du matériau de projection et des propriétés souhaitées pour le revêtement final [8].

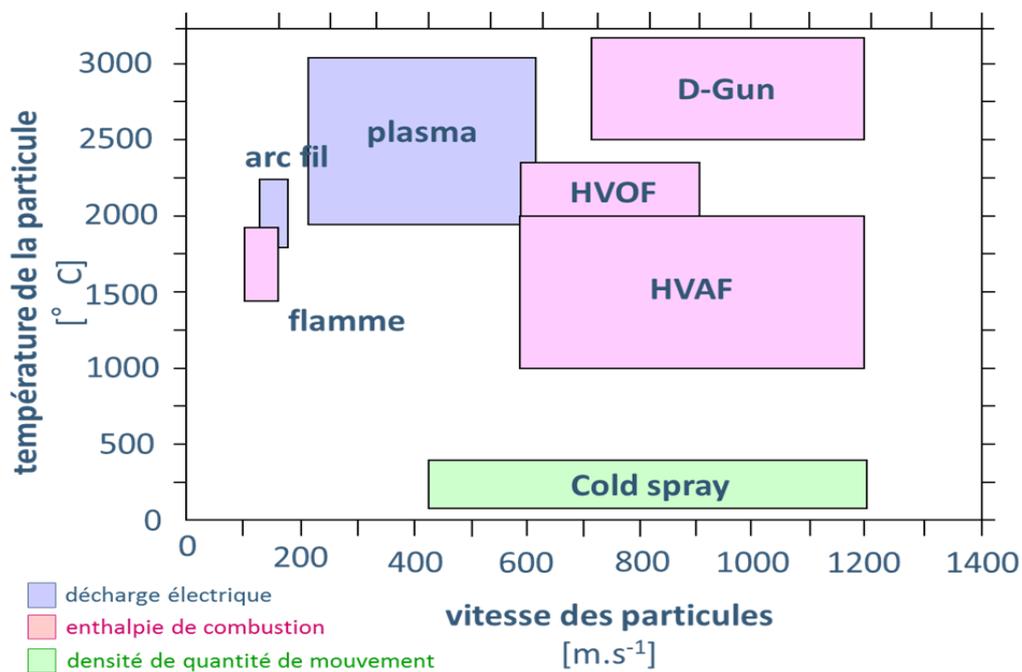


Figure I.8 : Le procédé vitesse-température de particules pour différents types de projection thermique

I.3.4 Distance de projection

La distance de projection est un paramètre important dans le processus de projection thermique, qui peut avoir un impact significatif sur la qualité et les propriétés du revêtement déposé.

La distance de projection se réfère à la distance entre la torche de projection thermique et la surface à revêtir. Elle peut varier en fonction du matériau de projection, de la puissance de la torche, de la taille des particules, de la vitesse de projection et d'autres facteurs.

Une distance de projection trop courte peut entraîner un dépôt de matériau inégal, des porosités, une surchauffe ou une fonte incomplète du matériau de projection. Une distance de projection trop longue peut entraîner une perte d'énergie, une dispersion des particules et une faible adhérence du matériau de projection sur la surface à revêtir.

En général, la distance de projection optimale est déterminée en fonction des propriétés spécifiques du matériau de projection, des propriétés requises pour le revêtement final et des conditions de projection thermique.

Des essais d'optimisation des paramètres de projection peuvent être nécessaires pour déterminer la distance de projection optimale pour chaque application [9].

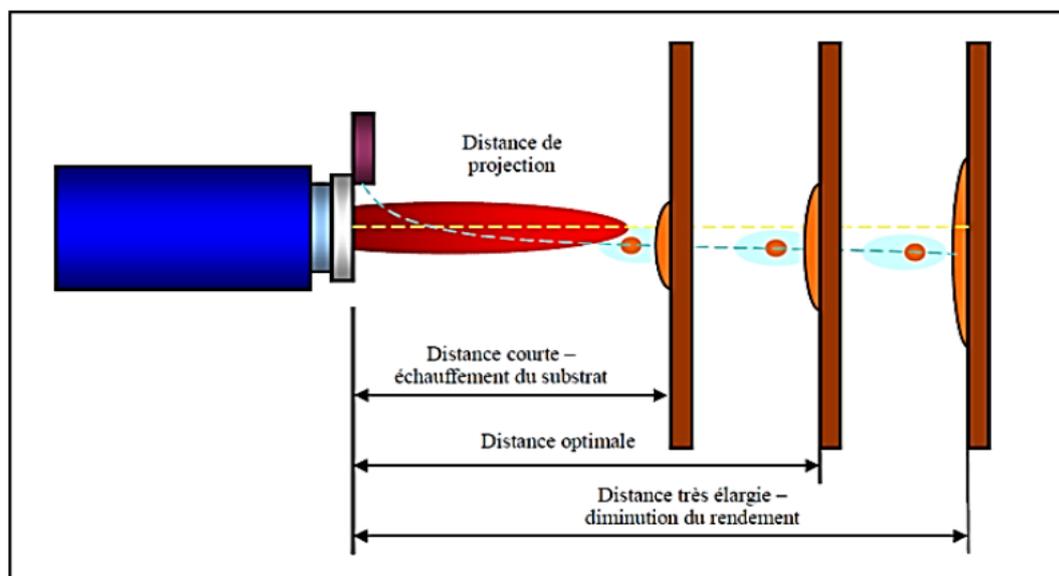


Figure I.9 : Schéma de distance de projection dans le procédé de projection thermique

I.3.5 Température du substrat :

La température du substrat est un paramètre important dans le processus de projection thermique, car elle peut avoir un impact significatif sur la qualité et les propriétés du revêtement déposé.

La température du substrat se réfère à la température de la surface à revêtir avant l'application du matériau de projection thermique. Cette température peut varier en fonction du matériau du substrat, de l'environnement de travail, de la puissance de la torche, de la taille des particules, de la vitesse de projection et d'autres facteurs.

Si la température du substrat est trop basse, le matériau de projection peut ne pas adhérer correctement à la surface et peut se fissurer ou se décoller plus tard. Si la température du substrat est trop élevée, le matériau de projection peut fondre excessivement, conduisant à une porosité accrue dans le revêtement.

Il est important de maintenir la température du substrat dans une plage optimale en fonction des propriétés du matériau de projection, des propriétés requises pour le revêtement final et des conditions de projection thermique.

Des techniques telles que le préchauffage du substrat, la sélection d'un matériau de projection approprié et la modification de la puissance et de la distance de projection peuvent être utilisées pour contrôler la température du substrat et obtenir un revêtement de haute qualité [9].

I.3.6 Forme de la buse :

La forme de la buse est un paramètre important dans le processus de projection thermique, car elle peut avoir un impact significatif sur la qualité et les propriétés du revêtement déposé.

La buse est l'élément de la torche de projection thermique qui dirige le flux de gaz porteur et de matériau de projection vers la surface à revêtir. La forme de la buse peut varier, mais en général, elle est conique ou cylindrique, avec une ouverture plus petite à l'extrémité de la buse.

La forme de la buse peut affecter la distribution de la chaleur et des particules sur la surface à revêtir, ainsi que la vitesse et la direction du flux de matériau de projection. Une buse

conique peut produire une couverture plus large et plus uniforme, tandis qu'une buse cylindrique peut produire un jet plus étroit et concentré.

Le choix de la forme de la buse dépendra de facteurs tels que le matériau de projection, la taille des particules, la vitesse de projection, la distance de projection et les propriétés requises pour le revêtement final. Des essais et des ajustements peuvent être nécessaires pour déterminer la forme de buse optimale pour chaque application [9].

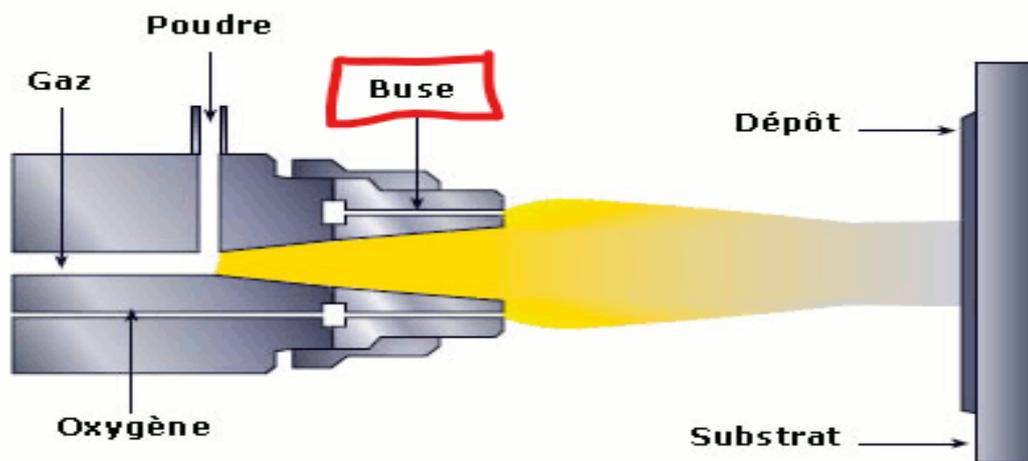


Figure I.10 : L'emplacement et la forme de buse

I.4 LES SUPERALLIAGES A BASE DE NICKEL

I.4.1 Introduction

Les superalliages à base de nickel sont des matériaux métalliques avancés utilisés dans les applications à haute température telles que les turbines à gaz, les réacteurs nucléaires, les moteurs d'avions, les turbines à vapeur, les turbines à gaz d'énergie, etc...

Ces alliages ont une résistance exceptionnelle à la corrosion et aux hautes températures, ce qui les rend idéaux pour des environnements exigeants.

Les superalliages à base de nickel sont constitués d'un mélange complexe de métaux et d'éléments d'alliage tels que le chrome, le cobalt, le tungstène, le molybdène, le niobium et le titane.

Les alliages de nickel sont également renforcés par des précipités métalliques ou céramiques pour améliorer la résistance à la corrosion, la stabilité thermique et la résistance à la déformation à haute température.

Les superalliages à base de nickel peuvent supporter des températures allant jusqu'à 1000°C ou plus, ce qui est essentiel pour les applications à haute température. Ils sont également résistants à la corrosion par des environnements corrosifs tels que les gaz chauds et les fluides corrosifs.

Les superalliages base nickel sont produits par fusion, puis ils sont coulés sous forme de lingots, qui sont ensuite forgés ou laminés à chaud pour obtenir la forme finale du produit. Ils peuvent également être fabriqués par métallurgie des poudres, qui consiste à mélanger des poudres d'alliage, puis à les compacter et à les fritter à haute température.

En raison de leurs excellentes propriétés mécaniques et de leur résistance à la corrosion, les superalliages à base de nickel sont largement utilisés dans des applications critiques où la fiabilité et la sécurité sont primordiales. Cependant, en raison de leur coût élevé et de leur complexité de traitement, ils sont souvent réservés pour les applications les plus exigeantes.

I.4.2 Historique des super alliages à base de nickel

Les superalliages à base de nickel ont été développés pour répondre aux besoins de l'industrie aéronautique dans les années 1940. Le développement de ces alliages a été stimulé par la demande croissante pour des matériaux résistants à haute température et à la corrosion, qui sont nécessaires pour les moteurs d'avions.



Figure I.11 : Premier turboréacteur aéronautique avec des composants superalliage base Nickel

En 1940, le premier superalliage à base de nickel, connu sous le nom d'alliage N-155, a été développé par la société Inco pour être utilisé dans les moteurs d'avions.

En 1948, le premier superalliage à base de nickel commercialisé a été l'Inconel 600, introduit par la société Inco, ainsi d'autres superalliages à base de nickel ont été développés pour répondre aux besoins de l'industrie.

Dans les années 1950 et 1960, les superalliages à base de nickel ont été utilisés pour la première fois dans les turbines à gaz. Les alliages Nimonic ont été développés pour résister aux températures élevées et à l'oxydation, tandis que les alliages Inconel ont été développés pour leur résistance à la corrosion et à l'érosion.

Dans les années 1970 et 1980, les superalliages à base de nickel ont été utilisés pour les aubes de turbine des moteurs d'avions, ce qui a permis de réaliser des économies de carburant et une amélioration des performances des moteurs. Au fil des ans, les superalliages à base de nickel ont été développés pour des applications plus exigeantes, comme les environnements de haute pression et haute température rencontrés dans les centrales nucléaires et les turbines à gaz [12].

I.4.3 Élaboration des poudres à base Nickel :

Les superalliages à base de nickel peuvent être fabriqués à partir de poudres métalliques à haute pureté. L'élaboration de ces poudres peut se faire selon différentes méthodes, dont voici quelques exemples :

I.4.3.1 La méthode de l'atomisation :

Est l'une des méthodes les plus courantes pour produire des poudres à base de nickel pour les superalliages. Elle consiste à faire fondre le métal dans un four à induction ou à arc électrique, puis à le projeter à travers une buse sous pression d'un gaz inerte, généralement de l'argon. Le métal fondu est pulvérisé en fines gouttelettes qui se solidifient en refroidissant rapidement en contact avec l'air ambiant. Les gouttelettes sont collectées dans un récepteur situé sous la buse.

Le choix des paramètres de la méthode d'atomisation, tels que la température de fusion du métal, la pression du gaz inerte, la taille de la buse et la distance entre la buse et le récepteur, peut influencer la taille, la forme et la distribution de la taille des particules obtenues. Les poudres obtenues par cette méthode ont généralement une taille de particules comprise entre 5 et 200 microns et peuvent être utilisées pour produire des pièces par différentes techniques de frittage, de forgeage, de laminage ou de moulage sous pression

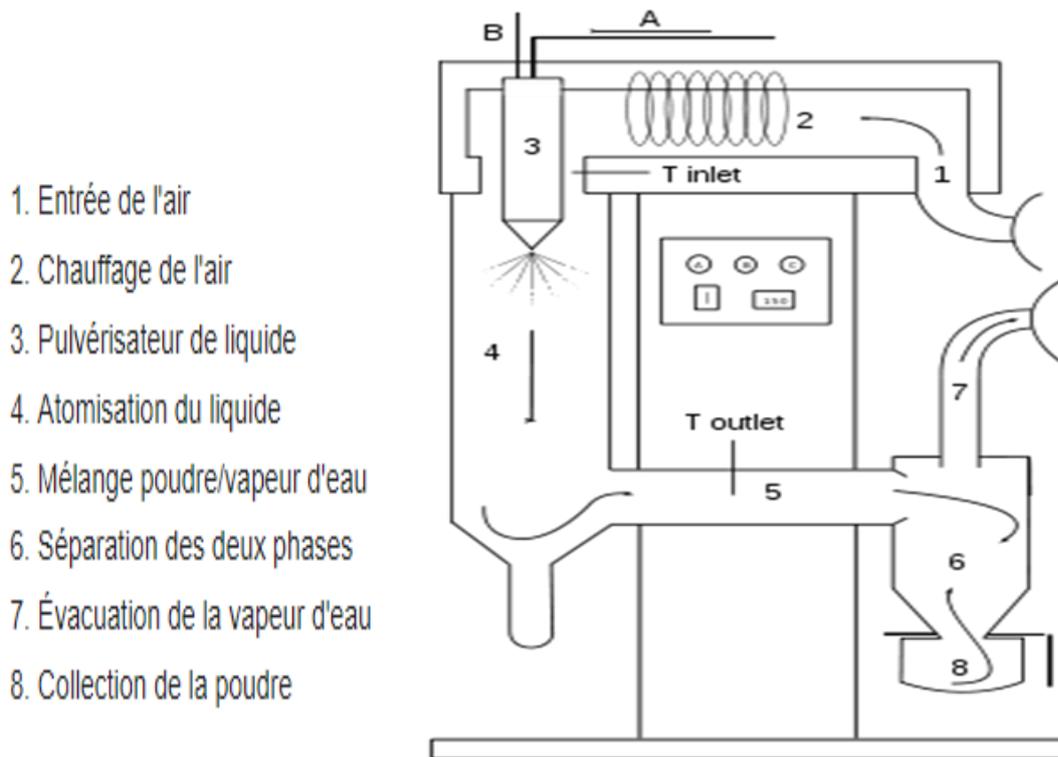


Figure I.12 : Principe général de l'atomisation

Les avantages de la méthode d'atomisation comprennent la production de poudres de haute pureté avec une distribution de taille de particules étroite, ainsi que la possibilité de produire des alliages à partir de plusieurs éléments métalliques en même temps. Cependant, cette méthode peut être coûteuse et nécessite des équipements spécialisés pour la production à grande échelle.

I.4.3.2 La pulvérisation cathodique :

Est une méthode de production de poudres à base de nickel pour les superalliages qui utilise un processus de vaporisation contrôlée pour déposer des couches minces de métal sur un substrat. Cette méthode est similaire à celle utilisée pour produire des revêtements de surface sur des pièces métalliques, mais elle peut également être utilisée pour produire des poudres à haute pureté avec des propriétés spécifiques.

Le processus de pulvérisation cathodique consiste à placer une cible métallique de nickel dans une chambre sous vide. Un gaz, généralement de l'argon, est introduit dans la chambre, puis un courant électrique est appliqué à la cible, créant un plasma d'ions de nickel. Les ions

sont alors accélérés vers le substrat, qui peut être une plaque de verre, une plaque de métal ou une autre surface de collecte. Les ions de nickel se condensent sur le substrat pour former une couche mince de métal.

Pour produire des poudres de nickel, le substrat est généralement tourné à grande vitesse pour favoriser la fragmentation des dépôts de nickel en fines particules. Ces particules peuvent être collectées dans une chambre de récupération et transformées en poudres. Les propriétés des poudres produites par cette méthode dépendent des paramètres de pulvérisation cathodique tels que la pression de gaz, la puissance de décharge, la distance entre la cible et le substrat, et la vitesse de rotation du substrat.

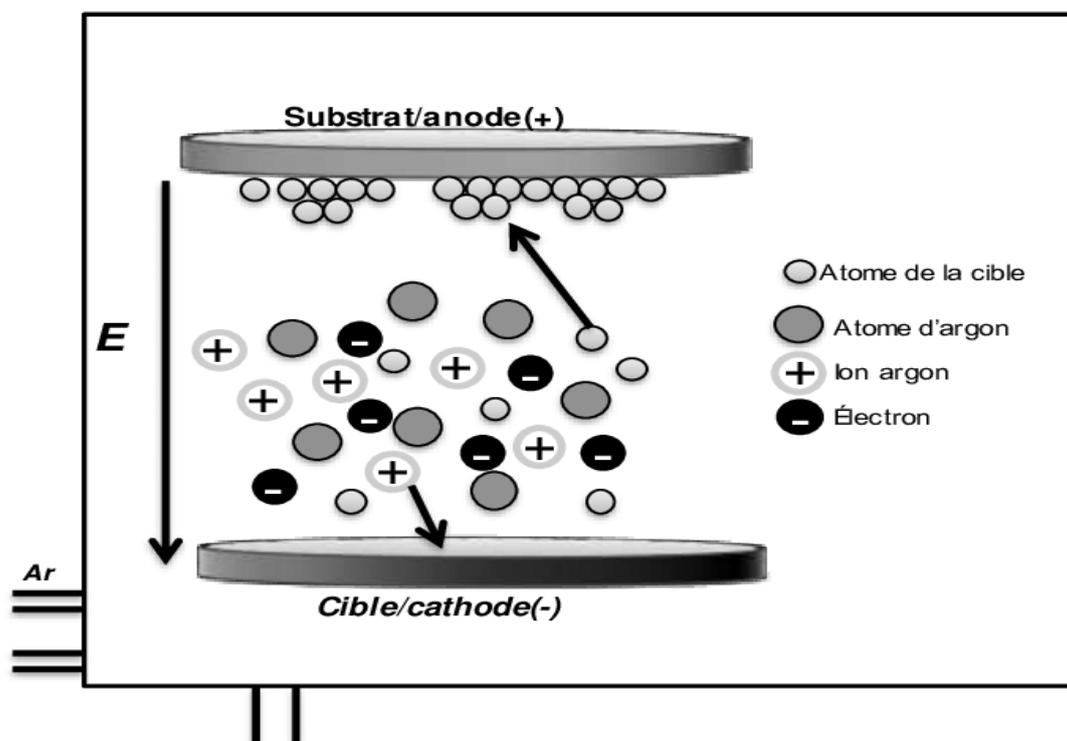


Figure I.13 : Schéma de principe de la pulvérisation cathodique

Les avantages de la méthode de pulvérisation cathodique pour la production de poudres de nickel incluent la production de poudres de haute pureté avec une distribution de taille de particules étroite, ainsi que la possibilité de produire des alliages complexes en contrôlant les conditions de pulvérisation. Cependant, cette méthode est généralement plus coûteuse que la méthode d'atomisation et nécessite des équipements spécialisés pour la production à grande échelle.

I.4.3.3 La méthode de la réduction directe :

Est une méthode de production de poudres à base de nickel pour les superalliages qui consiste à réduire des oxydes métalliques avec un agent réducteur pour obtenir du métal sous forme de poudre. Cette méthode peut être utilisée pour produire des poudres de nickel, mais aussi pour produire des alliages de nickel avec d'autres éléments.

Le processus de réduction directe commence par la préparation d'un mélange d'oxyde métallique et d'agent réducteur. Le mélange est chauffé à une température élevée dans un four à réduction, où l'oxyde métallique est réduit par l'agent réducteur pour former des particules de métal. Les particules de métal sont ensuite refroidies et collectées sous forme de poudre.

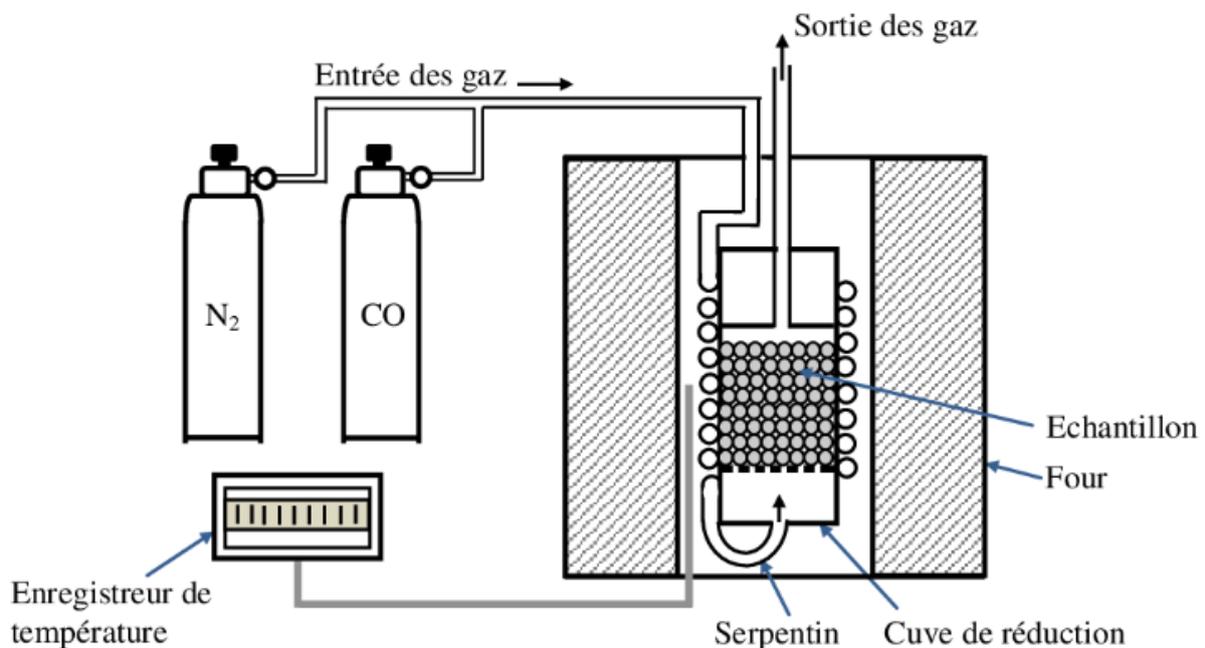


Figure I.14 : Schéma de principe de réduction directe

Les agents réducteurs couramment utilisés pour la production de poudres à base de nickel comprennent l'hydrogène, le carbone et le gaz naturel. La sélection de l'agent réducteur dépend des propriétés souhaitées pour la poudre de nickel finale.

Les avantages de la méthode de la réduction directe pour la production de poudres de nickel comprennent la capacité à produire des poudres de haute pureté et de qualité constante, ainsi que la possibilité de produire des alliages complexes en contrôlant les mélanges d'oxydes et d'agents réducteurs. Cependant, cette méthode nécessite des températures élevées et des

équipements spécialisés pour la production à grande échelle, et peut être coûteuse en raison de la consommation d'agents réducteurs.

I.5 Forme allotropique du nickel

L'allotropie est, en chimie, en minéralogie et en science des matériaux, la faculté de certains corps simples d'exister sous plusieurs formes cristallines ou moléculaires différentes [15].

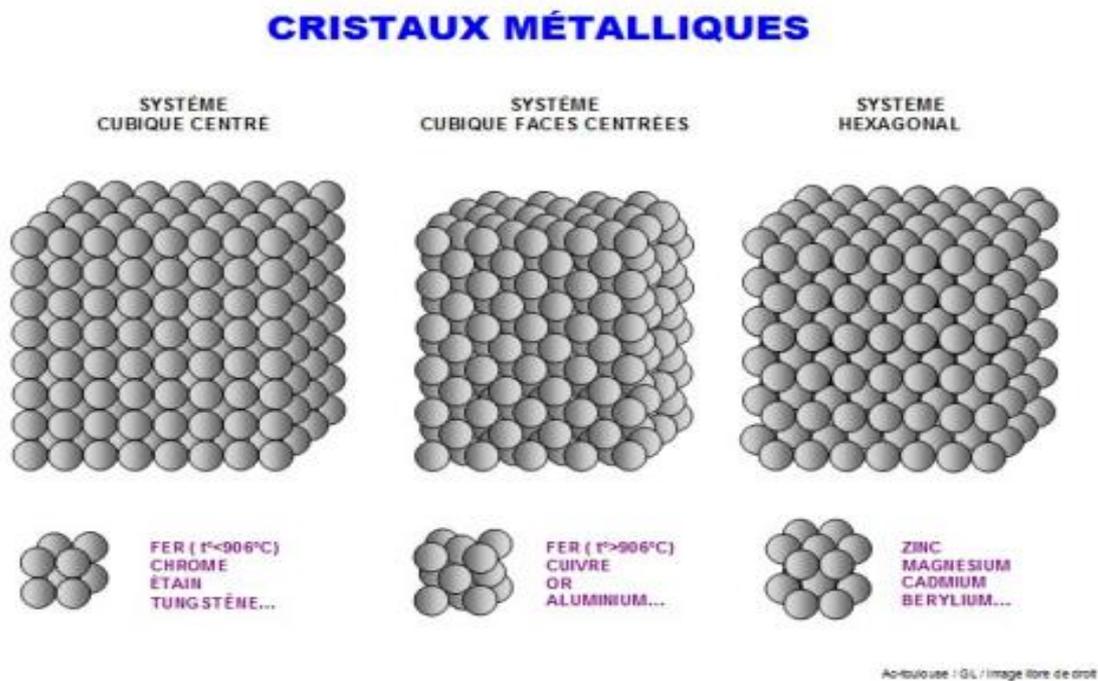


Figure I.15 : Différentes type d'empilements dans les solides métallique

Le nickel est un élément chimique qui peut exister sous plusieurs formes allotropiques, c'est-à-dire sous différentes formes de structures cristallines ou moléculaires. Les formes allotropiques les plus courantes du nickel sont les suivantes :

I.5.1 L'allotrope α du nickel (α -Ni) :

Est la forme allotropique la plus stable du nickel à température ambiante et jusqu'à environ 354°C et à une pression ambiante. Il représente la forme la plus courante du nickel dans la nature et est utilisé dans de nombreuses applications industrielles.

Le nickel alpha présente une structure cristalline cubique à faces centrées (CFC), ce qui signifie que les atomes de nickel sont disposés de manière ordonnée dans une structure cubique avec un atome de nickel situé au centre de chaque face du cube. Cette structure cristalline est responsable des propriétés physiques et chimiques du nickel alpha.

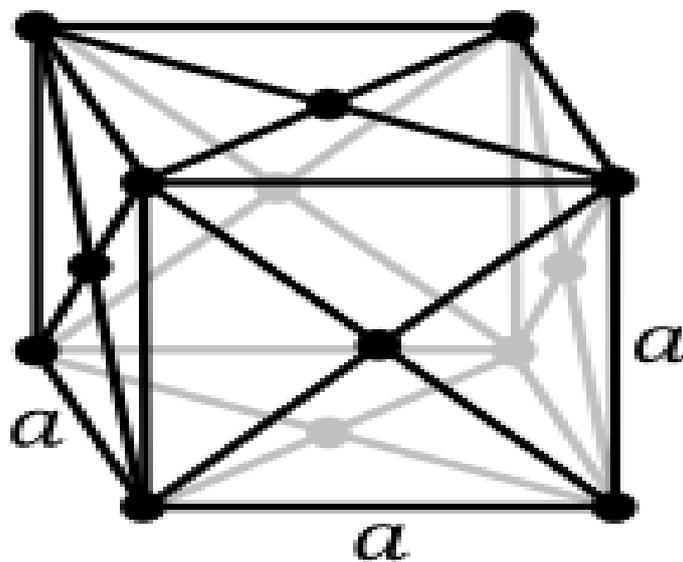


Figure I.16 : Maille cubique à face centre (CFC)

Le nickel alpha est de couleur argentée et possède une excellente résistance à la corrosion. Il est également ductile, ce qui signifie qu'il peut être étiré en fils minces sans se casser. Le nickel alpha est également magnétique à température ambiante et présente une conductivité électrique et thermique élevée.



Figure I.17 : Nodule du Nickel pur (99.9%) à côté d'un cube d'un cm³

Le nickel alpha est utilisé dans de nombreuses applications industrielles, notamment dans la production d'acier inoxydable, de superalliages, de catalyseurs, de piles à combustible et de batteries rechargeables.

I.5.2 L'allotropie β (bêta) du nickel

Est une forme métastable du nickel qui peut être obtenue en refroidissant rapidement le nickel fondu à partir de températures élevées lorsque le métal est chauffé à des températures supérieures à 354°C. Elle a une structure cristalline cubique centrée sur les faces (CFC) et il est plus dur que le nickel alpha et généralement moins stable que la forme γ plus courante.

Bien que la forme β du nickel soit moins courante et moins utilisée que la forme γ , elle présente des propriétés physiques et chimiques intéressantes. Par exemple, le nickel β a une densité plus élevée que la forme γ et une résistance à la corrosion supérieure. Cela le rend utile dans certaines applications, telles que la fabrication de pièces de précision dans l'industrie aérospatiale et la production de superalliages pour les turbines à gaz.

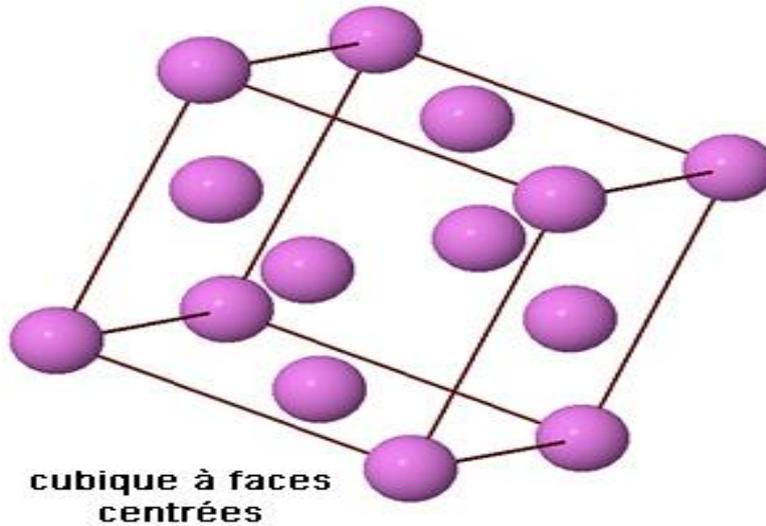


Figure I.18 : Forme allotropique du Nickel Beta

Cependant, en raison de son instabilité à température ambiante et de la transformation lente en la forme γ plus stable, le nickel β est généralement considéré comme moins utile que la forme γ . La forme β est souvent utilisée comme matériau de recherche pour étudier les propriétés des alliages de nickel et les transformations de phase métallurgiques.

I.5.3 L'allotrope γ (gamma) du nickel :

Est la forme allotropique la plus courante du nickel. Elle à une structure cristalline cubique centrée (CCC), Cette forme est obtenue en chauffant le nickel alpha à des températures supérieures à 720 °C. Le nickel γ est utilisé dans de nombreuses applications industrielles, notamment dans la fabrication d'acier inoxydable, de catalyseurs, de batteries, de revêtements et de pièces électroniques.

Le nickel γ présente des propriétés physiques et chimiques intéressantes, telles qu'une grande ductilité, une résistance élevée à la corrosion, une bonne conductivité électrique et une forte capacité de magnétisation.

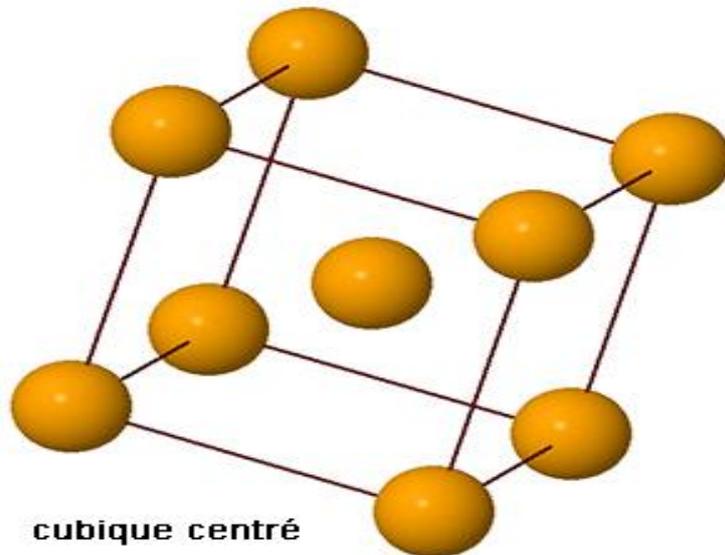


Figure I.19 : Forme allotropique du Nickel Gamma

Le nickel γ présente des propriétés physiques et chimiques intéressantes, telles qu'une grande ductilité, une résistance élevée à la corrosion, une bonne conductivité électrique et une forte capacité de magnétisation.

En outre, il est souvent allié avec d'autres métaux pour former des superalliages utilisés dans les turbines à gaz et les réacteurs nucléaires, il est également utilisé dans l'industrie chimique pour la production de produits chimiques tels que les acides, les alcalins et les produits chimiques organiques, comme on peut le trouver dans les piles alcalines et les batteries rechargeables, ainsi que dans les instruments de mesure tels que les jauges de contrainte et les capteurs de pression.



Figure I.20 : Production et application sur le Nickel

Le nickel γ peut être obtenu en refroidissant lentement le nickel fondu à partir de températures élevées ou en faisant subir un traitement thermique à la forme β instable. Il est important de noter que la transformation de la forme β en forme γ est un processus lent qui peut prendre des heures, des jours ou même des semaines.

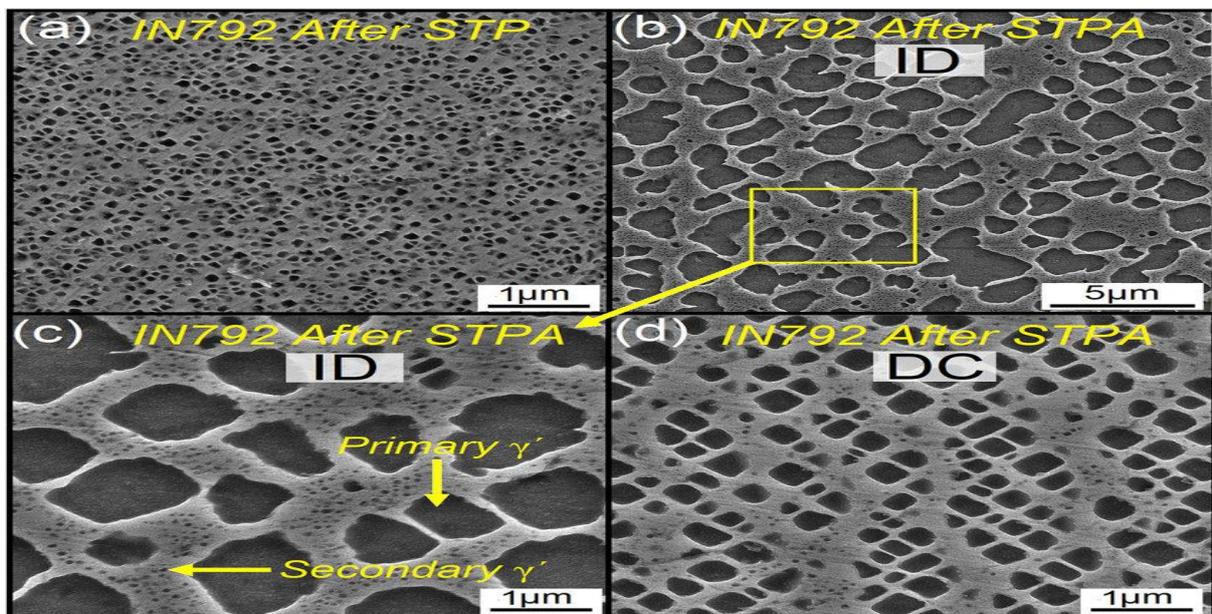


Figure I.21 : La microstructure du Nick Gamma

En somme, le nickel γ est une forme allotropique importante du nickel, utilisée dans de nombreuses applications industrielles et scientifiques en raison de ses propriétés physiques et chimiques remarquables.

Il est à noter que le nickel peut également former d'autres formes allotropiques à des températures et des pressions extrêmes, telles que le nickel delta (δ -Ni) et le nickel epsilon (ϵ -Ni). Cependant, ces formes sont moins courantes et moins étudiées que les trois principales formes allotropiques mentionnées ci-dessus.

I.6 Influence des éléments d'alliage sur la structure des superalliages

Les superalliages base nickel actuels sont composés de plus de dix éléments chimiques. Il existe un grand nombre de compositions différentes. Toutefois, ils ont tous une base commune i.e. entre 10 à 20% de chrome, jusqu'à 8% d'aluminium et de titane, de 5 à 10% de cobalt (pourcentages massiques) et des faibles quantités de bore, carbone et zirconium. Les éléments classiques que l'on trouve ajoutés à différentes teneurs à cette base sont le molybdène, le tungstène, le fer, le niobium, le tantale et le hafnium. Dans le domaine des compositions des superalliages base nickel, on peut classer ces éléments en trois groupes : - les éléments participant préférentiellement à la formation de la phase γ : Ni, Co, Fe, Cr, Mo, W, - les éléments participant préférentiellement à la formation de la phase γ' : Al, Ti, Nb, Ta, - les éléments tendant à ségréger aux joints de grains : C, B, Zr, Hf. Ce sont des alliages dans lesquels le durcissement par précipitation ou durcissement structural joue un rôle primordial [16].

Le système de base type est un alliage nickel aluminium, de composition telle que sa structure soit biphasée : une matrice γ -CFC, riche en nickel, contenant des précipités de la phase γ' -Ni₃Al. Cette phase précipite par mise en ordre de Ni et Al sur les sites atomiques de la matrice γ et se développe en formant des précipités presque cohérents avec la matrice. Quelques alliages sont triphasés et sont basés sur le système Ni- Al- Nb (durcissement par la phase γ'' de l'In718). La matrice γ contient des éléments tels que le cobalt, le chrome, le molybdène et le tungstène ; elle est ainsi durcie par effet de solution solide. La substitution de l'aluminium par des atomes de titane, de niobium ou de tantale conduit à un durcissement de la phase γ' . La modification de la teneur de ces éléments γ' -gènes peut provoquer une instabilité de la phase γ pouvant conduire à la précipitation d'autres phases. Une concentration

trop importante en titane par rapport à l'aluminium favorise, par exemple, la précipitation de la phase η -Ni₃Ti, délétère pour les propriétés mécaniques et la ductilité de l'alliage. La concentration et la nature des carbures et borures, fonctions des concentrations en carbone, bore et en éléments carburières modifient les propriétés des joints de grain où ils précipitent préférentiellement. Des phases topologiquement compactes (TCP) σ et μ peuvent précipiter notamment suite à une exposition à haute température plus ou moins longue en fonction des alliages. La stabilité au regard de la précipitation de ce type de phases, délétère pour les propriétés mécaniques de l'alliage, dépend de la composition. Des superalliages très riches en chrome auront une tendance plus marquée à former ce type de phases [16].

I.6.1 Influence des éléments d'alliage Chrome :

L'addition de chrome dans les superalliages permet la formation d'une couche passivante de Cr₂O₃ : cet oxyde sert de barrière protectrice jusqu'à 900°C (au-delà l'oxyde formé devient volatil) contre les éléments oxydants et corrodants de l'environnement en diminuant la vitesse de diffusion de l'oxygène mais aussi de l'azote et du soufre. Les superalliages actuellement utilisés contiennent au moins 10% at. de chrome [17].

L'augmentation de la teneur en chrome dans l'alliage permet également de diminuer la densité de l'alliage et la température de solvus de la phase γ' . De plus, le chrome présente une très grande solubilité dans le nickel. En effet, contrairement aux éléments W et Mo, le chrome présente un faible coefficient de durcissement ; son rayon atomique est proche de celui du nickel, la distorsion du réseau cristallin est donc assez faible. Le chrome contribue toutefois au durcissement de la matrice γ . Pelloux et Grant, qui ont travaillé sur des solutions binaires Ni-W, Ni-Mo, Ni-Cr, montrent que 20 at.% de chrome augmenteraient la contrainte d'écoulement autant que 7 at.% de molybdène. Montrent que l'énergie de défaut d'empilement diminue avec la concentration du chrome dans une solution binaire Ni-Cr, dans une étude sur l'influence du chrome, du molybdène et du tungstène sur les propriétés des superalliages base nickel, notent ainsi une augmentation de la limite d'élasticité en traction à 650°C proportionnelle à la concentration en chrome. Cependant, ces auteurs attribuent cet effet sur la limite d'élasticité à une influence indirecte du chrome sur la phase γ' . En effet, l'augmentation de la teneur en chrome, qui est très peu soluble dans cette phase, tend à diminuer la concentration des éléments Ti et Nb dans la matrice et par voie de conséquence à augmenter leurs concentrations dans la phase γ' ce qui a pour effet d'augmenter son durcissement [18].

I.6.2 Influence des éléments d'alliage Bore :

Cet élément, ajouté en faible quantité, est connu pour améliorer la tenue au fluage et à la propagation de fissures à haute température. Il agit principalement au niveau des joints de grain. Il semble que cet élément retarde l'apparition des microfissures au niveau des joints. L'absence de bore est ainsi préjudiciable à la tenue en traction, en fluage et à la fissuration à 650°C [16].

Plusieurs auteurs s'accordent sur l'effet bénéfique du bore sur la tenue en fluage à haute température. Après avoir modifié les concentrations en bore de l'alliage U720Li, observe ainsi un effet bénéfique de cet élément sur la résistance au fluage d'autant plus important que la température de l'essai est élevée. L'effet est particulièrement notable sur la microstructure "gros grain" : le bore améliore la résistance des joints de grain. Enregistre déjà une augmentation des temps à rupture et des temps nécessaires pour obtenir 0,2% de déformation plastique pour des températures supérieures à 700°C. Constate, en plus de l'amélioration du temps à rupture et de la ductilité en fluage à 650°C, un effet bénéfique sur la résistance à la propagation de fissures avec temps de maintien à 650°C. Obtient les mêmes résultats en fissuration avec temps de maintien à 750°C. La teneur généralement admise en bore dans les superalliages courants est d'environ 0,03 % en masse. Au-delà d'une certaine concentration, le bore va en effet former des borures M_3B_2 qui vont précipiter préférentiellement aux joints de grain. Une trop grande précipitation des borures va fragiliser les joints de grain via plusieurs phénomènes : tout d'abord une consommation des éléments durcissant de la matrice γ (Ni, Co, Cr, Mo) et de γ' (Ti), ensuite une interaction préférentielle des borures avec l'argon et/ou l'oxygène lors de l'étape de remise en solution, provoquant localement des brûlures ainsi que la formation de pores. Une trop grande concentration de bore réduit donc la fenêtre de remise en solution de l'alliage et conduit à une porosité induite thermiquement excessive aux joints qui les fragilise, conduisant ainsi à une chute de la ductilité et de la résistance à haute température. Des recommandations récentes sont faites pour diminuer la teneur en bore à une valeur comprise entre 0,01 et 0,02 % en masse (0,05 et 0,1% at.) afin de limiter la porosité induite thermiquement. Le brevet relatif au KM4 s'appuie sur une étude réalisée sur ce superalliage traité supersolvus et montre qu'une baisse de 0,03 à 0,015% en masse permet d'améliorer la résistance en fluage et de limiter la vitesse de propagation de fissures à haute température. Parvient aux mêmes résultats en étudiant les variations de la teneur en bore à partir de la composition standard du KM4. L'ONERA, l'ENSMP, la SNECMA et IMPHY, dans le cadre d'une étude commune sur l'influence de divers éléments d'alliages dont le bore

sur les propriétés des superalliages, arrivaient déjà en 1986 à la conclusion d'une nécessaire limitation à 100ppm en masse de la teneur en bore afin de garantir une durée de vie optimale en fluage ainsi qu'un minima de vitesse en propagation de fissures [19][20].

I.6.3 Influence des éléments d'alliage Silicium :

Il forme facilement des solutions solides avec le fer, aux états delta, gamma ou alpha et aussi avec la cémentite, en diminuant la solubilité de celle-ci. Alors qu'il est surtout présent à l'état de solution solide dans la ferrite, il y en a une petite proportion sous forme combinée, c'est la silice Si O_2 , formant dans le métal des inclusions non métalliques.

Les aciers à hautes teneur en carbone et en silicium peuvent contenir du carbure de silicium (Si C). Celui-ci, en solution solide, contribue à produire un grain grossier dans les aciers, alors que sous la forme d'inclusions dispersées, il a un certain effet pour gêner le grossissement du grain. Le silicium à l'état allié au fer, élargit le domaine de la phase alpha du diagramme d'équilibre, et quand il est présent en quantité suffisante, les alliages restent constamment ferritiques. En élevant ainsi le point de transformation, il demande des températures de trempe plus élevées. Une tendance très dommageable, surtout lorsque sa teneur 0.50%, est celle qui contribue à décomposer la cémentite en fer et graphite. On contrebalance cet effet par un apport de manganèse [21].

De nombreux aciers calmés sont partiellement désoxydés par le Ferro-silicium, désoxydant puissant, qui en éliminant largement les gaz et les oxydes, et en empêchant la formation de bulles gazeuses dans le métal qui se solidifie dans la lingotière ou dans le moule, donne du métal sain, exempt de soufflures. La désoxydation effectuée avec le silicium seul produit une quantité innombrable de petites particules réfractaires qui sont de la silice pure. Elles sont si petites que presque toutes restent retenues dans le métal.

Le silicium améliore la résistance de l'acier aux températures élevées. Les pellicules d'oxyde superficiel formées les premières sont adhérentes et inertes et elles empêchent rapidement une oxydation ultérieure. Certains des aciers à haute teneur en chrome résistants à la chaleur contiennent de 1 à 3% de silicium [21].

Chapitre II :

Matériaux et techniques

Expérimentales

CHAPITRE II : Matériaux et méthodes expérimentales

II. Introduction

Dans cette partie ce travail est consacré à décrire les dispositifs expérimentaux de projection thermique utilisée pour l'élaboration des dépôts. Il est plus particulièrement consacré à représenter les différentes techniques de caractérisation : l'analyse structural par la diffraction X (DRX) et microstructurale par MEB et EDS et les observations des échantillons par le microscope optique.

II.1 Matériaux utilisés :

II.1.1 Le substrat

II.1.1.1 Acier inoxydable (X6 Cr Ni 18/8)

L'acier inoxydable X6CrNi18/8, également connu sous le nom d'acier inoxydable 304, est un alliage austénitique standard couramment utilisé dans les applications industrielles pour sa bonne résistance à la corrosion et sa polyvalence. Voici quelques informations précises sur cet acier inoxydable.

Composition chimique :

Fer	Carbone	Manganèse	Silicium	Phosphore	Soufre	Chrome	Nickel
Bal	0,06%	1%	2%	0,045%	0,03%	17,5 à 19,5%	8 à 10,5%

Tableau II.1 : Composition chimique du substrat.

II.2 Dépôt réalisé

Le dépôt NiCrBSi est un alliage métallique utilisé dans la fabrication de revêtements thermiques par projection thermique résistants à l'usure et à la corrosion. Voici sa composition chimique typique :

Composition	Nickel (Ni)	Chrome (Cr)	Bore (B)	Silicium (Si)	Fer (Fe)	Carbone (C)
(%)	35-45%	20-25%	4-7%	1-3%	1% <	0,1% <

Tableau II.2 : composition chimique du dépôt.

II.3 Elaboration des échantillons

La préparation de l'échantillon pour la projection thermique nécessite une attention particulière afin d'assurer une surface propre et régulière pour l'application du revêtement.



Figure II.1 : Image d'un échantillon obtenu après projection thermique

II.4 Paramètres de projections utilisées

Les différents dépôts ont été obtenus selon les paramètres et les conditions de projection utilisées, ils sont illustrés dans le tableau suivant :

Paramètres de projection					Conditions de projection		
Pression d'air dans le moteur (bar)	Pression d'air dans la buse de projection (bar)	La vitesse d'avance du fil métallique (m/s)	Tension du générateur (V)	Intensité du courant (A)	Distance (mm)	Angle (°)	Vitesse d'avance de la buse (mm/tr)
4.2	3.8	0.1	45	210	90-100	90	3.2

Tableau II.3 : Paramètres de projection à l'arc

Paramètres	Valeurs
Débit Propane	68 l/min
Débit Oxygen	240 l/min
Débit air	375 l/min
Distance de projection	250 mm
Vitesse de de surfacage	120 mm/min
Distance entre passe	6 mm
Nombre de passé	30 pour NiCrBSi
Ratio de depot	40 g/min
Prechauffage substrat	145 °C

Tableau II.4 : Paramètres de projection à HVOF

II.4.1 Projection des dépôts

Echantillons	Substrat	Dépôt	Pistolet utilisé
1 ^{er} lot	Acier inoxydable X6CrNi18/8	Ni Cr B Si	Pistolet à arc électrique
2 ^{ème} lot	Acier inoxydable X6CrNi18/8	Ni Cr B Si	Pistolet HVOF

Tableau II.5 : présentation de différents échantillons réalisés

II.5 Procédé d'élaboration

II.5.1 Les procédés utilisés

II.5.1.1 Le pistolet à arc électrique

Le pistolet à arc électrique de type spray 234 est un équipement de soudage et de projection thermique. Ce type de pistolet utilise l'énergie électrique pour créer un arc entre la pièce à travailler et le fil d'alimentation. La chaleur générée par l'arc fait fondre le fil d'alimentation, qui est alors vaporisé et projeté à grande vitesse sur la surface de la pièce. Cette technique est appelée "projection thermique" ou "spray métallique".

Généralement utilisé pour le revêtement et la réparation de surfaces, il est disponible dans différentes tailles et capacités, et peut être utilisé avec différentes sources d'alimentation électrique telles que l'air comprimé, l'azote et l'argon. Il peut également être utilisé avec différents types de fil d'alimentation, tels que les fils en acier inoxydable, les fils en aluminium et les fils en alliage de nickel.

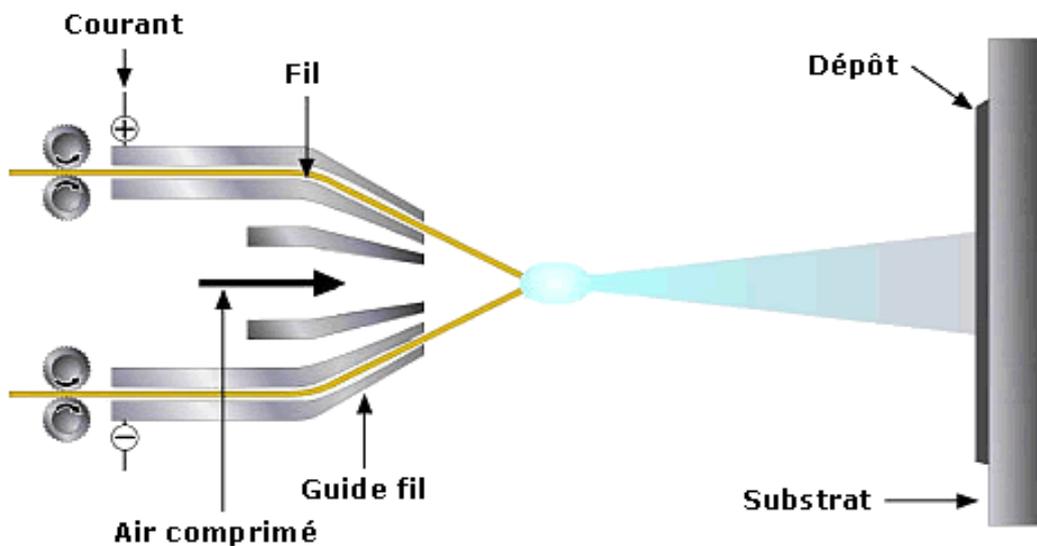


Figure II.2 : Schéma de principe d'un pistolet à arc électrique type Arc Spray 234

II.5.1.2 HVOF Flamme

Le pistolet HVOF le plus couramment utilisé est le pistolet HVOF à combustion supersonique. Ce type de pistolet HVOF utilise un mélange de carburant et d'oxygène pour produire une flamme supersonique qui chauffe le matériau d'alimentation à une température très élevée, créant ainsi un jet à haute vitesse de particules métalliques qui sont projetées sur la surface de la pièce à traiter. Cette technique permet de produire des revêtements de haute qualité, avec une densité très élevée, une adhérence supérieure et une résistance à l'usure et à la corrosion accrues.

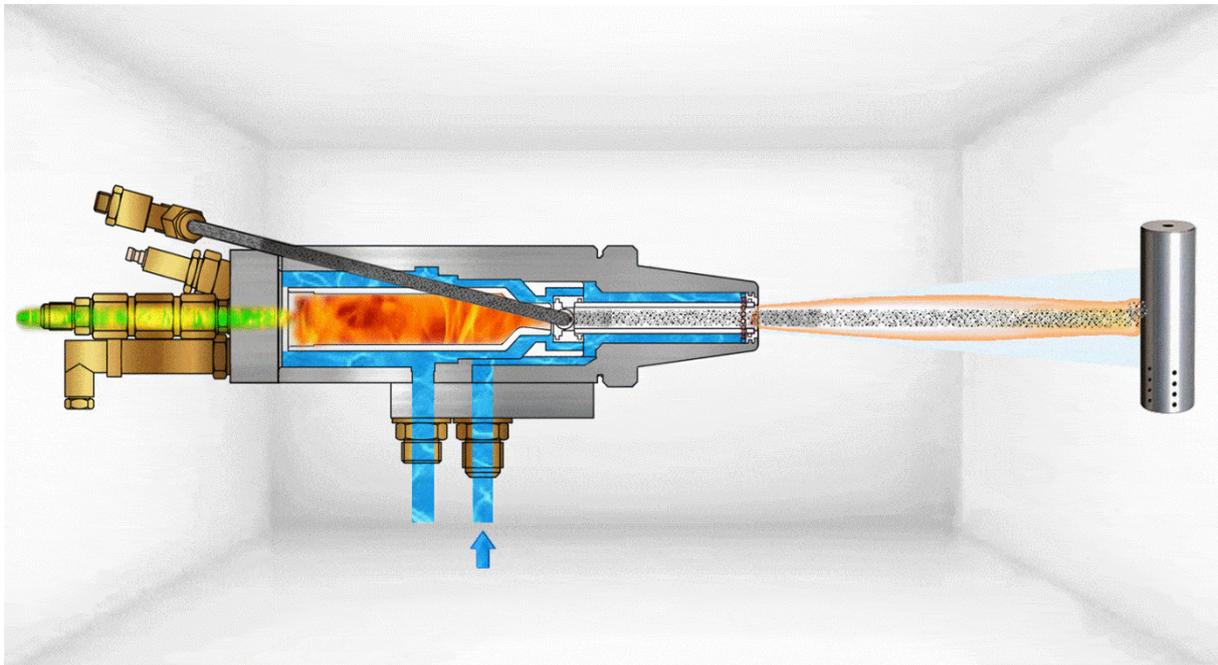


Figure II.3 : Schéma de principe d'un pistolet flamme HVOF

II.6 Caractérisation métallographique

II.6.1 Polissage

Le polissage mécanique est un processus de finition de surface qui consiste à utiliser un outil abrasif tel qu'un tampon, un disque ou une pierre à aiguiser attachée à une machine à polir pour éliminer les rayures, les irrégularités et les imperfections de la surface d'un matériau. Ce processus peut être effectué manuellement ou par des machines automatisées.

Le polissage mécanique peut être utilisé pour améliorer l'aspect esthétique des matériaux, mais il peut également être utilisé pour améliorer leurs propriétés fonctionnelles. Par exemple,

le polissage peut améliorer la résistance à la corrosion, améliorer la conductivité électrique ou thermique et même réduire le coefficient de frottement.

Les matériaux pouvant être abrasés mécaniquement comprennent les métaux, les plastiques, les céramiques et les composites. Le choix des outils de polissage et des paramètres de polissage dépend du matériau à polir et des spécifications de surface requises.

Le polissage mécanique peut être une étape critique dans la fabrication de pièces, de produits ou d'appareils qui nécessitent des surfaces lisses, homogènes et de haute qualité.



Figure II.4 : Machines et équipements de prépolissage et polissage

II.6.2 Microscope optique

Un microscope optique est un instrument d'observation qui utilise la lumière visible ou une autre forme de rayonnement électromagnétique pour grossir et examiner des échantillons opaques ou transparents à l'échelle microscopique.

Le microscope optique est constitué de plusieurs composants, notamment :

L'objectif, qui collecte la lumière et crée une image réelle de l'échantillon ;

L'oculaire, qui grossit l'image réelle pour permettre à l'observateur de la voir ;

La platine, sur laquelle est placé l'échantillon ;

La source lumineuse, qui illumine l'échantillon.

Lorsque la lumière frappe l'échantillon, une partie de celle-ci est réfléchi, tandis que l'autre partie est absorbée ou transmise à travers l'échantillon. Les rayons de lumière qui sont transmis à travers l'échantillon sont ensuite collectés par l'objectif, qui les réfracte pour créer une image réelle à l'intérieur du microscope. Cette image réelle est ensuite agrandie par l'oculaire pour permettre à l'observateur de la voir.

En résumé, le microscope optique est un instrument précieux pour l'observation et l'analyse des échantillons à l'échelle microscopique. Il est largement utilisé dans de nombreux domaines, tels que la biologie, la physique, la chimie, les sciences des matériaux et l'ingénierie.



Figure II.5 : microscope optique

II.6.3 Diffraction des rayons X (DRX)

Principe général de DRX et loi de Bragg Les rayons X, comme toutes les ondes électromagnétiques, provoquent un déplacement du nuage électronique par rapport au noyau dans les atomes, ces oscillations induites provoquent une réémission d'ondes électromagnétiques de même fréquence ; ce phénomène est appelé diffusion cohérente ou dite de Rayleigh. La diffraction des rayons X est une méthode universellement utilisée pour identifier la nature et la structure cristalline d'un matériau cristallin ou semi-cristallin. Cette méthode permet d'obtenir des informations à l'échelle de l'atome. En effet, elle résulte de l'interaction d'une onde électromagnétique, avec le milieu périodique de la matière cristallisée. Cette méthode permet une analyse qualitative et quantitative. Elle permet de déterminer la nature de chaque phase cristalline au sein d'un échantillon mais aussi de remonter à la structure du système analysé [22].

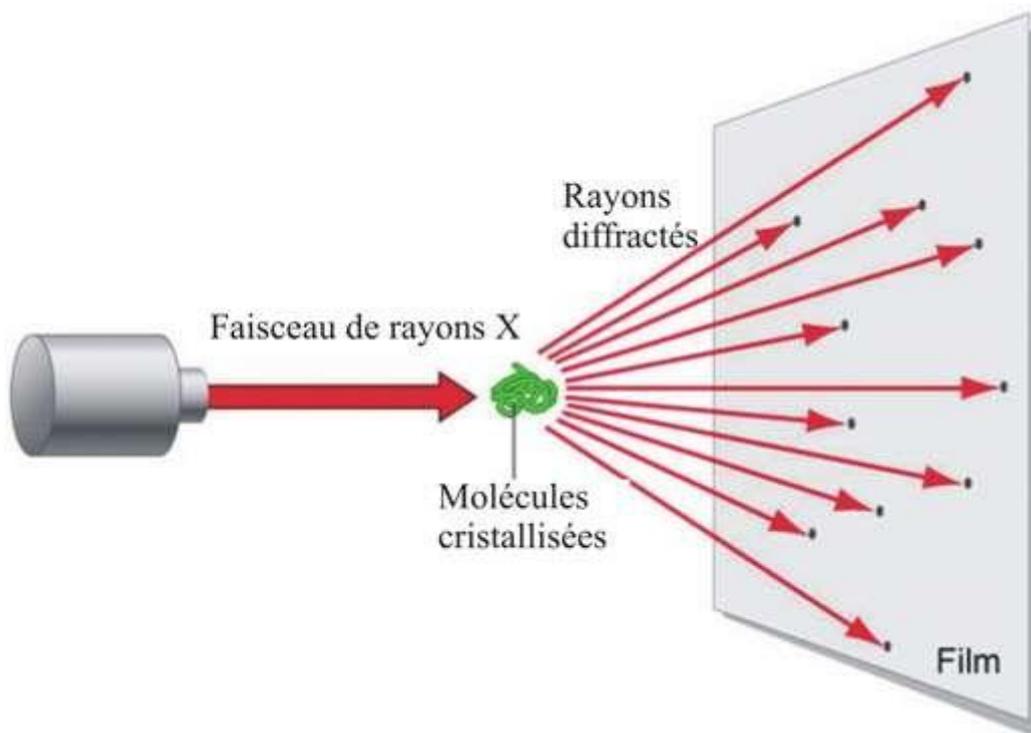


Figure II.6 : Dispositif Diffraction X

II.7 Caractérisation mécanique

La caractérisation mécanique en projection thermique est une étape importante pour évaluer la qualité et les performances des revêtements thermiques produits par cette technique. Elle consiste à mesurer les propriétés mécaniques du revêtement, telles que sa résistance à la traction, sa dureté, sa résistance à l'usure et à la corrosion, entre autres.

La dureté est une mesure de la résistance d'un matériau à la pénétration. Elle peut être mesurée à l'aide d'un testeur de dureté, qui mesure la résistance du matériau à l'indentation. Elle est importante pour évaluer la résistance du revêtement aux rayures et à l'usure.

La résistance à l'usure est une mesure de la capacité d'un matériau à résister à l'usure causée par le frottement et l'abrasion. Elle peut être mesurée à l'aide d'un test de résistance à l'usure, qui mesure la résistance du revêtement à l'usure et à l'abrasion. Elle est importante pour évaluer la durabilité du revêtement et sa capacité à résister à des conditions d'utilisation difficiles.

En résumé, la caractérisation mécanique en projection thermique est importante pour évaluer la qualité et les performances des revêtements thermiques. Elle consiste à mesurer les propriétés mécaniques du revêtement, telles que la résistance à la traction, la dureté, la résistance à l'usure et à la corrosion.

II.7.1 Micro-dureté Vickers

La micro-dureté Vickers est une méthode courante utilisée pour mesurer la dureté des matériaux. Elle utilise une pointe de diamant pyramidale pour créer une indentation dans la surface du matériau, puis mesure la diagonale de l'empreinte pour calculer la dureté.

Souvent utilisée pour mesurer la dureté des matériaux à petite échelle, tels que des échantillons minces ou des zones spécifiques d'un matériau. Elle est également utile pour mesurer la dureté de matériaux très durs, tels que les céramiques.

La dureté Vickers est exprimée en kilogrammes-force par millimètre carré (kgf/mm^2) ou en unités de pression, également appelées kiloponds par millimètre carré (kp/mm^2). Elle peut varier considérablement selon le matériau testé et les conditions de test, telles que la charge et le temps de maintien de la charge sur la surface.

Il existe des normes internationales pour les procédures d'essai de micro-dureté Vickers, telles que l'ISO 14577-1 et l'ASTM E384. Ces normes décrivent les paramètres d'essai, tels que la charge d'essai et le temps de maintien de la charge, ainsi que les méthodes de mesure de l'indentation.

En général, la micro-dureté Vickers est une méthode utile pour caractériser la dureté des matériaux à petite échelle et peut fournir des informations importantes sur les propriétés mécaniques des matériaux tel que le module de Young E . Cependant, elle doit être utilisée avec précaution, car les conditions de test peuvent avoir un impact significatif sur les résultats de mesure [23].

Afin de pouvoir calculer le module de Young de chaque un de nos échantillons on doit passer par la loi développée par Oliver et Pharr [24].

$$1/E_r = (1-\nu^2)/E + (1-\nu_i^2)/E_i$$

E_r : module d'élasticité réduit $= (S \cdot \pi^{1/2}) / (2 \cdot B \cdot A_P^{1/2})$.

S : La pente calculée à partir de la courbe décharge.

B ou β : facteur géométrique de correction = 1,05 pour un indenteur Vickers.

A_P l' Aire de contact $= 24,5 \cdot H_c^2$ **H_c** = $H_{max} - \psi \cdot P_{max}/S$ avec ($\psi=0,75$)

E : module d'élasticité de matériaux.

ν : coefficients de poisson de matériaux ($\nu = 0.3$)

ν_i : coefficients de poisson de l'indenteur $= 0,07$.

E_i : module d'élasticité de l'indenteur = 1140 GPa.

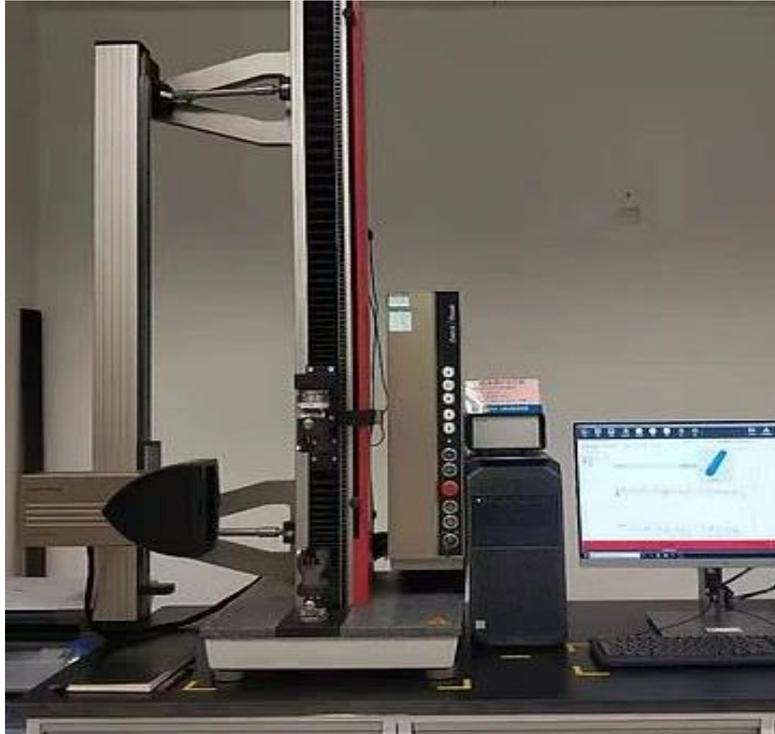


Figure II.7 : machines d'essai de micro-dureté Vickers (Zwick ZHU 2.5)

II.7.2 Profilomètre

Le profilomètre est un outil de mesure qui permet de mesurer la rugosité et le profil de surface d'un matériau. Dans la projection thermique, le profilomètre est utilisé pour caractériser la qualité des revêtements thermiques en mesurant la rugosité et le profil de surface du revêtement.

La rugosité est généralement mesurée à l'aide d'un profilomètre optique, qui utilise un faisceau laser pour balayer la surface du revêtement et enregistrer les variations de hauteur de la surface. Les données de hauteur enregistrées peuvent ensuite être analysées pour déterminer la rugosité de surface.

Le profilomètre est un outil de mesure important pour caractériser la qualité des revêtements thermiques dans la projection thermique. Il permet de mesurer la rugosité et le profil de surface du revêtement, ce qui est essentiel pour comprendre les propriétés du revêtement et améliorer sa performance et sa durabilité. Les données de mesure peuvent être utilisées pour identifier les zones de problèmes de qualité et optimiser la production du revêtement.



Figure II.8 : Profilomètre optique

III.1 Introduction

Ce chapitre donne un aperçu détaillé des processus appliqués des l'étude de la porosité, propriétés mécaniques et de la rugosité des matériaux. Nous avons démontré l'utilisation de la microscopie optique pour analyser la porosité d'échantillons de revêtements par projection thermique, la technique de diffraction des rayons X (DRX) pour étudier la structure cristalline, la microdureté Vickers pour caractériser les propriétés mécaniques et l'utilisation d'un profilomètre pour évaluer la rugosité de surface.

La combinaison de ces différentes méthodes analytiques nous a permis de mieux comprendre les propriétés et les performances des deux échantillons en NiCrBSi projetés thermiquement par le procédés flamme HVOF et l'arc électrique. Et est utile pour améliorer et optimiser les performances des matériaux de projection thermique dans diverses applications.

Après avoir examiné le matériel étudié, nous fournissons une interprétation détaillée des résultats obtenus par la DRX, profilomètre, et le microscope optique.

III.2 Caractérisation par microscope optique

Les observations obtenues lors de l'analyse de la porosité des deux échantillons après projection thermique en NiCrBSi à l'aide d'un microscope optique peuvent être interprétées comme suit :

Echantillon 1 (Arc)

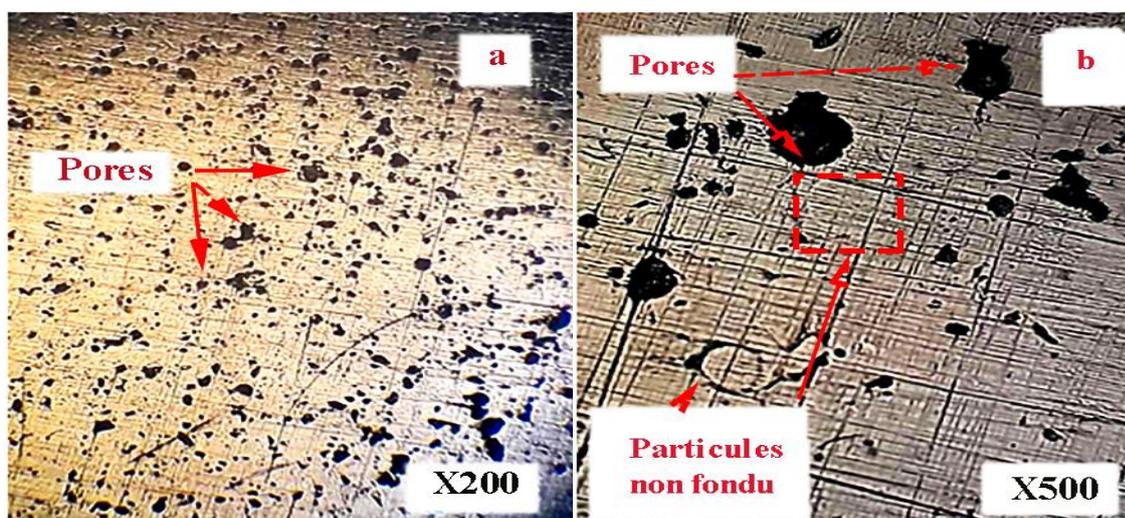


Figure III.1 : Image par microscope optique pour l'échantillon Arc

Échantillon arc (500x) :

A ce grossissement, les pores et les particules non fusionnées sont visibles. Cela indique la présence de vides dans la structure de l'échantillon, éventuellement liés à la porosité élevée. Les particules non fondues indiquent que certaines des particules éjectées n'ont pas atteint une température suffisante pour fondre complètement à la surface. Cela peut être dû à une mauvaise dissolution de l'échantillon ou à un refroidissement rapide, qui limite la diffusion des particules et conduit à la formation de pores.

Échantillon arc (200x) :

On observe principalement des pores dans l'échantillon à cette échelle de zoom, avec des particules non fusionnées moins visibles, moins évidentes. La taille et la distribution des pores varient et peuvent être causées par divers facteurs tels que la taille des particules de la poudre utilisée, les paramètres de pulvérisation et les conditions de refroidissement. Une porosité élevée implique des propriétés mécaniques de revêtement faibles et une résistance à la corrosion réduite.

Echantillon 2 (HVOF)

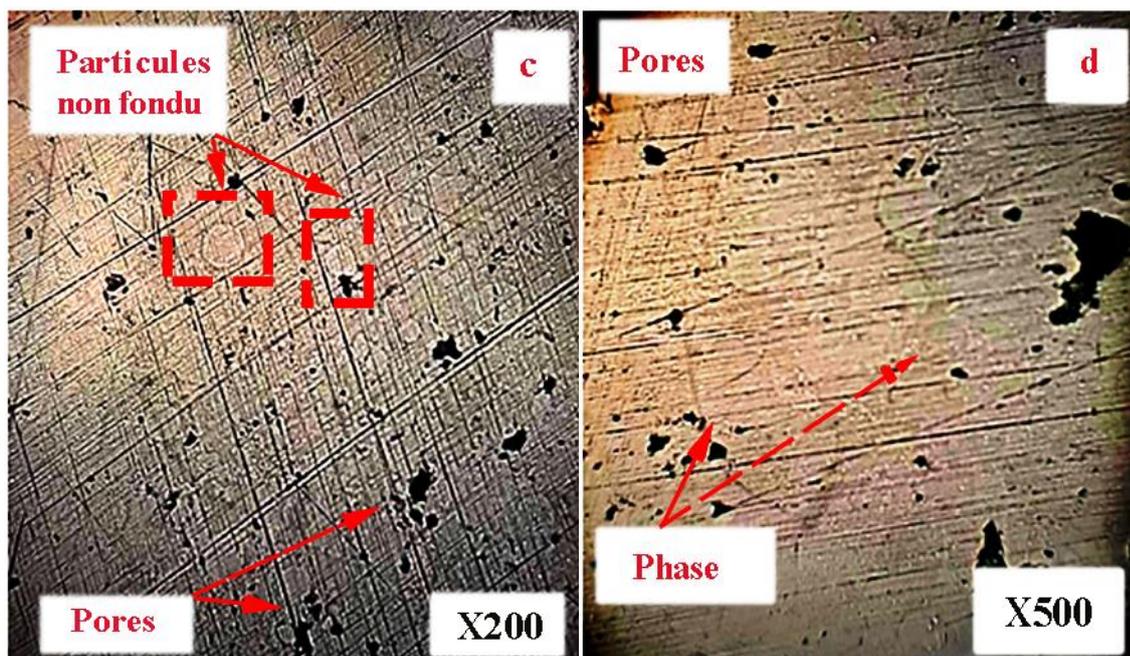


Figure III.2 : Image par microscope optique pour l'échantillon HVOF

Échantillon HVOF (200x) :

A ce niveau de zoom, on observe l'apparition de particules non fusionnées et de pores, La vitesse de refroidissement plus rapide du processus HVOF peut entraîner des particules non fondues, ce qui peut limiter la fusion complète des grains dans le substrat. Des pores sont également présents probablement liés à la porosité inhérente à ce processus et peuvent être affectés par des paramètres tels que la taille des particules, la pression de projection et la vitesse de dépôt.

Échantillon HVOF (500x) :

A un niveau de zoom plus élevé, les pores redeviennent visibles, mais cette fois on remarque également la présence d'une phase distincte.

Dans l'ensemble, il semble y avoir une certaine porosité dans les échantillons des deux procédés de projection thermique étudiés. La quantité et la distribution de la porosité dépendent des paramètres de pulvérisation, des matériaux utilisés et des conditions de refroidissement. Il est important de comprendre l'impact de la porosité sur les performances du revêtement en termes de résistance mécanique, de résistance à la corrosion, etc., et d'optimiser les paramètres de pulvérisation pour minimiser la porosité et améliorer la qualité du revêtement. Ces résultats aident à évaluer la qualité du revêtement et à identifier les domaines à améliorer dans le procédé de projection thermique.

III.2 Métallographie

Les processus métallographiques effectués fournissent des informations détaillées sur la structure cristalline, les phases présentes, les défauts, les inclusions et d'autres caractéristiques microstructurales.

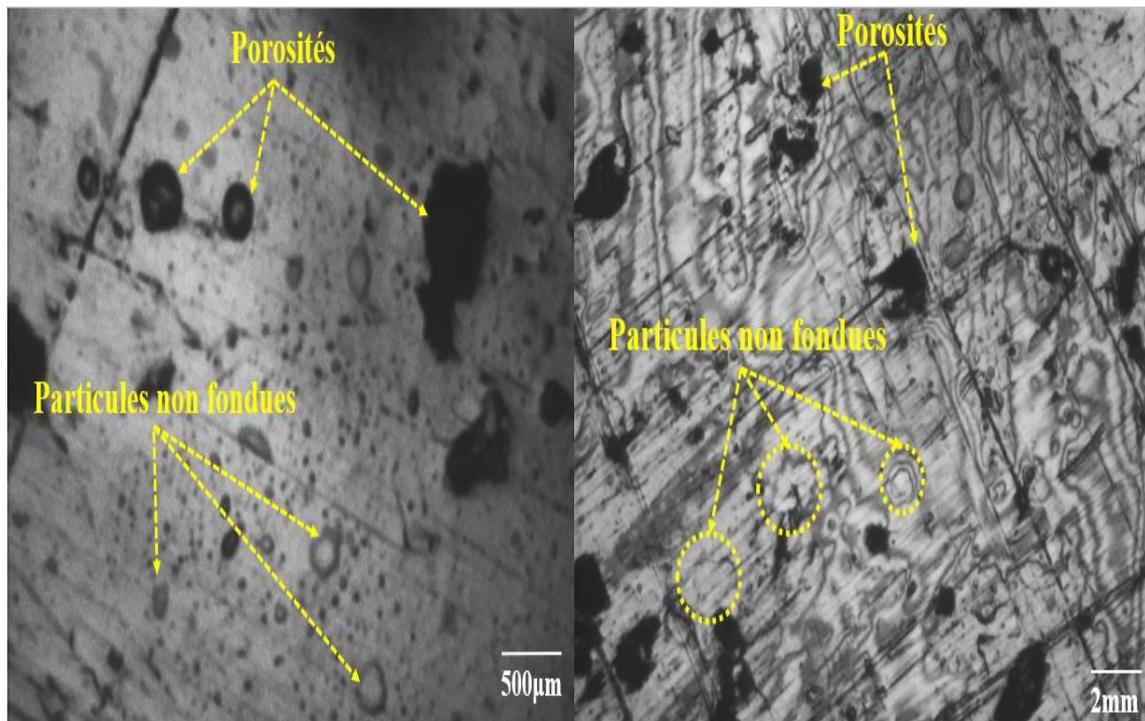


Figure III.3 : Image de Métallographie de l'échantillon HVOF

Pour l'échantillon HVOF :

Phase noire riche en nickel :

Les résultats DRX figure III.6 montrent la forte présence de Cr_2Ni_3 (56%) dans cet échantillon. La phase sombre riche en Ni observée en métallographie pourrait être attribuée à cette phase. Le Cr_2Ni_3 peut apparaître plus sombre par rapport à la matrice métallique en raison de sa composition chimique spécifique et des différences de densité électronique.

Phase claire en Fer :

La DRX montre la composition de FeNi (27%) dans cet échantillon. La phase claire riche en fer observée par métallographie peut correspondre à cette phase FeNi. La présence de fer pur ou d'autres alliages de fer peut également affecter la couleur de la lumière observée.

Taches de carbure :

Les résultats DRX pour cet échantillon ne mentionnent pas explicitement la présence de carbures. Cependant, les taches de carbure observés pourraient être des inclusions de carbure ou des précipités formés à partir d'éléments tels que CrSi (8%) et Ni_3B (2%) présents dans les échantillons HVOF. Ces carbures peuvent apparaître sous forme de taches distinctes au sein de la microstructure observée avec la microscopie métallurgique.

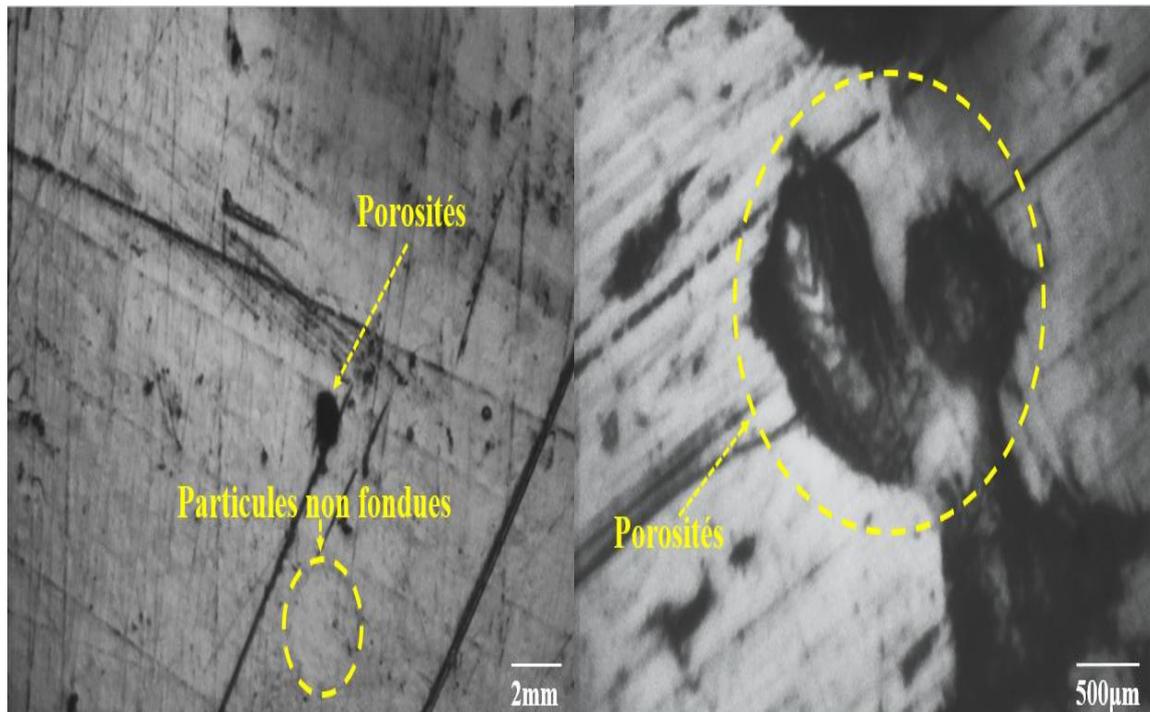


Figure III.4 : Image de Métallographie de l'échantillon Arc

Pour l'échantillon arc :

Phase sombre riche en nickel :

Les résultats DRX montrent une faible teneur en CrB (16%) dans cet échantillon. La phase sombre riche en Ni observée en métallographie pourrait être attribuée à la présence de NiSi (29%), ce qui ressort également des résultats DRX. Cette phase de NiSi peut apparaître sombre au microscope.

Phase claire riche en fer :

Les résultats DRX pour cet échantillon montrent une composition de FeNi (35%). La phase claire riche en fer observée peut correspondre à cette phase FeNi, similaire à la présence de fer pur ou d'autres alliages de fer.

Taches de carbure :

Les résultats DRX indiquent la présence de CrB (16%) dans cet échantillon. Les taches de carbure observées sont attribuées à cette phase CrB. D'autres carbures tels que NiSi (29%) sont également présents et peuvent contribuer à l'encrassement observé des carbures.

III.3 Diffraction des Rayons X (DRX)

III.3.1 Analyse structurale par diffraction des rayons X

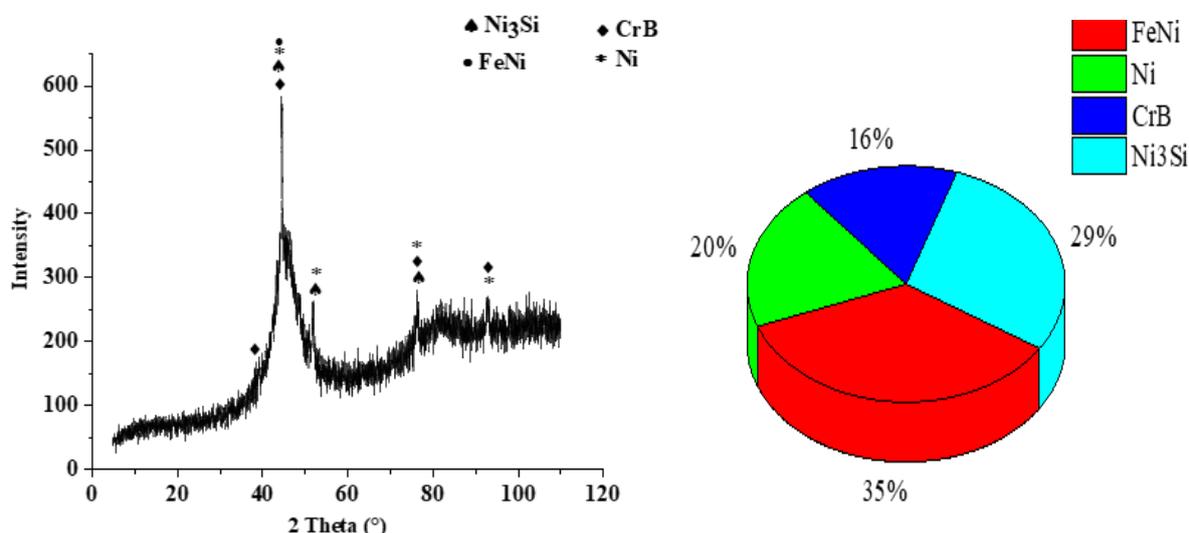


Figure III.5 : Spectre de diffraction des rayons X et quantification des phases des revêtements en alliage à base de NiCrBSi (Arc électrique)

La figure 5 présente les spectres de diffraction des rayons X et la quantification des phases des revêtements en alliage à base de NiCrBSi (Arc électrique). Les spectres de diffraction X des revêtements en NiCrBSi ont révélé la présence d'une phase principale qui est identifiée comme une solution solide de structure CFC (Ni) avec un paramètre de maille 3,5400 Å (JCPDS n° 00-001-1258), on peut noter également l'apparition d'une phase intermétallique (FeNi) de structure cubique avec un paramètre de maille 3,5160 Å (JCPDS n° 00-003-1044), borure de type CrB d'une phase orthorhombique, des pics de Ni₃Si est également visible dans ce revêtement de structure cubique d'une proportion de 29% .

A partir de ces spectres DRX, la quantification des phases nous montre que notre dépôt est constitué essentiellement de la phase principale qui est la phase intermétallique (FeNi) d'une teneur relative de 35%, d'une solution solide à face centrée de type Ni d'une teneur relative de 20%, Borure type CrB avec une faible proportion de 16%

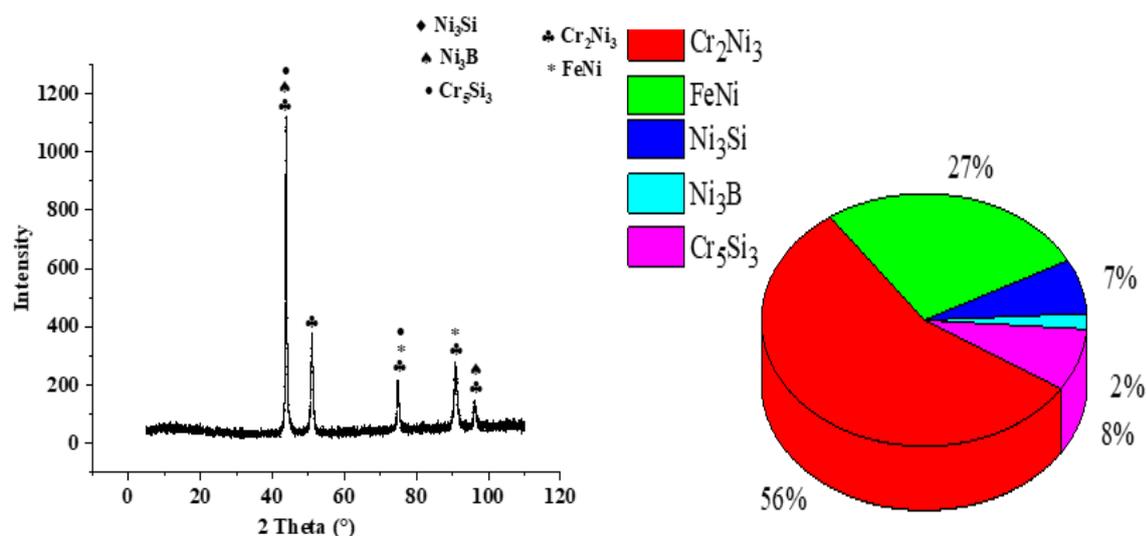


Figure III.6 : Spectre de diffraction des rayons X et Quantification des phases des revêtements en alliage à base de NiCrBSi (HVOF)

La figure 6 présente les spectres de diffraction des rayons X et la quantification des phases des revêtements en alliage à base de Ni (HVOF). Les spectres de diffraction X des revêtements en NiCrBSi ont révélé cinq phases. La première est d'une solution solide de structure cubique à face centrée avec un paramètre de maille de 3,6000 Å qui correspond l'élément de (Fe-Ni) (JCPDS n° 00-003-1207) de proportion de 27%. On note également la présence de deux carbures types Cr₂Ni₃ et Cr₅Si₃, le premier est d'une structure cubique et d'une teneur relative de 56%, le deuxième correspond à une structure tétragonal d'un paramètre avec une faible proportion de 8%. Des pics de Ni₃Si et Ni₃B ont été aussi visible dans notre dépôt avec des teneurs relatives de 7% et 2% respectivement.

III.4 Caractérisation mécanique

III.4.1 Evaluation de la microdureté Vickers

Les essais de dureté Vickers sont réalisés sur la surface de dépôt NiCrBSi par indentation sous une charge de 2N. La figure ci-dessous illustre le profil de dureté sur le long du dépôt en NiCrBSi obtenue par les deux procédés de projection HVOF et arc électrique.

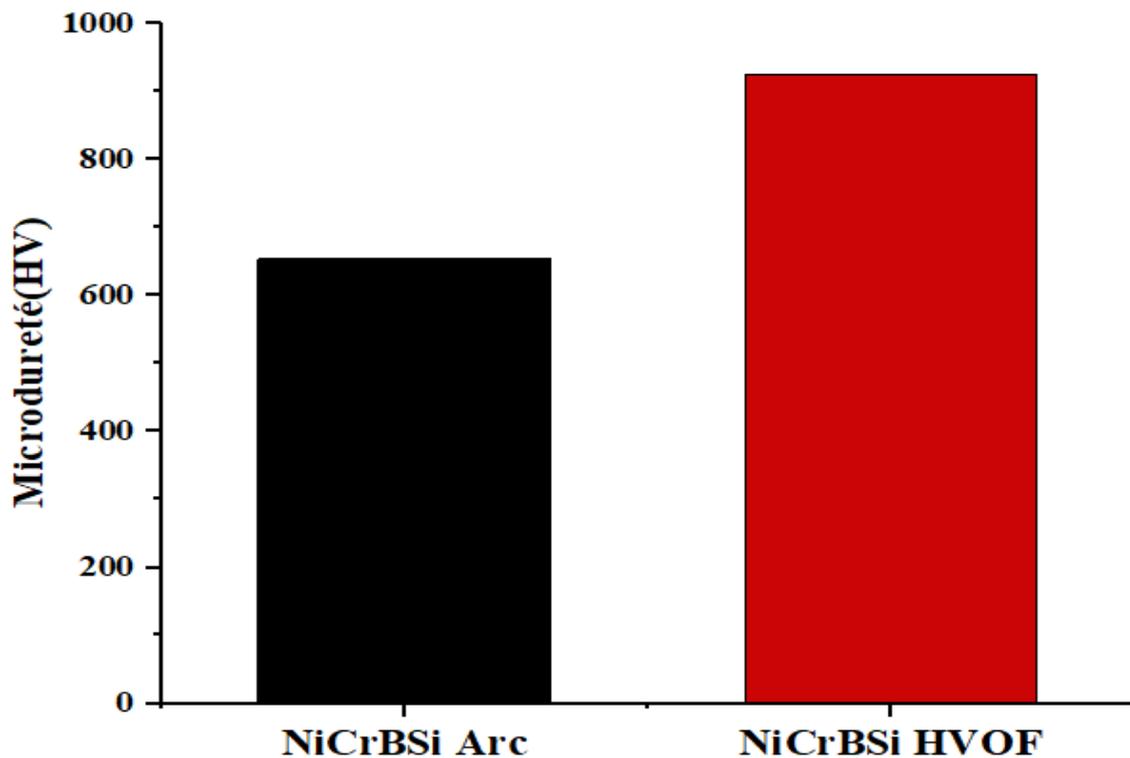


Figure III.7 : Analyse de la dureté des deux échantillons par microdureté Vickers :
Distribution des valeurs Hv

La figure III.7 représente un histogramme qui traduit la distribution des valeurs de microdureté (Hv) pour deux procédés de traitement des échantillons : le procédé HVOF et la projection à arc électrique.

Sur l'axe des abscisses on trouve le nom du procédé, avec deux catégories : "HVOF" et "Projection à arc électrique". Il s'agit donc de comparer les résultats de deux méthodes de traitement des échantillons, alors que l'axe des ordonnées représente la microdureté (Hv), qui est une mesure de la dureté des matériaux. Plus la valeur de Hv est élevée, plus le matériau est dur.

En observant l'histogramme on remarque deux pics qui correspondent aux deux procédés le 1^{er} situé autour de 924,17 Hv représentant une microdureté moyenne de l'échantillon revêtu par un dépôt NiCrBSi par le procédé HVOF. Quant au 2^{ème} pic, il atteint les 653,9 Hv représentant une microdureté moyenne du même dépôt revêtu pas le procédé de projection à arc électrique.

Aussi que nous pouvons observer la distribution des valeurs de microdureté pour chaque processus. L'histogramme nous donne une idée de la propagation et de la tendance globale de nos données. En comparant visuellement les deux processus en vérifiant les positions des barres correspondantes dans l'histogramme. La colonne du procédé HVOF est plus élevée que celle du procédé de pulvérisation à l'arc, cette différence peut être due à des paramètres de projection entre les deux procédés tel que la température, la vitesse de projection... etc.

Cela indique on conclusion que le procédé HVOF produit des échantillons avec une microdureté plus élevée en moyenne.

ARC :

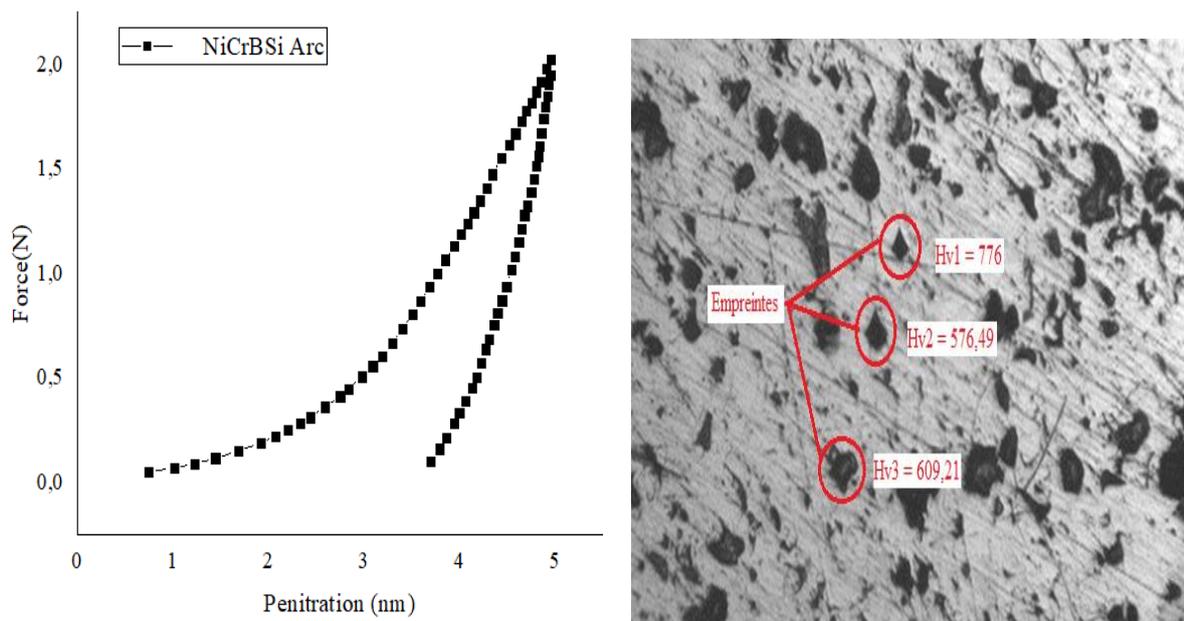


Figure III.8 : l'allure typique de la courbe charge-décharge pour le procédé arc électrique

La Figure III.8 illustre l'allure typique de la courbe charge-décharge d'essais de micro-indentation instrumentée Vickers réalisée sous une charge de 2N sur la surface polis des revêtements NiCrBSi obtenue par le procédé de projection Arc électrique.

La courbe de charge représente l'augmentation de la charge appliquée sur l'indenteur Vickers lors de la pénétration dans l'échantillon. Avec une charge maximale de 2 N, cela indique l'effort exercé pour enfoncer l'indenteur dans le matériau. La charge maximale appliquée est importante car elle peut influencer la profondeur de pénétration et la déformation du matériau. Il existe plusieurs approches mais généralement, on peut admettre

que la profondeur maximale ne doit pas dépasser 7–10 % de l'épaisseur du revêtement pour éviter l'influence du substrat dans la mesure [24].

Cette interprétation permet de distinguer la profondeur de pénétration de 4,95nm qui suggère que le matériaux est susceptible de subir une déformation plastique lorsque on applique une charge de 2N qui indique une force relativement faible en prenant en compte une dureté Vickers moyenne de 653,9 ce qui indique une certaine résistance à l'usure et à la déformation plastique et une dureté moyenne vue la charge maximale appliquée, cela pourrait indiquer des variations dans les propriétés mécaniques du matériau revêtu qui peut être influencé par des facteurs tel que la préparation de l'échantillon ou bien les paramètres de projection thermique.

HVOF:

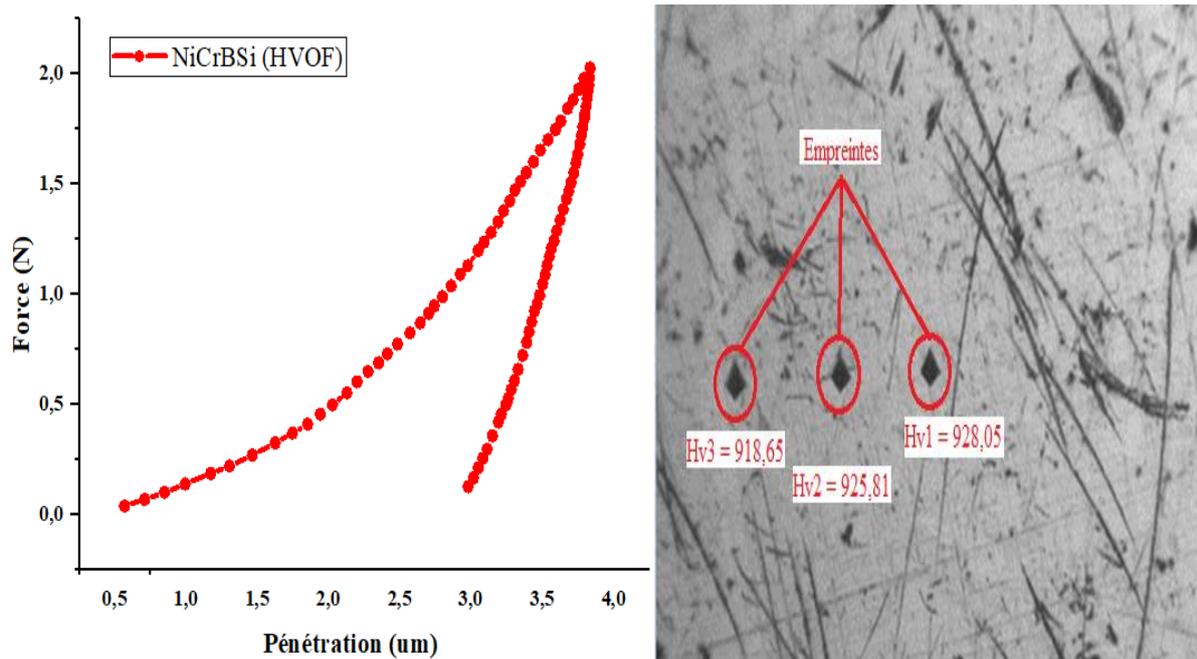


Figure III.9 : l'allure typique de la courbe charge-décharge pour le procédé flamme HVOF

La Figure III.9 illustre l'allure typique de la courbe charge-décharge d'essais de micro indentation instrumentée Vickers réalisée sous une charge de 2N sur la surface polis des revêtements NiCrBSi obtenue par le procédé de projection HVOF.

D'après cette figure il est remarquable de constater que le dépôt NiCrBSi a une valeur de pénétration maximale égal à 3.84nm qui est relativement faible et qui également signifie que le dépôt NiCrBSi a une bonne résistance à la déformation. En revanche, La profondeur maximale atteinte était inférieur 2 % de l'épaisseur du revêtement (environ 250nm), cela veut dire que la dureté représente uniquement celle du revêtement, car il est bien connu que le substrat peut intervenir dans la réponse du matériau revêtu si la profondeur maximale dépasse 7–10 % de l'épaisseur du revêtement mesuré, et par conséquent, la micro dureté et le module d'élasticité mesuré peut prendre en compte celui du substrat [24].

Cette interprétation permet de distinguer la profondeur de pénétration de 3.84nm qui est relativement faible en prenant en compte une dureté Vickers moyenne de 924,17 ce qui indique une bonne résistance à l'usure et à la déformation plastique et une dureté élevée vue la charge maximale appliquée, cela peut être attribué à l'effet bénéfique du revêtement NiCrBSi ainsi qu'au procédé de projection appliqué.

Etude comparative :

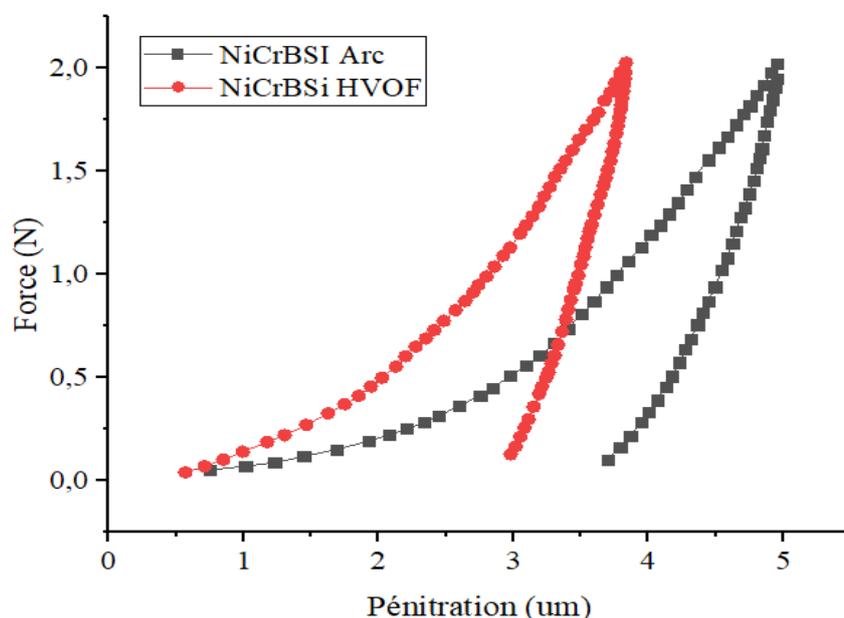


Figure III.10 : l'allure typique de la courbe charge-décharge pour les deux procédés HVOF et arc électrique

Résultats et discussions

La figure III.10 représente les graphes charge décharge des deux échantillons revêtus en NiCrBSi par deux procédés de projection thermique, une étude comparative a été établie si dessous afin de désigner le procédé de projection le plus utile pour ce dépôt :

	L'échantillon 1 (Arc électrique)	L'échantillon (HVOF)
Moyenne de la dureté Vickers (HV)	653,9	924,17
Charge maximale	2 N	2 N
Profondeur de pénétration Maximale	4,95 nm	3,8 nm
Module de Young (E)	174,271 GPa	220,698 GPa

Tableau III.1 : les valeurs obtenues par l'essai de la microdureté pour les deux échantillons

Comparaison des courbes de charge-décharge :

Forme de la courbe : montre une augmentation significative. Une décharge plus lente indique une dureté initiale et une rétention de charge plus élevées. En revanche, la courbe de l'échantillon 2 (revêtement HVOF) montre une augmentation plus progressive de la contrainte avec une décharge plus rapide, suggérant une dureté initiale légèrement inférieure et une plus grande déformation du matériau.

Dureté initiale : La dureté Vickers moyenne de l'échantillon 1 (653,9HV) est légèrement inférieure à celle de l'échantillon 2 (924,17HV), ce qui indique une dureté initiale inférieure du revêtement à l'arc.

Profondeur de pénétration du : l'échantillon 2 a une profondeur de pénétration légèrement plus élevée (4,95nm) que l'échantillon 1 (3,8nm). Cela est dû à une légère augmentation de la déformation plastique du matériau lors des essais de dureté, à la porosité.

En comparant les courbes de charge-décharge des deux échantillons, il est observé que l'échantillon 2 (revêtement par HVOF) présente une dureté initiale plus élevée et une capacité de maintien de la charge supérieure par rapport à l'échantillon 1 (revêtement par arc électrique). De plus, l'échantillon 2 présente légèrement une plus grande profondeur de pénétration, ce qui suggère une déformation plus importante.

III.4.1.1 Module de Young

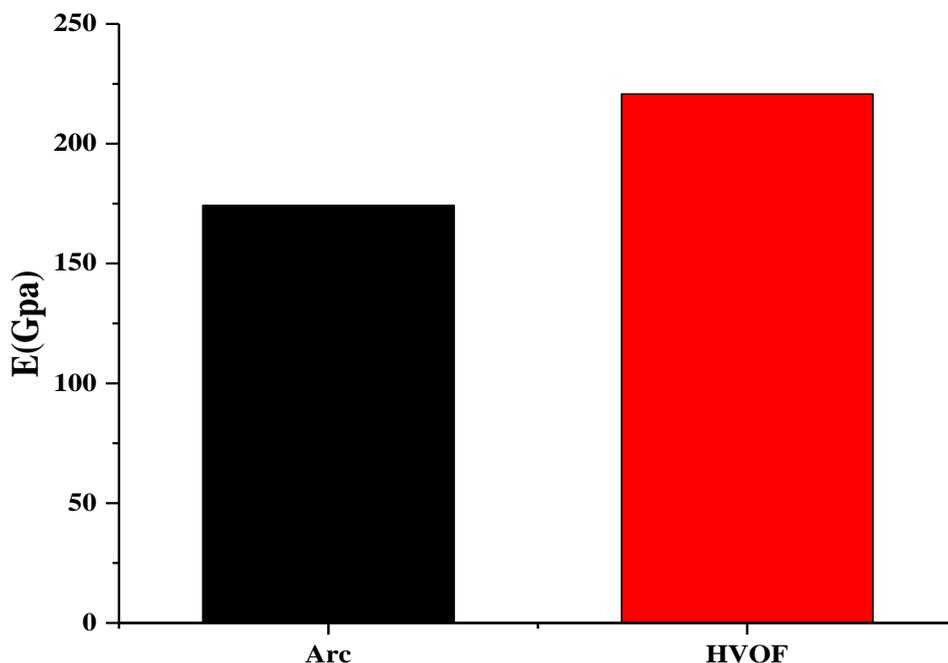


Figure III.11: Les valeurs du module de Young obtenues pour chaque échantillon

La figure III.11 représente les résultats calculés par la méthode développée par Olivier et Pharr concernant les modules de Young de deux échantillons traduits sous forme d'histogramme [23].

L'histogramme présente deux colons verticaux correspondent au module de Young des deux échantillons revêtus, en les examinant on peut traduire les valeurs de E de chaque échantillon et constater que l'échantillon revêtu par Arc électrique présent un module de Young de 174,271 GPa, sachant qu'une valeur plus élevée du module de Young indique une plus grande rigidité du matériau, alors que l'échantillon revêtu à l'arc électrique présente une rigidité de 174,271 GPa.

Échantillon revêtu par procédé HVOF : le module de Young calculé pour cet échantillon est de 220,698 GPa. Cette valeur indique une rigidité supérieure par rapport à l'échantillon revêtu par arc électrique. Cela suggère que l'échantillon revêtu par procédé HVOF présente une meilleure résistance à la déformation élastique et une plus grande rigidité par rapport à l'échantillon revêtu par arc électrique.

L'histogramme met en évidence la différence entre les modules de Young des deux échantillons et permet de visualiser facilement les valeurs obtenues. Il indique clairement que l'échantillon revêtu par procédé HVOF présente un module de Young plus élevé, ce qui suggère une meilleure résistance mécanique et une rigidité accrue par rapport à l'échantillon revêtu par arc électrique.

Cette interprétation et ces résultats sont basés sur plusieurs facteurs tels que la qualité du revêtement, les conditions expérimentales et les propriétés spécifiques des matériaux qui peuvent également avoir une influence sur les résultats.

III.4.2 Profilomètre

III.4.2.1 Caractérisation de la rugosité de surface du dépôt de NiCrBSi :

La caractérisation de la rugosité de surface du dépôt de NiCrBSi a été obtenue grâce à l'analyse profilométrique de la rugosité Ra.

Avec procédé HVOF

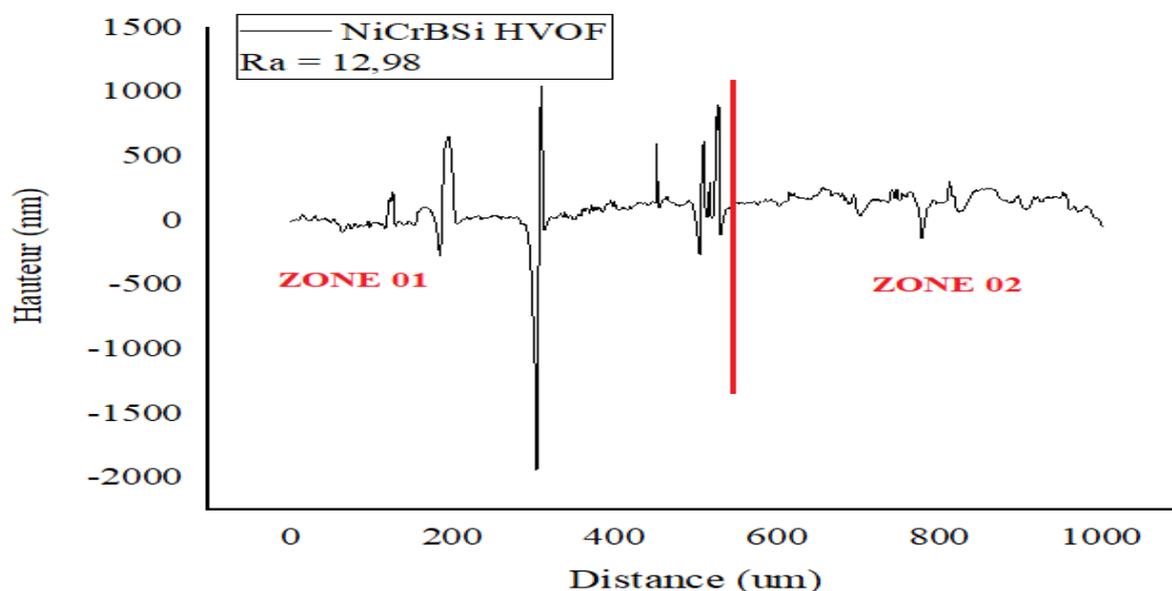


Figure III.12 : le profil de rugosité obtenu après la projection thermique flamme HVOF

Le graphique de profilométrie nous traduit le profil de rugosité obtenu après la projection thermique HVOF sur un substrat en NiCrBSi, il représente la variation de de la hauteur de

surface (axe des y) en fonction de la distance parcourue sur la surface (axe des x), les données sont collectées à l'aide d'un profilomètre.

En examinant la forme de la ligne on constate une apparition de deux zones, cahoteuse (zone 01) et uniforme (zone 02) ce qui nous permet d'identifier plusieurs caractéristiques et d'interpréter les valeurs de la rugosité moyenne $Ra=12,98\mu m$ cela suggère une rugosité relativement faible, ce qui signifie que la surface est uniforme en général et une valeur élevée $Rz=3043nm$ qui a été signalée dans la 1^{ère} phase (0 à 500nm) du graphique indiquant une variation significative de hauteur sur la surface et qu'elle présente des aspérités et des irrégularités.

Ces caractéristiques peuvent être le résultat de processus de fabrication des matériaux utilisés, de conditions de traitement spécifique ou bien de paramètres de projection.

On observe une uniformité accrue en 2^{ème} phase (de 500 à 1000nm) où la ligne du graphique devient plus uniforme par rapport à 1^{ère} phase, bien que la rugosité reste relativement élevée par rapport à la grande valeur de Rz. Ces caractéristiques peuvent directement influencer sur les propriétés et les performances de la surface, et pour atteindre des spécifications requises on doit opter à des méthodes de correction.

Avec procédé arc électrique

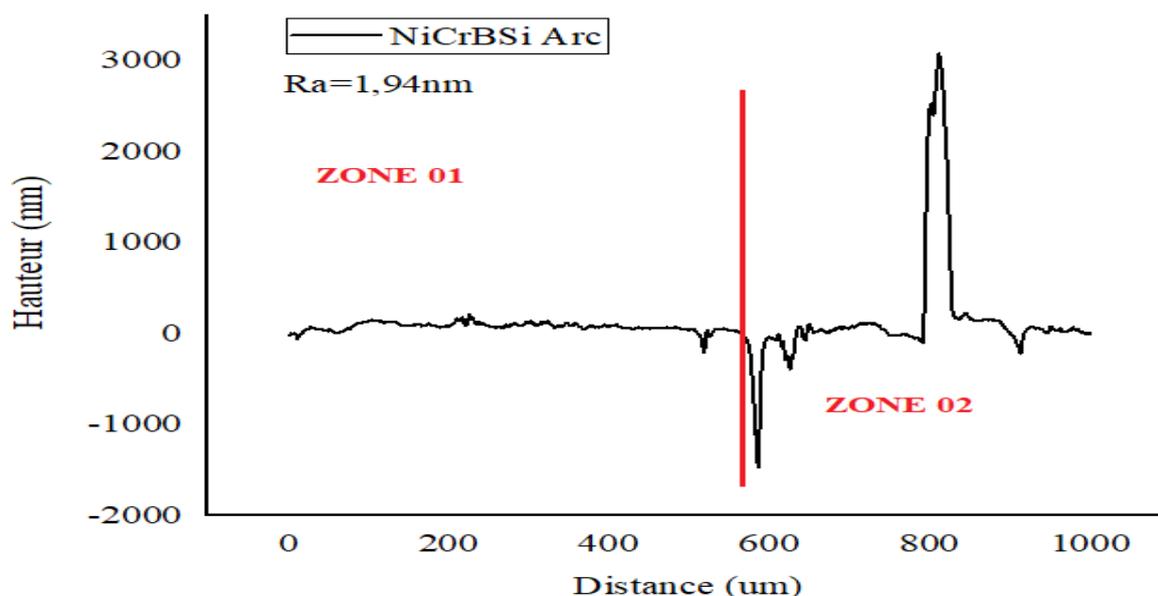


Figure III.13 : le profil de rugosité obtenu après la projection thermique à Arc électrique

Le graphique de profilométrie nous traduit le profil de rugosité obtenu après la projection thermique à arc électrique sur un substrat en NiCrBSi, il représente la variation de la hauteur de surface (axe des y) en fonction de la distance parcourue sur la surface (axe des x), les données sont collectées à l'aide d'un profilomètre.

En examinant la forme de la ligne on constate une apparition de deux zones, uniforme (zone 01) et cahoteuse (zone 02) ce qui nous permet d'identifier plusieurs caractéristiques et d'interpréter les valeurs de la rugosité moyenne $R_a=1,94\mu\text{m}$ indiquant une rugosité relativement faible, ce qui signifie que, en moyenne, les écarts entre les sommets et les creux de la ligne de profil sont de petites amplitudes, ce qui suggère une surface relativement lisse et une valeur élevée $R_z=4580\text{nm}$ qui a été signalée dans la 2^{ème} phase (500 à 1000 nm) du graphique indiquant une variation significative de hauteur sur la surface et qu'elle présente des aspérités et des irrégularités ou des défauts qui entraînent une rugosité plus élevée dans cette zone.

Ces caractéristiques peuvent être le résultat de conditions de traitement spécifique ou bien de paramètres de projection.

Une meilleure uniformité a été observée en 1^{ère} phase (de 0 à 500 nm) où la ligne du graphique est stable par rapport à 2^{ème} phase, bien que la rugosité reste relativement élevée par rapport à la grande valeur de R_z . Ces caractéristiques peuvent directement influencer sur les propriétés et les performances de la surface, et pour atteindre des spécifications requises on doit opter à des méthodes de correction (Polissage et usinage).

Ces propriétés peuvent affecter directement les performances de la surface. Afin d'atteindre les spécifications requises, il est nécessaire de déterminer la méthode de correction.

Chapitre III :

Résultats et discussions

Conclusion générale

Conclusion générale

En conclusion, notre étude est basée précisément sur la caractérisation des dépôts obtenus par projection thermique, en utilisant deux procédés spécifiques, à savoir HVOF et arc électrique.

Une série d'analyses et de tests ont été effectués pour évaluer les propriétés des revêtements NiCrBSi résultants déposés sur un acier inoxydable (X6CrNi18/8).

Notre recherche a abouti à plusieurs résultats importants :

Dans un premier temps, les études de porosité effectuées par microscope optique ont révélé un pourcentage de porosité plus faibles dans le procédé HVOF par rapport au procédé à l'arc, indiquant une meilleure densification de la microstructure.

De plus, l'analyse par diffraction des rayons X (DRX) a confirmé la présence de phases cristallines dans les deux échantillons, prouvant la qualité structurale des dépôts.

L'observation par microscope optique nous a permis de visualiser la microstructure du revêtement, montrant une bonne adhérence entre les particules et le substrat et une répartition uniforme des phases.

En termes de propriétés mécaniques, les tests de microdureté effectués sous une charge de 2N ont montré une dureté supérieure des échantillons HVOF, indiquant une meilleure résistance à l'usure avec une moyenne 653,9 Hv pour l'échantillon Arc et 924,17 Hv pour l'échantillon HVOF.

L'analyse de rugosité réalisée à l'aide d'un profilomètre de surface a révélé des valeurs de rugosité plus faibles pour les dépôts HVOF, indiquant une bonne qualité de surface. Ces résultats sont importants pour les applications nécessitant une faible rugosité et une bonne adhérence.

Dans l'ensemble, les résultats obtenus démontrent l'efficacité du procédé HVOF par rapport au procédé à l'arc dans le dépôt de revêtements NiCrBSi. Les revêtements HVOF se caractérisent par une densification supérieure, une meilleure résistance à l'usure et une meilleure qualité de surface, ce qui les rend plus adaptés à diverses applications industrielles.

Cependant, il est à noter que notre étude se concentre seulement sur le matériau NiCrBSi, cela veut dire que d'autres matériaux de revêtement peuvent se comporter différemment.

Conclusion générale

Par conséquent, d'autres études sont nécessaires pour évaluer les performances des revêtements dans des conditions d'utilisation spécifiques.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] **V. Michel**, Plasma and Thermal Spraying, Elsevier, 2008.
- [2] **N. Hidja, AIS A.**, mémoire de fin d'étude « frottements des dépôt obtenue par projection thermique à l'arc électrique », université de béjaia.2009.
- [3] **C. M. Kay, J. Wiley and son**, Thermal Spraying: Practice, Theory and Application, 2006.
- [4] **R. B. Heimann**, Plasma Spray Coating: Principles and Applications, ASM International, 1994.
- [5] **L. Pawlowski**, Thermal Spray Technology, Springer Science and Business Media, 2008.
- [6] **G. Bolelli, M. Lusyarghi, L. Milanti, and L. Bertolni**, HVOF Thermal Spray Coatings: Influence of Process Parameters on Coating Characteristics
- [7] **M. Salehi, M. Farzaneh, F. Ashrafizadeh, and M. H. Enayati**, The Influence of HVOF Particle Velocity on Coating Properties, Journal of Thermal Spray Technology, vol. 28, no. 7, pp. 1192-1201, 2019
- [8] **A. Toma, M. Dumitru, and C. Lupu**, Influence of Process Parameters on the Microstructure and Properties of HVOF-Sprayed WC-17Co Coatings, Journal of Thermal Spray Technology, vol. 28, no. 7, pp. 1258-1266, 2019.
- [9] **S. L. Kampe, S. A. E. Boyer, and R. G. Buchheit**, "The effect of spray distance on the characteristics of HVOF sprayed coatings", Surface and Coatings Technology, vol. 123, no. 1, pp. 64-70, 2000.
- [10] **P. L. Fauchais, J. V. R. Heberlein et M. I. Boulos** Thermal Spray Fundamentals: From Powder to Part, publié par Springer, 2014.
- [11] **G. R. Halford and W. A. Locci**, Nickel-Based Superalloys for Advanced Turbine Engines: Chemistry, Microstructure, and Properties, Journal of Propulsion and Power, vol. 22, no 2,2006.

Références bibliographiques

- [12] **D. N. Duhl and A. I. Levin**, History of the Development of Nickel-Base Superalloys for High Temperature Applications, in Nickel, Cobalt, and Their Alloys, ed. J. R. Davis (ASM International, 2000).
- [13] **Y. Qi, H. Zhao and H. Liu**, Preparation and Characterization of Nickel Powders by Vacuum Arc Plasma, Journal of Alloys and Compounds, vol. 453, no. 1-2, pp. 364-367, 2008.
- [14] **O. D. Neikov**, Handbook of Non-Ferrous Metal Powders, 2009.
- [15] **R. A. Dunlap**, "Nickel," in Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology, John Wiley & Sons, Inc., 2005.
- [16] **C.T. Sims, N. S. Stolff, W.C. Hagel**, Superalloys II; High temperature materials for aerospace and industrial power. New York, 1987.
- [17] **R. Molins**, Oxydation des superalliages à base de nickel Identification des mécanismes et conséquences sur le mode de propagation des fissures en fatigue à haute température. Thèse Paris, ENSMP CDM, 1995.
- [18] **M. Marty, A. Walder, C. Diot** Influence of solid solution strengthening elements on the properties of PM nickel base alloys. PM Aerospace Materials, Lucerne, p. 10, 1987.
- [19] **E. Huron**, The influence of inclusions on low fatigue life in a PM nickel-base disk superalloy. Superalloys, Seven Spring, p. 359-367, 1996.
- [20] **E. Huron, K. R. Bain, D.P. Mourer, J. Schirra, P.L. Reynolds, E.E. Montero** The influence of grain boundary elements on properties and microstructures of PM nickel base superalloys. Superalloys, Seven Springs, p. 73-81, 2004.
- [21] **Paitendre B.** Influence de la composition sur la constitution et les propriétés mécaniques de superalliages base nickel produits par la métallurgie des poudres. Thèse Paris, ENSMP CDM, 1986.
- [22] **N. W. Ashcroft**, N. D. PHYSIQUE DES SOLIDES. Paris-France, (janvier 2002).
- [23] **W.C Oliver, G.M Pharr**, Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented Indentation: advances in understanding and refinement to methodology, J.Mater.Res.19,3, 2004.

Références bibliographiques

[24] **B. Jonson, S. Hogmark** , Hardness measurements of thin films, Thin Solid Films 114, 257, 1984.

Résumé

Résumé :

L'objet de cette étude consiste à déterminer quel procédé est le plus approprié pour certaines applications ou exigences spécifiques en termes de qualité de revêtement parmi les deux techniques de projection thermique y compris la projection à flamme (HVOF) et l'arc électrique. Nous nous sommes intéressés aux procédés de caractérisation mécanique et structurale des dépôts, ces derniers montrent que HVOF fournit des revêtements avec une meilleure rugosité, une porosité plus faible, meilleure dureté et une microstructure plus uniforme par rapport à l'arc.

Notre étude fournit des informations importantes pour sélectionner le procédé de projection thermique optimal pour les revêtements NiCrBSi résistants et durables.

Mots clés : Projection thermique, dépôt, caractérisation mécanique, caractérisation structurale

Abstract :

The purpose of this study is to determine which of the two thermal spray techniques, high velocity oxy-fuel (HVOF) and electric arc, is the most effective coating process in terms of coating quality. We focus on the mechanical and structural characterization process of coatings, HVOF provides coatings with surface roughness, lower porosity, increased hardness and more uniform microstructure compared to arc methods we have shown.

Our study provides valuable insight into selecting the optimal thermal spray process for durable and resistant NiCrBSi coatings.

Key words: Thermal spraying, deposition, mechanical characterization, structural characterization

ملخص

الغرض من هذه الدراسة هو تحديد أكثر طريقة فعالة من حيث جودة التغليف بين الطريقتين للرش الحراري، بما في ذلك القوس الكهربائي. لقد ركزنا على عمليات توصيف الميكانيكية والهيكلية للتغليفات، حيث (HVOF) الرش باللهب أظهرت النتائج أن توفر تغليفات ذات خشونة أفضل، ومسامية أقل، وصلابة محسنة، وهيكل دقيق أكثر توحيداً مقارنةً بتقنية القوس الكهربائي

يوفر البحث الخاص بنا معلومات هامة لاختيار الطريقة المثلى للرش الحراري للحصول على تغليفات متينة ومقاومة

الكلمات الدالة: الرش الحراري، الترسيب، التوصيف الميكانيكي، التوصيف الإنشائي

Résumé
