

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE DE BLIDA
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE MECANIQUE



Projet de Fin d'Etudes
Pour l'obtention du Diplôme de Master
Spécialité Ingénierie des Matériaux et des Surfaces (IMS)

Caractérisation de revêtement composite déposés par
torche à flamme

Promoteur :

Pr. Bacha Nacer-Eddine

Réalisé par :

Neffaa Islem

Kerouadi Mohamed Anouar

Promotion: 2023/2024

Dédicace

Neffaa Islem

Louange à Allah

Je dédie ce travail à : mes parents et mes amis proches, pour leur soutiens, qui m'ont aidé à rédiger ce mémoire, a notre meilleur promoteur Pr. BachaNacer E.
et tous ceux qui ont contribué avec moi à ma réussite et merci beaucoup.

Dédicace

Kerouadi Mohamed Anouar

Je tiens à remercier toute ma famille et mes amis, qui ont contribué avec moi et m'ont aidé à compléter ce mémorandum. Je remercie également mon promoteur Pr BachaNacer E.
Et merci beaucoup.

Remerciement

Nous remercions tout d'abord Allah de nous avoir offert la santé et la volonté pour mener à terme ce projet de fin d'étude.

Nous adressons nos remerciements et nos gratitude à notre professeur Nacer-Eddine Bacha pour le remercier pour ses conseils continus qu'il nous a prodigué, et pour tous encouragements qu'il nous a donnés et que nous qui nous ont permis de parfaire nos connaissances.

RESUME

Dans ce travail, des revêtements de NiCrFeSi, NiCrMo et Ni-WC ont été déposés

avec succès à l'aide d'une torche à flammes sur des substrats en acier au carbone. Des revêtements composites ont aussi été fabriqués à partir d'un mélange de ces poudres. Les revêtements ont été caractérisés et ensuite leurs performances tribologiques ont été évaluées sous différentes charges et sous des angles d'incidence de particules abrasives.

Les revêtements ont été caractérisés à l'aide de la microscopie optique et électronique. Des essais de dureté ont été aussi réalisés surtout les types de revêtements déposés. Enfin, des essais d'usure, pion sur disque et d'érosion ont été réalisés pour mesurer les performances tribologiques des différents revêtements.

Les essais d'érosion ont montré que le revêtement composite possède la meilleure résistance à l'érosion. Elle est de 300% supérieure à celle de la Metaceram et plus de 400% de celle du revêtement 19999. Pour le reste, le revêtement composite a des performances intermédiaires comparativement aux autres revêtements testés.

SUMMARY

In this work, NiCrFeSi, NiCrMo, and Ni-WC coatings were successfully deposited using a flame torch on carbon steel substrates. Composite coatings were also fabricated from a mixture of these powders. The coatings were characterized, and then their tribological performances were evaluated under different loads and angles of abrasive particle incidence. The coatings were characterized using optical and electron microscopy. Hardness tests were also performed on all types of deposited coatings. Finally, wear tests, pin-on-disc, and erosion tests were conducted to measure the tribological performances of the different coatings.

Erosion tests showed that the composite coating has the best erosion resistance. It is 300% higher than that of Metaceram and over 400% higher than that of the 19999 coating. In comparison to the other coatings tested, the composite coating has intermediate performances.

ملخص

بنجاح باستخدام شعلة لهب على قواعد من Ni-WC و NiCrMo، NiCrFeSi في هذا العمل، تم ترسيب طبقات الصلب الكربوني. تم أيضًا تصنيع طبقات مركبة من خليط من هذه المساحيق. تم توصيف الطبقات ومن ثم تم تقييم أدائها التآكلي تحت أحمال مختلفة وتحت زوايا اصطدام الجسيمات الكاشطة. تم توصيف الطبقات باستخدام المجهر البصري والإلكتروني. تم أيضًا إجراء اختبارات صلادة على جميع أنواع الطبقات المرسبة. وأخيرًا، تم إجراء اختبارات للتآكل، مثل اختبار دبوس على قرص واختبار التآكل بالتآكل لقياس أداء التآكل للطبقات المختلفة. أظهرت اختبارات التآكل أن الطبقة المركبة لديها أفضل مقاومة للتآكل. إنها تزيد بنسبة 300% عن ميتاسيرام وأكثر من 400% من طبقة 19999. بالنسبة لبقية الأداء، فإن الطبقة المركبة لديها أداء متوسط مقارنة بالطبقات الأخرى التي تم اختبارها.

SOMMAIRE

Tableau des Matières

INTRODUCTION GENERALE	1
Chapitre1 : La projection par flamme	2
1 Projection par flamme	3
1.1 Projection flamme poudre	3
1.2 Projection flamme fil.....	4
1.3 Equipement flamme-poudre	5
a. Torche à gaz	5
b. Torche à poudre subsonique	6
c. Pistolet à poudre hypersonique.....	7
1.4 Préparation des surfaces	8
1.5 Les matériaux céramiques	9
1.5.1 Revêtements céramiques.....	9
1.6 L'usure.....	12
1.6.1 Définition	12
1.6.2 Mécanisme d'usure.....	12
1.6.2.1 L'usure adhésive	12
1.6.2.2 L'usure abrasive	13
1.6.2.3 L'usure érosive	14
1.6.2.4 Dureté	14
1.6.2.5 Tribomètre pion sur disque.....	15
Chapitre 2 : Procédures expérimentales	16
2 Introduction.....	17
2.1 Découpage des échantillons	17
2.2 Préparation des surfaces	17
2.3 Projection thermique.....	18
2.4 Poudres	Erreur ! Signet non défini.
2.4.1 Poudre 625	19
2.4.2 Poudre 19999	20
2.4.3 Metaceram.....	21
2.5 Balance électronique	21
2.6 Le polissage	21
2.7 Attaque chimique.....	22
2.8 Microscopie Electronique à Balayage	22
2.9 Microscopie optique	23
2.10 Essai de dureté.....	24

2.11	Essais d'érosion	24
	Chapitre 03 : Résultats et Discussions	26
3	Introduction.....	27
3.1	Composition chimique du substrat.....	27
3.2	Poudres utilisées	27
3.3	Analyse des coupes transversales.....	28
3.4	Essais de microdureté	31
3.5	Essai d'usure pion sur disque.....	32
3.6	Essais d'érosion	34
	CONCLUSION.....	39

LISTES DES FIGURES

Figure 1.1 : Schéma du principe d'un pistolet flamme poudre.....	4
Figure 1.2 : Schéma d'un pistolet flamme fil.....	5
Figure 1.3 : Installation d'un pistolet oxygène-gaz à poudre.....	6
Figure 1.4 : Pistolet à poudre subsonique.....	7
Figure 1.5 : Pistolet à tir continu HVOF.....	7
Figure 1.6 : Diagramme ténacité-module d'élasticité.....	12
Figure 1.7 : Phénomènes élémentaires de l'usure adhésive.....	13
Figure 1.8 : Phénomènes élémentaires de l'usure abrasive.....	13
Figure 1.9 : Mécanisme de l'érosion d'une surface par des particules.....	14
Figure 1.10 : Tribomètre pion-disque.....	15
Figure 2.1 : Guillotine.....	17
Figure 2.2 : Grenailleuse.....	18
Figure 2.3 : Torche à flamme CastoDyn DS 8000.....	18
Figure 2.4 : Projection des poudres en cours.....	19
Figure 2.5 : Poudre 625 vue au MEB.....	20
Figure 2.6 : Balance électronique.....	21
Figure 2.7 : Polisseuse.....	22
Figure 2.8 : Microscope Électronique à Balayage.....	23
Figure 2.9 : Microscope optique.....	24
Figure 2.10 : Duromètre Rockwell.....	24
Figure 2.11 : Montage expérimental pour l'essai d'érosion.....	25
Figure 3.1 : Anouar en action.....	27
Figure 3.2 : Coupe transversale du revêtement composite.....	28
Figure 3.3 : Vue de la coupe transversale du revêtement composite au MEB.....	28
Figure 3.4 : Coupe transversale de la poudre 19999.....	29
Figure 3.5 : Vue de la coupe transversale du revêtement 19999 au MEB.....	29
Figure 3.6 : Coupe transversale du Metaceram 28030.....	30
Figure 3.7 : Vue de la coupe transversale du revêtement Metaceram au MEB.....	30
Figure 3.8 : Aspects des surfaces des revêtements après l'essai d'usure pion sur disque.....	32
Figure 3.9 : Courbes d'usure pion sur disque des revêtements.....	34
Figure 3.10 : Éssais d'érosion des revêtements (angle d'incidence 90° durant 30 s.).....	35
Figure 3.11 : Erosion du revêtement composite à 90° durant 30 secondes.....	37
Figure 3.12 : Erosion du revêtement 19999 à 90° durant 30 secondes.....	37
Figure 3.13 : Essai pion sur disque du revêtement composite (charge 1.5kg, 1 min.).....	38

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Module d'élasticité et dureté Vickers de quelques matériaux.....	11
Tableau 2.1 : Paramètres opératoires de la projection thermique.....	19
Tableau 2.2 : Composition chimique de l'alliage 625.	19
Tableau 2.3 : Composition chimique de la poudre 19999.....	20
Tableau 2.4 : Caractéristiques mécaniques et physiques de la poudre 19999.....	20
Tableau 2.5 : Caractéristiques générales de la poudre Metaceram.....	21
Tableau 3.1 : Duretés des revêtements déposés à la torche à flamme.....	31
Tableau 3.2 : Essais d'usure pion sur disque des revêtements déposés à la torche à flamme.	33
Tableau 3.3 : Résultats des essais d'érosion.	35

INTRODUCTION GENERALE

Les agressions dues à l'usure ou à la corrosion sont un problème commun en ingénierie, que la pièce, le dispositif, le système, soient en contact avec des solides, des liquides ou des gaz. En général, l'endommagement causé par l'usure ou la corrosion peut être atténué avec les solutions techniques qui existent actuellement.

Les procédés de déposition par projection thermique sont des techniques développées afin d'améliorer les propriétés mécaniques de divers composants industriels par recouvrement avec des couches de quelque dixième de millimètres d'épaisseur. Dans la pratique, des revêtements chers mais déposés en petite quantité sont des solutions innovantes qui permettent de régler de tels problèmes.

Dans ce travail, des revêtements de NiCrFeSi, NiCrMo et Ni-WC seront déposés à l'aide d'une torche à flamme sur des substrats en acier au carbone. Des revêtements composites seront aussi fabriqués à partir d'un mélange de ces poudres. Les revêtements seront caractérisés à l'aide de la microscopie optique et électronique. Des essais de dureté sont aussi réalisés sur tous les types de revêtements déposés. Enfin, des essais d'usure, pion sur disque et d'érosion seront réalisés pour mesurer les performances tribologiques des différents revêtements.

Pour la présentation est scindée en trois chapitres:

- Le premier chapitre présente une étude bibliographique concernant les différentes techniques de projection thermique et leurs principes qui permettent de décrire le procédé de torche à flamme.
- Le deuxième chapitre représente la partie expérimentale dans laquelle nous avons exposé nos techniques expérimentales et les différentes poudres utilisées dans notre recherche.
- Le dernier chapitre est réservé à la présentation et à l'interprétation des résultats. Ce travail sera bien sûr clôturé par une conclusion générale.

Chapitre 1 :

La projection

par flamme

1 Projection par flamme

Cette technologie utilise l'énergie de la combustion d'un carburant gazeux (acétylène par exemple) avec de l'oxygène. Les températures atteintes par une flamme oxyacétylénique sont de l'ordre de 3300 K. Les matériaux dont la température de fusion est inférieure à 2573 K peuvent être projetés sous forme de poudres. Les matériaux utilisés sous forme de fil ou de tige (en général des métaux, des alliages et certaines céramiques) peuvent être projetés si leur température de fusion est inférieure à 3173 K. On distingue en général trois techniques qui relèvent de cette technologie : projection par flamme, projection par flamme hypersonique et projection par plasma. De plus, pour la projection par flamme, on différencie la projection dite « flamme poudre » de celle dite « flamme fil » d'après le conditionnement du matériau[1].

1.1 Projection flamme poudre

Le matériau d'apport est introduit sous forme de poudre dans la flamme oxy-combustible où il est accéléré grâce à l'énergie cinétique transmise essentiellement par le gaz porteur ou le gaz de soufflage de combustion. Les torches sont équipées d'un récipient de stockage de poudre, soit intégré à la torche soit séparé (figure 1.1). La poudre à projeter peut-être un métal pur, un alliage, un composite, un cermet ou certaines céramiques à bas point de fusion. La température de fusion des matériaux utilisés doit être inférieure à 0,6 à 0,7 de la température de la flamme ($T_{\text{fusion}} = 0,6-0,7 T_{\text{flamme}}$).

En raison de la faible vitesse d'impact des particules projetées, de l'ordre de 30 à 50 m/s, les dépôts obtenus ont une faible adhérence (de l'ordre de 20 à 40 MPa) et une porosité relativement élevée (10 à 20%). Les matériaux les plus utilisés sont les alliages auto fusibles (alliages à base de Ni ou Co contenant du bore et/ou du silicium et les alliages à bas point de fusion. Pour les alliages auto-fusibles, la refusion et la liaison du dépôt avec le substrat, sont obtenues par un post-traitement de chauffage après projection. Les dépôts refondus sont denses et presque sans porosité. De plus, les oxydes sont éliminés grâce au bore et au silicium sur lesquels l'oxygène se fixe préférentiellement et qui diffusent ensuite vers la surface du fait du gradient de température[2].

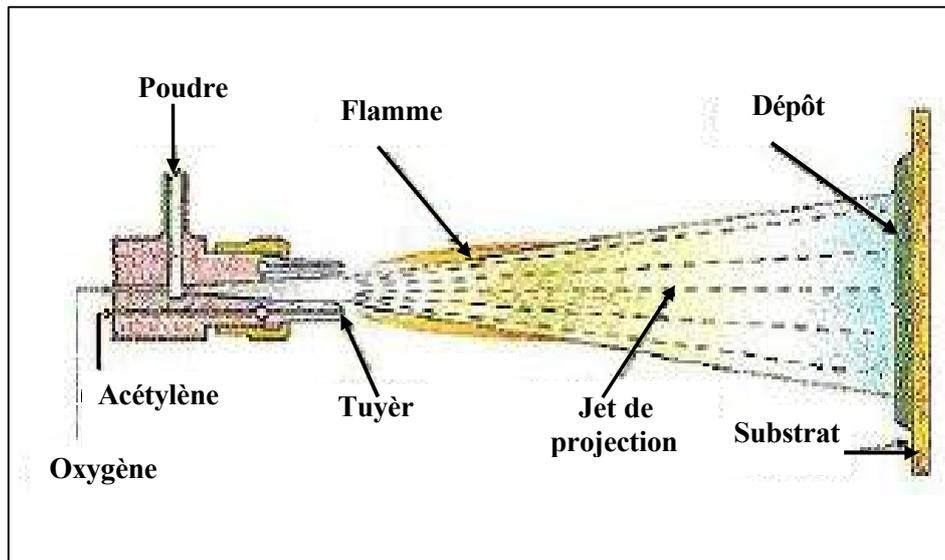


Figure 1.1 : Schéma du principe d'un pistolet flamme poudre[1].

1.2 Projection flamme fil

Le matériau est conditionné sous forme de fil (figure 1.2) ou de tige et entraîné dans la flamme par des rouleaux placés à l'arrière de la torche. Ces rouleaux sont actionnés par un moteur électrique ou un moteur pneumatique. Une fois l'extrémité de la tige ou du fil fondue dans la flamme, un courant d'air comprimé l'atomise et projette les particules sur la surface du substrat à une vitesse pouvant atteindre 150 m/s. Les taux horaires de déposition varient de 1 à 30 kg/h selon le type du matériau projeté et le diamètre des fils ou des baguettes utilisés. La température de fusion des matériaux peut atteindre 0,95 de la température de la flamme ($T_{\text{fusion}} = 0,95 T_{\text{flamme}}$). L'épaisseur des dépôts varie de quelques dixièmes de millimètres à quelques millimètres. Cette technique permet de projeter des métaux (Zn, Al, Cu, Sn, Ni, Mo), des aciers et des alliages à base de Zn, Cu et de Ni sous forme de fils et quelques céramiques (Al_2O_3 , $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$, ZrO_2 avec stabilisants) sous forme de cordons ou de baguettes.

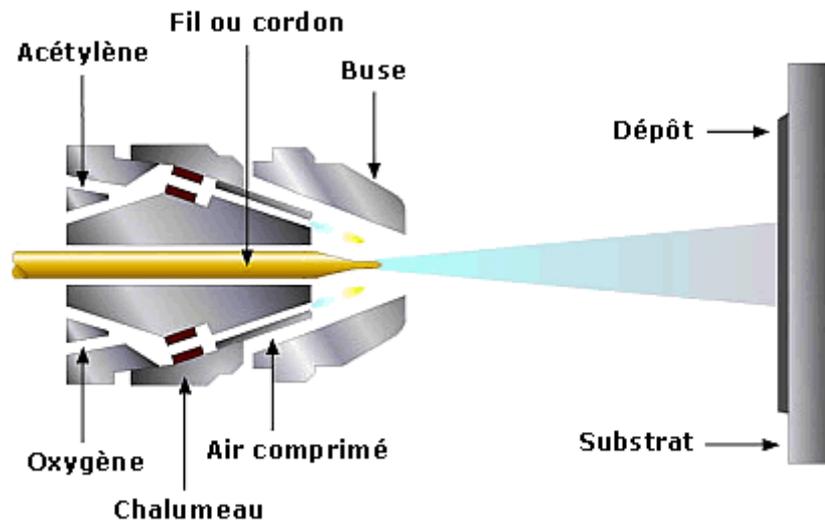


Figure 1.2 : Schéma d'un pistolet flamme fil[3].

1.3 Equipement flamme-poudre

Dans ce groupe nous trouvons trois types de matériels :

- Les torches à gaz.
- Les pistolets à poudre subsoniques.
- Les pistolets à poudre hypersoniques.

Les installations nécessaires sont peu différentes de celles décrites précédemment, elles sont en générale très simples mais elles peuvent nécessiter un automatisme très poussé (figure 1.3). Les gaz employés sont les mêmes que ceux décrits au paragraphe précédent, à l'exception de l'air comprimé qui est facultative[4].

a. Torche à gaz

Il s'agit de chalumeaux oxy-gaz (en générale oxyacétylénique) utilisés en soudure autogène, équipé d'un petit récipient contenant de la poudre. Celle-ci tombe par gravité dans la canalisation d'un gaz de combustion et est entraînée par celui-ci jusqu'à la buse pour être introduite dans la flamme qu'elle traverse à faible vitesse avant d'arriver au support à recharger.

La distance de la buse au support est très faible (quelques millimètres), ce qui permet à la flamme d'assurer la fusion de la poudre et le chauffage du support. La poudre arrive ainsi au substrat chaud mais non fondu, et une liaison de type brasure est assurée entre le métal

d'apport et le métal de base.

Les matériaux d'apports sont uniquement des alliages dits auto-fusibles à base de nickel ou de cobalt avec des éléments d'additions tel que le chrome, tungstène, bore, silicium, etc. Dans ces alliages, il est possible d'introduire des carbures de tungstène (jusqu'à 60% en masse) pour répondre à des applications exigeant un matériau résistant à l'usure[5].

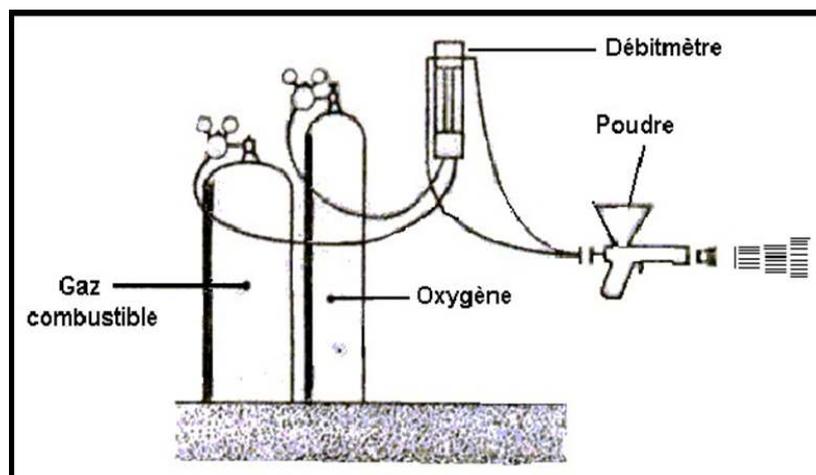


Figure 1.3 : Installation d'un pistolet oxygène-gaz à poudre[5].

b. Torche à poudre subsonique

Ces torches utilisent généralement un mélange oxyacétylénique. La poudre est stockée dans un réservoir qui peut être intégré au pistolet ou indépendant, et dans ce cas relié au pistolet par un tuyau flexible. La poudre est donc entraînée jusque dans la flamme par sa mise en suspension dans l'un des gaz (figure 1.4).

Les dépôts obtenus avec ce matériel présentent, en général, une adhérence moyenne, une faible cohésion des particules, entre elles, et une porosité élevée, à cause de la faible vitesse des particules. Le transport de poudre peut aussi se faire avec un jet d'air comprimé ou bien avec un des gaz neutres. Ces améliorations arrivent à augmenter les qualités des dépôts réalisés avec ce type de matériel. Leur utilisation est centrée sur les matériaux de type auto-fusibles, ou des auto-adhérents.

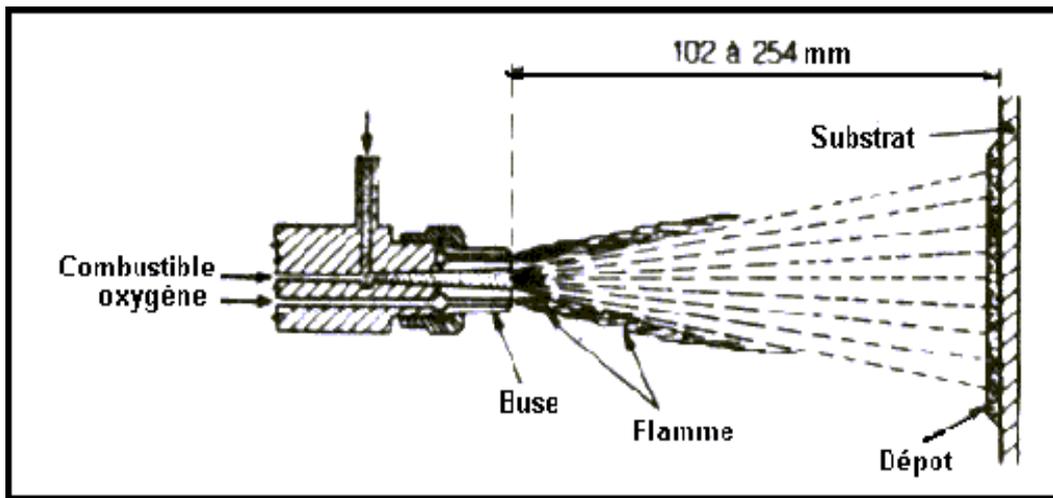


Figure 1.4 : Pistolet à poudre subsonique[6].

Ce matériel est apprécié pour son faible degré de nuisance (faible niveau de bruit) et nécessite peu d'investissement. On le trouve dans toutes les industries pour résoudre les problèmes de réparation et quelques fois traiter des pièces neuves, sollicitées en abrasion, corrosion, usure, isolation thermique ou électrique[5].

c. Pistolet à poudre hypersonique

Ce type de matériel peut se diviser en deux catégories : Pistolet à tir discontinu ou pistolet à tir continu. Le premier type a été abandonné aujourd'hui. C'est une technologie des années 1950 qui fait beaucoup de nuisance sonore. Le second (figure 1.5) est montré ci-dessous.

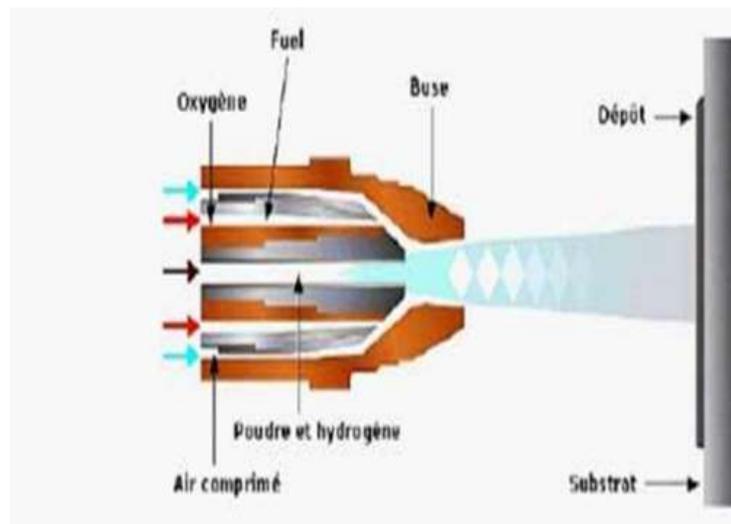


Figure 1.5 : Pistolet à tir continu HVOF[7].

Leur application peut être manuelle ou automatique. Ils utilisent comme principe de base un jet à combustion interne (Rocket), qui donne des vitesses de gaz hypersonique (plus de huit fois la vitesse de son). La poudre introduite dans le gaz d'échappement de la Rocket est concentrée pour être conduite à l'intérieur de la buse qui peut atteindre 300 mm de long. Celle-ci est refroidie par l'eau (HVOF-HP) ou par air (HVOF-LP). Dans ce type de pistolet, on peut utiliser, comme gaz de combustion, des mélanges tels qu'oxygène-propane ou oxygène-gaz naturel ou oxygène-kérosène. Cet appareil peut projeter des carbures, des oxydes métalliques, des alliages et des métaux. Les dépôts réalisés sont très adhérents et très denses[5].

1.4 Préparation des surfaces

La préparation de surface est un facteur primordial et indispensable à une bonne adhérence des dépôts. Elle est destinée principalement à mettre en condition de réception la couche superficielle des solides. Le but le plus important de cette mise en condition est d'éliminer de la surface tous les corps étrangers qui peuvent la recouvrir (solide ou liquide) et aussi de dissoudre ou de détacher les composés chimiques présents (couche d'oxyde ou autres composés du métal). L'idéal d'une bonne préparation est de permettre un contact aussi intime que possible entre la surface à recouvrir et le revêtement à exécuter, ou de conduire à une surface suffisamment active chimiquement pour faciliter les réactions. La préparation de surface proprement dite a pour but:

- De nettoyer la pièce.
- De créer un relief favorisant l'adhérence mécanique du dépôt.

Les pièces destinées à être revêtues doivent être propres et débarrassées de graisses, huiles et peintures. Si les pièces sont poreuses, il est nécessaire de diluer les matières contaminantes présentes dans les porosités avec les diluants appropriés, pour éviter que l'échauffement du substrat, dû à la projection ne fasse remonter les matières contaminantes à la surface et nuisent à l'adhérence du dépôt. Les dégraissages sont effectués, le plus souvent, en utilisant des vapeurs dans lesquelles les pièces doivent séjourner de 15 à 30 minutes. Ce décapage est destiné principalement à éliminer les produits corrosifs des matériaux déposés antérieurement, d'augmenter la rugosité des surfaces destinées à être revêtues.

Après nettoyage des pièces, il est nécessaire de créer une rugosité en surface de la pièce à revêtir, afin de permettre aux particules en fusion d'épouser les irrégularités de la surface et réaliser ainsi un bon accrochage mécanique. Cette ultime préparation doit être faite pour la bonne tenue des dépôts, et la géométrie de surface peut être obtenue par :

- Traitement par impact.
- Préparation mécanique des surfaces suivie d'un traitement par impact.

Le choix de la technique de préparation dépend de la nature du revêtement et de son épaisseur.

Il permet de préparer la surface par projection d'abrasifs. Celui-ci doit être à angle vif. Ce traitement nettoie la pièce et crée une certaine rugosité de surface dans cette phase du traitement, les paramètres de projection de l'abrasif doivent être contrôlés. En particulier, l'orientation du jet qui doit être comprise entre 30 et 60° par rapport à la normale. L'abrasif doit être maintenu propre et sa granulométrie contrôlée. En outre, pour des emplois spécifiques, la quantité d'abrasifs doit être vérifiée[5].

1.5 Les matériaux céramiques

Les matériaux sont des solides d'origine naturelle ou artificielle qui se divisent en trois grandes familles: céramiques, métalliques et polymères. Elles se différencient les unes des autres par leurs propriétés physico-chimiques. Les céramiques sont des matériaux non métalliques et inorganiques formés par frittage à haute température d'un compact de poudre (le plus souvent) mis dans la forme de l'objet voulu. Le frittage d'une céramique, c'est-à-dire la densification, peut-être :

- Naturel, quand on chauffe le compact pulvérulent en dessous de sa température de fusion, de manière à former un solide cohérent (frittage conventionnel, frittage par micro-ondes),
- Sous charge, lorsqu'on applique une pression simultanée au chauffage, lorsque le matériau est difficile à densifier (SPS, HIP...).

1.5.1 Revêtements céramiques

Les revêtements céramiques sont utilisés dans le milieu industriel, pour fonctionnaliser les surfaces et obtenir des propriétés biologiques (biomatériaux), tribologiques (revêtements anti-usure), thermiques (écrans thermiques). Il existe plusieurs procédés permettant d'élaborer des revêtements céramiques, dont les techniques de dépôt physique en phase vapeur PVD (Physical VapeurDéposition), de dépôt chimique en phase vapeur CVD (ChemicalVapeurDéposition), de dépôt sol-gel et de dépôt par projection thermique. 65 % des dépôts céramiques dits épais (> 50 µm) sont obtenus par projection thermique. La plus grande partie des revêtements projetés thermiquement est utilisée pour protéger des pièces de moteurs (environ 64 %), des outils de coupe (17 %) et comme protection contre l'usure (15 %)[8].

1.5.2. Propriétés des matériaux céramiques

À l'exception des verres amorphes, les matériaux céramiques se caractérisent par leur microstructure polycristalline, c'est-à-dire comportant un grand nombre de grains bien ordonnés reliés par des zones moins ordonnées appelées joint de grains. La figure I.4 montre la microstructure d'une surface polie d'une alumine (Al_2O_3) et illustre les grains monocristallins, joints de grains et pores résiduels après le frittage du matériau. L'ensemble des propriétés microstructurales (taille et morphologie des grains et des phases, porosité ouverte ou fermée...) dépend du processus d'élaboration du matériau.

Par ailleurs, les propriétés générales des matériaux céramiques découlent de leurs liaisons atomiques. En effet, la majorité des céramiques sont des oxydes (Al_2O_3 , SiO_2 , MgO), des carbures (WC , TIC , SiC) et des nitrures (Si_3N_4 , BN) élaborés à partir des premiers éléments de la classification périodique. Ils ont donc, pour la plupart, des liaisons atomiques fortes de type iono-covalente. Les céramiques sont des matériaux relativement légers, de masses volumiques similaires à celle de l'aluminium, de l'ordre de 2 à 4 g/cm^3 . Cela rend leur utilisation très avantageuse pour certaines applications où le gain de masse, et donc d'énergie, est nécessaire. De plus, la possibilité de contrôler le taux de porosité au cours du processus d'élaboration joue aussi un rôle important dans l'allègement des structures. D'autre part, les matériaux céramiques sont généralement de bons isolants électriques et thermiques. Cependant, certaines céramiques présentent des propriétés ferroélectriques (BaTiO_3), piézoélectriques (PZT) et semi-conductrices (SiC). Généralement, les matériaux céramiques ont des températures de fusion très élevées, une grande stabilité chimique et donc une bonne résistance à la corrosion. Cela permet leur utilisation dans des milieux agressifs notamment à température élevée où la majorité des matériaux fondent ou s'oxydent.

Par ailleurs, la forte liaison chimique des matériaux céramiques leur confère des modules d'élasticité et des duretés élevés. Les matériaux céramiques ont des modules d'élasticité compris entre 50 GPa et 1000 GPa. Ils ont des duretés très élevées pouvant atteindre 90 GPa pour le diamant. Quelques valeurs de dureté et de modules d'élasticité sont données dans le tableau 1.1.

En contrepartie, ces matériaux sont très fragiles comme on peut le constater sur le diagramme d'Ashby[9](figure 1.6) donnant la ténacité en fonction du module d'élasticité pour toutes les classes de matériaux. La ténacité des matériaux céramiques varie de 0,1 à 10 MPa.m^{1/2}. On peut remarquer sur la figure 11, que les matériaux céramiques se situent près du seuil minimal de ténacité. Par conséquent, les matériaux céramiques ne présentent pratiquement aucune plasticité avant rupture.

La contrainte à la rupture n'est pas une propriété intrinsèque des céramiques, car elle dépend de plusieurs paramètres microstructuraux comme la taille des grains, la porosité et elle est liée à la taille de la pièce. En effet, la ténacité dépend des défauts existant dans le matériau puisque la probabilité de fissuration augmente avec la quantité de défauts, tel que la porosité. Par conséquent, les matériaux céramiques présentent de meilleures propriétés en compression qu'en traction. Dans les céramiques poreuses, la compression provoque la fermeture des pores et l'effondrement des interfaces matière/porosité qui se traduit par un comportement appelé quasi-plasticité.

Tableau 1.1 : Module d'élasticité et dureté Vickers de quelques matériaux[10].

Matériau	Module d'élasticité (GPa)	Dureté Vickers (GPa)
Diamant	1000	90
SiC	410	33
Al ₂ O ₃	390	23
ZrO ₂	205	14
Silice vitreuse	70	5,5
NaCl	44	0,2

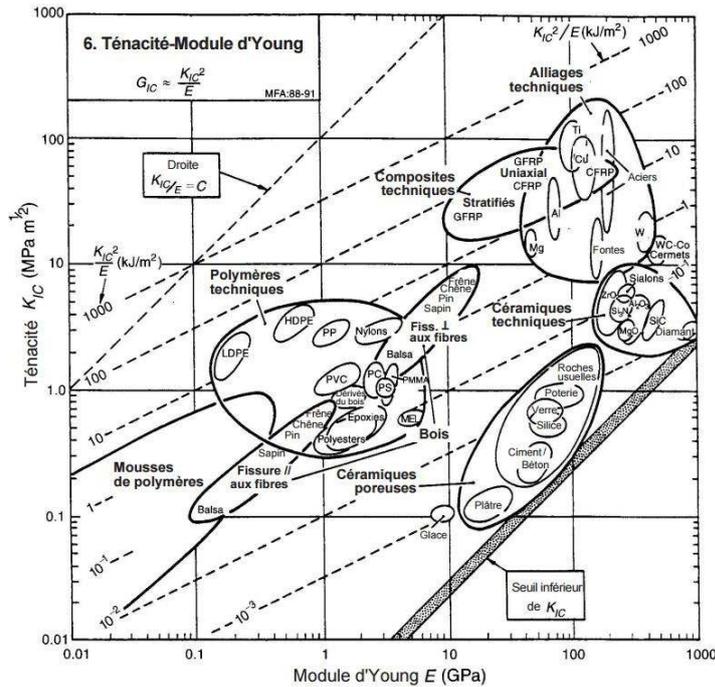


Figure 1.6 : Diagramme ténacité-module d'élasticité[9].

1.6 L'usure

1.6.1 Définition

L'usure correspond à l'ensemble de phénomènes conduisant à des pertes de masse ou à des évolutions géométriques significatives du contact pouvant s'accompagner d'effets secondaires liés au jeu dans le mécanisme en mouvement, à la perte de côte, à l'émission de débris et à l'endommagement de surfaces.

L'usure est généralement combattue à cause de ses effets négatifs, mais elle présente aussi des aspects favorables. L'affutage d'un outil, la finition d'une surface par rectification, l'écriture de la craie sur le tableau ou du crayon sur le papier sont des exemples d'usure abrasive utile.

1.6.2 Mécanisme d'usure

1.6.2.1 L'usure adhésive

L'usure adhésive se caractérise par un transfert de débris d'un des deux antagonistes vers l'autre soit par un mécanisme d'origine purement mécanique, soit suite à une réaction physico-chimique (figure 1.7). Pour le transfert mécanique, plusieurs hypothèses ont été développées. Les micro-aspérités présentes dans le contact peuvent conduire à la

diminution des zones en contact et générer aux jonctions des énergies très élevées qui peuvent favoriser les réactions physico- chimiques[8] (micro soudage des aspérités en contact).

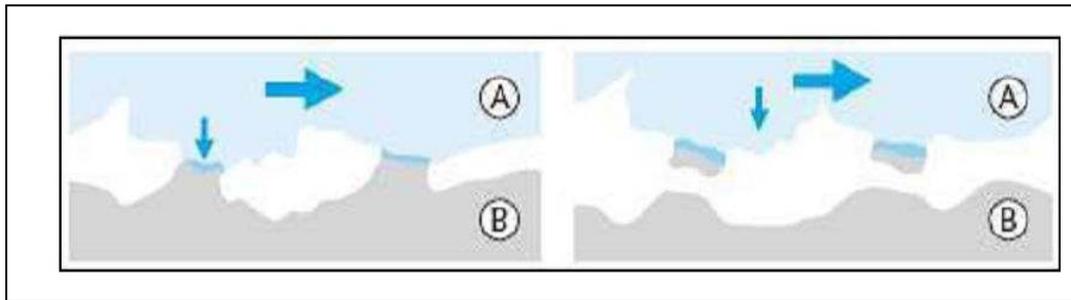


Figure 1.7 : Phénomènes élémentaires de l'usure adhésive[11].

1.6.2.2 L'usure abrasive

Elle se caractérise par la présence dans le contact d'un état de surface rugueux ou par pénétration dans le matériau le plus tendre de particules dures provenant des débris d'usure de contact ou lié à la pollution du milieu. Ce mécanisme de dégradation qui fait intervenir dans les premiers instants uniquement les corps antagonistes, devient rapidement une usure à trois corps (figure 1.8). Cette forme d'usure se manifeste par des polissages, des griffures, des micro-labourages, des arrachements de particules. Le micro-labourage (ou micro-usinage) se manifeste par des rayures à la surface du matériau le plus tendre sans arrachement de matière mais provoquant sur les bords du sillon une déformation plastique. Le plus souvent pour lutter contre l'usure abrasive, on cherche à durcir les matériaux (au moins leur surface).

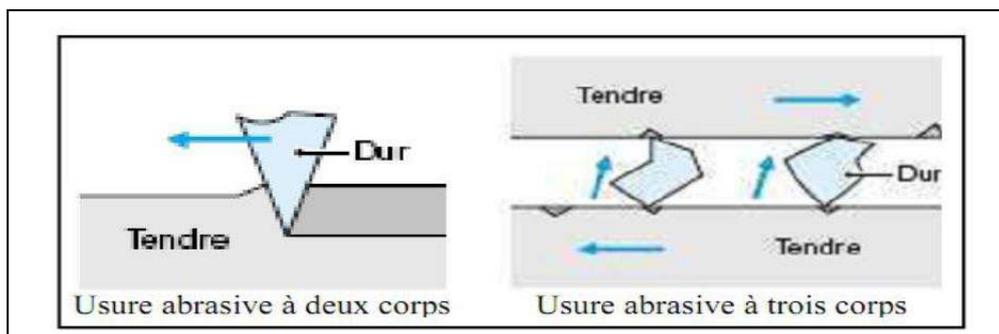


Figure 1.8 : Phénomènes élémentaires de l'usure abrasive[11].

1.6.2.3 L'usure érosive

L'usure érosive se définit comme la perte de matière provoquée par l'action des particules contenues dans un fluide en mouvement, qui viennent heurter une surface solide. Comme dans le cas de l'usure abrasive plusieurs paramètres influencent ce mode d'usure.

- La taille, le nombre, la morphologie et la vitesse des particules.
- L'angle d'impact qui définit le faciès des endommagements observés (figure 1.9)

Un faible angle d'incidence favorise l'effet de coupe alors qu'une incidence normale entraîne plus de déformation. L'intensité des endommagements dépend de plus du comportement des matériaux (figure 8). Les résultats montrent que l'érosion est maximale pour de faibles angles d'attaque dans le cas des matériaux à caractère ductile et qu'au contraire, elle est maximale sous incidence normale avec des matériaux fragiles.

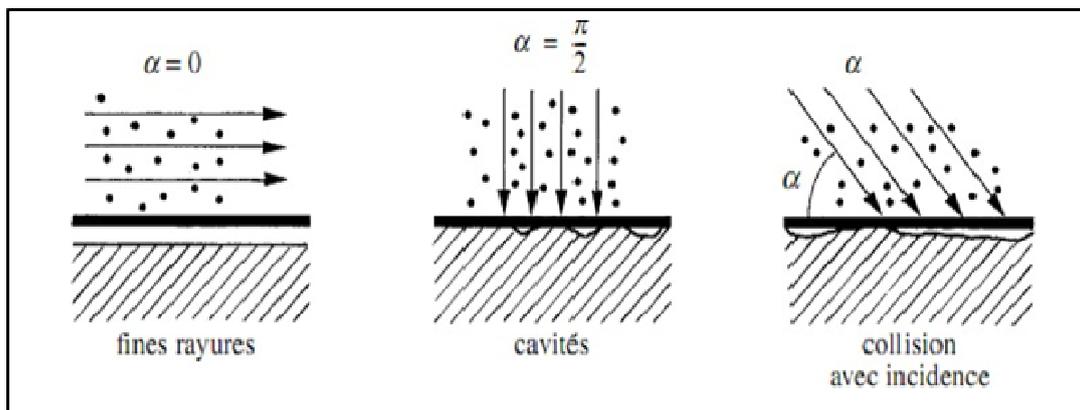


Figure 1.9 : Mécanisme de l'érosion d'une surface par des particules[12].

1.6.2.4 Dureté

Les matériaux projetés thermiquement sont constitués de particules juxtaposées et liées entre elles. Ceci se traduit en général par une dureté sans rapport avec la dureté de chacune des particules, mais représentatives de la compacité du dépôt. La dureté des dépôts obtenus dépend toujours des paramètres de projection[5].

- Les autres caractéristiques des dépôts :

- La résistance à l'usure.
- Le coefficient du frottement.
- Les caractéristiques électriques.
- Les caractéristiques thermiques.

1.6.2.5 Tribomètre pion sur disque

Il s'agit de la méthode d'étude tribologique la plus courante. Elle a pour but de tester dans des conditions de laboratoire la résistance à l'usure d'un ensemble tribologique formé de deux matériaux, généralement en présence d'un lubrifiant. La méthode consiste à mettre en rotation un disque à surface plane, formant le partenaire de frottement mobile. Le partenaire de frottement fixe présente une surface sphérique (pion ou bille). Il appuie sur le disque de manière excentré. L'usure générée se manifeste par l'apparition d'un « plat » sur le pion appelé calotte d'usure et d'un sillon circulaire sur le disque. La figure 1.10 montre une photo d'un tribomètre pion sur disque.

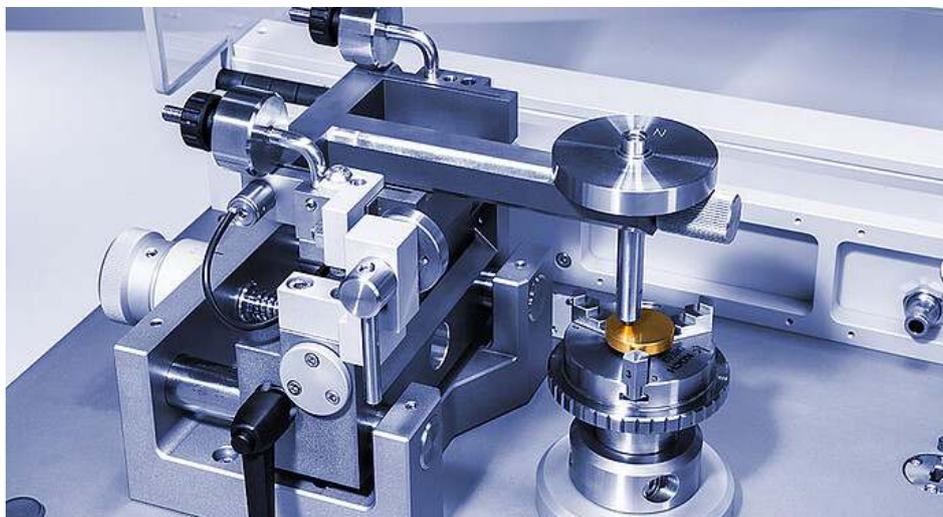


Figure 1.10 : Tribomètre pion-disque[13].

La force appliquée est constante et générée par un poids. La force de frottement est mesurée à l'aide d'un dynamomètre. La vitesse de glissement est maintenue constante ; la rotation est poursuivie jusqu'à ce que le pion ait parcouru une distance déterminée par passages successifs sur le disque, typiquement plusieurs centaines de mètres à plusieurs kilomètres[14].

Chapitre 2 :

Procédure expérimentales

2 Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation des principaux résultats obtenus dans le cadre de cette étude suivi d'une discussion et des interprétations afin d'établir des relations entre les résultats de déposition thermique et les propriétés mécaniques et tribologiques tout en prenant en compte le procédé de déposition et technicité avec laquelle ces différents revêtements ont été réalisés.

2.1 Découpage des échantillons

Des échantillons sous forme de plaquette de dimensions de (40x80x2) mm et de (90x90x2) mm et (20x20x2) mm ont été découpés à l'aide d'une guillotine. Le découpage est réalisé dans l'atelier de soudage du département de mécanique. La figure 2.1 montre la photo de la machine.



Figure 2.1 : Guillotine.

2.2 Préparation des surfaces

L'adhésion des revêtements réalisés par projection thermique est basée principalement sur l'accrochage mécanique. Pour une meilleure adhérence du dépôt au substrat (plaquette), nous avons utilisé le grenailage pour créer la rugosité nécessaire pour favoriser l'ancrage mécanique. Cette opération est faite aussi pour éliminer toute trace de graisse de rouille et d'oxydes qui se trouvent éventuellement sur la surface des plaquettes. L'augmentation de la rugosité de surface est obtenue par un lancement à grande vitesse des grains de tailles micrométriques de sables d'alumine (Al_2O_3) contre l'échantillon à l'aide d'air comprimé sous une grande pression. Le sablage se fait perpendiculairement sur les substrats pendant 4 minutes. La grenailleuse se trouve au niveau du laboratoire LTSM et est montrée à la figure

2.2.



Figure 2.2 : Grenailleuse.

2.3 Projection thermique

Après la préparation des surfaces tel que décrit précédemment, l'élaboration de nos revêtements a été faite par projection thermique à la flamme oxyacétylénique. La torche à flamme de type de CastolinEutectic CastoDyn DS 8000 a été utilisée pour l'exécution des revêtements sur les substrats en acier. La figure 2.3 montre la torche utilisée. Les principaux paramètres opératoires de la torche à flamme sont listés au tableau 2.1. La figure 2.4 montre la projection thermique en cours de déposition.



Figure 2.3 : Torche à flamme CastoDyn DS 8000.

Le pistolet de projection thermique oxyacétylénique conçu pour permettre le dépôt d'une large palette d'alliages pour une grande variété d'applications. Ce pistolet peut s'utiliser en manuel mais également sur des installations robotisées.

Paramètre	Poudre Metaceram	Poudre 19999	Poudre 625
Oxygène	4 Bar	4 Bar	4 Bar
Acétylène	0,7 Bar	0.7 Bar	0.7 Bar
Distance de projections	90 mm	200 mm	200 mm

Tableau 2.1 : Paramètres opératoires de la projection thermique.



Figure 2.4 : Projection des poudres en cours.

2.4 Matière première

2.4.1 Poudre 625

La poudre 625 est un alliage à base de nickel, caractérisé par sa haute résistance à la corrosion, à la chaleur et à la traction. Sa composition chimique est donnée au tableau 2.2. Il est principalement composé de nickel (environ 58%), de chrome (environ 20-23%), de molybdène (environ 8-10%), de fer et de niobium (environ 3.15-4.15%). Il contient également des quantités moindres d'autres éléments tels que le titane et l'aluminium, ce qui contribue à renforcer ses propriétés.

Tableau 2.2 : Composition chimique de l'alliage 625.

Cr	Mo	Nb	Fe	C	Si	Al	Ti	Mn	S
21.5	8	3.6	2	0.05	0.20	0.20	0.20	0.20	0.001

La figure 2.5 montre une photo de la poudre 625. Selon sa forme, elle a été fabriquée par atomisation.

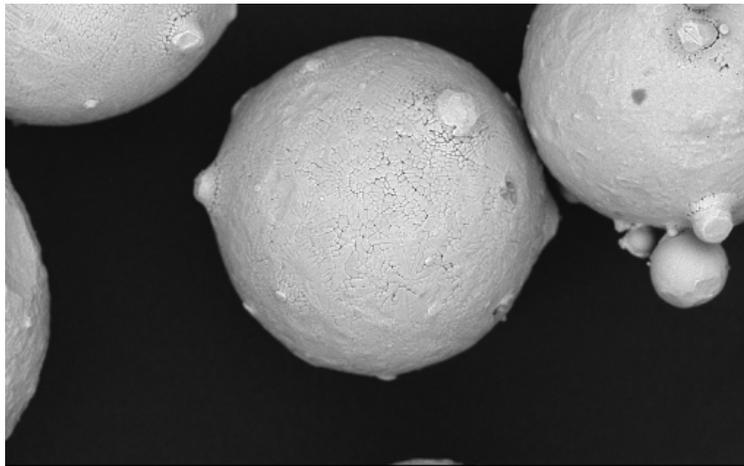


Figure 2.5 : Poudre 625 vue au MEB.

2.4.2 Poudre 19999

La poudre utilisable en projection à froid (fusion été refusion). Cet alliage contient une quantité importante de carbures de tungstène lui conférant une très bonne résistance à l'abrasion et au frottement. Sa composition chimique est donnée au tableau 2.3.

➤ **Composition chimique (%)**

Tableau 2.3 : Composition chimique de la poudre 19999.

C	Si	Fe	Cr	Ni	WC
<0,25	1,2	7,8	16,8	Solde	50,00

Les caractéristiques mécaniques et physiques types de la poudre 19999 sont données au tableau 2.4.

Tableau 2.4 : Caractéristiques mécaniques et physiques de la poudre 19999.

Dureté de la matrice	255 HV10
Densité	3,9 g/cm ³
Forme des grains	Irrégulière
Taille des grains	< 180 μm

2.4.3 Metaceram

Cette poudre est destinée au rechargement par projection thermique à l'aide du procédé CastoDyn DS 8000. Il s'agit d'un matériau complexe, stabilisé à l'oxygène et à l'aluminium-titane, présentant une répartition spécifique des grains et une morphologie contrôlée.

- Structure compacte, lamellaire, à force de cohésion élevée.
- Résistant à l'usure et à la corrosion.
- Dépôt dense et résistant, avec de bonnes caractéristiques de frottement.

Elle est appliquée à tous les aciers, alliages et matériaux industriels. Le tableau 2.5 donne quelques-unes de ses caractéristiques générales.

Tableau 2.5 : Caractéristiques générales de la poudre Metaceram.

Point de fusion	1950° C
Température max. de service	1000°C
Dureté du dépôt	1 600 HV/10g
Densité	4.0 g/cm ³
Couleur de la poudre à l'état libre	Blanche
Couleur du dépôt	Grisfoncé

2.5 Balance électronique

Une balance électrique de marque OHAUS et de précision à 0.1 mg a été utilisée pour mesurer les masses des éprouvettes avant et après l'essai d'usure. La figure 2.6 montre une photo de la balance électronique.



Figure 2.6 : Balance électronique.

2.6 Le polissage

Le polissage est une étape cruciale de la préparation de surface pour la métallographie. Il est

utilisé pour obtenir une surface lisse et brillante sur l'échantillon métallique, ce qui permet une observation précise de sa structure microscopique au microscope optique ou électronique. Les échantillons ont subi un polissage mécanique comportant trois stades grossier Cette opération s'effectue manuellement avec des disques tournants en papier abrasif à l'eau courante comme lubrifiant. La figure 2.7 montre la polisseuse utilisée au niveau de laboratoire.



Figure 2.7 : Polisseuse.

2.7 Attaque chimique

L'attaque chimique a pour rôle de révéler les joints des grains. Elle a été réalisée dans laboratoire LTSM avec le réactif de Nital de composition chimique suivante :

- 5 ml d'acide nitrique (P (%) =20, d=1,33 g/ml).
- 100 ml d'éthanol pur. Durée d'attaque : 5s.

2.8 Microscopie Electronique à Balayage

Le microscope électronique à balayage (MEB) est basé sur le principe du balayage synchrone d'un faisceau d'électrons (moins énergétiques) à la surface de l'échantillon. En chaque point, les électrons secondaires (rétrodiffusés) sont détectés et forment l'image de l'échantillon sur un écran à la résolution demandée (agrandissement). La Figure 2.8 montre un exemple d'un MEB.



Figure 2.8 : Microscope Électronique à Balayage.

2.9 Microscopie optique

Le microscope optique est un outil essentiel en métallographie, utilisé pour observer la structure interne des métaux et des alliages à une échelle microscopique. Son principe repose sur l'utilisation de la lumière visible pour illuminer l'échantillon métallique préparé, permettant ainsi aux chercheurs et aux ingénieurs d'observer les détails de sa structure. Le but principal de l'utilisation du microscope optique en métallographie est d'analyser la taille des grains, la distribution des phases, les inclusions et les défauts de structure dans les matériaux métalliques. Ces observations fournissent des informations cruciales pour comprendre les propriétés physiques, mécaniques et chimiques des métaux, ce qui est essentiel pour concevoir et fabriquer des produits de haute qualité dans diverses industries. La photo de la figure 2.9 montre un microscope optique.



Figure 2.9 : Microscope optique.

2.10 Essai de dureté

Ces essais ont l'avantage d'être plus simple à réaliser et de donner des résultats reproductibles. Réalisés sous très faible charge, les essais de la micro dureté permettent des mesures très localisées environ 100 μm . La mesure de dureté (HRA) se fait avec un pénétrateur en forme de cône en diamant. Une moyenne de cinq mesures ont été prises sur chaque éprouvette. La figure 2.10 montre une photo d'un duromètre Rockwell.



Figure 2.10 : Duromètre Rockwell.

2.11 Essais d'érosion

L'usure des surfaces désigne le phénomène de dégradation des couches superficielles d'un solide sous l'action mécanique du milieu extérieur. Elle peut prendre la forme d'une perte de masse, de côté, de forme, ou encore d'une modification de la structure. L'étude des phénomènes d'érosion est un des domaines de la tribologie.



Figure 2.11 : Montage expérimental pour l'essai d'érosion.

Chapitre 03 :

Résultats

et Discussions

3 Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation des principaux résultats obtenus dans le cadre de cette étude suivi d'une discussion et des interprétations afin d'établir des relations entre les résultats de dépôt thermique et les propriétés mécaniques et tribologiques tout en prenant en compte le procédé de dépôt et technicité avec laquelle ces différents revêtements ont été réalisés.

3.1 Composition chimique du substrat

L'acier XC10 à 0,083% de carbone est considéré comme extra doux. Il est utilisé comme substrat pour la réalisation des dépôts. Pour les échantillons, on a plusieurs modèles, en forme de tôles de 2mm d'épaisseur et entre (20 et 40) mm de côté pour la caractérisation des surfaces et des dépôts, et en forme cylindrique de diamètre de 45 mm et 45 mm de hauteur.

3.2 Poudres utilisées

Pour la projection de notre dépôt, on a utilisé trois poudres commerciales de : 19999 et Metaceram et la poudre Inconel.

Pour réaliser les dépôts, nous avons utilisé les paramètres opératoires suivants:

- Débit oxygène : 4 bars
- Acétylène : 0.7 bar
- Le débit de l'air : 1 bar
- La distance de projection de 90 à 200 mm selon le type de poudre
- Angle de projection : 90°.

La figure 3.1 montre notre technicien hautement qualifié qui projette un revêtement.



Figure 3.1 : Anouar en action.

3.3 Analyse des coupes transversales

Les échantillons revêtus ont été découpés et préparés métallographiquement pour observation au microscope optique. Les figures 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6 et 3.7 montrent des coupes transversales des différents revêtements déposés.

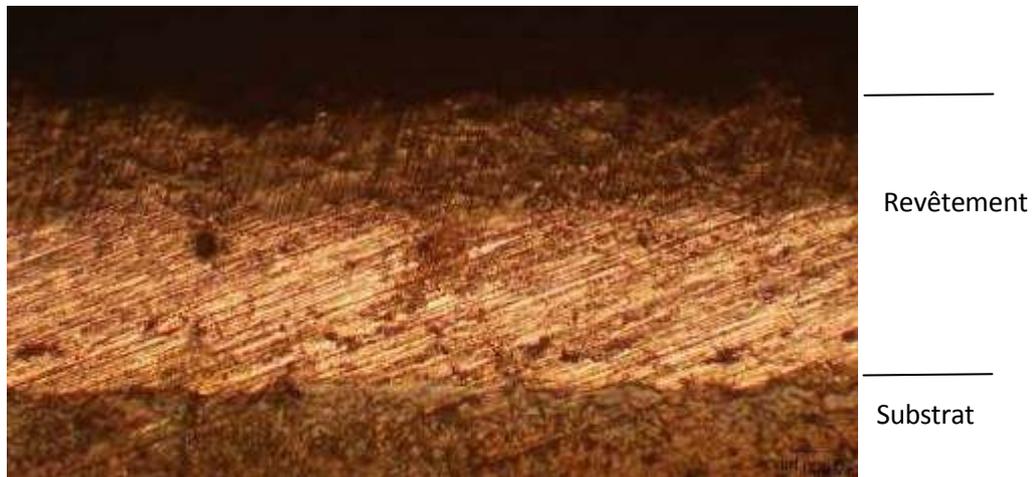


Figure 3.2 : Coupe transversale du revêtement composite.

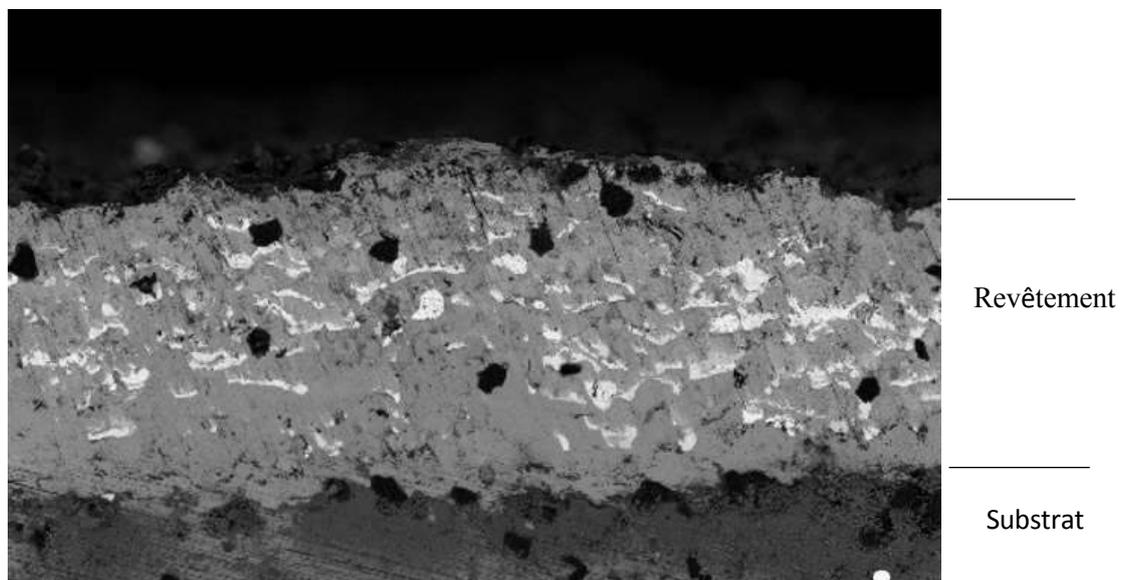


Figure 3.3 : Vue de la coupe transversale du revêtement composite au MEB.



Figure 3.4 : Coupe transversale de la poudre 19999.

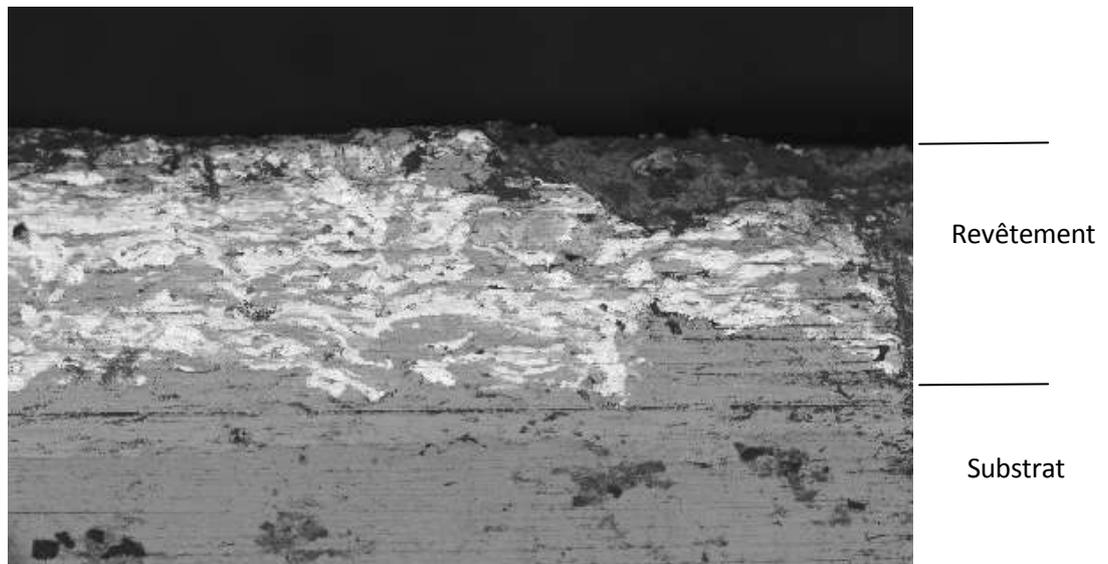


Figure 3.5 : Vue de la coupe transversale du revêtement 19999 au MEB.

Le revêtement 19999 paraît dense avec une bonne uniformité sur toute la surface du substrat. L'interface substrat-revêtement est nette. Il y a très peu de porosité et dans la plupart des cas, le revêtement épouse parfaitement les contours du substrat. Le découpage à la meule n'a pas affecté son intégrité. La coupe du revêtement était propre, sans bavure et sans cassure. En général, ce sont de bons indices pour indiquer une bonne adhérence du revêtement sur son substrat.



Figure 3.6 : Coupe transversale du Metaceram 28030.

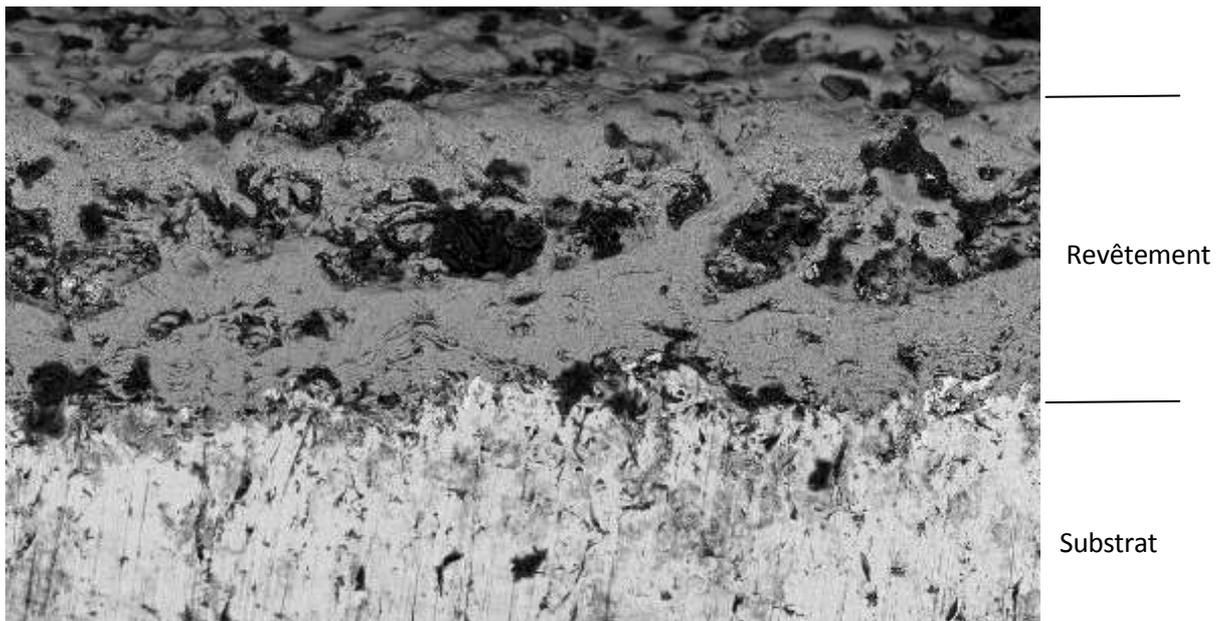


Figure 3.7 : Vue de la coupe transversale du revêtement Metaceram au MEB.

Le revêtement déposé est de uniformité sur toute la surface du substrat. Les parties sombres sont de l'oxyde de chrome. Le reste qui paraît comme une zone grise, est la matrice constituée de Nickel Chrome. Le revêtement est relativement dense et uniforme. La poudre Metaceram est très fine et c'est pourquoi nous obtenons un revêtement avec une très faible porosité.

Pour le revêtement composite, nous voyons clairement le mélange des carbures de WC (en

blanc sur la photo) avec ceux des carbures de chrome (en noir sur la photo). Il y a une bonne répartition des deux poudres et le revêtement composite est représentatif des deux compositions chimiques.

On note toutefois la présence de quelques oxydes liés aux conditions de projection, aux distances de projection et la déposition à l'air libre.

3.4 Essais de dureté

Les mesures de microdureté ont été effectuées avec un microduromètre équipé d'un écran digital. Les mesures de microdureté Rockwell HRA ont été effectuées sur les coupes transversale des revêtements. Le tableau 3.1 regroupe la moyenne des microduretés prises sur les différents revêtements déposés à la torche à flamme.

Tableau 3.1 : Duretés des revêtements déposés à la torche à flamme.

Revêtement	Dureté(HRA)
Metaceram28030	56,52
Composite(NiCrMo+Ni-WC)	64,32
19999	53,79

D'après ces essais de microdureté, nous remarquons que le revêtement le plus dur est le revêtement composite. La présence du carbure de tungstène dans le revêtement augmente la dureté globale du composite comparativement aux revêtements déposés avec les poudres de NiCrMo et Ni-WC respectivement. Yang et al. [15] ont préparé des revêtements composites à base de nickel et de carbure de tungstène avec différentes teneurs en WC sur la surface de l'acier non magnétique par la technologie de placage au laser. Les effets de la teneur en WC sur la phase et les propriétés magnétiques du revêtement ont été étudiés. Les résultats montrent que les phases de revêtement comprennent principalement des phases γ -Ni et carbure, et le faible magnétisme du revêtement est principalement lié au comportement métallurgique des particules de WC.

Dans cette première étude prospective, nous n'avons utilisé qu'un seul pourcentage de WC à introduire dans l'alliage NiCrMo. Notre but était de savoir si l'introduction de particule de WC avait un effet sur la dureté et la résistance du composite obtenu. La répartition des carbures de tungsten était pour nous secondaire bien qu'elle soit très importante dans le comportement mécanique du revêtement composite. De plus, la plupart des études qui ont été menées par un équipement laser à très haute vitesse (EHLA). Certaines ont utilisé la torche HVOF. Maroli et al. [16] ont étudié les influences de différentes formes de WC sur la

microstructure et la résistance à l'usure des revêtements composites. Les résultats indiquent que la forme des particules de WC a peu d'effet sur la microstructure et la résistance à l'usure du revêtement. Des chuyteneer et al. [17] ont étudié les effets de la taille de phase renforcée sur la résistance à l'usure du revêtement composite à base de nickel et de carbure de tungstène par placage laser, et ont analysé les effets de différentes formes de frottement et d'usure sur la résistance à l'usure du revêtement. Les résultats expriment que plus la taille des particules de WC est grande, meilleure est la résistance à l'usure du revêtement en termes de frottement de roulement et d'usure. De plus, les particules de WC de petite taille peuvent améliorer la résistance au frottement de glissement du revêtement. Garcia et al. [18] ont constaté qu'avec l'ajout de particules de WC, l'usure du revêtement à base de nickel diminue de manière exponentielle et que la teneur en WC détermine le mécanisme d'usure du revêtement.

Les sections suivantes seront donc consacrées à l'étude de l'usure type pion sur disque et l'usure érosive. Cela nous permettra de conforter les résultats des essais de dureté.

3.5 Essai d'usure pion sur disque

Une série d'essais d'usure de type pion sur disque a été effectuée sur les différents revêtements déposés par la torche à flamme. La figure 3.8 représente l'aspect des surfaces des revêtements après l'essai d'usure pion sur disque. Elle nous donne une idée qualitative sur les traces d'usure du pion laissées sur leur surface. Le pion était composé d'un acier outil ayant une dureté de 70 HRC.

Le tableau 3.2 rassemble les résultats des essais d'usure pion sur disque des différents revêtements testés. La figure 3.9 regroupe les résultats d'usure pion sur disque sous forme de courbes.



Figure 3.8 : Aspects des surfaces des revêtements après l'essai d'usure pion sur disque.

Tableau 3.2 : Essais d'usure pion sur disque des revêtements déposés à la torche à flamme.

Poudre 28030			
Charge	Avant essai	Après essai	Δm
0.5 kg	55,0035 g	55,0029 g	0,0006 g
1 kg	47,6900 g	47,6880 g	0,002 g
1.5 kg	46,4439 g	46,4386 g	0,0053 g
Poudre composite			
Charge	Avant essai	Après essai	Δm
0.5 kg	50,7227 g	50,7181 g	0,0046 g
1 kg	45,7187 g	45,7123 g	0,0064 g
1.5 kg	55,1775 g	55,1687 g	0,0088 g
Poudre 19999			
Charge	Avant essai	Après essai	Δm
0.5 kg	46,5256 g	46,5215 g	0,0041 g
1 kg	48,9980 g	48,9878 g	0,0102 g
1.5 kg	47,0902 g	47,0737 g	0,0165 g

Nous remarquons que le revêtement céramique offre le meilleur comportement en usure par friction. Le revêtement composite, bien qu'il possède une dureté plus grande que celle du revêtement céramique, a une résistance à l'usure par friction moins bonne que celui de la céramique. Le revêtement 19999 possède la résistance à l'usure par friction la plus faible.

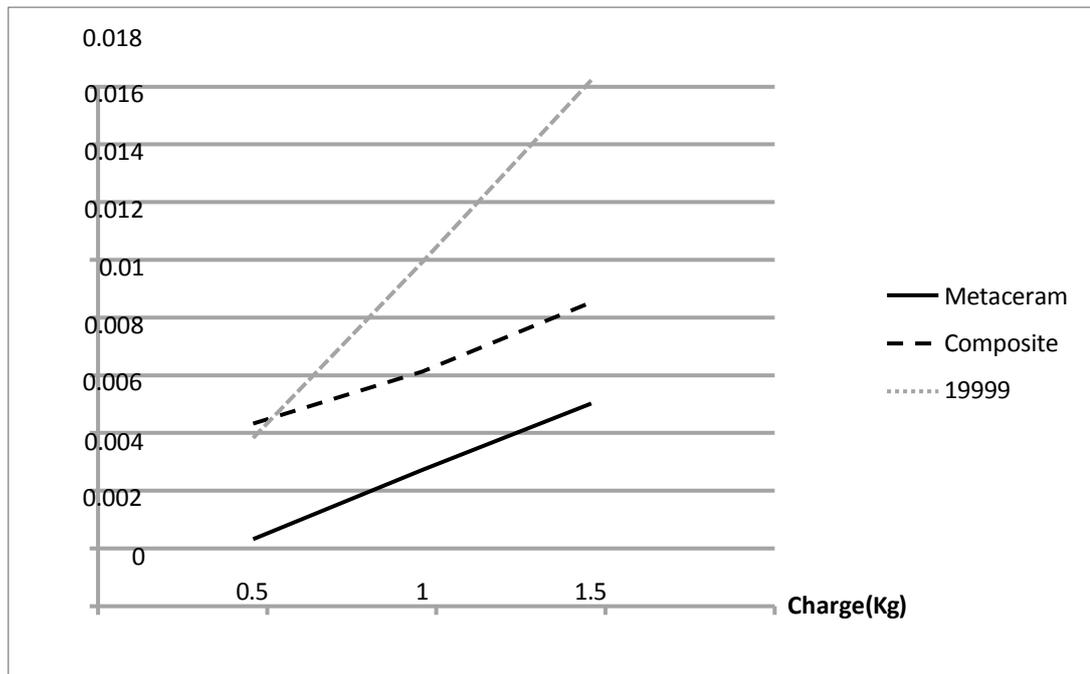


Figure 3.9 : Courbes d'usure pion sur disque des revêtements.

3.6 Essais d'érosion

Des essais d'érosion ont été effectués sur les différents revêtements préparés car ce type d'usure est l'une des principales causes de dégradation des alliages que nous avons projeté. Le revêtement céramique n'a pas été inclus car les échantillons avaient apparemment des épaisseurs trop minces. A la fin des essais, nous voyons une absence totale du revêtement céramique sur le substrat. Ceci indiquait que le temps d'érosion était suffisant pour dégarnir le substrat de son revêtement. Par conséquent, les essais n'étaient pas représentatifs de la résistance à l'érosion du revêtement céramique. Le tableau 3.3 regroupe les résultats des essais d'érosion des revêtements d'Inconel, du composite et du 19999 respectivement. Nous voyons qu'à travers ces résultats que la résistance à l'érosion augmente du revêtement d'Inconel, du 19999 jusqu'au revêtement composite. Il est remarquable de noter la poudre composite offre la meilleure résistance à l'érosion. Ce résultat nous poussera à l'avenir de vérifier le comportement à l'érosion du revêtement composite en fonction du pourcentage de carbures à introduire dans le mélange d'une poudre composite. La figure 3.9 donne l'historique des résultats d'érosion regroupés dans le tableau 3.3.

Tableau 3.3 : Résultats des essais d'érosion.

Durée de l'essai : 30 s à un angle d'impact de 90°			
Revêtement	Avant essai	Fin essai	Δm
	Masse		
Composite	49,1488 g	48,9848 g	0,164 g
19999	52,4115 g	51,9329 g	0,4786 g
Inconel	45.5503	45.2832	0.671 g

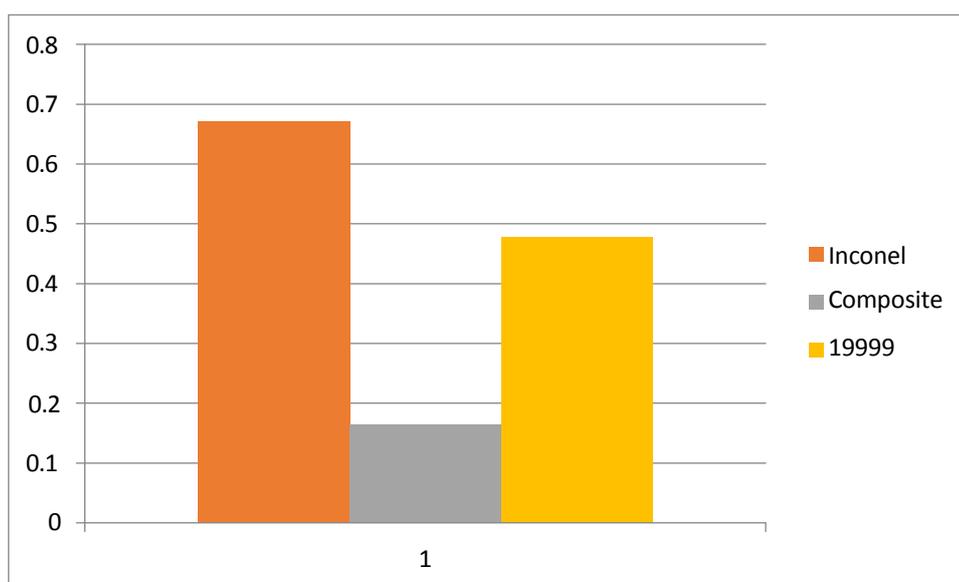


Figure 3.10 : Essais d'érosion des revêtements (angle d'incidence 90° durant 30 s.)

Bien que le revêtement 19999 possède un pourcentage plus élevé en carbures de tungstène, cela n'a pas conduit à une meilleure résistance à l'érosion par rapport au revêtement composite. Le revêtement composite a une résistance à plus de 300 % supérieure à celle du 19999 et 400 % à celle de l'Inconel. Ce qui est énorme.

Vardiet al.[19] en étudiant la résistance à l'érosion de l'Inconel 625 avec un renforcement de carbures de vanadium ont que l'augmentation de la teneur en phases fragiles dans les

couches minces, à la fois en VC primaires et en précipités en blocs ou dendritiques, le mécanisme d'érosion semble changer. Il est possible d'apprécier le passage d'un mécanisme principalement dominé par la déformation plastique de la matrice, à un mécanisme mixte dans lequel la fragmentation de la matrice et des carbures est prédominante. Un comportement similaire est expliqué par Hutchings et Shipway [20] en discutant du comportement d'érosion des composites WC-Co. Alors que pour les matériaux ductiles, tels que les métaux, la résistance à l'érosion est directement proportionnelle à la dureté (c'est-à-dire qu'une dureté plus élevée correspond à une résistance à l'érosion plus élevée), pour les matériaux cassants, comme la céramique, la relation est inverse (c'est-à-dire qu'une dureté plus élevée correspond à une résistance à l'érosion plus faible.). Dans les matériaux MMC, les deux relations sont présentes en même temps et le comportement global dépend du mécanisme prédominant. Enfin, les auteurs suggèrent que la combinaison de mécanismes plastiques et fragiles conduit à une dépendance monotone de la valeur d'érosion sur le contenu du renforcement. Cependant, ils soulignent que l'utilisation de grosses particules érodantes peut conduire à un pic de valeur d'érosion à des teneurs intermédiaires en céramique.

Les photos de la figure 3.11 et 3.12 montrent les surfaces érodées des revêtements composites et 19999 respectivement. On dénote la répartition des carbures présents dans les deux revêtements. Dans le revêtement 19999, les carbures de tungstène sont beaucoup plus nombreuses et bien réparties dans tout le revêtement. Il est très difficile de commenter les deux photos car les deux surfaces sont très tourmentées. Cependant, nous pouvons mieux voir le côté du revêtement composite dans le revêtement composite, représenté ici dans la matrice de Nickel (figure 3.13) lors d'un essai pion sur disque sous une charge de 1.5 kilo durant une minute. La présence de sillons labourés indique qu'une déformation plastique a bien eu lieu dans la matrice de Nickel.

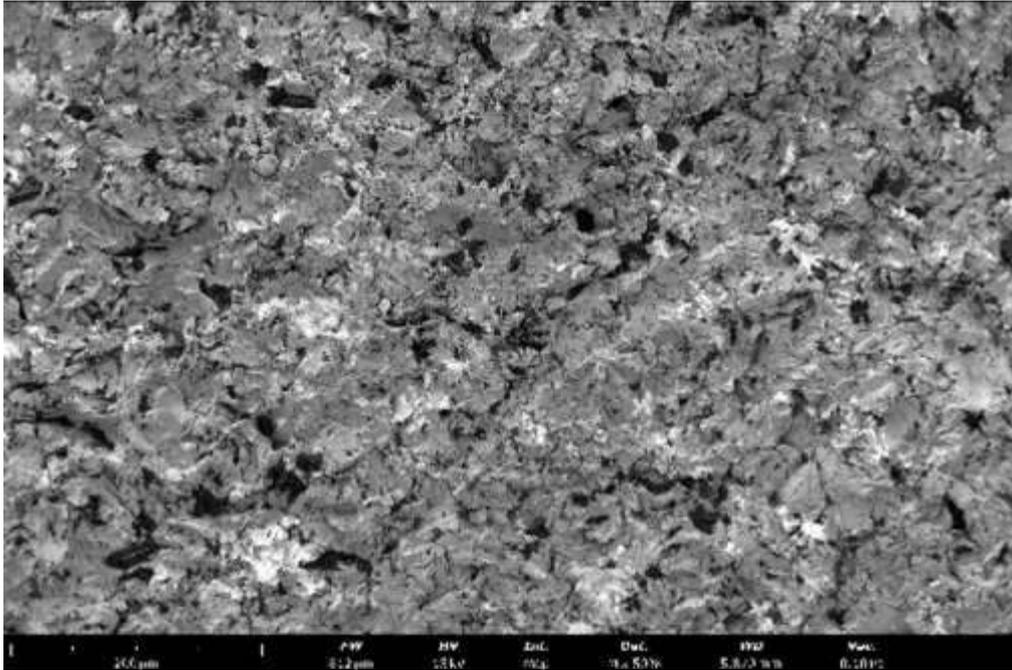


Figure 3.11 : Erosion du revêtement composite à 90° durant 30 secondes.

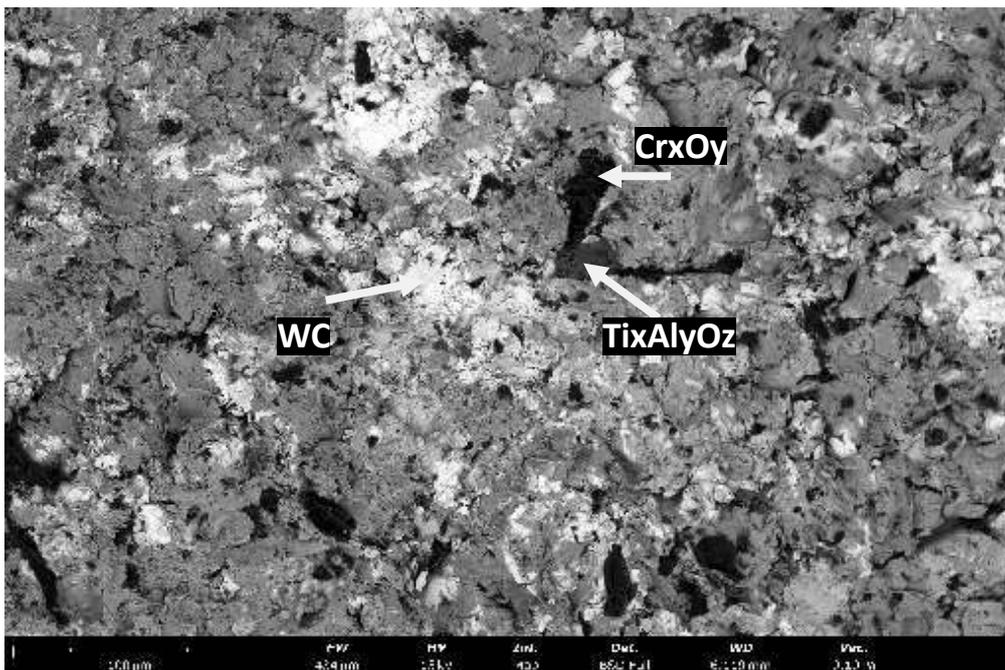


Figure 3.12 : Erosion du revêtement 1999 à 90° durant 30 secondes.

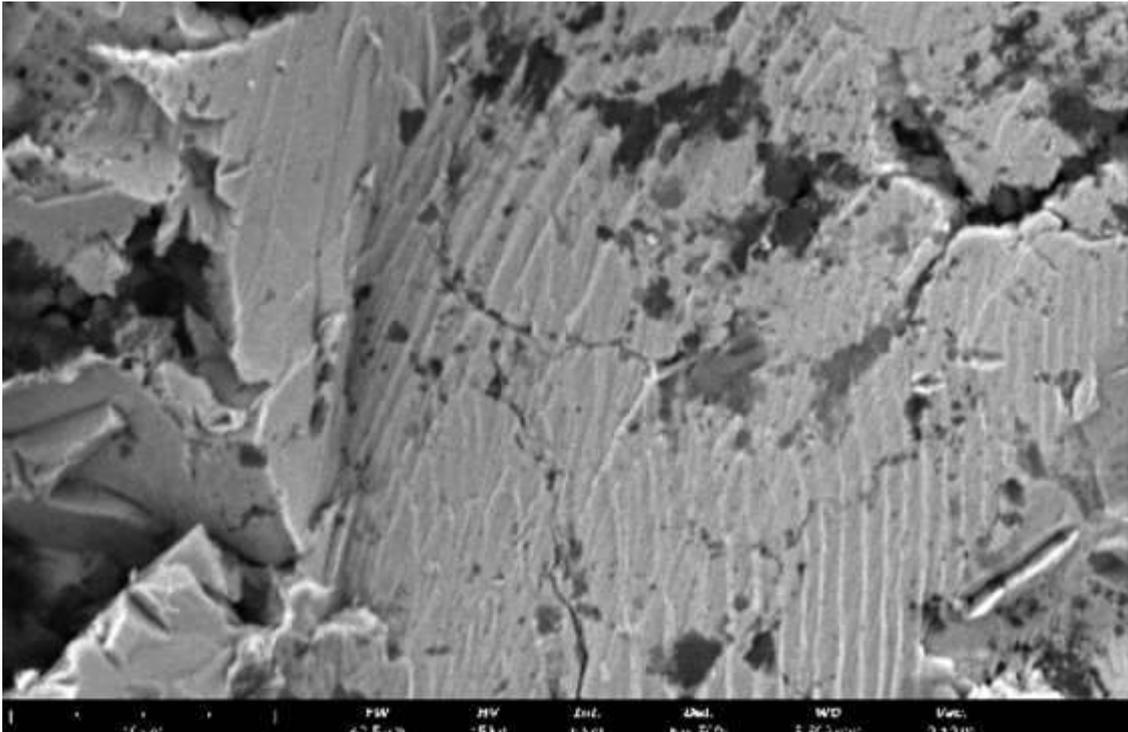


Figure 3.13 : Essai pion sur disque du revêtement composite (charge 1.5kg, 1 min.)

CONCLUSION

Dans ce travail, des revêtements de NiCrFeSi, NiCrMo et Ni-WC ont été déposés avec succès à l'aide d'une torche à flammes sur des substrats en acier au carbone. Des revêtements composites ont aussi été fabriqués à partir d'un mélange de ces poudres.

Les revêtements ont été caractérisés et ensuite leurs performances tribologiques ont été évaluées sous différentes charges et sous des angles d'incidence de particules abrasives. Les résultats ont montré que :

- Les revêtements composites possèdent bien un mélange de carbures de chrome, de titane et de carbures de tungstène issus des différentes poudres mélangées. D'autres carbures plus complexes existent, notamment contenant du fer et du nickel ainsi de l'aluminium mais en moins grandes quantités.
- La dureté du revêtement composite est une valeur moyenne de celle du revêtement 19999 et la Metaceram.
- Les essais d'usure du pion sur disque ont montré, sous des charges de 0.5, 1 et 1.5 kg durant une minute, que les revêtements composites ont des résistances intermédiaires à ceux des revêtements de 19999 et la Metaceram.
- Les essais d'érosion ont montré que le revêtement composite possède la meilleure résistance à l'érosion. Elle est de 300 % supérieure à celle de la Metaceram et plus de 400% de celle du revêtement 19999.
- Cette étude a montré que l'ajout d'oxydes comme matière de renfort peut avoir des effets bénéfiques sur la résistance à l'usure des revêtements. Cependant, il faudra à l'avenir comprendre de quelle manière ces oxydes interagissent avec la structure du revêtement, quel est le pourcentage optimal qu'il faut ajouter, quelle est leur répartition. Il faut aussi comprendre l'influence de la carburation de la flamme (oxygène/acétylène) sur l'oxydation du revêtement.

BIBLIOGRAPHIQUE

[1] Tong Ge, Lan Chen, Pengfei Gu, Xudong Ren, Xiaoming Chen, 'Microstructure and corrosion resistance of TiC/Inconel 625 composite coatings by extreme high speed laser cladding', *Optics & Laser Technology* 150 (2022) 107919.

[2] [PFENDER E., 1992 ; PRONER A., Techniques de l'ingénieur ; FAUCHAIS P., 2001].

[3] C. Lampa, I. Smirnov, High speed laser cladding of an iron based alloy developed for hard chrome replacement, *Journal for Laser Applications*, volume 31 (2) (2019) 022511, <https://doi.org/10.2351/1.5096142>.

[4] K. Thirupathi, R. Raj Mohan, S. Yokesh Kumar, S. Raghuraman, R. Venkatraman, K. Balaji, Experimental study on the effect of sintering cycle and reinforcement of 1% niobium carbide (NbC) in aluminium metal matrix composite (Al-MMC), *Materials Today: Proceedings*, volume. 37 (2021) 75–79.

[5] Cour projection thermique جامعة يحيى فارس المدية

[6] Z. Li, H. Yan, P. Zhang, J. Guo, Z. Yu, J.W. Ringsberg, Improving surface resistance to wear and corrosion of nickel-aluminum bronze by laser-clad TaC/Co-based alloy composite coatings, *Surf. Coat. Technol.* 405 (2021) 126592.

[7] Q.-Y. Wang, S.-L. Bai, Y.-H. Zhao, Z.-D. Liu, Effect of mechanical polishing on corrosion behavior of Hastelloy C22 coating prepared by high power diode laser cladding, *Appl. Surf. Sci.* 303 (2014) 312–318.

[8] L. Pawłowski, *The science and engineering of thermal spray coatings*, 2nd edition, Chichester: Wiley, 2008.

[9] M.F. Ashby, *Choix des matériaux en conception mécanique*, Dunod, Paris, 2004.

[10] G. Fantozzi, S. Le Gallet and J.-C. Niepce, *Science et technologies céramiques*, EDP

[11] G.W. Stachowiak. «Wear-materials, mechanisms and practice». Tribology in practice series. Wiley, Hoboken, NJ, USA, 2005.

[12] P. KAPSA, M. CARTIER, Usure des contacts mécaniques – Manifestations de l'usure, Techniques de l'Ingénieur BM5067, p. 1-13, 2001.

[13] <https://www.anton-paar.com/be-fr/produits/details/trb3-tribometre-pion-disque/>

[14] Article sous titre “ moyen d'étude de la résistance à l'usure : Tribometre pion-disque”, laboratoires de recherche et de chimie bienne, sarl LRCB.

[15] J.X. Yang, Z.Y. Xiao, F. Yang, et al., ‘Microstructure and Magnetic Properties of NiCrMoAl/WC Coatings by Laser Cladding: Effect of WC Metallurgical Behaviors’, Surface Coating Technology, volume 350 (2018) 110–118.

[16] B. Maroli, S. Dizdar, H.B. Zhu, ‘Effect of Type and Amount of Tungsten Carbides on the Abrasive Wear of Laser Cladded Nickel Based Coatings’, Thermal Spray Technology, volume 9 (01) (2017) 50–59.

[17] D. Deschuyteneer, F. Pettit, M. Gonon, et al., ‘Influence of Large Particle Size up to 1.2 mm and Morphology on Wear Resistance in NiCrBSi/WC Laser Cladded Composite Coatings’, Surface Coating Technology, volume 311 (2017) 365–373.

[18] A. Garcia, M.R. Fernandez, J.M. Cuetos, et al., Study of the Sliding Wear and Friction Behavior of WC + NiCrBSi Laser Cladding Coatings as a Function of Actual Concentration of WC Reinforcement Particles in Ball-on-Disk Test, Tribology Letters, volume 63 (3) (2016) 1–10.

[19] Davide Verdi, Rocío Cortés, Guo Yong Chia and Grace Tay, ‘Erosion behaviour of laser cladded Inconel 625 — Vanadium carbide metal matrix composites coatings manufactured with different reinforcement contents’, Surface & Coatings Technology 476 (2024) 130282.

[20] I. Hutchings, P. Shipway, Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials, Second edition, 2017.