

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

UNIVERSITE AbdERRAHMANE MIRA BEJAIA
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

MEMOIRE

PRESENTE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE

MASTER

FILIERE : GENIE MECANIQUE

SPECIALITE : FABRICATION MECANIQUE ET PRODUCTIQUE

PAR :

AYADI MOHAMED

BAUCHE FAHEM

MAAFA MOHAND AMEZIANE

Thème

**Effets d'un traitement de surface laser sur le comportement
tribologique d'un cermet**

Soutenu le -07-2022 devant le jury composé de :

Mr. M.A.Bradai	Président
Mr. YOUNES R	Rapporteur
Mr. A.Idir	Examineur

ANNEE UNIVERSITAIRE 2021/2022

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

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, et l'équipe de l'ENMTP de Bejaia.

Que tous ceux qui ont contribués à notre formation trouvent ici l'expression de Nos sincère gratitude.

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

Dédicace

Dédicace

Dédicace

Je dédie ce mémoire aux personnes qui nous sont les plus chers :

A mon père et ma mère, les êtres les plus nobles qui ont sacrifié les plus belles années de leurs vies.

A mes sœurs

A mes frères

A mes meilleurs amis

A tous les membres de nos familles particulièrement nos cousines et cousins.

A tous les camarades de filière génie mécanique.

FAHAM

Dédicace

Je dédie ce travail qui n'aura jamais pu voir le jour sans les soutiens indéfectibles et sans limite de mes chers parents qui ne cessent de me donner avec amour le nécessaire pour que je puisse arriver à ce que je suis aujourd'hui.

Que dieux vous protège ma chère mère et cher père et que la réussite soit toujours à ma portée pour que je puisse vous combler de bonheur.

Je dédie aussi ce travail à :

- Mes grands parents
- Mes frères, mes sœurs et leurs familles.
- Mes oncles, mes tantes et leurs familles.
- Tous mes cousins et cousines.

MOUHAMED

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

Mon très cher père et ma très chère mère qui sont sans cesse à mes côtés.

Mes très chers frères et mes très chères sœurs qui m'ont toujours soutenu.

Mes grands-parents, mes oncles

Toute ma famille

TOUT MES AMIS ET MES COLLEGUES

MOHAND AME ZIANE

Liste de tableau

Liste de tableau

Tableau II.1 : Propriétés thermo physiques et mécaniques de l'acier nickel chrome	15
---	----

Liste de figures

Liste de Figures

Figure I.1 le procédé de projection thermique	2
Figure I.2 : Principe de projection a flamme.....	3
Figure I.3 : principe de projection flamme-poudre	3
Figure I.4 : principe de projection a pistolet à poudre.....	4
Figure I.5 : principe de projection flamme-fil.....	4
Figure I.6 : Schéma projection thermique par arc électrique	5
Figure I.7 : micrographies MEB de carbures primaires et de carbures secondaires dans L’Inconel 718	11
Figure I.8 : structure CC.....	13
Figure I.9 : structure CFC.....	13
Figure I.10 : Structure HC	13
Figure II.1 : Echantillon utilisé pour la projection	14
Figure II.2 : Principe de projection flamme fil.....	17
Figure II.3 : schéma de principe du traitement laser (laser cladding)	17
Figure II.4 : Mode opératoire d'un traitement thermique	18
Figure II.5 : La polisseuse	19
Figure II.6 : Essai de micro dureté Rockwell.....	20
Figure II.7.tribomètre	21
Figure III.1 : tribomètre pion sur disque	23
Figure III.1 : dureté HRC des différents échantillons : Témoin ; TL : Traitement laser ; TT : Traité thermiquement	24
Figure III.2 : Coefficient de frottement en fonction de temps sous une charge de 15N : Témoin ; TL : Traitement laser ; TT : Traité thermiquement.....	25
Figure III.3 : Coefficient de frottement en fonction de temps sous une charge de 10N : Témoin ; TL : Traitement laser ; TT : Traité thermiquement.....	26

Figure III.4 : Influence de la charge sur les coefficients de frottement pour les échantillons témoin.....	27
Figure III.5. Etude comparative pour les coefficients de frottement pour les échantillons traité laser sous des charges de 10 et 15N	28
Figure III.6 : Influence de la charge sur le coefficient de frottement pour les échantillons traité thermiquement.....	28
Figure III.7. Évolution de la température de contacte sous une charge de 10N : Témoin ; TL : Traitement laser ; TT : Traité thermiquement	29
Figure III.8. Évolution de la température de contacte sous une charge de 15N : Témoin ; TL : Traitement laser ; TT : Traité thermiquement	30

Sommaire

Sommaire

Introduction générale	I
I. Généralité sur la projection thermique	
I.1. Introduction	1
I.2 Invention et évolution de la projection thermique.....	1
I.3 Principe générales de la projection.....	1
I.4 Place de la projection thermique dans les traitements de surface.....	2
I.5 Les différents procédés de projection thermique.....	3
I.5.1 Projection a flamme.....	3
I.5.1.1 Projections flamme-poudre	3
I.5.1.1.1 Pistolets à poudre.....	4
I.5.1.2 projections flamme-fil	4
I.5.1.3 les gaz de projection	5
I.5.2 Projection par arc électrique entre deux fils	5
I.5.2.1 principes	5
I.5.3 La projection par le procédé PROTAL	6
I.6. Méthodologie de réalisation de revêtement.....	6
I.6.1. Analyse du problème de surface à résoudre	6
I.6.2. Le choix des matériaux du revêtement.....	6
I.6.3. Le choix de la technique de projection.....	6
I.6.4. Le choix de la technique de préparation de surface	6
I.6.5. la définition de l'épaisseur du revêtement.....	6
I.6.5.1. La préparation des surfaces... ..	7
I.6.5.2. La propreté de la surface	7
I.6.5.3. La rugosité.....	7
I.6.5.4. Le préchauffage	8
I.7 formation et structure des dépôts.....	8
I.8 Les alliages base nickel.....	9
I.8.1 Influence des éléments d'alliage sur la structure des superalliages... ..	9
I.8.2 Modes de durcissement des superalliages... ..	10
I.8.2 Les carbure	10
I.9 Structure des matériaux	11
I.9.1. Structure microscopique du matériau (échelle de l'atome).....	12
I.9.2 Structure macroscopique du matériau	12
I.10 Cristaux métalliques	12
I.10.1 Structure cubique centrée CC.....	12
I.10.2 Structure cubique à faces centrées CFC	13
I.11 structure CFC I.3.6.3 Structure hexagonale compacte HC	13
II. Matériaux et techniques expérimentales	
II.1. Introduction.....	14
II.2. Matériaux utilisés.....	14
II.2.1 Elaboration des échantillons	14
II.2 préparation des surfaces à revêtir... ..	15
II.2.1 Dégraissage	15
II.2.2 Sablage	15
II.3 Le substrat... ..	15
II.3.1 Dépôts réalisé.....	16
II.4 Réalisation des dépôts... ..	16
II.4.1 procédé de l'arc électrique sur l'échantillon... ..	16
II.4.2 procédé d'élaboration des revêtements par la projection flamme fil	16

II.5. Traitements laser	17
II.6. Traitements thermiques.....	18
II.7. le polissage mécanique.....	18
II.8. Essai de dureté ROCKWELL.....	19
II.9. Essai tribologie.....	20
II.9.1. représentation du dispositif d'usure.....	20

III. Résultats et Discussion

III.1. Introduction.....	22
III.2. Présentation du tribomètre.....	22
III.3. Condition à la limite des tests tribologique effectués... ..	23
III.4 Influence des traitements de surface sur les propriétés mécanique des dépôts en NiCr.....	24
III.5 Influence des traitements de surface sur les propriétés tribologiques des dépôts en Ni Cr.	25
III.6 Influence de la charge sur les propriétés tribologiques des dépôts en Ni Cr.....	27
III.7 Influences des traitements de surface sur l'évolution de la température de contact de nos dépôt Ni Cr.....	29

Conclusion générale.....	32
---------------------------------	-----------

Références bibliographiques

Annexes

Chapitre I :

Chapitre I : Généralité sur la projection thermique

I.1. Introduction

La projection thermique est un procédé d'élaboration de revêtement dont le principe repose sur deux éléments : la fusion de la matière à projeter et l'accélération de celle-ci afin d'assurer un bon étalement et une bonne adhésion des particules sur le substrat. Il existe différents procédés de projection qui permettent, en fonction de la nature et des caractéristiques du couple matériau à projeter/substrat, des propriétés du revêtement souhaité d'atteindre des vitesses et des températures adaptées à la réalisation d'un dépôt de qualité

I.2 Invention et évolution de la projection thermique

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

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

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

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

I.3 Principe générales de la projection :

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

Tous les systèmes de projection thermique utilisent un gaz vecteur servant à accélérer et transporter de fines particules (typiquement 5 à 100 micromètres) d'un matériau fondu sur une surface à recouvrir. Les gouttelettes se déposent à la surface et se solidifient, c'est l'accumulation des particules sur le substrat qui crée le revêtement. Les liaisons entre le substrat et la couche déposée sont donc entièrement mécaniques, le matériau à déposer peut être sous forme de poudre, fil ou baguette. L'apport d'énergie se fait de deux façons : la flamme et l'arc électrique, la projection thermique consiste à utiliser une source d'énergie en vue de fondre et d'accélérer un matériau fragmenté (avant ou après fusion) à l'exception de la projection à froid basée uniquement sur la déformation du matériau. Les différents procédés en projection thermique sont définis principalement par la source d'énergie mise en œuvre (Combustion, décharge électrique). Le procédé est conditionné par des transferts thermiques et/ou cinétiques entre le matériau projeté et la source enthalpie utilisée. L'énergie cinétique est communiquée à la particule par la vitesse et la viscosité du mélange gazeux de projection. La construction du revêtement résulte de l'empilement des particules sur le substrat. L'équilibre entre l'énergie cinétique et thermique des particules est donc prépondérant pour la qualité du revêtement [6].

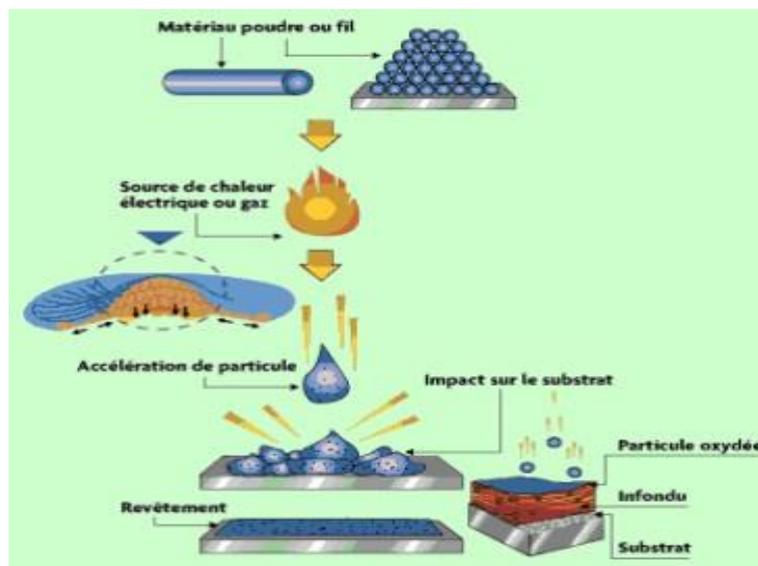


Figure I.1 : le procédé de projection thermique

I.4 Place de la projection thermique dans les traitements de surface :

Les techniques de traitements de surface se répartissent en quatre familles :

- Les traitements de diffusion (le matériau d'apport diffuse dans le substrat)
- Les traitements de conversion (réaction superficielle entre le matériau d'apport et le substrat)
- Les revêtements par voie sèche ou humide

- La transformation structurale (modification de la structure métallurgique substrat)

I.5 Les différents procédés de projection thermique :

I.5.1 Projection a flamme :

Elle est particulièrement adaptée aux matériaux à bas point de fusion. Elle fait appel à une flamme oxyacétylénique comme source de chaleur. La température à l'intérieure de la flamme peut atteindre 3000c. Le matériau d'apport est véhiculé par l'énergie cinétique par les gaz de combustion. [8].

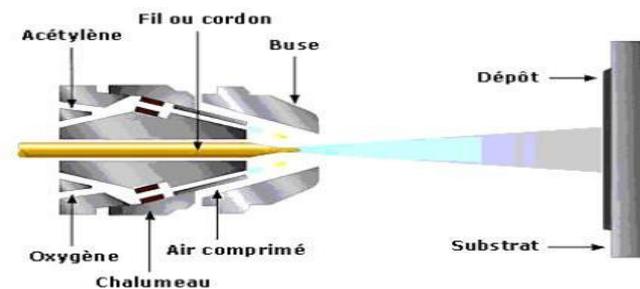


Figure I.2 : principe de projection a flamme

I.5.1.1 Projections flamme-poudre :

Le matériau d'apport se présente sous forme de poudre. La vitesse des particules est faible et la distance entre la buse et le support ne doit être que de quelques millimètres. Les matériaux d'apport les plus fréquemment utilise sont les alliages auto fusible sa base de nickel et le cobalt. Ce procédé est très répandu dans la plupart des industries pour résoudre des problèmes d'abrasion, de corrosion, d'usure, d'isolation thermique ou électrique. (Figure 2) [9].

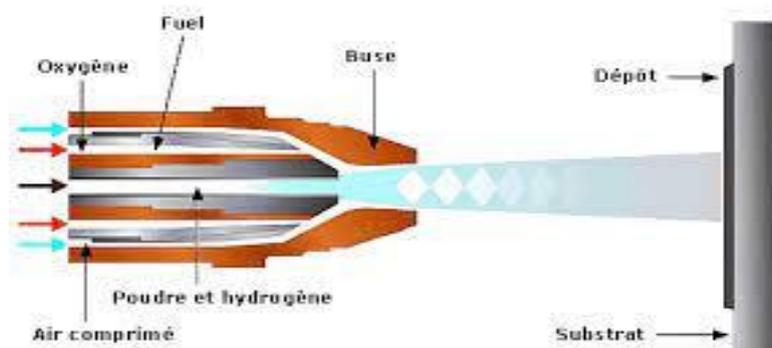


Figure I.3 : principe de projection flamme-poudre

I.5.1.1.1 Pistolets à poudre :

A la fois léger et robuste, l'équipement de projection thermique à froid CastoDyn DS 8000 est utilisé pour le dépôt d'alliages sous forme de poudre pendant les travaux de soudage.

Facile à manier, le CastoDyn DS 8000 garantit le dépôt d'une large palette d'alliages sachant qu'il peut être utilisé en manuel et sur des installations robotisées.

Ce pistolet de projection thermique se caractérise par sa résistance au frottement, à la corrosion, l'abrasion, l'érosion ainsi que par sa rapidité de prise en main et sa facilité de réglage.

Sa pression oxygène est de 4 bars tandis que son débit d'acétylène est compris entre 400 et 1800 L. [8].

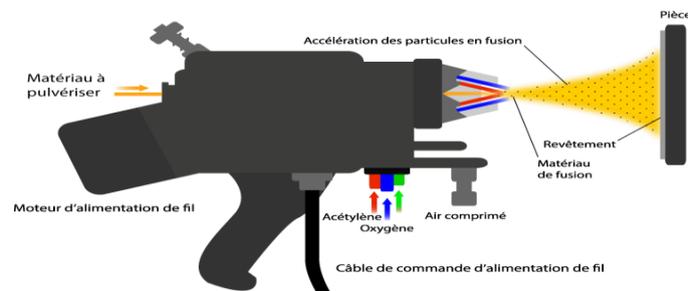


Figure I.4 : principe de projection a pistolet à poudre

I.5.1.2 projections flamme-fil ;

Le matériau d'apport se présente sous forme de fil, de cordon, de baguette ou de fil fourre, la flamme ne sert, dans ce cas à la fonte de matériau. Les particules obtenues seront véhiculées par un flux d'air comprimé (Figure 4). [6]

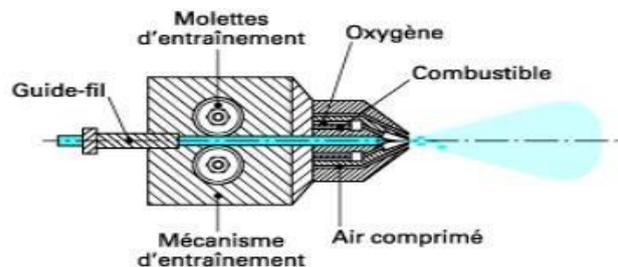


Figure I.5 : principe de projection flamme-fil

I.5.1.3 les gaz de projection :

I.5.2 Projection par arc électrique entre deux fils :

I.5.2.1 principes :

Le principe de ce procédé de projection thermique consiste à faire éclater un arc électrique entre deux fils ductiles consommables tout en atomisant le matériau fondu aux deux extrémités par un jet de gaz comprimé (air/azote) qui projette la matière liquide sur un substrat. Les pistolets à arc électrique sont alimentés par des générateurs à courant continu avec des tensions d'arc comprises autour de 30 V, pour des intensités de courant allant de 35 à 350 A. Ils sont constitués de deux parties : un module où sont montées les deux bobines et équipé d'un premier système d'entraînement des fils et la partie pistolet où se passe l'interaction entre les fils et leur traitement thermique. Les fils sont conditionnés en bobines et sont tirés, au travers de gaines souples, par des molettes d'entraînement intégrées au pistolet et donc aussi par le système d'entraînement primaire sur le premier module. Ce type d'équipement est communément appelé « push-pull ». A l'intérieur du pistolet, les fils sont guidés par deux tubes permettant de positionner les fils avant leur entrée dans la zone de fusion et d'assurer la polarité du courant électrique aux fils. Une buse située derrière l'extrémité des fils dirige le flux de gaz comprimé à grande vitesse vers l'extrémité des fils en fusion pour générer l'atomisation des particules. La température de l'arc créé entre les fils est d'environ 6000 K, température suffisante pour traiter les différents métaux mais qui induit aussi de par sa valeur une vaporisation relativement importante et un chauffage excessif des gouttelettes. [7]

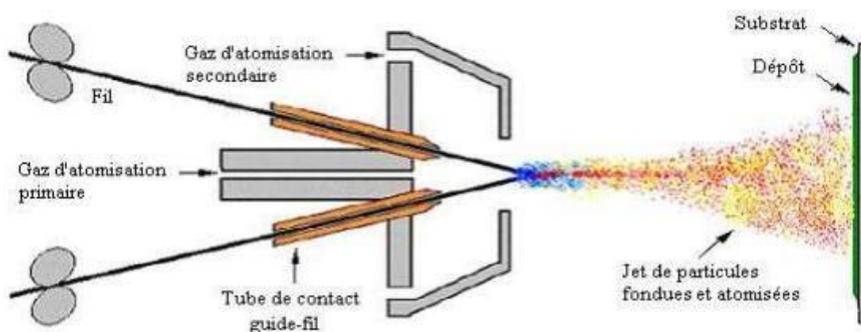


Figure I.6 : Schéma projection thermique par arc électrique

I.5.3 La projection par le procédé PROTAL :

C'est la projection qui peut modifier la surface du substrat juste avant l'étalement des particules, la projection PROTAL (Projection Thermique Assistée par Laser) consiste à coupler un dispositif de projection thermique à un laser, elle utilise le procédé de projection thermique par plasma sous air (APS). Ce n'est que très récemment, grâce à une augmentation de la surface irradiée par le laser que des projections HVOF ont pu être couplées au traitement laser PROTAL. L'intérêt attendu de ce procédé est de pouvoir réaliser la projection sans préparation préalable du substrat. Le sablage et le dégraissage ne sont alors plus nécessaires à la bonne adhérence des dépôts. [10-11].

I.6. Méthodologie de réalisation de revêtement : réaliser un revêtement suivant l'état de l'art nécessite toute une démarche qui peut être illustrée par le recensement des différentes étapes suivantes :

I.6.1. Analyse du problème de surface à résoudre : Elle doit aboutir à la définition du cahier de charges du problème.

I.6.2. Le choix des matériaux du revêtement : Il est sélectionné en fonction des contraintes du problème. Le choix d'un procédé dépend non seulement du choix du matériau et des propriétés du dépôt recherchés, il est défini par le composant et ses sollicitations de fonctionnement. Dans le cas d'une surface qui subit l'usure, l'épaisseur minimale est déterminée, par le maximum d'usure autorisée et une épaisseur minimale de dépôt uniforme, et aussi essentiellement par le coût.

Le surplus d'épaisseur nécessaire à l'usinage final ou à la rectification ou rodage doit être correctement estimé ; il est important d'apprécier que si à la suite de l'usinage final la cote n'est plus bonne pour l'utilisation de la pièce traitée toute l'opération de traitement de surface est à refaire, il faut donc prévoir une marge de sécurité.

I.6.3. Le choix de la technique de projection

Choisir la bonne technique de projection pour un matériau donné est crucial pour obtenir le résultat souhaité sur la surface.

Afin de choisir la meilleure technique de projection, il faut d'abord déterminer quel type de matériau doit être enduit. Par exemple, si l'on veut recouvrir une surface non poreuse comme le métal ou le verre, il faut utiliser un procédé de revêtement électrostatique. Si l'on veut enduire une surface poreuse comme du papier ou du tissu, il faut utiliser un procédé de revêtement par immersion.

I.6.4. Le choix de la technique de préparation de surface

La préparation de surface est le processus de préparation d'une surface pour la peinture, l'impression ou le collage. Différents types de techniques de préparation de surface sont utilisés en fonction du support et du résultat souhaité. Le choix de la technique dépend du type de peinture ou d'encre qui sera appliqué sur la surface. Il existe de nombreux types de techniques de préparation de surface qui peuvent être utilisées en fonction du type de peinture ou d'encre qui sera appliqué sur la surface.

la définition de l'épaisseur du revêtement : Elle est définie par le composant et ses sollicitations de fonctionnement. Dans le cas d'une surface qui subit l'usure l'épaisseur minimal est déterminée, par le maximum d'usure autorise et une épaisseur minimal de dépôt uniforme, et aussi essentiellement par le cout. Le surplus d'épaisseur nécessaire à l'usinage final ou à la rectification ou rodage doit être correctement estime ; il est important d'apprécier que si à la suite de l'usinage final la cote n'est plus bonne pour l'utilisation de la pièce traitée toute l'opération de traitement de surface est à refaire, il faut donc prévoir une marge de sécurité. Larugosité du revêtement est alors un paramétre à prendre en compte pour la mesure des épaisseurs déposées. Typiquement des épaisseurs cde 150 micron à plus d'un millimètre. Etéventuel du revêtement.

I.6.4.1. La préparation des surfaces

La métallisation exige une préparation rigoureuse des surfaces à revêtir. Si quelques fois on peut obtenir, avec des particules liquides et très chaudes, des liaisons ponctuelles par fusion entre le projectile et le subjectile, cet accrochage reste toujours très insuffisant. En effet, que ce soit pendant les opérations d'usinage sur pièces rechargées, ou au cours des sollicitations sur des pièces protégées contre la corrosion, les efforts mécaniques induits aux revêtements engendreront son décollement. Il est donc utile et nécessaire de préparer la surface pour obtenir :

- ✓ Une rugosité qui est un état physique.
- ✓ Un préchauffage éventuel.

I.6.4.2. La propreté de la surface

La propreté est le constat visuel de la disparition plus ou moins importante des impuretés de toutes natures, pouvant souiller la surface d'un produit. Elle permet aussi de mettre à jour les modifications physiques éventuelles de la structure (défauts ou autres). La métallisation exige, que la surface du support devant recevoir un futur revêtement, soit particulièrement propre, exempte de traces de calamine, de rouille, d'huile ou graisse, afin de ne pas nuire à l'adhérence du métal d'apport. Cette propreté sera obtenue, suivant le type de polluant de la surface, soit par un dégraissage soigné après usinage dans le cas d'opération de rechargement, soit par un sablage dans le cas d'opération de protection anticorrosion.

I.6.4.3. La rugosité :

La rugosité est le résultat de la modification micro géométrique d'une surface, provoquée par le bombardement intensif de projectiles dans le cas du sablage, ou par l'enlèvement organisé de matière créant un relief, dans le cas d'usinage. Dans les deux cas, le résultat a pour effet :

- D'augmenter l'aire de contact entre le substrat et le revêtement, car l'adhérence est directement liée à l'étendue de la surface.
- De créer un maximum d'aspérités, ou le matériau déposé viendra s'ancrer.
- La rugosité est complémentaire de la propreté.

I.6.4.4. Le préchauffage :

Comme nous l'avons vu précédemment, suivant la différence de température entre le métal d'apport et celle du support, on obtiendra un accrochage plus ou moins important. C'est pourquoi un préchauffage de substrat est recommandé pour améliorer les propriétés d'adhérences, est toujours conseillé afin d'augmenter le pouvoir d'adhérence. Il devient indispensable pour les revêtements à partir de poudre, surtout pour les matières plastique qui ne sont pas conductrices de chaleur. Le préchauffage peut aussi être employé pour la dessiccation de certaines pièces poreuses, imprégnées en profondeur d'eau, de graisse ou d'huile, où le nettoyage n'est pas atteint. Il permettra de faire sortir les liquides afin que la métallisation adhère efficacement. [12]

1.7 Formation Et Structure Des Dépôts :

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

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

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

I.8 Les alliages base nickel

Les alliages base-nickel sont des matériaux métalliques complexes dotés d'une tenue mécanique à haute température et d'une résistance à l'oxydation ou à la corrosion à chaud. Ces superalliages sont élaborés par fonderie de précision ou par métallurgie des poudres. Ils sont utilisés généralement pour élaborer des pièces des turbines à gaz industrielles ou marines et de turbomachines aéronautiques. Dans les superalliages base nickel, on distingue plusieurs éléments capables de fournir différentes phases et microstructures développées selon un traitement thermique choisi. La particularité des superalliages réside dans la cohérence cristallographique entre la structure de la matrice austénitique FCC γ et la phase γ' Ni₃ (Al, Ti). Toutes les deux ont une structure cubique à faces centrées dont les paramètres cristallographiques sont très proches. La matrice nickel (structure γ) est caractérisée par sa résistance aux efforts de fluage à haute température. L'aluminium et le chrome sont des éléments importants qui favorisent la tenue à l'oxydation et à la corrosion à chaud dues à la présence d'oxygène ou de polluants (Na, Ca,...). Le tantale, le molybdène et le tungstène permettent d'améliorer le durcissement par la formation des solutions solides. Le durcissement est aussi amélioré par précipitation de carbures (Cr, Mo, Nb, W, Ti) ou par précipitation de la phase γ' Ni₃ (Al, Ti) stable à 1100 °C. Le hafnium est ajouté afin d'améliorer la ductilité en fluage de l'alliage et de réduire les risques de la crique à chaud. L'intérêt de l'ajout du cobalt est d'améliorer la tenue en fatigue thermique et faciliter la mise en œuvre (soudabilité).[14]

I.8.1 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 et le tantale. 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.

I.8.2 Modes de durcissement des superalliages.

Les superalliages sont renforcés selon 3 mécanismes :

- Le durcissement par précipitation de phase ordonnée γ' est le mode de durcissement majeur des alliages à base nickel. La taille, la morphologie et la répartition des précipités pour une fraction volumique donnée vont conditionner les propriétés du matériau, particulièrement la limite d'élasticité, le durcissement par écrouissage, la rupture, la tenue en fatigue et la vitesse de fissuration, mais aussi le fluage. la vitesse de refroidissement lors de la trempe et de la durée des traitements de précipitation.[15]
- La précipitation des carbures et borures s'effectue surtout aux joints de grains afin d'en améliorer l'ancrage. Ces éléments sont généralement insensibles aux traitements thermiques et n'engendrent pas de risque de brulure, c'est-à-dire de fusion locale de la matrice qui les entoure.
- Le durcissement par effet de solution solide est obtenu par distorsion du réseau cristallin par substitution au nickel d'atomes lourds tels que le tungstène ou le molybdène, de grands diamètres et de faibles vitesses de diffusion dans le nickel.

I.8.2 Les carbure

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

Les carbures ou carbonitrides primaires se forment lors de la solidification du lingot. Ceux-ci précipitent dans les espaces interdendritique dans lesquels s'est créée une ségrégation des éléments comme le Niobium, le Molybdène et le Titane. Les carbures et les carbonitrides ont une taille similaire que peut atteindre 10 μm , mais ils présentent des morphologies différentes : globulaire pour les carbures et cubique pour les carbonitrides. Toutefois ces deux phases adoptent la même structure cristalline B1 de réseau cubique à faces centrées. La température de

solvus des carbures primaires est supérieure à la température de solidus (voir même de la température de liquidus) de l'alliage, ce qui fait qu'ils restent présents même après traitement thermique à haute température de l'alliage.[16]

Les carbures secondaires apparaissent lors de maintiens à haute température. Leur composition est de type M_6C , et $M_{23}C_6$, ou M est une combinaison des éléments Chrome, Molybdène et fer. La précipitation des carbures primaires permet, dans certains alliages, notamment ceux élaborés par métallurgie des poudres, d'ancrer les joints de grains et de limiter leur mobilité. La précipitation des carbures secondaires sur les joints de grains permet également d'améliorer la tenue en fluage des alliages, lorsqu'ils ne forment pas un film continu dans les joints, en limitant le glissement des joints de grains. (Figure I.7).

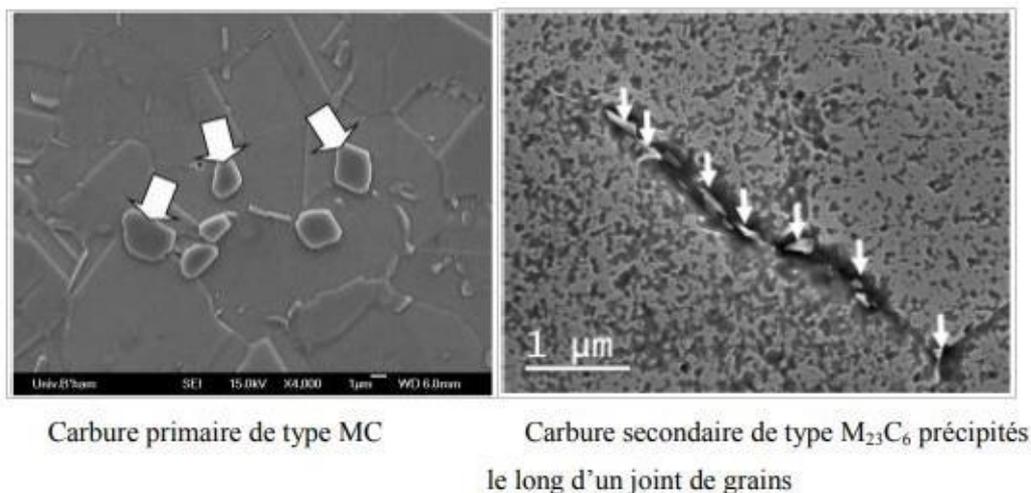


Figure I.7 : micrographies MEB de carbures primaires et de carbures secondaires dans l'Inconel 718

I.9 Structure des matériaux

La science des matériaux est l'étude des relations qui existent entre leur structure et leurs propriétés générales. La structure d'un matériau correspond à la façon dont s'agencent ses éléments constitutifs à Plusieurs échelles[16]

- Échelle subatomique : noyau et électrons
- Échelle atomique : disposition des atomes ou molécules les uns par rapport aux autres
- Échelle microscopique : groupes d'atomes
- Échelle macroscopique : éléments de structure visibles à l'œil nu Nous allons considérer la structure d'un matériau depuis les constituants de base, en commençant par les

atomes, puis par les liaisons atomiques, pour remonter petit à petit (en travelling arrière) jusqu'à l'arrangement macroscopique.

I.9.1. Structure microscopique du matériau (échelle de l'atome)

- Structure cristalline (Roche, métaux)
- Structure vitreuse (Verre, la céramique, le laitier)
- Structure colloïdale (plastiques, caoutchouc, résine,...)

I.9.2 Structure macroscopique du matériau

- Structure fibreuse (Bois, l'éternite (amiante + ciment))
- Structure capillaire (mastique, mortier de ciment et béton)
- Ou à la fois fibreuse et capillaire (béton de fibre)

I.10 Cristaux métalliques

Parmi les quatorze réseaux de BRAVAIS, trois ont une importance particulière : les réseaux cubique faces centrées (C.F), hexagonal et cubique centré (C.I). Ces trois réseaux permettent de comprendre l'organisation des structures adoptées par la plupart des métaux et qui sont :

- la structure cubique faces centrées.
- la structure hexagonale compacte.
- la structure cubique centrée.

Le même métal peut présenter plusieurs structures cristallines selon l'intervalle de température considéré, on dit qu'il présente un polymorphisme cristallin.

I.10.1 Structure cubique centrée CC

Définie par une maille élémentaire de 2 ions (un au centre et 8 aux sommets du cube mais appartenant chacun à 8 mailles).

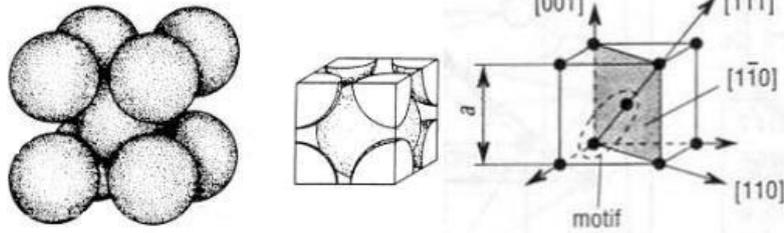


Figure I.8 : structure CC

I.10.2 Structure cubique à faces centrées CFC

Définie par un motif élémentaire de 4 ions (6 sur les faces appartenant chacun à 2 mailles et 8 aux sommets du cube mais appartenant chacun à 8 mailles).

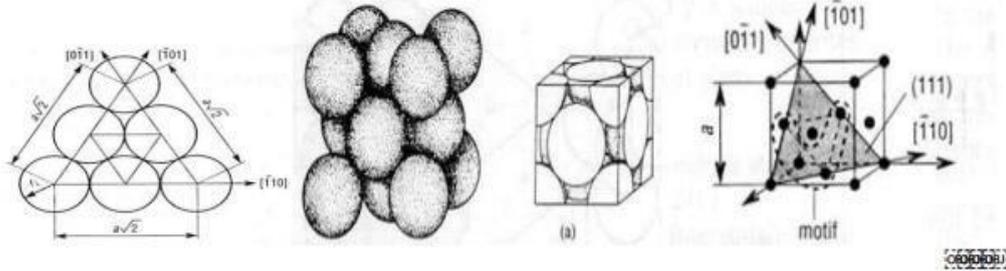


Figure I.9 : structure CFC

I.11 structure CFC I.3.6.3 Structure hexagonale compacte HC

Définie par un motif élémentaire de 2 ions. La maille représentative contient 6 ions (3 à l'intérieur et 2 sur les bases, communs chacun à 2 mailles, et 12 sur les sommets, communs chacun à 6 mailles).

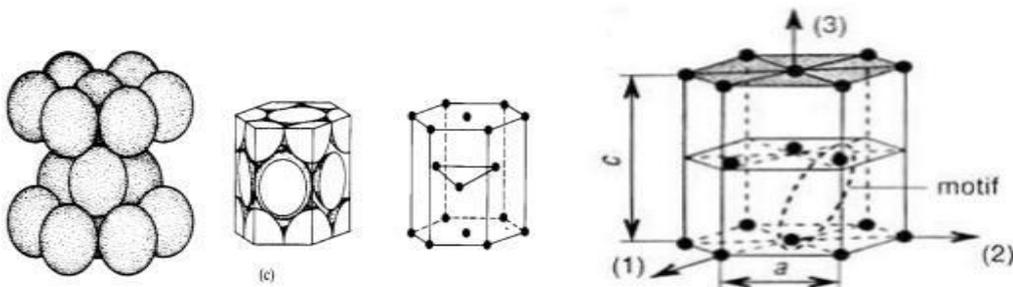


Figure I.10 : Structure HC

Chapitre II :

Chapitre II : Matériaux et techniques expérimentale.

II Matériaux et technique expérimentales :

II.1 INTRODUCTION :

L'objectif de notre étude est le procédé de projection utilise pour l'élaboration du revêtement qui est projection flamme-fil dans une deuxième étape on présentera les différentes techniques de caractérisations : Caractérisation mécanique ainsi que celle tribologique basée sur les tests de duretés et d'usure.

II.2 Matériaux utilisés :

II.2.1 Elaboration des échantillons :

Les échantillons utilisés pour la projection thermique, ont été usinés sur le tour parallèle au niveau du hall de technologie où on a effectué :

- Un dressage, pour avoir un bon état de surface.
- Un épaulement, dans le but de fixer les pièces, lors de la projection.
- Un chanfreinage, dans le but d'avoir un contact parfait entre le revêtement et la surface antagoniste.
- Les échantillons élaborés présentent la forme de pions et sont représentés dans la (figure II.2).

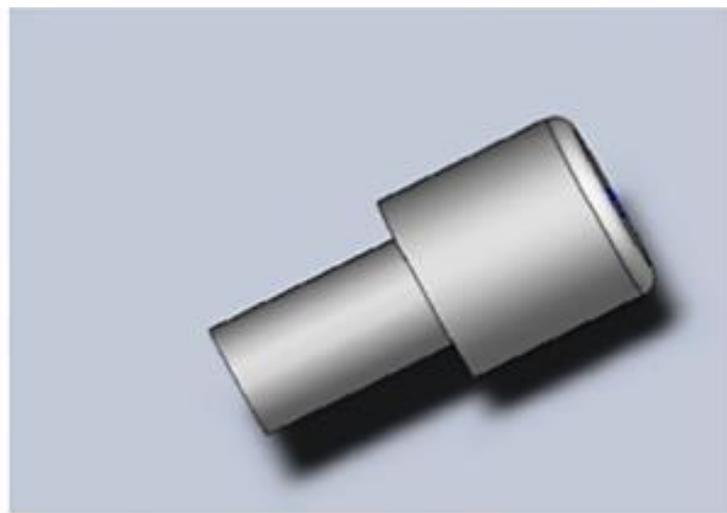


Figure II.1: Echantillon utilisé pour la projection.

Chapitre II : Matériaux et techniques expérimentale.

II.2.2 Préparation des surfaces à revêtir

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

Tableau II.1 : Propriétés thermo physiques et mécaniques de l'acier nickel chrome.

Limite élastique (MPa)	255-730
Limite de rupture (MPa)	400-1000
Module d'élasticités (GPa)	150-210
Allongement (%)	8-20
Intervalles de fusion (°c)	940-1430
Température de coulée (°C)	1000-1500

II.2.2.1 Dégraissage

Ce traitement est d'importance capitale, dont le but est d'éliminer de la surface, toutes traces de substances organiques, huiles, produit gras, pâtes qui sont dues aux différentes manipulations que le matériau a subies auparavant (emballage, déchargement, accrochage, etc.). Les échantillons sont dégraissés et nettoyés avec de l'éthanol.

II.2.2.2 Sablage :

Parmi les méthodes de rigidification des surfaces, on a opté pour le sablage avec du corindon.

Cette méthode a pour but l'obtention d'une surface rugueuse prête à recevoir le revêtement. Le principe du sablage consiste à revêtir par u jet de particules à une pression d'air de 5 bars.

Ce prétraitement offre l'avantage simultané de donner à la surface à revêtir une bonne rugosité et d'induire cette même surface de contraintes résiduelles de compression donnant ainsi au métal à projeter une bonne adhérence physique et mécanique.

II.3 Le substrat :

Le substrat utilisé pour réaliser les dépôts est un acier de construction mécanique d'usage général de type E335. Le Qui est un alliage non magnétique et une nuance d'alliage souvent rencontrée est composée de 74% de nickel et 20% de chrome et 3% de cuivre et 3% de fer .Composition chimique de votre substrat.

Chapitre II : Matériaux et techniques expérimentale.

II.3.1 métal réalisés :

métal	Ni	Cr	Cu	Fe
Massique (%)	74%	20%	3%	3%

Le matériau de projection utilisé est un alliage à base, qui se présente sous forme fil. Cet alliage est conçu pour produire un dépôt est utilisée généralement sur les surfaces d'appui résistant et une excellente résistance à l'oxydation et à la corrosion et aux températures élevées.

II.4 Réalisation des dépôts :

Afin de bien mener l'opération de projection, il est impératif de respecter certaines étapes, elles sont la bonne usinabilité des échantillons, qui se représentent sous une forme bien déterminée et une préparation de la surface à savoir le sablage ainsi que les paramètres de projection et de l'arc électrique.

II.4.1 Procédé de l'arc électrique sur l'échantillon :

Est un phénomène durant lequel le courant électrique passant d'un point à un autre de l'air devient visible. Ce phénomène recouvre aussi bien l'étincelle électrique que l'éclair.

II.4.2 Procédé d'élaboration des revêtements par la projection flamme fil :

Pour l'élaboration de nos dépôts, le pistolet de projection utilisé à partir de cordons est constitué d'un pistolet Master –Jet 2 (Figure II-2), pourvu d'un moteur électrique à basse vitesse (10mm/s) pour l'entraînement du cordon. Un système de contrôle des gaz, composé de débitmètres à flotteur pour régler le débit d'oxygène et d'acétylène et des manomètres régulant la pression des gaz de la flamme d'air et d'un support échantillon. Lors de la projection, les échantillons sont mis en rotation et le pistolet est placé perpendiculairement à la surface des substrats à une distance contrôlée manuellement d'environ 130mm. Un jet d'air comprimé placé à environ 80 mm de l'échantillon est dirigé vers la surface du dépôt après la projection, pour contrôler le refroidissement, avec certains paramètres de projection.

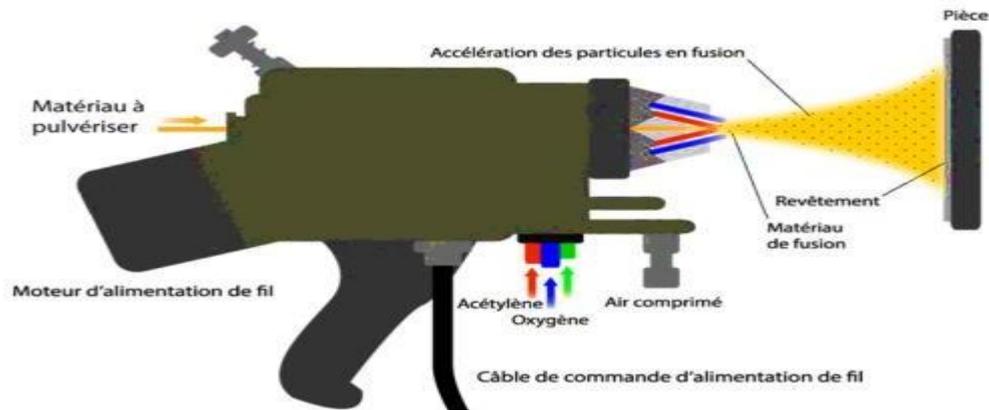


Figure II.2: Principe de projection flamme fil

II.5 Traitement laser :

Le traitement laser donne les meilleurs résultats lorsqu'on le pratique au moyen d'un laser à impulsions. Cette technique permet de remplacer les méthodes traditionnelles pour bruler et modifie en microstructure métastable, augmente l'oxydation et d'autres contaminant sa surface des métaux.

Dans notre étude, on a effectué un traitement laser sous atmosphère d'un milieu ambiant, le schéma ci-dessous montre le principe de fonctionnement.

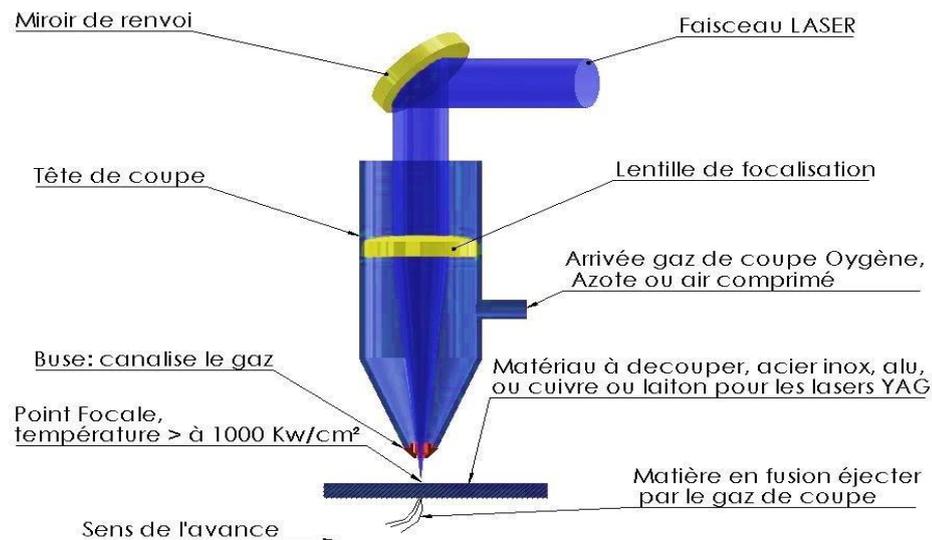


Figure II.3: schéma de principe du traitement laser (laser cladding)

Chapitre II : Matériaux et techniques expérimentale.

II.6 Traitements thermiques :

Le but des traitements thermiques appliqués aux aciers nickel chrome est d'améliorer leurs caractéristiques mécaniques ou leur résistance à la corrosion. Si la qualité première des aciers nickel chrome est leur tenue à la corrosion, il convient de rappeler qu'ils peuvent par traitement thermique approprié acquérir des caractéristiques mécaniques supérieures dont une grande dureté, ce qui permet des économies de matière et un allégement des structures.

La structure totalement martensitique confère aux aciers nickel chrome une limite d'élasticité, une résistance mécanique et une dureté élevée. Leur ductilité est par contre moindre que celle des aciers nickel chrome ferritiques ou austénitiques. Afin de l'améliorer, les aciers nickel chroment.

Martensitiques subissent en général un traitement de revenu plus ou moins prononcé, afin d'obtenir une structure ferrito-martensitique.

Les traitements thermiques qu'on a effectués pour nos échantillons avec des différentes températures :

- Traitement thermique à 1000 C° ;
- Refroidissement à l'air ambiant.

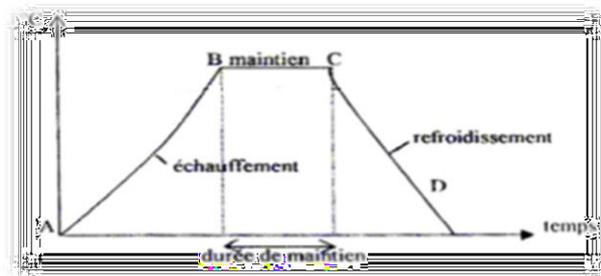


Figure II.4: Mode opératoire d'un traitement thermique.

II.7 Le polissage mécanique :

Après les traitements thermiques, polisseuse ont été mise à notre disposition pour élaborer le polissage avec le papier abrasif de plus en plus faible de 400 jusqu'on arrive à utiliser le papier en feutre avec la pâte diamanté pour avoir une surface réfléchissante adéquate pour les essais de dureté comme montrée sur la figure ci-dessous.



Figure II.5: La polisseuse.

II.8 Essai de dureté Rockwell :

Il consiste à imprimer dans le métal testé un pénétrateur en diamant de forme géométrique pyramidal à base carrée, d'angle au sommet entre deux faces opposées de 136° , sous l'action d'une force connue. On mesure la diagonale de l'empreinte carrée laissée par le pénétrateur. L'avantage d'un pénétrateur pyramidal (comme d'un pénétrateur conique) est quand on fait varier la charge, on obtient des empreintes géométriquement semblables entre elles, donc des valeurs identiques pour la dureté. Généralement la gamme des forces utilisables (5 à 100 kgf) permet d'appliquer cette méthode avec toutes les dimensions d'échantillons. En choisissant la force donnant une empreinte telle que la diagonale d doit être inférieure aux deux tiers de l'épaisseur. Le principe de l'essai consiste à appliquer une charge progressive sur la surface polie de l'échantillon, pendant 15 s suivie d'une décharge. La réglette et la forme de l'empreinte imprimée dans l'échantillon après essai sont représentées dans la (figure II.5).



Figure II.6: Essai de micro dureté Rockwell.

Dans l'essai Rockwell, une pyramide à base carrée en diamant est utilisée comme pénétrateur. La dureté Vickers HV est définie par :

$$HV = \frac{\text{La charge appliquée}}{\text{La surface de l'empreinte}}$$

II.9 Essai tribologique :

II.9.1. Représentation du dispositif d'usure

Afin d'assurer les tests d'usure, on a réalisé un dispositif tribomètre type pion disque représenté ci-dessus, le disque est de nuance 25CrMo4 trempé d'une dureté de 50HRC et de rugosité de Ra de 2.5 μm , le disque est tournant à une vitesse qu'on peut manipuler (de 30 tr/min jusqu'à 50 tr/min),

Afin de réunir toutes les conditions nécessaires pour la réalisation de tests d'usure significatifs soutenue par l'obtention de résultats fiables permettant une comparaison du comportement en matière de perte des masses des échantillons. Nous avons essayé de gérer les paramètres influents sur l'usure comme suit :

Avant de commencer les tests, on doit nettoyer notre échantillon des éléments additifs.

- prendre la masse initiale (M_0) de l'échantillon à l'aide d'une balance analytique de précision 0,1 mg ;
- Nettoyer le disque avec une solution alcoolique ;
- Observation des phénomènes d'usure à l'aide d'un microscope optique afin de caractériser les traces d'usure

Chapitre II : Matériaux et techniques expérimentale.

A) Les charges appliquées

On a appliqué des charges lors des tests d'usure pour les différents échantillons : les charges appliquées (5 N, 10 N).

B) La vitesse

Le travail s'est effectué à deux vitesses pour chacune des charges appliquées à savoir :

- 35 tr /min.
- à 50 tr/min.

C) La lubrification

Les tests d'usure ont été réalisés sans lubrification. Les tests à sec nous permettent de déterminer les coefficients de frottement les plus extrême.

II.10.Présentation du tribomètre

La machine présentée dans notre projet a été conçue et réalisée au sein de notre université se range dans la catégorie des machines du type rotatif. Elle possède une avance certaine en matière de simplicité, de commodité de fonctionnement, facilite de la préparation des éprouvettes. Elle a été conçue pour la recherche scientifique et l'enseignement. Elle est prévue pour utiliser des charges plus importantes que les machines classiques, et conçue en premier lieu pour des essais sans lubrification.

Le dispositif à valider est un tribomètre pion-disque vertical. Il permet d'étudier le frottement et l'usure des couples de matériaux. Son principe consiste à appliquer une charge verticale sur un pion immobile en contact avec la face plane d'un disque en rotation.

Lors de l'essai de frottement un capteur à jauges de contrainte enregistre les valeurs de l'effort tangentiel et de l'effort normal grâce aux déformations des jauges.

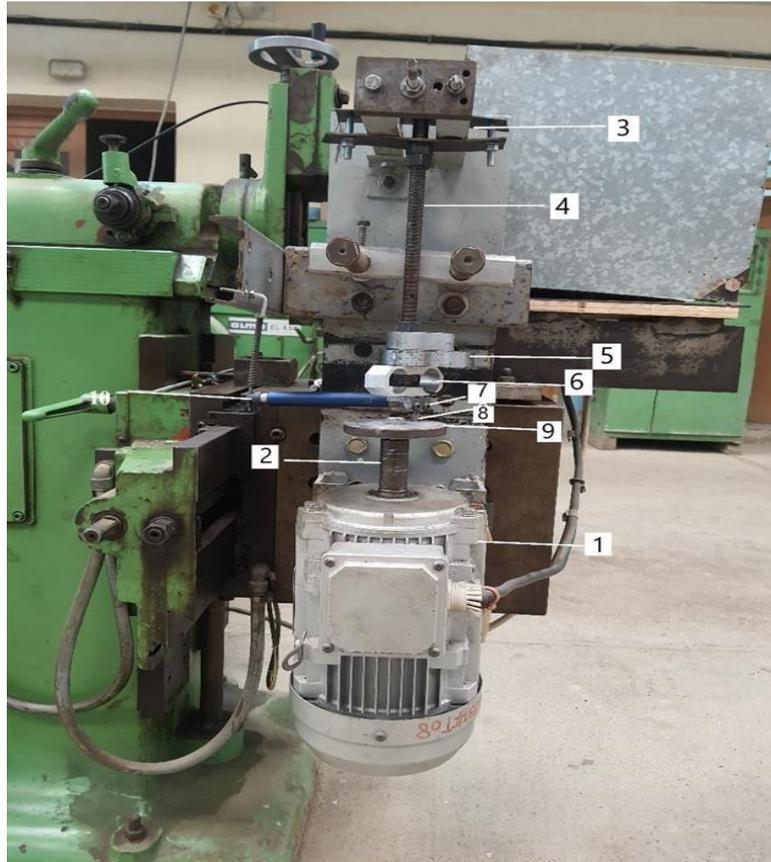


Figure II.7.tribomètre

1-moteur , 2-arbre moteur, 3-element de forme U, 4-tige filetée, 5-poids, 6-support porte éprouvette, 7-porte pion, 8-pion, 9-disque, 10-dynamique de 20N

Chapitre III :

Chapitre III : Résultats et discussions

Chapitre III : Résultats et discussions

III. Introduction :

Dans ce chapitre, on présentera en premier lieu une caractérisation mécanique est étudié sur nos dépôts en Ni-Cr, suivi d'une étude tribologique afin de caractérisé l'influence des différents traitements de surface ainsi que la charges.

Après la réalisation des tests et l'obtention des valeurs de la force tangentielle, l'objectif visé est le calcul du coefficient de frottement qui est défini implicitement par $\mu = \text{force de frottement}/\text{force normal}$.

III.1. Condition à la limite des tests tribologique effectués

Afin d'assurer les tests d'usure, on a réalisé un dispositif tribomètre type pion disque représenté ci-dessus, le disque est de nuance 25CrMo4 trempé d'une dureté de 50HRC et de rugosité de R_a de 2.5 μm , le disque est tournant à une vitesse qu'on peut manipuler (de 100 tr/min jusqu'à 200 tr/min),

Afin de réunir toutes les conditions nécessaires pour la réalisation de tests d'usure significatifs soutenue par l'obtention de résultats fiables permettant une comparaison du comportement en matière de perte des masses des échantillons. Nous avons essayé de gérer les paramètres influents sur l'usure comme suit :

Avant de commencer les tests, on doit nettoyer notre échantillon des éléments additifs prendre la masse initiale (M_0) de l'échantillon à l'aide d'une balance analytique de précision 0,1 mg ;

Nettoyer le disque avec une solution alcoolique ;

Chapitre III : Résultats et discussions

Observation des phénomènes d'usure à l'aide d'un microscope optique afin de caractériser les traces d'usures.

A) les charges appliquées :

On a appliqué des charges lors des tests d'usure pour les différents échantillons les charges appliquées (10N, 15N)

B) La vitesse :

Le travail s'est effectué à deux vitesses pour chacune des charges appliquées à savoir :

A 200 tr/min

C) Lubrification :

Les tests d'usure ont été réalisés sans lubrification. Les tests à sec nous permettent de déterminer les coefficients de frottement les plus extrêmes

III.3 Influence des traitements de surface sur les propriétés mécaniques des dépôts en NiCr

Le graphique III.1 montre l'influence des différents types de Traitement de surface sur les duretés Rockwell.

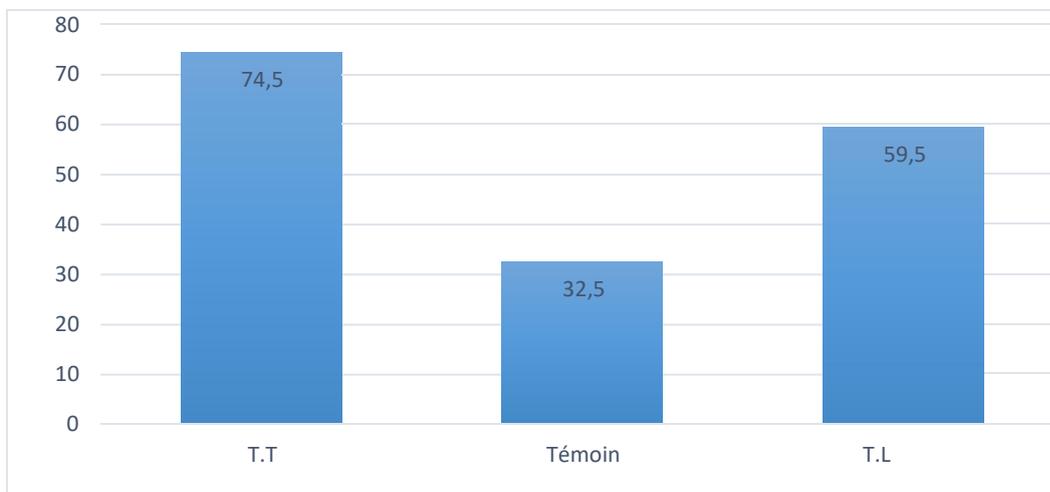


Figure III.1 : dureté HRC des différents échantillons : Témoin ; TL : Traitement laser ; TT : Traité thermiquement.

On remarque que la dureté des différents échantillons, que les trois tests réalisés on trouve que l'échantillon de traitement thermique au niveau de fourne à 1000° et plus résistant par rapport aux autres échantillons tel que celui de chalumeau et témoin. Et celui de chalumeau et plus résistant par rapport à ce de témoin, et leurs valeurs sont respectivement comme suite : 74.5, 59.5, 32.5.

Chapitre III : Résultats et discussions

III.4 Influence du traitement de surface sur les propriétés tribologiques des dépôts en NiCr

Durant cette partie de l'étude on verra le coefficient de frottement en fonction du temps à des charges fixe de 10N et 15N pour nos différents échantillons :

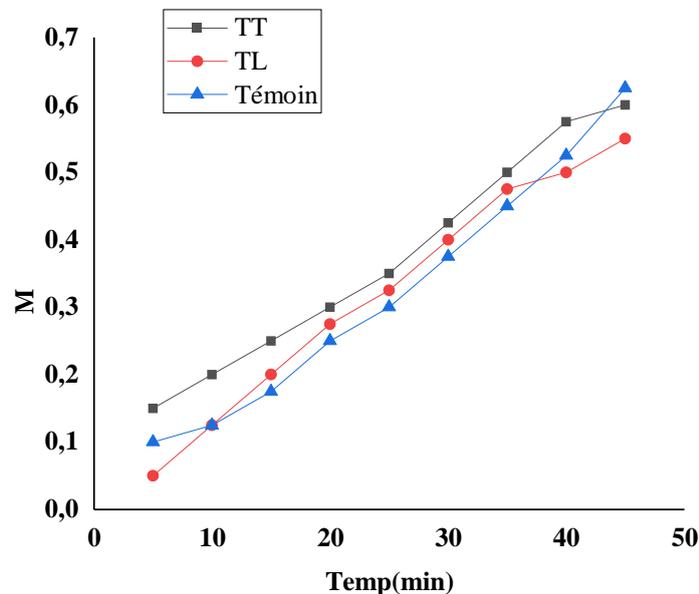


Figure III.2 : Coefficient de frottement en fonction de temps sous une charge de 15N : Témoin ; TL : Traitement laser ; TT : Traité thermiquement.

Evolution du coefficient de frottement en fonction de la température sous une charge normale de 10 N et une vitesse de rotation 200 tr/min

Pour le coefficient de frottement les résultats obtenu reflète l'influence de la force normale et tangentielle sur le calcul des coefficients de frottement ainsi que le facteur temps qui joue un rôle important dans le calcul du coefficient de frottement ; D'après nos résultats on peut conclure que (figure III.2) :

- De 0 min jusqu'à 10 min : le coefficient de frottement augmente de façon lente pour le traitement thermique et témoin, au contraire pour le traitement laser reste stable pour l'essai de 10 N
- De 10 min jusqu'à 45 min : l'évolution du coefficient de frottement dans les trois traitements augmente d'une façon continue.

On remarque que les résistances des traitements, on trouve que le coefficient de frottement pour le traitement thermique est plus élevé par rapport aux autres échantillons tel que celui de traitement laser et témoin.

Chapitre III : Résultats et discussions

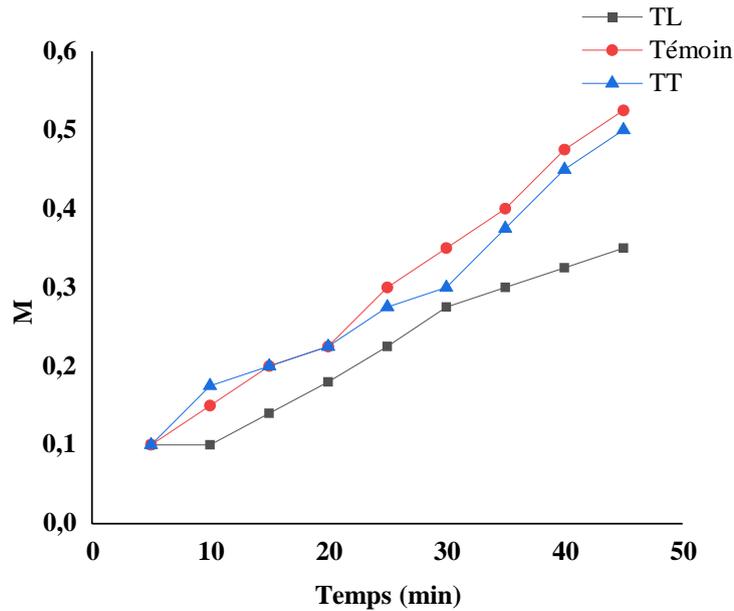


Figure III.3 : Coefficient de frottement en fonction de temps sous une charge de 10N :
Témoin ; TL : Traitement laser ; TT : Traité thermiquement

Evolution du coefficient de frottement en fonction de la température sous une charge normale de 15 N et une vitesse de rotation 200 tr/min

Pour le coefficient de frottement les résultats obtenus reflètent l'influence de la force normale et tangentielle sur le calcul des coefficients de frottement ainsi que le facteur temps qui joue un rôle important dans le calcul du coefficient de frottement

D'après nos résultats on peut conclure que (figure III.3) :

- Le coefficient de frottement reste stable de 0 min à 10 min pour l'échantillon de traitement laser puis augmente de 10 min à 45 min. Pour les autres échantillons les coefficients de frottement augmentent de 0 min à 45 min. On trouve que le traitement thermique est plus élevé par rapport au témoin de 0 min à 15, et de 15 min à 20 min les coefficients de frottement sont égaux, mais à partir de 20 min les valeurs sont inversées : témoin plus élevé à celui de traitement thermique, mais la valeur la plus basse est adossée à celle de l'échantillon traité par laser.

On remarque entre les deux graphes, que à chaque fois la charge augmente le coefficient de frottement augmente : celle de 10 N à 45 min le CF est à 0,5 N, par contre celui de 15 N à 45 min le CF est à 0,65 N.

Chapitre III : Résultats et discussions

III.5 Influence de la charge sur les propriétés tribologiques des dépôts en NiCr:

Durant cette partie, On présentera l'influence de la charge sur le comportement du coefficient de frottement de nos dépôts en NiCr, le premier graphe III.4 représente Influence de la charge sur le coefficient de frottement pour les échantillons témoin.

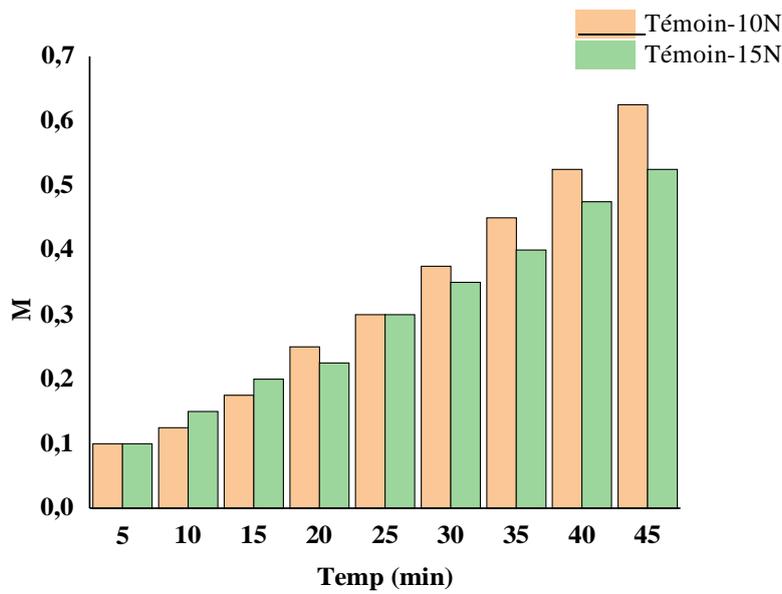


Figure III.4 : Influence de la charge sur les coefficients de frottement pour les échantillons témoin.

On remarque que le coefficient de frottement pour le traitement témoin à l'application d'une force normale 10N et 15N entre 0 min à 5 min on trouve une égalité entre les deux forces d'application, mais à partir de 10 min à 20 min la force normale de 10 N et plus élevé par rapport à celle de 15 N, à la 25 min on retrouve la stabilité des deux forces, puis à partir de la 30 min à 45 min la force de 10 N plus élevé de celle de 15N.

Cette différence de coefficient de frottement dû à la différence de charge utilisé.

Chapitre III : Résultats et discussions

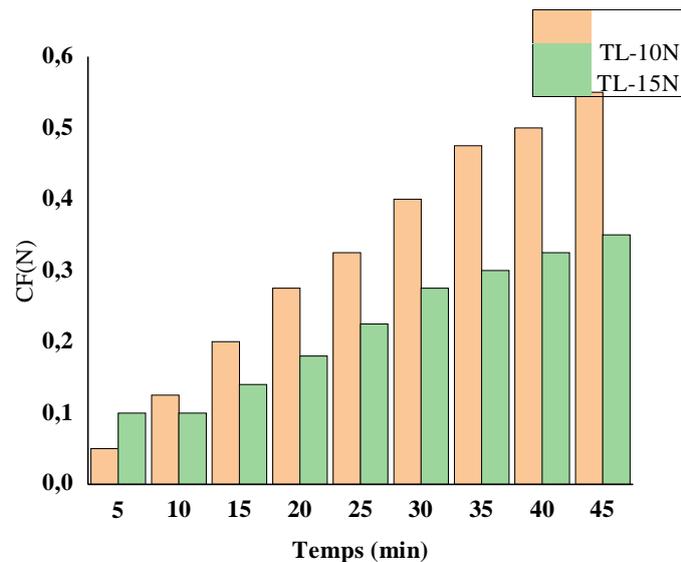


Figure III.5. Etude comparative pour les coefficients de frottement pour les échantillons traité laser sous des charges de 10 et 15N

On remarque que le coefficient de frottement pour le traitement laser à l'application d'une force normale 10N et plus élevé par rapport à l'application de 15 N, mais on trouve que le démarrage le coefficient de frottement pour traitement laser de 0 min a 05min la résistance pour 15 N et plus élevé par rapport à 10 N.

Et on remarque une large différence entre les deux tests pour ces deux charges de 10 N et 15N, à partir de 15 min à 45 min pour la charge de 10N une augmentation en continuité, mais pour 15N y'a une stabilité de résistance de frottement de 0 min a 15min

Et la résistance de coefficient de frottement relie directement à la charge utilisée.

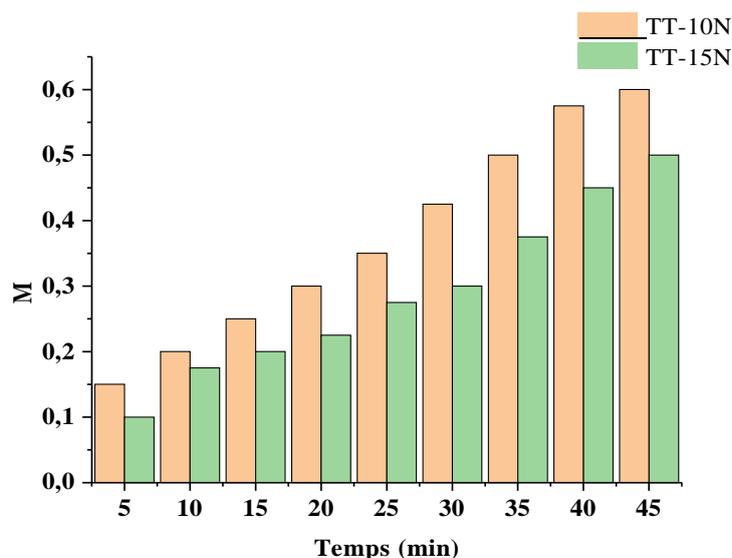


Figure III.6 : Influence de la charge sur le coefficient de frottement pour les échantillons traité thermiquement.

Chapitre III : Résultats et discussions

On remarque que le coefficient de frottement pour le traitement thermique à l'application d'une force normale 10 N et plus élevé par rapport à l'application de 15 N,

On remarque que la différence de coefficients de frottement de 0 min à 15 min une légère différence, mais à partir de 20 min à 45 min le coefficient de frottement pour 10N et plus élevé et remarquable par rapport à 15 N, et ça du a la charge utilisé.

III. Influences des traitements de surface sur l'évolution de la température de contact de nos dépôts NiCr

On présentera dans cette partie d'études l'évolution de la température de contact en fonction des différents traitements de surface effectué Figure III. 7

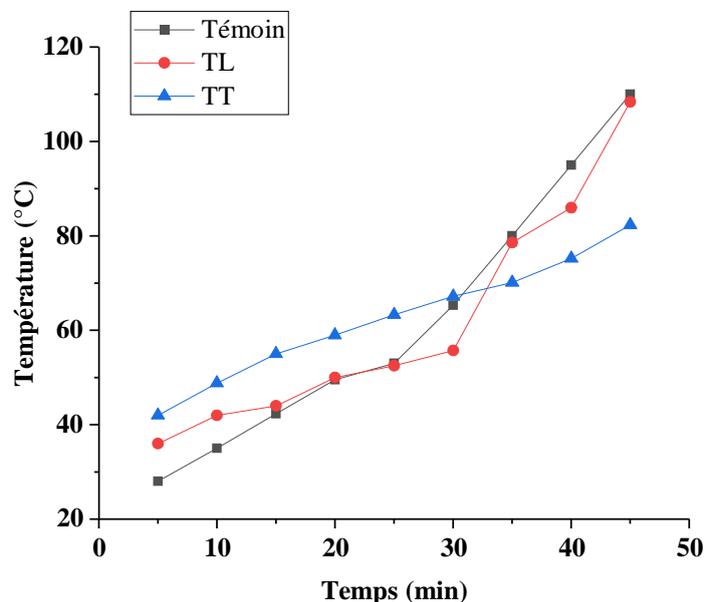


Figure III.7. Évolution de la température de contact sous une charge de 10N : Témoin ; TL : Traitement laser ; TT : Traité thermiquement

Après la réalisation des essais on peut constater que l'évolution de la température est proportionnelle au temps, la différence de résultat de la température varie selon la force normale appliquer (figure III.7).

- De 0 min a 45 min ; la température pour le traitement thermique augmente d'une façon lent, mais pour le traitement témoin de 0 min à 20 min la température augmente d'une façon lent, puis une légère augmentation de 20 min 25 min, et à partir de 25 min à 45 min l'augmentation de la température est fléché, et on trouve que la température pour le traitement témoin et plus

Chapitre III : Résultats et discussions

élevé par rapport aux autres traitements. Et on trouve que la température pour le traitement laser de 0 min à 10 min une augmentation lente, puis une stabilité de 10 min à 15 min, suivi d'une reprise de l'augmentation de température est lent de 15 min à 30 min, mais à partir de 30 min une augmentation de la température pour le traitement laser est remarquable jusqu'à 45 min.

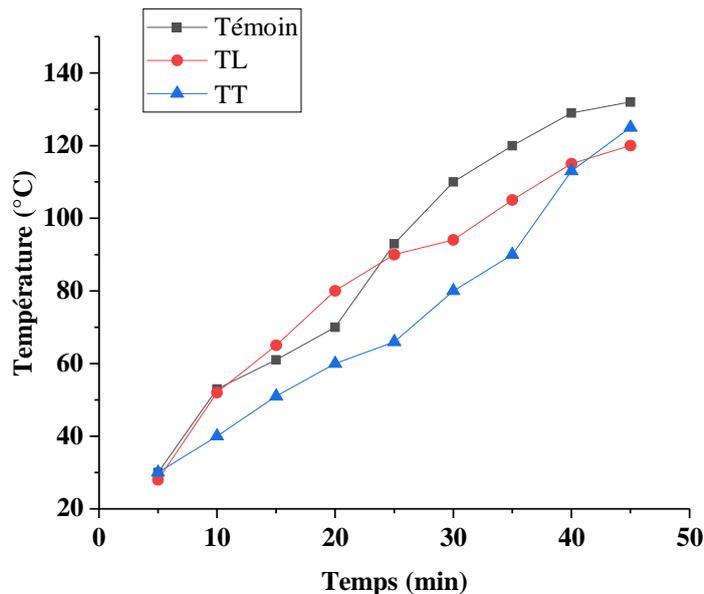


Figure III.8. Évolution de la température de contact sous une charge de 15N : Témoin ; TL : Traitement laser ; TT : Traité thermiquement

Après la réalisation des essais on peut constater que l'évolution de la température est proportionnelle au temps. la différence de résultat de la température varie selon la force normale appliquée (figure III.8).

De 0 min à 10 min ; la température pour les trois traitements augmente d'une façon lente, pour l'essai de 15 N, et on remarque que la température pour le traitement laser et témoin sont identiques de 0 min à 10 min. à partir de 10 min à 25 min on trouve que la température pour traitement laser est plus élevée par rapport au traitement témoin jusqu'au point de croisement des deux traitements à la 25 min la température est inversée pour laser et témoin.

Du 0 min à 40 min on trouve que la température pour traitement thermique est plus basse jusqu'au point de croisement à la 40 min ou on trouve la diminution de température pour le traitement laser et augmentation de température pour traitement thermique.

Chapitre III : Résultats et discussions

On remarque entre les deux graphes, que à chaque fois la charge augmente le coefficient de frottement augmente celle de 10 N a 45min la température est à 110°, par contre celui de 15N a 45 min la température est a 130 N.

III.5. conclusion :

Les études expérimentales menées sur le frottement sec ont mis en évidence la complexité du phénomène tribologique et le nombre de paramètres existants. C'est paramètre représentent, d'une part, les conditions de glissement telles que la vitesse de glissement, la force normale ou encore les températures à l'interface et d'autre part, les caractéristiques des solides en contact telle que la nature des matériaux et l'état de surfaces de glissement. Tous ces paramètres s'imbriquant entre eux et dépendent les uns des autre constituent la problématique de la détermination du coefficient de frottement μ .

Les essais de frottement des différentes forces normal qu'on a appliqué, ont permis de faire une comparaison différentielle des comportements tribologiques.

Conclusion générale

Conclusion générale

A travers les différents tests on a réalisé que la projection thermique est d'une importance dans les revêtements, la rénovation des pièces mécaniques usées. Qui permet de résoudre de nombreux problèmes de matériaux.

Dans ce travail, nous avons montré l'influence des traitements thermiques à 1000°C et avec un traitement laser sur le comportement mécanique d'un dépôt réalisé par projection thermique

A la lumière de ces résultats, il ressort que :

- Les dépôts traités à différents post-traitements présentent une dureté plus grande que celle du substrat.

Les essais tribologiques ont montré que :

- Les six dépôts se comportent identiquement face aux sollicitations au frottement, et il se matérialise par la stabilisation de la valeur du coefficient de frottement.

Annexes

Annexes

III.10 Résultats :

Dans ces tableau ont illustre les résultats obtenu pour une charge verticale de 10 N :

Vitesse de rotation du disque est de : 200 rpm

FN=10 N

Temps	Température (C°)	FT (N)	Vitesse de Rotation (rpm)	CF
0	Température initiale 28°	0	200	0
5	30	1	200	0.067
10	53	1.5	200	0.1
15	61	2	200	0.13
20	70	2.25	200	0.15
25	93	3	200	0.2
30	110	3.5	200	0.23
35	120	4	200	0.27
40	129	4.75	200	0.32
45	132	5.25	200	0.35

Tableau I.1. Force normal de traitement témoin pour 10 N

Temps	Température (C°)	FT (N)	Vitesse de Rotation (rpm)	CF
0	Température initiale 28°	0	200	0
5	35	1	200	0.067
10	52	1.25	200	0.083
15	65	1.4	200	0.093
20	80	1.8	200	0.12
25	90	2.25	200	0.15
30	94	2.75	200	0.18
35	105	3	200	0.2
40	115	3.25	200	0.21
45	120	3.5	200	0.23

Tableau I.2. Force normal de traitement laser pour 10N

Temps	Température (C°)	FT (N)	Vitesse de Rotation (rpm)	CF
0	Température initiale 28°	0	200	0
5	30	1	200	0.067
10	40	1.75	200	0.12
15	51	2	200	0.13
20	60	2.25	200	0.15
25	66	2.75	200	0.18
30	80	3	200	0.2
35	90	3.75	200	0.25
40	113	4.5	200	0.3
45	125	5	200	0.33

Tableau I.3. Force normal de traitement thermique pour 10 N

Annexes

Résultats tribologique pour une charge de 15 N

Temps	Température (C°)	FT (N)	Vitesse de Rotation (rpm)	CF
0	Température initiale 27°	0	200	0
5	36	0.5	200	0.05
10	42	1.25	200	0.125
15	44	2	200	0.2
20	50	2.75	200	0.275
25	52.5	3.25	200	0.325
30	55.7	4	200	0.4
35	78.6	4.75	200	0.475
40	86	5	200	0.5
45	108.4	5.5	200	0.55

Tableau II.1. Force normal de traitement laser pour 15 N

Temps	Température (C°)	FT (N)	Vitesse de Rotation (rpm)	CF
0	Température initiale 25°	0	200	0
5	42	1.5	200	0.15
10	48.8	2	200	0.2
15	55	2.5	200	0.25
20	59	3	200	0.3
25	63.3	3.5	200	0.35
30	67.2	4.25	200	0.425
35	70.1	5	200	0.5
40	75.4	5.75	200	0.575
45	82.3	6	200	0.6

Tableau II.2. Force normal de traitement thermique pour 15 N

Temps	Température (C°)	FT (N)	Vitesse de Rotation (rpm)	CF
0	Température initiale 27°	0	200	0
5	31	1	200	0.1
10	35	1.25	200	0.125
15	42.3	1.75	200	0.175
20	49.5	2.5	200	0.25
25	53	3	200	0.3
30	65.3	3.75	200	0.375
35	80	4.5	200	0.45
40	90	5.25	200	0.525
45	110	6.25	200	0.625

Tableau II.3. Force normal de traitement témoin pour 15 N

Références bibliographiques

Références bibliographie

Références bibliographie

- [1] **A. Prôner**, revêtement par projection thermique, techniques de l'ingénieur : traité matériaux métalliques, 1999 vol M 1645 PP1-20.
- [2] **M.U.Schoop**, Apparatus for spraying molten metal and other fusible substances. Application filed February 19.1914 and US Patent 1,133,507 Patented Mar, (1915).
- [3] **E. Muehlbrger**, Method and apparatus for effecting high-energy dynamic coating of substrates, US patent 3,839,618 oct, 1.1974.
- [4] **E. Muehlberger**. A high energy plasma coating process, Welding Institute, 7-th International Metal Sparying Conference, (1974) 245-256.
- [5] **R. W Smith, R. Novak**, Advances and applications in U.S.thermal spray technology.I. Technology and materials, Powder metallurgy international, Vol. 23(3) (1991) 147-155.
- [6] CITRA- centre d'ingénierie en traitements et revêtements de surface avancés.
- [7] **Le LERMPS** est un laboratoire de l'université de technologie de Belfort Montbéliard.
- [8] **Smith C.W.**, "The basic principales of flame spraying." Science and Technology ofSurface Coating, 1974, pp. 262-270.
- [9] **Salman NOUROUZI**, Thèse de doctorat, Contribution à l'étude du procédé arc-fil pour la réalisation de dépôts métalliques durs restants à l'usure abrasive, Université de limoges, 30 novembre 2004.
- [10] **S Costil, H, Liao, O.Chretien, A.Loredo, A, Gammoudi, M Verdier, C.Coddet** Influence of surface laser cleaning combined with substrate preheating on the splat morphology, journal of Thermal Spray Technology, Vol 14 (1) (2005) 31-38.
- [11] **F.Folio, J.Michler, G. Barbezat**, Influence of laser surface preparation on adhesion of thermally sprayed coatings , Surface Engineering, Vol, 17 (2001) 490-494.
- [12] **S Costil, H, Liao, O.Chretien, A.Loredo, A, Gammoudi, M Verdier, C.Coddet** Influence of surface laser cleaning combined with substrate preheating on the splat morphology, journal of Thermal Spray Technology, Vol 14 (1) (2005) 31-38.
- [13] **Z.TEGGUICHE** ; « traitement des surfaces combiné d'un acier faiblement allié » P.13
- [14] **M. Youcef YAHMI**, Elaboration et qualification d'une procédure de réparation par soudage tige d'aube de Turbine à gaz en superalliages à base de nickel-Inconel 738, Mémoire de magister option fiabilité et maintenance industrielle, université –boumerdes, 2007.
- [15] Mémoire de master superalliages Projet de fin d'étude master II 2016/2017 Page 37 choix des températures de traitement.
- [16] **Meriadeg REVAUD**, optimisation métallurgique du superalliage à base de nickel 718 plus, thèse pour obtention de grade de docteur en science et génie des matériaux, Ecole

Références bibliographie

Nationale supérieure des mines de paris, 2013.