

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE de Technologie
DEPARTEMENT de Génie Mécanique
N° :



DOMAINE : Science Technologique
FILIERE : Génie Mécanique
OPTION : Genie des Matériaux

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Par:

- Saci Abdelhamid

Caractérisation du revêtement d'une
aube de turbine à Gaz en superalliage
à base Nickel/ Incoln738.

Soutenu devant le jury composé de:

Amroune Salah	MCA	Université de M'sila	Président
Zaoui Moussa	MCA	Université de M'sila	Examineur
Menasri Noureddine	MCA	Université de M'sila	Encadreur
Douib Nadhir	MAA	Université de M'sila	Co- Encadreur

Année universitaire : 2018/2019

Remerciements

Je remercie Dieu pour m'avoir donné la santé la patience et le courage tout au long du travail.

Je remercie chaleureusement mon encadreur monsieur Menasri Noureddine et monsieur Douib Nadhir, Merci pour ses suggestions et ses conseils qui m'ont été précieux pour mener ce travail à son terme.

Enfin je remercie aussi tout le personnel administratif du département de génie mécanique de l'Université de Msila, et je remercie également les membres de jury qui me font honneur en acceptant d'examiner et juger mon travail. Mr Salah Amroune en tant que président de jury. Mr Zaoui Moussa en tant que Examineur.

Sans oublier l'équipe du hall de technologie de l'université de Msila, (Khalid Boucharb ingénieur de labo, toute l'équipe labo physique), ainsi monsieur Bessai Abdelkrim, Slimani Saïd de MEI pour leur aide.

Didicace

Je dédie ce modeste travail aux personnes qui sont les plus chères :

A Ma très chère mère qui sans cesse était à mes cotés .

A mon père ,que dieu lui ,paix à son âme

A ma vie, ma femme ,et mes fils ; Ali
,Fatima,Abdelallah

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

Toute ma famille

Tout mes amis et mes collègues

Listes des figure des tableaux

Listes des tableaux

Introduction Générale

Chapitre I

1. Introduction.....	3
2. les superalliages à base de nickel.....	
3. Les superalliages à base de nickel pour aubes de turbine à gaz.....	5
4. Les différents types des superalliages à base de nickel.....	
5. phase gamma et gamma prime.....	7
6. Diagramme d'équilibre.....	8
5.la Resistance à la corrossion.....	9
6. Usinage	10
7. soudabilité.....	10
8.traitement thermique.....	11
9.taittement de surfacepar revetement.....	
10.Les revetement de superalliage à base Nickel.....	12
11.revetement haute activité	15
12.Cémentation	16
13.Cémentation solide.....	15
14.cémentation Gazeuz	16
15.sulfuration	17
16. Nitruration.....	18
17. nitruration plasma	19
18.la métallisation.....	20
19.protectrice.....	21
20. protection cathodique.....	23

Chapitre 2

les procédés de projection thermique

II.1.Introduction	24
II.2. Les procédés de projection thermique	25
II.2.1. Généralité	26
II.2.2. Principe de base et formation de dépôt	27
II.2. 3. Les procédés par combustion	28
II.2.3.1. La projection à la flamme	28
II.2.3.2. La projection par combustion discontinue (détonation) ou continue (HVOF)	29
II.2.3.Les procédés par décharge électrique	30
II.2.3.1. La projection à l'arc électrique	30
II.2.3.2.La projection plasma	31
II.2.3.2.1. Pistolets plasma	32
• Le pistolet à plasma d'arc interne (ou arc soufflé)	32
• Le pistolet à plasma d'arc externe (ou transféré).	32
II-2.3.2.1.La projection plasma atmosphérique (APS)	33
II-2.3.2.2.La projection plasma à pression réduite (LPPS)	33
II-3.Comparaison DES différents procédés de projection	34
II- 4.Les procédés de revêtement utilisés	36
II- 4.1.La métallisation par flamme	36
II- 4.1.1. Définition	36
Barrière protectrice	37
Protection cathodique	37
II- 4.1.2.Principe de la Métallisation	37
II- 4.1.3.Métallisation (projection à la flamme fil ou poudre)	37
II- 4.1.4.La mécanique d'accrochage	37
II- 4.1.4.Métallisation à la flamme par pistolet à poudre	40
II- 4.1.4.1.Principe	40
II- 4.1.4.2.Fonctionnement	40
II- 4.1.4.3.Les applications	41
II- 4.1.4.4.Les dépôts	41
II- 4.1.4.5.Les utilisations	42
II- 4.1.5.Métallisation à la flamme par pistolet à fil	42
II- 4.1.5.1.Principe	42
II4.1.5.2.Fonctionnement...	43
II- 4.1.5.3.Les applications	44

II- 4.1.5.4.Les dépôts	44
II- 4.1.5.5.Les utilisations	45
II- 5. Conclusion	45

Chapitre III

Partie expérimentale projection flamme

III-Caractérisation du revêtement projection thermique	46
III.1. présentation de l'aube	46
III.2.les échantillons à revetues	46
III.3. Procédes de revetemts	48
III.3.1.1. procédés de revêtement flamme poudre	47
III.3.1.2.préparations de surfaces	47
III.3.1.3.description	49
III.4.poudre utilisable en projection à froid	50
III.4.1.technique de rechargement	50
III.4.2. paramètre indicatifs	50
III.4.3.présentation	50
III.4.préparation projection thermique flamme à fil	51
III.5.projection thermique de flamme à fil	52
III.5.1.Parametre de projection à fil	53
III.5.2. Mode opératoire	53
III.6..Etude métallographique	54
III.6.1.Le découpage , 6..2.enrobage.	54
III.6.3. Principe	55
III.6.4.Observation métallographique	56
III.6.5. Préparation des échantillons pour l'observation métallographique	56
III.6.6. Polissage de finition	56
III.7.Diffraction des rayons (DRX)	58
III.7.1 observation micrographie	61
III.7.3. Attaque chimique	62
III.7.4.Résultat des observations	62
III.7.4.1.microstructure revêtement échantillon à fil.	62
III.7.4.2.microstructure revêtement échantillon à poudre	63
III.8. la micro-dureté	64
III.8.1.principe	64
III.8.2.interprétation de résultats	62

Listes des tableaux.

Listes des tableaux.

Liste des tableaux

Tableau I.1 : <i>principales nuances d'alliages réfractaires</i>	5
tableau I.2.caractéristiques des différents procédés de projection thermique.	18
Tableau I.3. La réalisation de l'enrichissement	19
tableaux II-1 et II-2 caractéristiques des revêtements	35
Tableau II-1 : Quelques caractéristiques des revêtements / source employée	35
Tableau II-2 les abréviations utilisées.	36
Tableau II -2 : Autres caractéristiques des revêtements	36
Tableau III-1-Paramètre de projection	48
Tableau III-2Composition du substrat 2 :	48
tableau III-3 -Composite (%) de la poudreion chimique	49
tableau-III-4-Caractéristique mécanique et physique types.	49
tableau III-5- Paramètres indicatifs :	50
tableau III- Les paramètres pour CastoDyn DS 8000 sont comme :	51
Tableau : composition de substrat 1	52
Tableau.III.3.1.2-Paramètre de projection à fil	53
Tableau III.5.3.1-Analyse obtenu du DRX pour les deux échantillons :	56
Tableau III-11-échantillon 01	57
Tableau III-12-échantillon 02.....	57
Tableau III-13-Définition des phase déterminer :.....	58
Tableau III -14-Revêtement à fil :.....	59
Tableau-III-15-Revêtement à poudre :.....	62

Listes des Figures

Listes des figure :

Figure I.1 :aubes turbine de microstructureur (a) équiax,(b) colonaire,(c) monocritallin	6
Figure I.2 :structure cristallines (y),(y')	7
Figure I. 3diagramme d'équilibre Ni-Al	11
Figure I.4fissure après solidification.	12
Figure 1.5 Soudabilité des superalliages à base de Nickel	18
Figure I.6 :la réalisation de l'enrichissement	19
Figure I.7 :shema de principe d'enceinte de nitruration assisté par plasma	22
Figure- II.1 : Facteur d'influence de la projection thermique.	24
Figure I-3 : Classification générale des techniques de revêtement	25
Figure- II.2 : Les différents procédés de revêtement des surfaces	27
Figure- II.3 : Principe de la projection thermique	27
Figure- II.5 : Chalumeau classique à fil (à gauche) et à poudre (à droite)	28
Figure- II.6 : Schéma de principe du procédé HVOF	30
Figure- II.7 : Schéma de principe d'un pistolet à arc électrique	32
Figure- II.8 : Schéma de principe d'un pistolet plasma	34
Le pistolet à plasma d'arc interne (ou arc soufflé) .	34
Le pistolet à plasma d'arc externe (ou transféré) .	34
Figure- II.9 : Température d'utilisation et vitesse des particules des procédés.	35
(Figure- II.10)	35
Figure- II.10 : Buse de projection thermique a- à poudre. b- à fil	37
Figure- II.11 : Schéma de principe de la projection thermique à la flamme (poudre ou fil)	38
Figure- II.13 : Pistolet à poudre	40
Figure- II.14 : Poste de métallisation à la flamme en fil (MEI)	44

Chapitre III.	
figure III-1 matiere découpée d'une aube de turbine	46
figure III-2échantillon à revêtir46	47
figure III-3-échantillon rectifié46	47
Fig –III- 4 :grenailleuse.Airblast.	47
Figure III-5- La torche Castodyn en marche en marche	48
figure III-6- La torche Castodyn possédé de l'université de blida	51
figure III-7-La torche castodyn en opération	51
figure III-8-échantillon fixé	51
figure III-9-échantillon revetu	51
Figure III-10type de sable utilisé .	51
figure III-11Grains de sabl	52
Fig III-12 Pistole de projection thermique flamme à fil.	52
Figure :III-13 réalisation de projection flamme fil	54
Figure III-14 Machine de découpage à fil (électro-érosion).	54
Figure III-15 : Forme de l'échantillon.	54
Figure III-16 echantillon pour enrobage	55
Figure III-19 appareil d'enrobage sous vide avec compresseur	55
Figure III-17 Échantillons dans la résine	56
Figure III-18 moules en chambre sous vide	56
Figure III.19 Planopol-3 <struers>.	57
Figure III.20 utilisation d'un patte à polissage fin.	57
FigureIII-21 :XPert Pro pour analyse DRX.	58
FigureIII-22 :XPert Pro lié a l'ordinateur.	59

Figure III-24spectre de diffraction	60
Figure III-24 Observations micrographique	60
Figure III.25 <i>Microscope optique en transmission et réflexion OLYMPUS BH2.</i>	61
Figure III-26 microstructure d échantillon (fil)	62
Figure III-27 microstructure d'échantillon (poudre)	62
Figure III-28 Indotec Zwick Roell attaché à micro-ordinateur.	64
Figure III-29,30 histogramme,évolution micro-dureté.	66

Introduction Générale

Introduction générale

Lors de ces dernières décennies, de nombreuses études ont été menées dans le domaine des matériaux et des procédés afin d'augmenter les performances des pièces en service et de comprendre l'origine des mécanismes physiques responsables des propriétés recherchées.

Pour des sollicitations de surfaces, différents procédés de traitements de surface existent. Parmi ceux-ci, on identifie la projection thermique qui permet la formation de revêtements protecteurs contre l'usure, la température, la corrosion etc.... Il est possible par ce biais d'allonger la durée de vie des pièces tout en améliorant leurs performances. Cette technique a un intérêt particulier dans la récupération de pièces mécaniques usées en procurant des propriétés superficielles intéressantes en l'occurrence une bonne tenue à l'usure.

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.

Les machines tournantes jouent un rôle stratégique dans un procédé de fabrication, c'est le cas des turbines à gaz. L'amélioration des performances des turbines à gaz est un enjeu important, qui nécessite d'identifier et de comprendre les mécanismes de détérioration qui ont lieu durant leur utilisation. Les turbines à gaz sont présentes dans de nombreuses applications : les turbines terrestres (ou industrielles) qui constituent un moyen de production simultanée, d'électricité et de chaleur (cogénération), relativement peu coûteux et peu polluant, les turbines aéronautiques servant à propulser les avions ou les hélicoptères.

Dans les parties les plus chaudes des turbines à gaz (*i.e.* chambre de combustion), les matériaux utilisés sont soumis à de fortes sollicitations thermiques et mécaniques. Cela est notamment le cas des aubes de turbine. Les températures d'usage sont en effet, de l'ordre de 800°C. Ces sollicitations induisent différents types de dégradation. Les plus fréquemment rencontrés par les aubes de turbine, sont l'érosion, le fluage, la fatigue, la corrosion et l'oxydation. Les matériaux utilisés pour résister à de telles sollicitations et dégradations, sont des superalliages à base de nickel. Leurs excellentes propriétés mécaniques leur assurent une bonne résistance aux sollicitations mécaniques. En revanche, leur durée de vie est souvent limitée par les dommages causés par l'environnement. En effet, ces matériaux réagissent avec l'atmosphère environnante, à haute ou basse température, pour former des oxydes, des sulfures, des nitrures ou des carbures. La vitesse et les mécanismes réactionnels dépendent de plusieurs paramètres tels que la température, la pression ou la composition chimique de l'atmosphère environnante. Selon la température et l'environnement, trois modes de détérioration peuvent être observés : la corrosion de type II vers 700°C, qui se manifeste par une attaque localisée du matériau, la corrosion type de I vers 850°C qui est une réaction de surface entre les oxydes formés à la surface du superalliage et un dépôt de sels fondus (Na_2SO_4 et/ou NaCl) provenant des gaz de combustion, enfin au-delà de 900°C l'oxydation prédomine. Lorsqu'une couche (compacte et dense) d'oxyde, se forme, le superalliage est séparé du gaz environnant, il devient ainsi protégé. Les superalliages, à base de nickel, contiennent du chrome et de l'aluminium qui permettent de former, à haute température, une couche protectrice de Al_2O_3 et Cr_2O_3 . Mais les températures d'utilisation, dans les parties chaudes des turbines, sont si élevées, que les teneurs en chrome et aluminium des superalliages ne sont parfois pas suffisantes pour assurer une protection durable.

Afin d'améliorer la durabilité à haute température des aubes de turbine, des revêtements aluminiformeurs sont utilisés. Ils favorisent la croissance d'une couche d'alumine dense, stable, adhérente, continue et auto-réparatrice qui protège le superalliage et inhibe la diffusion d'espèces endommageantes comme l'oxygène, l'azote et le soufre dans le superalliage. Les revêtements les plus communément utilisés sont les aluminures de diffusion.

Le travail présenté dans ce mémoire concerne la caractérisation d'un dépôt sur superalliage à base Nickel Incoln 738 réalisé par le procédé de projection thermique à flamme fil et le procédé de projection thermique par poudre. Il comprend une introduction générale, trois chapitres et une conclusion générale.

Le premier chapitre est dédié à un état des lieux plus détaillé de nos connaissances sur les superalliages à base Nickel, à savoir la composition chimique, l'influence des éléments sur l'alliage, diagramme Ni-Al, la microstructure...etc.

Dans le deuxième chapitre, Le développement des procédés de revêtements par projections thermiques. Dans celui-ci on présente la procédure, les moyens et les paramètres pour réaliser un revêtement

Dans le troisième chapitre, on présente la caractérisation du revêtement d'une aube de turbine à Gaz troisième étage 9000 à savoir :

- test de diffraction par rayons X (DRX).
- test micro dureté et les observations microscopiques.

Enfin, on termine par une conclusion générale avec des suggestions pour des travaux futurs.

CHAPITRE I

Les superalliages à base Nickel /Incoln 738

Chapitre I : Les Superalliages base Nickel Incoln 738

Les superalliages sont des alliages biphasés constitués d'une phase mère appelée gamma, désordonnée dont la structure atomique cristalline est cubique face centrée, et d'une phase de précipités de structure ordonnée et de forme cubique face centrée appelés gamma prime dispersés dans la matrice gamma.

Les superalliages apportent une grande résistance à tous types d'attaques telles que le Fluage, la corrosion ou bien l'oxydation. Cette résistance est due à leur microstructure. Sur l'illustration 1, on peut remarquer que la phase gamma prime est irrégulière : certains blocs sont plus longs que d'autres, ou encore coudés. Ces irrégularités apportent leur résistance car, en cas de cassure, la fissure provoquée ne pourra pas facilement se propager à travers sa microstructure. De plus, la structure des blocs n'est pas totalement rectiligne. Ceci est dû à leur structure cristalline atomique : il se peut que certaines mailles s'écartent et quelques atomes peuvent s'insérer entre deux atomes d'une maille et ainsi créer deux mailles qui s'écarteront jusqu'à avoir deux mailles de taille normale.

Les superalliages sont des matériaux clés pour l'aéronautique, ils sont utilisés pour la Fabrication des parties chaudes des turboréacteurs d'avions (aubes de turbines). Ils sont Capables de résister à une température de plus de 1 000 °C et une pression de près de 40 Atmosphères (soit 4 MPA).

On peut diviser les superalliages en trois familles :

- alliages à base de fer-nickel-chrome ;
- alliages à base de nickel;
- alliages à base de cobalt.

I. Les superalliages à base de nickel :

I.1 Introduction :

Les superalliages à base de nickel sont largement utilisés dans la fabrication des turbines à gaz, particulièrement dans la fabrication des aubes qui sont en contact direct avec les gaz chaud, lors de leur exploitation. De ce fait, ces aubes sont soumises à des températures élevées, à des contraintes statiques et dynamiques importantes et à une érosion et/ou une corrosion à chaud pouvant être très sévères.

Pendant le service, les aubes subissent donc des dégradations naturelle sont accélérées dues aux différentes causes.

Ces dégradations ou détériorations sont d'origine métallurgique ou mécanique ; elles sont la conséquence de l'abaissement de la fiabilité et de la disponibilité des turbines à gaz et l'augmentation de leur probabilité de défaillance. Généralement, il est attendu de ces aubes une durabilité avoisinant les 50 000 heures de fonctionnement ; malheureusement, ces composants subissent souvent des dommages tels que : impact, fissure, usure, destruction du revêtement protecteur, dégradation de la microstructure etc.

Bien avant d'avoir atteint leur durée de vie théorique. Les coûts de remplacement étant onéreux (le prix d'une aube de turbine est de l'ordre de 1.500 Dollars US), les utilisateurs de turbines à gaz préfèrent souvent réparer les aubes endommagées, réalisant ainsi des économies substantielles. Les utilisateurs de turbines à gaz et les réparateurs spécialisés se sont investis à développer des techniques fiables de réparation ; le résultat est qu'on peut aujourd'hui rénover une aube endommagée et lui redonner une durée de vie théorique pouvant atteindre celle d'une aube neuve, cela à un prix ne dépassant guère 60% du coût de cette dernière ! Les économies réalisées sont donc très importantes.

Les aubes sont généralement fabriquées dans des alliages de nickel durcis par précipitation d'une phase cohérente riche en nickel et en titane qui les rend sensibles à la fissuration à chaud lors du soudage.

Il était jusqu'à récemment impossible de recharger ces alliages par soudage TIG en utilisant un métal d'apport ayant une résistance au fluage comparable à celle du métal de base ; la technique adoptée par la majorité des réparateurs consistait à recharger l'aube endommagée avec un métal d'apport alliage de nickel durci par solution solide, le résultat étant une zone réparée ayant une résistance au fluage plus faible que celle du métal de base. Dans ce cas donc, il n'était permis de réparer que la partie de l'aube où les sollicitations combinées contrainte – température n'est pas très sévère, c'est à dire la partie couvrant approximativement le tiers supérieur de l'aube.

Définition [10] : Ils sont connus notamment sous les noms de marques : **Inconel** (Inco) et **Hastelloys** (Haynes international), ils présentent d'ailleurs de très nombreuses nuances dont des alliages **superéfractaires** utilisés à hautes températures. Deux types d'alliages de nickel peuvent être distingués :

- Les alliages réfractaires utilisés notamment pour leur résistance à la corrosion.
- Les alliages super réfractaires : superalliages à durcissement structural utilisés pour leur résistance à chaud, Les alliages réfractaires contiennent une teneur importante en nickel provoquant un accroissement important des propriétés mécaniques à chaud. Les alliages super

réfractaires (superaliages) sont des Alliages à durcissement structural et contiennent beaucoup d'éléments chimiques avec une teneur en Chrome du même ordre que pour les alliages réfractaires. Des éléments tels que le molybdène, le Tungstène, le niobium, le tantale et le titane sont ajoutés pour augmenter leur résistance à chaud. Le Tableau 1.1 donne les principales nuances d'alliages réfractaires à base de nickel.

Ces alliages contiennent le plus souvent majoritairement du nickel et sont très chargés en chrome.

Nuance	Ni (%pds)	Cr (%pds)	Fe (%pds)	Ti (%pds)
NY845	41	23	Bal	0.3
In600	Bal.	16	9	0.2
NY690	Bal.	29	9	
In601	Bal.	23	14	1.5
Nimonic 75	Bal.	19.5	< 5	
Ha 214	Bal.	16	2.5	4.5

Tableau I.1 : principales nuances d'alliages réfractaires

1.2 Les superalliages à base de nickel pour aubes de turbine à gaz :

Le procédé de solidification dirigée a d'abord permis l'élaboration d'aubes à grains Colonnaires dans les années 60 puis monocristallines dans les années 70. L'élimination des joints de grains a amélioré la ductilité à température élevée du superalliage.

En effet, en supprimant les sites d'initiation des fissures, un traitement de remise en solution Permettant l'optimisation de la microstructure (γ') et donc le renforcement, est alors possible sans risque de Fissuration. Les superalliages monocristallins ont aussi une excellente résistance au fluage, De Par l'élimination des joints de grains perpendiculaires à l'axe de contraintes.

Ils ont aussi une résistance à la fatigue thermique supérieure grâce à une orientation $\langle 001 \rangle$ parallèle à la direction de solidification.

La microstructure des superalliages monocristallins est identique à celle des superalliages Conventionnels, ils sont constitués de précipités cubiques. (γ') dans une matrice γ mais la fraction de (γ') est plus importante. De quelques carbures et borures, ainsi que de phases TCP. Ainsi, grâce à leurs très bonnes propriétés mécaniques et leur stabilité de surface à haute Température, les superalliages à base de nickel sont utilisés dans les parties les plus chaudes Des turbines à gaz aéronautiques, industrielles ou marines. Pour accroître le rendement des Turbines

à gaz, il est nécessaire d'augmenter les températures de fonctionnement, donc d'améliorer les propriétés mécaniques des superalliages. Les propriétés mécaniques des Superaliages ont été nettement améliorées grâce à l'optimisation de leur composition, en diminuant notamment les teneurs en chrome mais surtout grâce à la technique de solidification dirigée, qui a permis d'obtenir des aubes monocristallines. Or, la diminution du Taux de chrome s'est généralement accompagnée d'une diminution de la résistance à la Corrosion. Les températures de fonctionnement sont maintenant limitées par la température Maximale d'utilisation des superalliages. Pour pallier ces deux problèmes, parallèlement à l'évolution de la conception des superalliages, des revêtements protecteurs aluminiformes ont été développés afin de permettre l'utilisation des superalliages dans un domaine de température où les problèmes de corrosion n'interviennent plus ($T > 950^{\circ}\text{C}$).

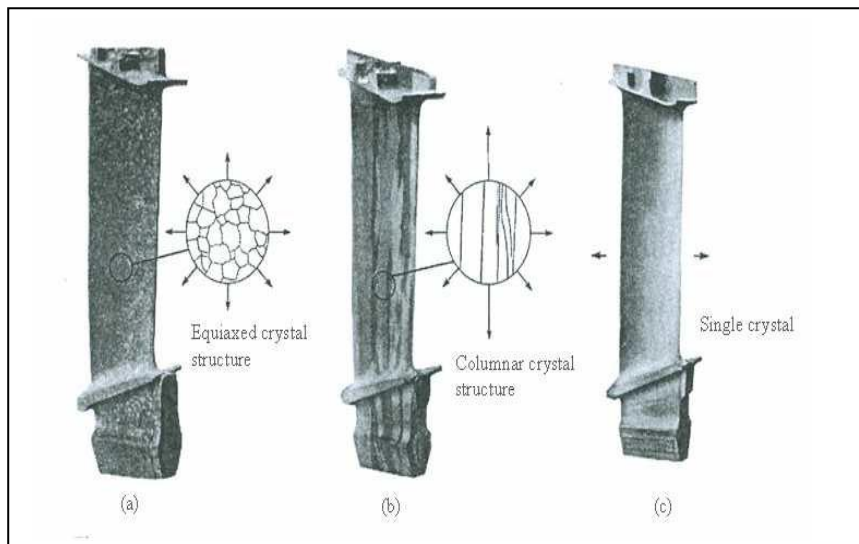


Figure I.1 : Aubes de turbine de microstructure (a) équiaxe, (b) colonnaire, (c) monocristalline

1.3 Structure d'un superalliage à base de nickel

Les superalliages à base de nickel contiennent des précipités cohérents de la phase ordonnée γ' dans la matrice CFC. Donc, un superalliage est un solide biphasique :

- une matrice austénitique : système CFC désordonné ;
- des précipités formant un système CFC ordonné Ni_3Al .

Ces deux phases sont mixées sans qu'il y ait rupture de la structure.

1.3.1 Phase gamma [04] :

La phase gamma, γ , est l'élément principal de tous les superalliages et la phase austénitique de la matrice. Cette phase est durcie par solution solide et par les précipités de la phase gamma

prime (γ') et du carbure. La phase gamma est cubique à faces centrées (CFC) et la maille cubique comporte une distribution aléatoire de différents atomes.

1.3.2 Phase gamma prime

La phase gamma prime (γ') est cubique à faces centrées d'une structure cristalline géométriquement compacte et très stable de Ni_3Al , de Ni_3Ti ou de $\text{Ni}_3(\text{Al,Ti})$. La maille cubique contient des atomes de Nickel aux centres des faces et des atomes d'Aluminium ou de Titane aux coins du cube. Parfois, par substitution des éléments, le Nickel est remplacé par le Cobalt, le Chrome ou le Fer et l'Aluminium est remplacé par le Fer.

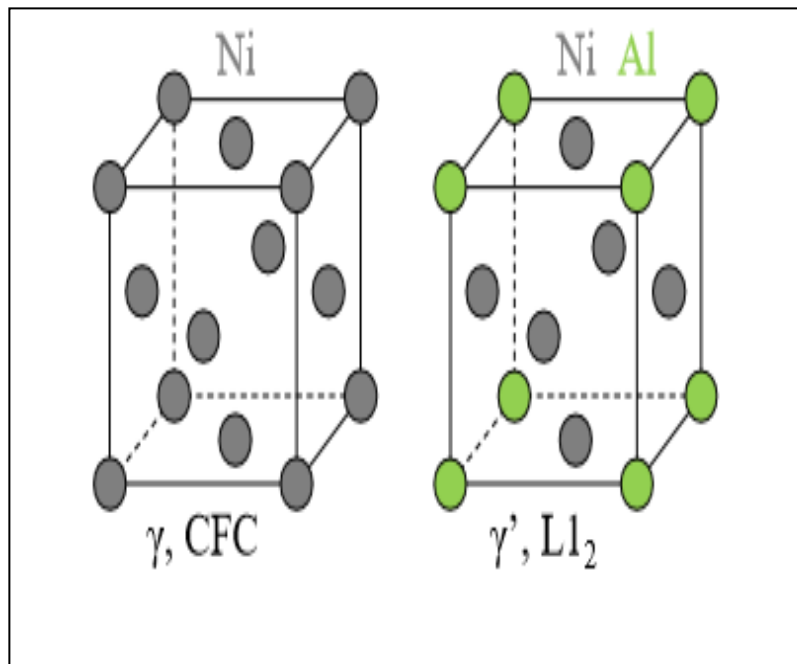
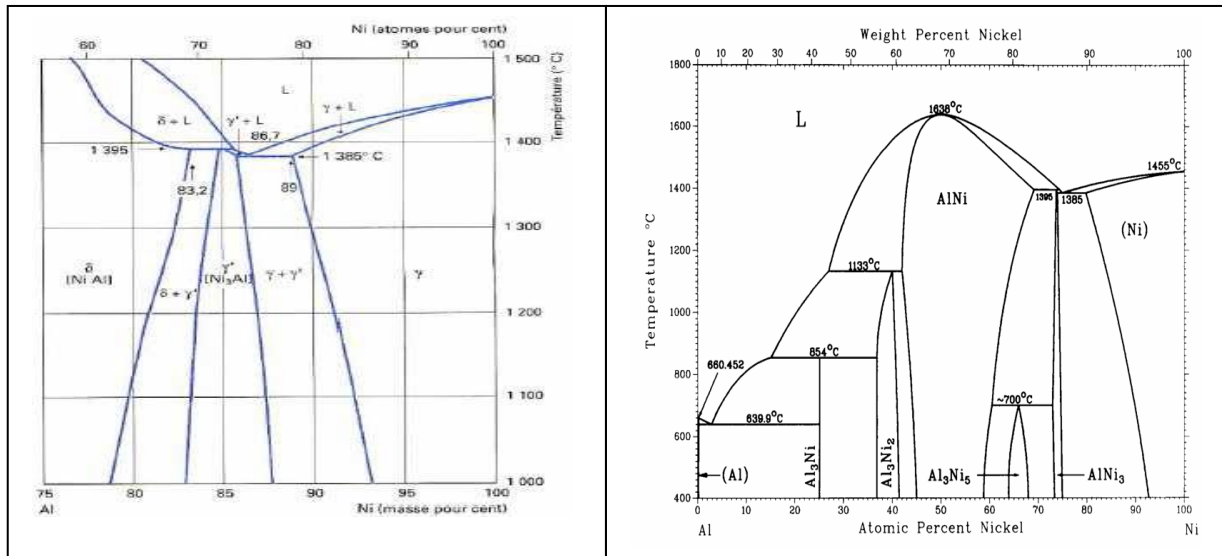


Figure I.2 : Structures cristallines des phases γ et γ' .

1.3.3 Diagramme de phases :

Le diagramme d'équilibre binaire Ni-Al [10] montre que la phase β -NiAl est stable sur un large domaine de composition, compris entre 35 et 57 % atomiques (% at.) en aluminium à 1100°C et entre 41 et 55 % at. à température ambiante (Figure 1.1). Ce diagramme permet également d'identifier la Phase γ' -Ni₃Al vers laquelle le dépôt va évoluer en condition de service, en s'appauvrissant en aluminium.



(a) Diagramme d'équilibre Ni-Al indiquant la fraction f de la phase γ' à différentes températures et à la composition équivalente

(b) Diagramme binaire Ni-Al

Figure I.3 Diagramme d'équilibre Ni-Al [10]

1.3.4 Composition chimique

La composition des superalliages est le résultat d'un compromis entre plusieurs objectifs qui sont :

- La possibilité de réalisation en utilisant un procédé de fabrication donné.
- La résistance à la corrosion sèche.
- La résistance mécanique telles que : la résistance à la traction, au fluage et à la fatigue, ce qui implique une stabilité de la structure métallurgique en service.

Il faut régler finement la composition chimique pour bien obtenir les deux phases γ et γ' . Cela est d'autant plus difficile car le moindre ajout d'additif fait varier le taux de différentes phases ;

- il faut connaître précisément la répartition des additifs entre les deux phases.

- de plus, la composition chimique influence grandement la durée de vie en contrainte du superalliage.

Celle-ci peut varier de moins de 200 heures à plus de 1000 heures pour une même température de service [21]

On remarque que ces alliages sont très complexes et définis par un très grand nombre d'éléments. Il s'agit d'un prolongement de la famille des aciers réfractaires austénitiques par un accroissement de la teneur en nickel. à cette substitution du fer par le nickel correspond un

accroissement des propriétés mécaniques à chaud des alliages. Ils ont une teneur en chrome du même ordre que celles des aciers inoxydables, bien que, pour les nuances les plus chargées en éléments d'alliages, on doit limiter cette teneur en chrome pour des raisons d'optimisation de la structure métallurgique. Ces alliages comportent en même temps plusieurs éléments destinés à augmenter la résistance à chaud des alliages : molybdène, tungstène, tantale, aluminium, titane...

Les spécifications de ces alliages imposent des limites très basses pour les teneurs des éléments nocifs (Étain, Argent, Plomb...).

1.4 La résistance à la corrosion :

Sous l'effet d'une élévation de température, le métal peut subir une agression de la part du milieu avec lequel il est en contact : air, autre atmosphère gazeuse comme les gaz de combustion. Ce sont les phénomènes de corrosion à haute température. Les matériaux résistant à ce genre de corrosion sont qualifiés de réfractaires.

Les superalliages doivent résister à haute température, soit simplement à l'action oxydante et nitrurant de l'air, soit à l'action plus complexe, et souvent plus agressive d'atmosphères contenant, en plus, d'autres agents comme des produits de combustion des hydrocarbures, de Produits sulfurés ou d'autres impuretés provenant des hydrocarbures comme l'oxyde de vanadium (V_2O_5).

En fait, les turbines à gaz fonctionnant avec des fuels riches en soufre et parfois en vanadium. Le soufre est particulièrement nocif pour les alliages riches en nickel parce qu'il forme avec le nickel des eutectiques à bas point de fusion : $645^\circ C$ pour l'eutectique (Ni-Ni $3S_2$)

Au contact de ces eutectiques, l'oxydation est accélérée. De même l'oxyde de vanadium (V_2O_5) fond à $650^\circ C$ et accélère l'attaque du métal [10].

Pour les problèmes de corrosion sèche, les superalliages peuvent être divisés en trois catégories:

- les superalliages utilisés à températures relativement basses (moins de $750^\circ C$), et sous fortes contraintes. Il s'agit d'alliages de disque et de boulonnerie. Ces alliages ne posent pas de problèmes particuliers de corrosion sèche à cause de basses températures auxquelles ils sont soumis.

- Les alliages de chambre de combustion, qui sont soumis à des conditions sévères de corrosion sèche sous des contraintes relativement faibles. Leur résistance à la corrosion est due à leur teneur en chrome et à des additions d'éléments traces comme le Lanthane.
- Les alliages destinés à la fabrication d'aubes ont des teneurs faibles en chrome pour des raisons d'optimisation d'une structure très riche en phase γ' , pour résister aux fortes contraintes à haute température auxquelles ils sont soumis. Ce sont des alliages de faible résistance à la corrosion sèche qui sont utilisés à haute température. Il en résulte qu'ils doivent être protégés par des revêtements.

1.5 Usinage :

L'usinage des superalliages est très difficile car, ils ont plusieurs propriétés physiques et mécaniques défavorables à l'usinabilité, qui sont :

- ✓ une faible conductivité thermique.
- ✓ Un coefficient de dilatation élevé.
- ✓ Une écrouissabilité élevée : la limite élastique passe de 200-300MPa, à l'état hypertrempe, à 1500-2000MPa à l'état fortement écroui [10].

En plus de ces caractéristiques, ils conservent leurs propriétés mécaniques à haute température et contiennent un pourcentage élevé de constituants durs et abrasifs (carbures et phase intermétallique comme la phase γ' , qui produisent des usures intenses des outils.

Pour les procédés d'usinage conventionnels : tournage, fraisage, perçage, alésage ; on utilise des outils en carbures. (K10K20).

Cependant, le développement des moyens d'usinage rend intéressant l'usage d'outils de coupe en céramique. Par ailleurs la faible usinabilité des superalliages rend particulièrement avantageux les procédés d'usinage sans enlèvement de copeaux [10].

1.6 Soudabilité des superalliages :

La faible aptitude au soudage de ces alliages est liée à des problèmes de fissuration à chaud de la zone fondue et de la zone affectée par la chaleur

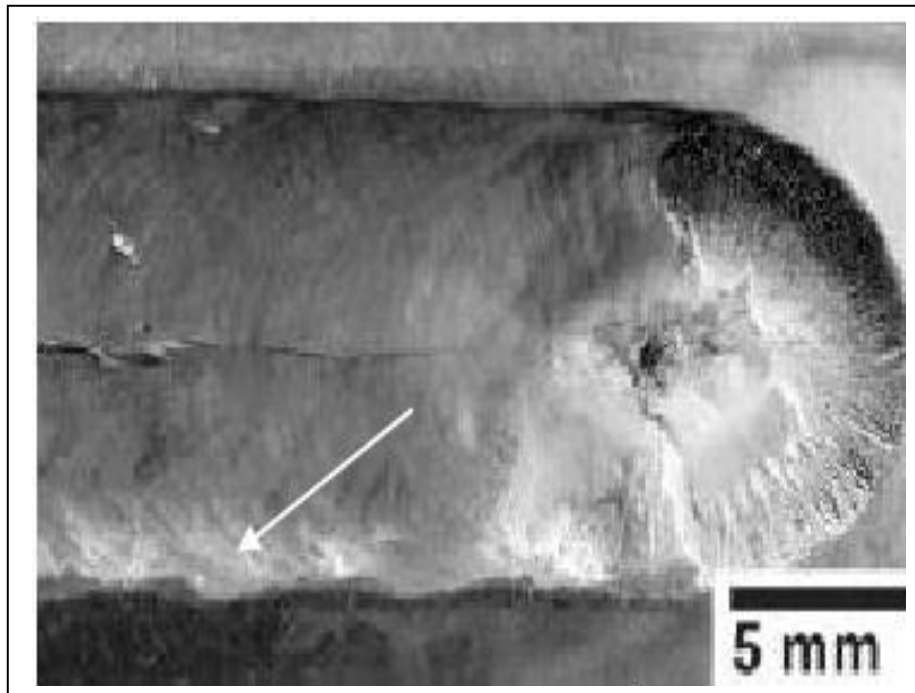


Figure I.4. Fissure après solidification : suite à un soudage TIG d'une plaque en IN718 .

(Fig. I.4), et aussi de fissuration au revenu de durcissement dans la zone affectée thermiquement. La susceptibilité à la fissuration à chaud est favorisée par la forte teneur en Ti et Al, car ces deux éléments favorisent la précipitation de la phase γ' , et par la présence d'éléments tels que le carbone, le soufre et le bore.

La soudabilité des superalliages à base de nickel et la susceptibilité à la fissuration sont souvent quantifiées en traçant le graphe représentant la teneur en Al en fonction de sa teneur en Ti comme le montre la figure 2.9. Pour un alliage donné, quand le total (Al+Ti) dépasse une valeur critique (souvent égale à 4 % en masse), on estime qu'il est difficilement soudable, et cette difficulté augmente avec le total Al+Ti. Un soin particulier doit être apporté à ce type d'alliage aussi bien pour le soudage que pour leur traitement thermique.

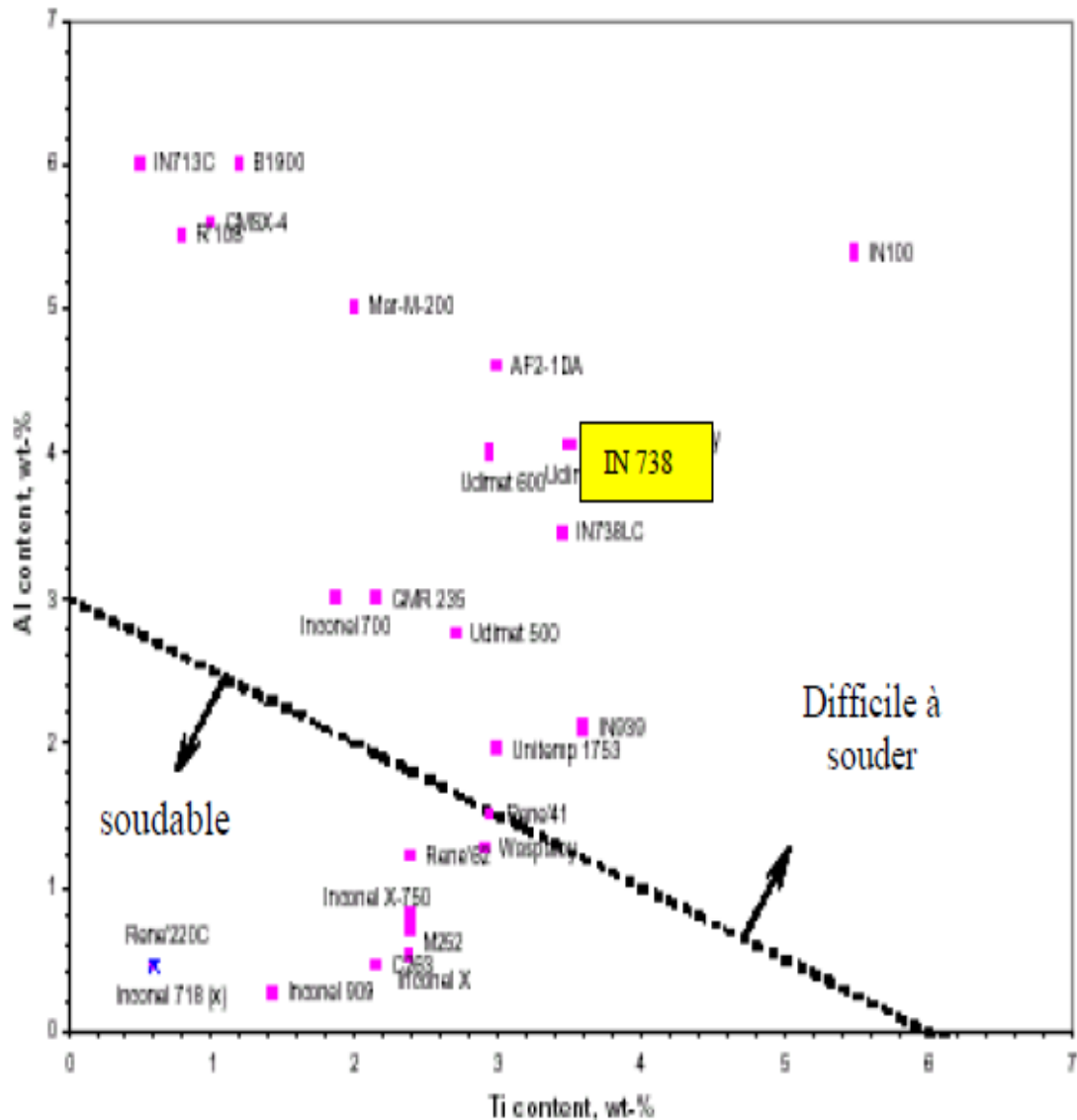


Figure I.5 : Soudabilité des superalliages à base de nickel

1.7 Traitement thermique des superalliages :

Les traitements thermiques des superalliages interviennent à tous les stades de mise en œuvre, depuis l'élaboration des demi-produits jusqu'à la livraison des pièces finies. Ils conditionnent de façon évidente la qualité du produit fini, les propriétés mécaniques des matériaux et, en grande partie, l'homogénéité des résultats obtenus. La réalisation de séquences de déformation à des niveaux de température particuliers suivies ou non de refroidissements contrôlés permet, par ailleurs, d'obtenir des microstructures à très hautes caractéristiques, par recristallisations successives. Ces méthodes, décrites sous l'appellation de traitements thermomécaniques. Les traitements thermiques proprement dits s'effectuent sans déformation et correspondent d'une part aux mises en solution, stabilisation ou précipitation qui vont permettre d'adapter la

microstructure initiale et de déterminer les propriétés en service et, d'autre part, aux traitements d'adoucissement et de relaxation des contraintes liées au forgeage, au soudage, à l'usinage, etc. La structure métallurgique des superalliages est composée de plusieurs phases, dont les deux premières sont les principales :

- une matrice austénitique γ cubique à face centrée, stable dans le cas des alliages fer/nickel pour une teneur supérieure à 25 % de Ni ;
- une phase durcissant intermétallique ordonnée γ' $[\text{Ni}_3(\text{Ti}, \text{Al})]$ ou $[\text{Ni}_3 \text{Nb}]$ représentant 30 à 70 % de fraction volumique, de carbures primaires le plus souvent de type MC (ou parfois M_6C), répartis aléatoirement, et secondaires M_{23}C_6 , situés préférentiellement aux joints de grains. Des borures s'ajoutent ou se substituent quelquefois au M_{23}C_6 ;
- des phases secondaires TPC (Topologically Compact Phases) sous forme d'aiguilles ou de plaquettes, telles que les phases σ , δ ou de Laves, fragiles et généralement nocives ;
- des oxydes fins dispersés dans le cas particulier des alliages à dispersion d'oxydes [15].

Les traitements thermiques seront organisés pour favoriser l'état métastable de structure biphasée

Les traitements de surfaces par revêtement :

II .1 /Introduction :

La notion de traitement de surface par revêtement est une technique de plus en plus utilisée. Elle consiste à augmenter les propriétés à la surface par dépôt d'un film très mince (de quelques \AA à quelques microns). Cette couche mince appelée revêtement, peut être utilisée afin d'augmenter la dureté, d'assurer la protection contre la corrosion ou d'améliorer les propriétés physiques particulières ou, en fin dans un cadre décoratif.

Les qualités recherchées peuvent être très différentes selon l'application considérée et la destination de l'utilisation de la pièce.

Actuellement L'industrie présente de différents procédés et techniques de dépôt de revêtement, parmi les quels on peut citer :

- Revêtement par voie électrolytique.
- Revêtement par voie chimique.
- Revêtement par évaporation.

- Revêtement par pulvérisation.

Les revêtements des superalliages à base de nickel :

La protection des matériaux constitutifs des pièces des parties chaudes des turboréacteurs repose sur l'élaboration de revêtements permettant l'établissement d'une couche d'oxyde adhérente, compacte et à croissance lente. Les oxydes présentant ces caractéristiques sont la chromine, la silice et, pour les parties les plus chaudes, surtout l'alumine.

Le rôle des revêtements des superalliages est de protéger le superalliage, en formant en surface, par interaction avec l'oxygène de l'atmosphère environnante, une couche d'alumine dense, stable, adhérente et continue, qui inhibe la diffusion d'espèces endommageant. Comme l'oxygène, l'azote et le soufre dans le superalliage (ou substrat).

Les premiers revêtements des superalliages développés sont les aluminures de diffusion simples ou modifiés [6-15] dont le procédé d'élaboration, entre le substrat et le revêtement.

Les revêtements des superalliages de diffusion sont nommés ainsi car leur élaboration est basée sur un processus de diffusion, permettant la formation de la phase β -NiAl. Ils sont produits soit par diffusion d'aluminium vers le substrat, soit par diffusion de nickel vers la surface.

La direction de diffusion des espèces est déterminée par l'activité de l'aluminium, la température et le temps [6, 16].

L'intérêt des revêtements des superalliages repose sur leur aptitude à former, dans les conditions d'utilisation, des oxydes plus protecteurs que ceux formés par l'alliage de base.

Cependant, le choix d'un procédé de dépôt implique de considérer :

- la compatibilité chimique avec le substrat
- la tenue mécanique du système composite
- la géométrie du substrat

Revêtements basse activité

Lorsque les paramètres (concentration en aluminium, température, etc.) sont choisis de telle sorte que l'activité de l'aluminium soit faible, l'aluminium se dépose en surface.

Simultanément, le nickel diffuse depuis le substrat vers l'extérieur et une couche de β -NiAl se forme en surface.

La diffusivité du nickel est beaucoup plus grande que celle de l'aluminium.

Dans la phase β -NiAl, tant que la teneur en aluminium est inférieure à 51%at (**Figure I- 3**) [19].

La teneur maximale en aluminium dans un revêtement à basse activité ne sera donc pas plus élevée que 51%at. de par leur mode de croissance, ces revêtements ont aussi une teneur plus

faible en éléments d'alliage que les revêtements haute activité et sont élaborés à plus Haute température (980 à 1090°C)

Revêtements haute activité

Ces revêtements sont formés par diffusion de l'aluminium vers le substrat, composé des Phases γ et γ' -Ni₃Al, à une température relativement faible (entre 700 et 900°C) [15]. Cet Enrichissement en aluminium, des phases du substrat, provoque l'apparition de la phase Fragile δ -Ni₂Al₃, comme le prévoit le diagramme de phases Ni-Al (**Figure I- 2**). la diffusivité Du nickel dans δ -Ni₂Al₃ est négligeable devant celle de l'aluminium [17].

Ainsi une quantité Importante d'aluminium peut être introduite de plus en plus profondément dans le matériau. Mais à cause de la croissance interne du revêtement vers le superalliage, des éléments D'alliage à diffusion lente, tels que W, Mo, Ta, Cr ou Re, vont se retrouver sous forme de Précipités ou bien en solution solide dans le revêtement. après aluminisation, le matériau Subit un traitement thermique entre 1040 et 1095°C qui entraîne la diffusion du nickel depuis Le substrat vers la surface, provoquant ainsi la transformation de la phase fragile δ -Ni₂Al₃ en β -NiAl. Ce traitement thermique est suivi d'un traitement de vieillissement à plus basse Température qui permet de restaurer la microstructure initiale du superalliage.

Dépôt d'aluminium :

Comme on peut l'observer sur les diagrammes de phase Ni-Al L'aluminisation du nickel peut conduire à la formation de différentes Phases intermétalliques : Al₃Ni, Ni₂Al₃ et NiAl ainsi qu'à des solutions solides.

Les aluminisations sur les alliages base nickel sont généralement répertoriées en deux Grandes classes : L'aluminisation « haute activité » et L'aluminisation « basse activité » .

La projection thermique :

Les projections thermiques sont des procédés particuliers de dépôt caractérisés par une injection de particules solides dans un gaz ou mélange de gaz à haute température où elles sont chauffées, accélérées et projetées sur le substrat à revêtir. Plusieurs types de projections thermiques sont actuellement utilisés.

Les aubes de turbine à gaz représentent un très bon exemple d'utilisation des traitements de Surface permettant un revêtement dur et résistant à l'usure [3].

Il existe plusieurs procédés Ou méthodes permettant d'améliorer les propriétés en surface d'une aube de turbine à gaz.

Certains Procédés plus conventionnels comme la cémentation, la nitruration et le placage ; la métallisation Permettent d'améliorer les propriétés des aubes de turbine à gaz depuis plus d'un

siècle. au cours des années 60, l'avènement du dépôt chimique en phase vapeur (CVD : chemical vapor deposition) et du dépôt physique en phase vapeur (PVD : physical vapor deposition) a permis de déposer un revêtement protecteur très dur [3]. Plus récemment, des techniques de dépôt moderne comme la projection thermique et le laser prennent de plus en plus de place dans ce marché [3]. Comparativement aux procédés CVD et PVD, la projection thermique a un taux de déposition élevé, puisque ce procédé se caractérise par une forte enthalpie. Les procédés de projection thermique se regroupent sous trois grandes catégories.

La projection à la flamme, la projection à arc électrique et la projection plasma. La projection à froid peut être considérée comme une variante de la projection thermique. Cependant, elle ne fait pas partie des trois grandes catégories de la projection thermique, car elle se caractérise comme étant un procédé d'énergie cinétique.

Caractéristiques	Projection Flamme poudre	Projection flamme fil	Projection HVOF	Projection par canon à détonation	Projection arc électrique	Projection plasma
Source de chaleur	Flamme oxy-acétylénique	Flamme oxy-acétylénique	Flamme oxy-acétylénique	Flamme oxy-acétylénique	Arc électrique	Plasma
Température de flamme (°C)	3 000	3 000	3 000	3 000	6 000	12 000
Transport des particules	Gaz flamme	Air comprimé	Gaz flamme	Gaz flamme	Air comprimé	Gaz plasma (Ar/H)
Vitesse des particules (m/s)	40	150	700	950	250	200
Forme du matériau d'apport	Poudre	Fil ou cordon	Poudre	Poudre	Fil	Poudre
Rendement moyen (%)	50	70	70	70	80	70
Épaisseur (mm)	0,1 à 1,5	0,1 à 1,5	0,05 à 1	0,05 à 1	0,2 à 3	0,05 à 1,5
Exemple de matériaux d'apport	-Métaux -Céramiques -Carbures dans matrice métallique	-Métaux -Céramiques -Carbures dans matrice métallique	-Métaux -Carbures	-Métaux -Céramiques	-Métaux	-Métaux -Céramique -Carbures

Tableau I.2. Caractéristiques des différents procédés de projection thermique.

La cémentation :

La cémentation superficielle des aciers, s'effectue en phase γ .

Le procédé le plus ancien consistait à mettre en contact l'acier avec du graphite ou un carbonate. Plus récemment des procédés de cémentation en atmosphère contrôlée, (CO , CO_2 , CH_4 , C_3H_8) se sont développés.

La décomposition des hydrocarbures présents à la surface du métal fournit le carbone recherché. Après traitement de cémentation, l'acier est trempé, ce qui transforme la couche cémentée en martensite de haute résistance mécanique. Les traitements de carburation en phase gazeuse ont été récemment appliqués pour la protection par une couche de carbure, protectrice et très dure.

pour les métaux réfractaires oxydables. Donc, on a pour but de faire absorber, superficiellement du carbone par l'acier doux de façon à constituer un alliage hétérogène ayant à la surface une teneur en carbone. [7]

La cémentation comporte généralement deux étapes : l'enrichissement en carbone d'une couche superficielle de la pièce, suivie d'une trempe qui conduit à la dureté voulue. L'enrichissement en carbone est l'étape chimique du traitement. Par mise en contact avec un milieu cémentant, on forme à la surface de l'acier une couche superficielle plus au moins profonde enrichie en carbone. Il y a en fait deux phénomènes qui interviennent : une réaction chimique qui fournit du carbone à la surface du métal et un phénomène de diffusion dans la zone superficielle du métal de la surface vers l'intérieur. La solubilité du carbone en phase austénitique étant plus élevée en phase austénitique qu'en phase ferritique et le coefficient de diffusion augmente avec la température. Le traitement d'enrichissement a lieu à l'état austénitique vers 900-950°C.

Le traitement de cémentation utilise trois types de ciments :

- Cément solide
- Cément liquide
- Cément gazeux

Cémentation solide

L'agent de saturation dans cette opération est un ciment solide, le plus souvent le charbon de bois. Pour accélérer la cémentation, on ajoute au charbon des activateurs dont le carbonate de baryum $BaCO_3$ et le carbonate de sodium Na_2CO_3 à raison de 10 à 40 % du poids du charbon. Le ciment solide largement utilisé se compose de charbon de bois, de 20 à 25% de $BaCO_3$ et jusqu'à 3.5% de $CaCO_3$. Les pièces sont placées dans des caisses soudées en acier, ou plus rarement, en fonte. La température de cémentation varie de 900 à 940 °C.

La cémentation liquide :

La cémentation en caisse est le procédé le plus couramment utilisé. Les pièces à revêtir sont immergées dans une caisse contenant une poudre constituée d'un mélange d'aluminium, un halogénure (NaF, NH_4Cl , NaCl) agissant comme activateur et une poudre inerte (généralement Al_2O_3).

La caisse est alors remplie d'un gaz inerte (typiquement l'argon), et chauffée à haute température. La poudre d'aluminium réagit avec l'activateur pour former un halogénure gazeux qui vient se décomposer à la surface de la pièce à traiter.

Les espèces peuvent alors diffuser, la direction de la diffusion est déterminée par l'activité de l'aluminium et la quantité d'aluminium introduite dépend de la composition du pack [20].

Les réactions mises en jeu lors de la cémentation en caisse pour les procédés haute et basse activités sont décrites schématiquement à la **Figure I- 6** :

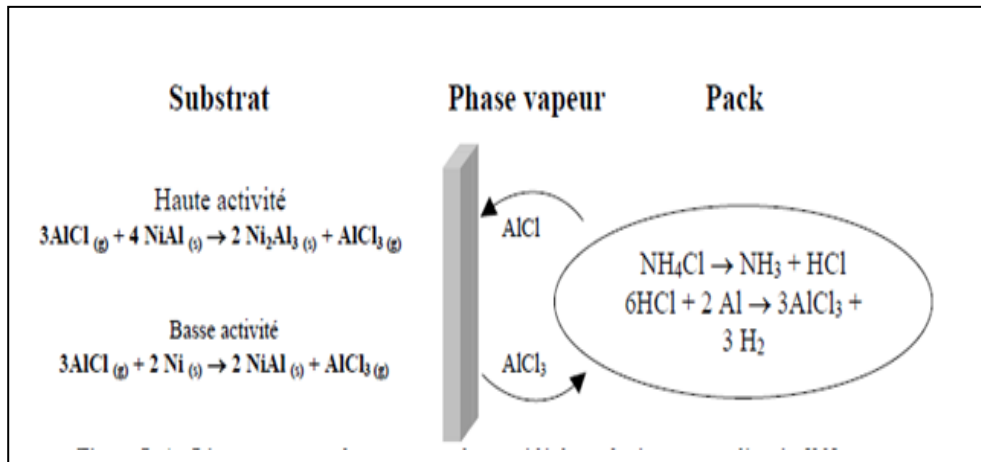
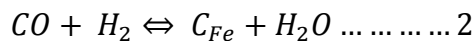
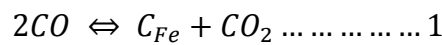


Fig. I.6 : les réactions pour les procédés haute et baisse.

Cémentation gazeuse

Dans les atmosphères de cémentation conventionnelles à base de gaz endothermique ou d'instillation de liquide organique, les mélanges gazeux sont constitués approximativement de 20 à 33% de CO, 40 à 65% de H₂, 0 à 40% de N₂ et moins de 1% de CO₂ et H₂O.

Le carbone est libéré à la surface du métal selon les réactions globales suivantes:



C_{Fe} : est le carbone dissous dans l'austénite.

Tableau I.3. La réalisation de l'enrichissement

État	Les porteurs de carbone	Les activateurs
Cément solide	Le coke Le carbone de bois	Carbonate de baryum
Cément liquide	Le cyanure de sodium	Des sels contenant de chlorures alcalins
Cément gazeux	Gaz de ville Gaz naturel Méthane	

La sulfuration :

La sulfuration ou cémentation par le soufre, confère, à la surface des pièces traitées Une haute résistance à l'usure et à la fissuration sous accroissement de dureté. Pour sa réalisation, les pièces sont chauffées dans un creuset contenant du cyanure et des sels Dévers du soufre, qui sont portés à une température inférieure au point de transformation AC 1 des aciers à traiter. Le refroidissement s'effectue dans de l'eau très chaud (80°C).

Après traitement, les pièces sont recouvertes d'un dépôt rugueux de sels solidifiés que L'on peut enlever par brassage ou sablage.

Ce type de traitement de surface est surtout utilisé pour les pièces de frottement, pièces qui Servent de contacte mobile. Il peut être aussi appliqué à tous les alliages ferreux, car il ne Provoque pas de déformations, et cela en raison de la température moyenne de chauffage.

La nitruration :

A la différence de la carburation basée sur une mise en solution, la nitruration des aciers tend à réaliser la formation d'un composé superficiel, de nitrure dont les propriétés mécaniques sont élevées. La nitruration s'effectue à température modérée (500 à 650°) dans des atmosphères contenant de l'azote.

Il existe plusieurs variantes de traitements de nitruration. Les plus utilisées industriellement sont la nitruration en phase liquide et la nitruration ionique (assistée par plasma) . Dans la variante, traitement en phase gazeuse, les bains de sels sont composés par des mélanges de cyanates et de cyanures alcalins, et l'élément actif est le cyanate qui se transforme en carbonate avec formation d'azote naissant.

Les avantages et les propriétés des pièces après le traitement de nitruration peuvent être Discutés de la façon suivante :

- La dureté des pièces nitrurées est supérieure à celle des pièces trempées.
- La résistance à l'usure par suite de cette dureté s'améliore, la qualité des frottements est Améliorée, entraînant une diminution des risques de grippage.
- Les aciers nitrurés sont inoxydables à l'air humide et à l'eau douce.
- La nitruration s'effectuant à température relativement basse, aucune déformation des Pièces n'est à craindre.
- La couche nitrurée présente le plus souvent une résistance à la corrosion et à la fatigue.

Il existe trois familles de procédés de nitruration :

la nitruration en bains de sels fondus, la nitruration en phase gazeuse (réalisée à partir d'ammoniac à la pression atmosphérique) et la nitruration assistée par plasma (réalisée à partir d'un plasma froid).

La nitruration plasma des superalliages :

Dans le domaine de la nitruration plasma ; l'évolution à la vois la plus récente de la plus importante concerne les aciers inoxydables austénitiques (ASS = Austenitic StainlessSteel) ainsi que les alliages à base Ni austénitiques. Les modifications induites aussi bien sur le plan microstructural que sur le plan des propriétés mécaniques et chimiques dépendent des températures et durées des traitements.

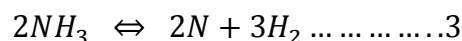
La carbonitruration :

Il s'agit d'un traitement mixte qui s'effectue par adjonction d'ammoniac à l'atmosphère de cémentation.

Le phénomène principal est la carburation, associée à la nitruration qui intervient pour provoquer un durcissement, ainsi on obtient un complément de protection contre l'usure et la corrosion.

Pour cette opération, les pièces sont chauffées pendant 2 à 10 h jusqu'à 850 ou 860 °c dans un milieu gazeux composé de gaz carburant et D'ammoniac .

L'ammoniac NH₃ introduit dans le four avec l'atmosphère carburante se dissocie sous l'effet thermique selon la réaction nette suivante :



Il est établi que la diffusion simultanée du carbone et de L'azote accélère la diffusion du carbone.

La vitesse de la progression des Couches carbonitrurée et cémentée à la profondeur de 0.5 mm est

Pratiquement la même, bien que la température de nitrocarburation soit Presque de 100°C inférieure. L'épaisseur ordinaire d'une couche carbonitrurée est de 0.2 à 0.8 mm.

Pour la carbonitruration on recommande d'employer une atmosphère endothermique contrôlée à laquelle on ajoute de 3 à 15 % de gaz d'éclairage non traité et de 2 à 10% de NH₃, ou dans le cas d'un four à cuve, un ciment liquide, la triéthanolamine (C₂H₅O)₃N, introduite dans l'espace utile du four sous la forme de gouttes.

La métallisation :

La métallisation est un terme couramment utilisé pour décrire les revêtements métalliques appliqués par projection thermique. Pour la protection des éléments en acier contre la corrosion, cela désigne la pulvérisation de d'aluminium en fusion sur les surfaces en acier. Dans ce procédé, le métal est amené sous forme de fil ou de poudre vers un pistolet d'application où il est fondu et projeté sur la surface à protéger. Au contact avec la surface, les dépôts d'aluminium de refroidissent instantanément, ce qui crée une barrière protectrice solide qui isole le substrat en acier de l'environnement.

La métallisation compte sur une liaison mécanique entre le l'aluminium et l'acier pour former le revêtement protecteur. Puisque cette liaison est mécanique, une préparation de la surface adéquate est essentielle pour assurer l'efficacité du revêtement à long terme.

La métallisation protège l'acier de deux façons :

1-protectrice :

Le revêtement pulvérisé constitue lui-même une robuste barrière protectrice entre l'environnement et la surface d'acier, et évite le contact avec l'eau, qui causerait l'oxydation.

2- Protection cathodique :

L'efficacité de la métallisation résulte aussi d'une réaction électrochimique entre l'acier et le zinc, qui conduit ces revêtements à base de zinc à se « sacrifier » pour protéger l'acier contre tout dommage. Cette protection sacrificielle est comparable à la protection que procurent les apprêts riches en aluminium.

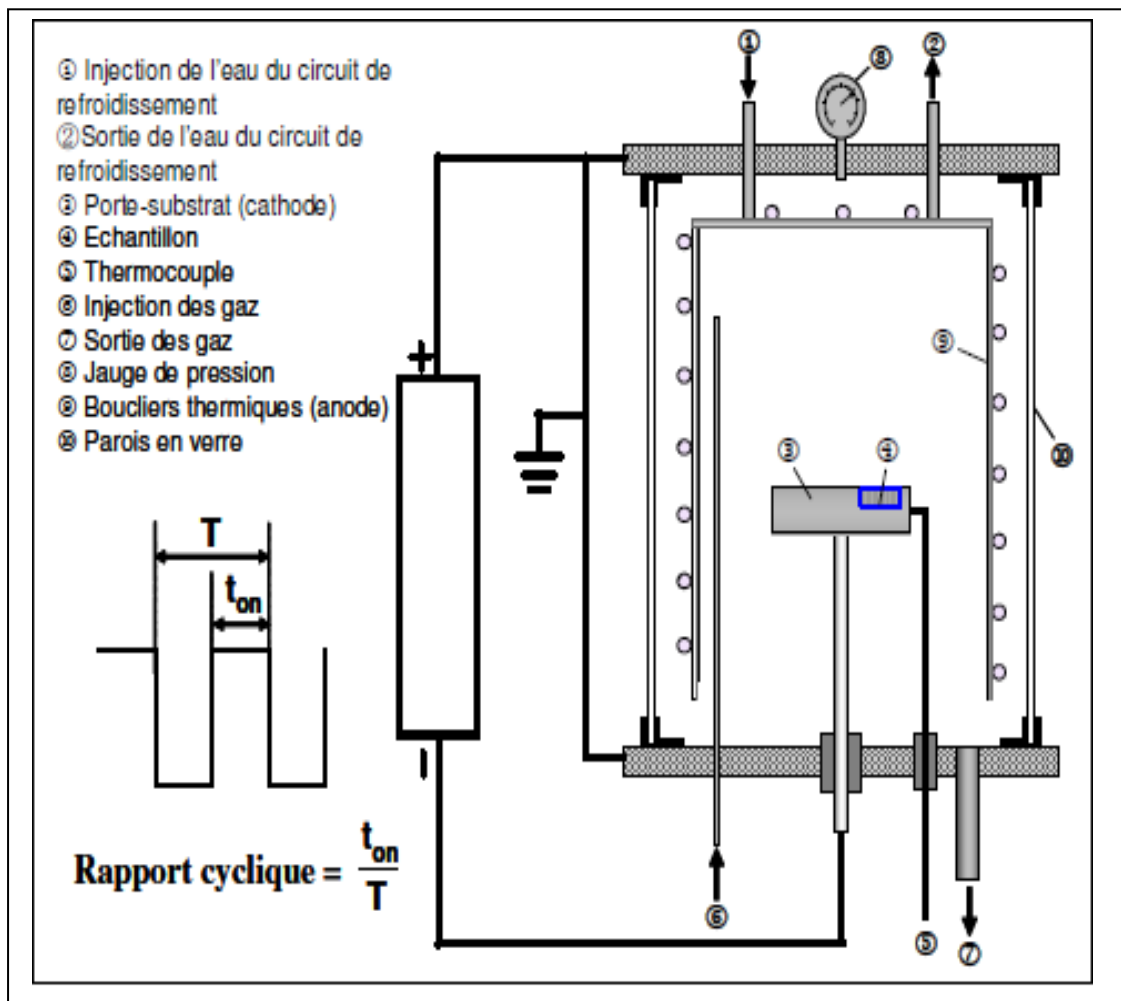


Figure I.7. : Schéma de principe d'une enceinte de nitruration assistée par plasma et forme des impulsions délivrées par un générateur pulsé.

CHAPITRE II

Les procédés projection thermique

Chapitre II : Les procédés de revêtement par projection thermique

II.1.Introduction :

Dans le domaine des revêtements et traitements de surface, pris au sens large, les notions de surface et d'interface ont un rôle majeur, En fonction de leurs caractéristique, ces deux notions conditionnent les propriétés fonctionnelles d'une pièce en services : résistance à la fissuration, à la corrosion, à la fatigue mécanique au choc thermique, à l'usure et au frottement, dureté, aspect extérieur. La science des surfaces à connu un important essor au cours de ces dernières décennies. Bien que conscient, depuis longtemps, des différences entre les propriétés surfaciques et volumiques, ce n'est que depuis peu de temps qu'elles sont réellement prises en compte de mises à profit. Le développement de nouvelles méthodes de caractérisation, qui sont devenues de plus en plus sensibles et performantes, a permis de faire d'énormes progrès sur la connaissance des surfaces, notamment, en permettant d'établir des relations entre les caractéristiques d'une surface et le propriétés d'emploi (adhésion tribologie, fatigue de contact, corrosion ...).

Apparue, dès le début du siècle dernier, la projection thermique a joué un rôle très important dans l'évolution de la science des surfaces depuis près de 100 ans. Cette technique consiste à projeter en fines particules, sur une surface préalablement préparée, un produit d'apport solide qui est fondu par l'intermédiaire d'un pistolet ou d'un chalumeau adéquat. Elle peut, en réalité, être considérée comme un système très complexe ou de nombreux paramètres interviennent et interagissent.

Jusque dans les années 1920, la projection thermique (appelée successivement shoopage de nom de son inventeur le Docteur Shoop puis métallisation) avait essentiellement des applications pour la protection contre la corrosion et pour la décoration. Son utilisation s'est développée, après la seconde guerre mondiale suite aux pénuries de métaux et de pièces de rechanges. Les industriels de l'époque ont utilisé la projection thermique pour restaurer les côtes initiales de pièces mécanique usées. Au cours des années qui ont suivi, le champ d'application de la projection thermique s'est de plus diversifié, avec entre autres, l'apparition du canon à détonation (fin des années 1950) qui a permis des avancées dans le domaine de l'usure et du frottement et avec celle des premiers systèmes de projection à la troche plasma (dans les années 1960) qui ont été très utilisés dans l'industrie aéronautique.

Le développement actuel de la projection thermique est dû essentiellement aux industries de point (aéronautique et automobile, biomédicale, microélectronique..ect). Il est, d'ailleurs, de plus

difficile de trouver un secteur industriels où l'on n'a pas recours à l'utilisation de ce procédé. Citons par exemple le cas de l'industrie informatique qui utilise de plus en plus fréquemment des implants revêtus de titane et/ou d'hydroxyapatite, dont l'organigramme illustre une explication exhaustive.

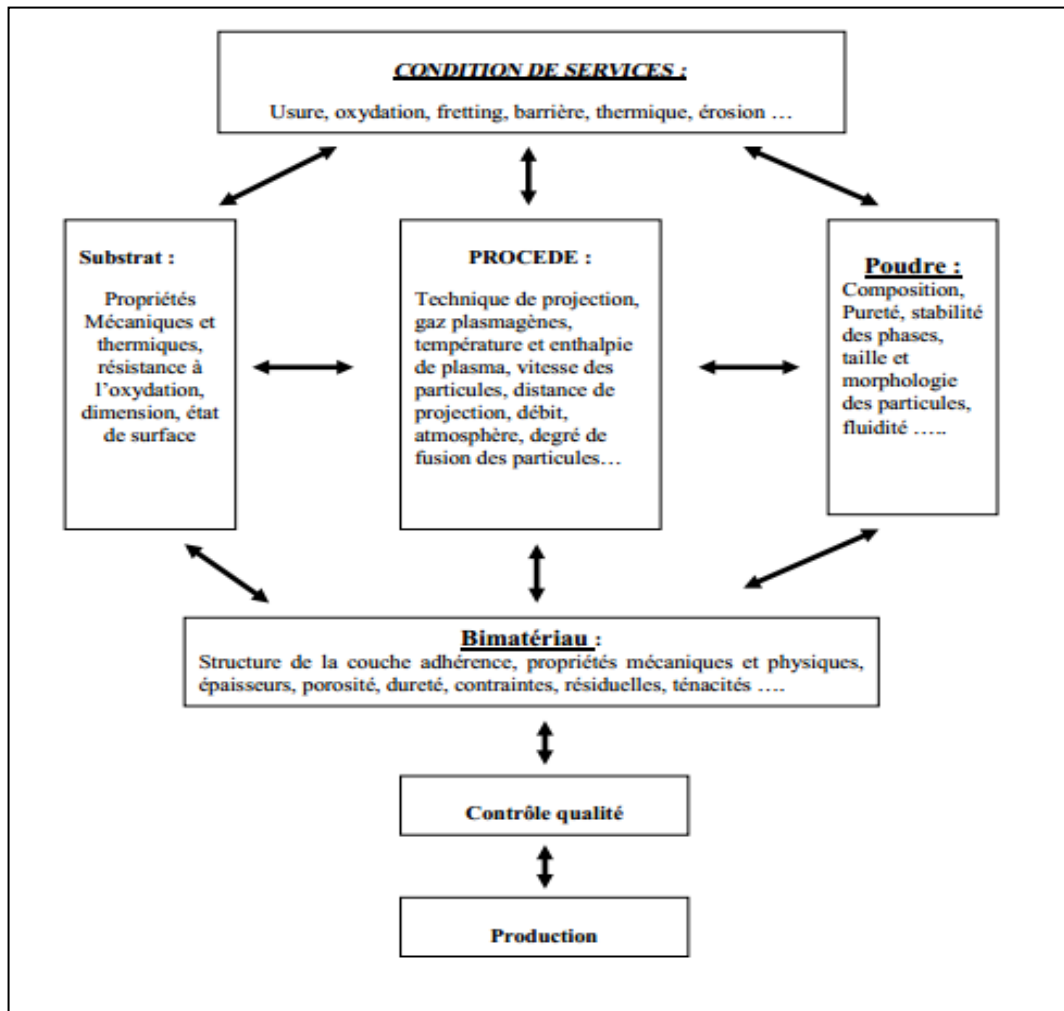


Figure- II.1 : Facteur d'influence de la projection thermique.

Le développement rapide des revêtements tribologiques, lors de ces dernières années est essentiellement dû à l'apparition de nouvelles méthodes de dépôt qui permettent d'obtenir des propriétés physiques (morphologie, composition, structure et adhérence) jusque-là impossibles à atteindre. La technique qui est à la base de cet accroissement d'intérêt pour les revêtements, est sans aucun doute la technique de projection à la torche plasma.

Rickerby et Matthews proposent une la classification des différents procédés de dépôt en trois catégories [1]:

- Les procédés de projection thermique (fusion complète ou partielle).

- Les procédés en phase gazeuse
- Les procédés par voie humide

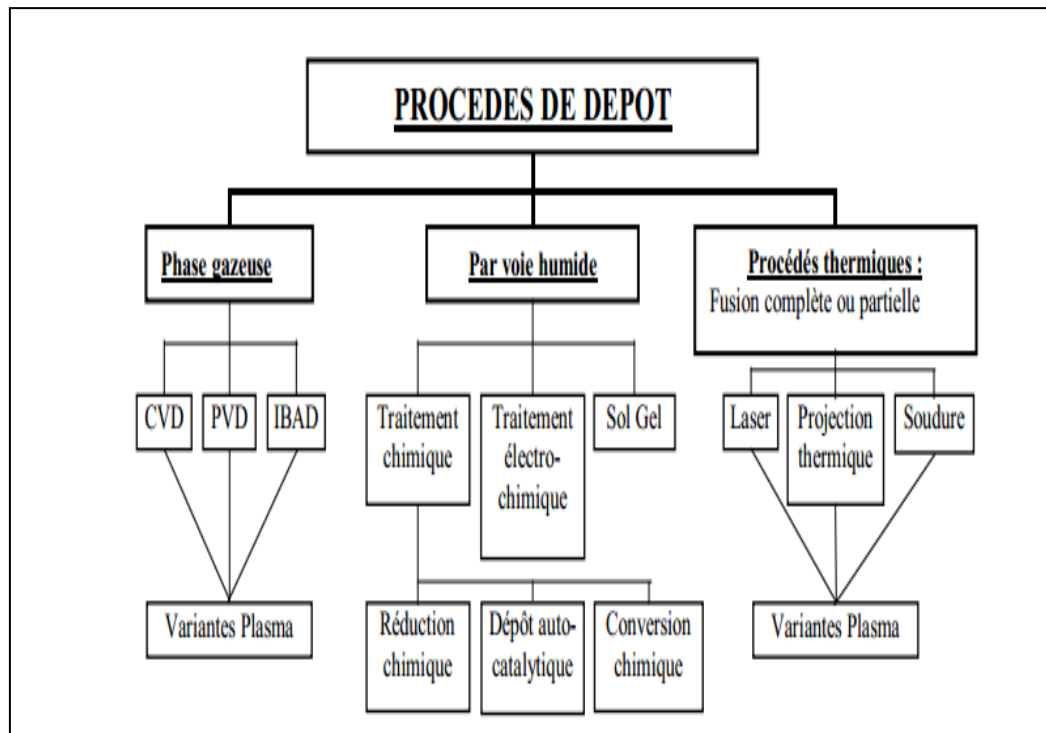


Figure- II.2 : Les différents procédés de revêtement des surfaces

Dans cette figure et dans tout le reste du document, nous allons utiliser les abréviations suivantes :

- PA = assisté par plasma (Plasma Assisted)
- CVD = dépôt chimique en phase vapeur (Chemical Vapour Deposition)
- PVD = dépôt physique en phase vapeur (Physical Vapour Deposition)
- IBAD = dépôt assisté ioniquement (Ion Beam Assisted Deposition)
- II = implantation ionique (Ion Implantation)

Dans ce chapitre, nous allons décrire d'une manière synthétique les différents procédés de projection thermiques (procédés par combustion et par décharges électriques).

II.2. Les procédés de projection thermique :

Dans ce paragraphe, nous allons traiter à la fois les procédés par combustion (projection à la flamme et projection par combustion continue ou discontinue) et les procédés par décharge électrique (projection à l'arc et projection plasma). Il est évident que chacun de ces procédés couvre un vaste domaine, cependant le but premier de ce chapitre étant de présenter la majeure

partie des procédés de projection thermique, nous allons nous contenter d'en décrire brièvement les principales caractéristiques.

II.2.1. Généralités :

La projection thermique a été inventée en 1909 par Shoop qui eût l'idée d'utiliser un chalumeau oxyacétylénique pour projeter un métal en fusion [15]. Cette technique se développe à partir de 1914 sous le nom de "shoopage" et consiste essentiellement à projeter du zinc et de l'aluminium pour la protection de l'acier.

De nos jours, la projection thermique se caractérise par l'utilisation d'une source d'énergie (combustion ou décharge électrique) en vue de fondre et d'accélérer un matériau fragmenté (avant ou après fusion).

Depuis l'invention d'origine de Shoop de nombreuses évolutions ont permis une diversification et un large accroissement des potentialités de la technique :

- 1911 : Utilisation de l'arc électrique soufflé (Shoop)
- 1951 : Apparition de la projection thermique à la torche plasma (APS, Plasma dyne)
- 1955 : Apparition du canon à détonation (D-Gun, Union Carbide)
- 1983 : Apparition du chalumeau à flamme supersonique: procédé HVOF (High Velocity Oxy Fuel) (Browning).

La projection thermique est de plus en plus utilisée depuis la découverte de son procédé, car elle offre à un utilisateur de nombreuses possibilités d'anoblissement de surface. Un revêtement projeté thermiquement peut améliorer ou modifier les propriétés anticorrosives, anti-usure et anti-frottement, électromagnétiques, thermiques (barrière thermique), esthétiques... De plus, ce procédé déjà universel permet, entre autre, de déposer une très large gamme de matériaux : métaux, céramiques, cermets, polymères, composites... De plus, il est possible de créer des revêtements soit sous forme d'une couche simple à composition unique, soit sous forme de couches multiples à gradient de composition ou de propriétés fonctionnelles. Ainsi, avec ce procédé, on a la possibilité de mettre en place le bon matériau au bon endroit ce qui confère à un tel dépôt le pouvoir de remplir plusieurs rôles simultanément. Une des rares contraintes de la projection thermique est liée à la géométrie de la pièce à revêtir. En effet, la zone où l'on doit déposer le revêtement doit être suffisamment accessible.

II.2.2. Principe de base et formation du dépôt :

La projection thermique consiste à fondre et à accélérer un matériau afin qu'il puisse s'étaler sous forme de gouttelettes sur un substrat et y former un dépôt par empilements successifs.

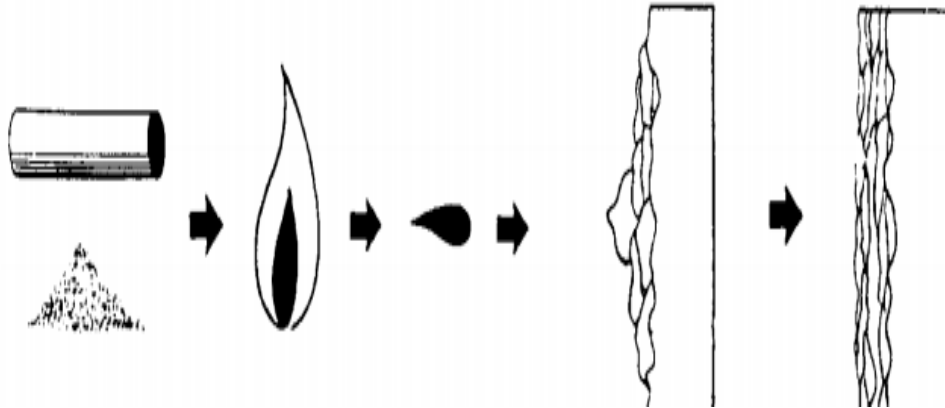


Figure- II.3 : Principe de la projection thermique

La source d'énergie doit donc être suffisamment puissante pour fournir l'énergie nécessaire à la fusion rapide du matériau et délivrer un jet gazeux susceptible de véhiculer les particules. Les différentes sources d'énergie utilisables en projection sont présentées sur la figure I-5.

Quant au matériau, il doit posséder un point de fusion à une température suffisamment éloignée de la température de décomposition éventuelle (de 200°C au moins) ou bien pouvoir être introduit dans une matrice fusible. Ce matériau peut se présenter sous forme d'un fil ou bien d'une poudre, laquelle est généralement utilisée en vrac ou sous forme d'un cordon qui s'apparente alors à un fil.

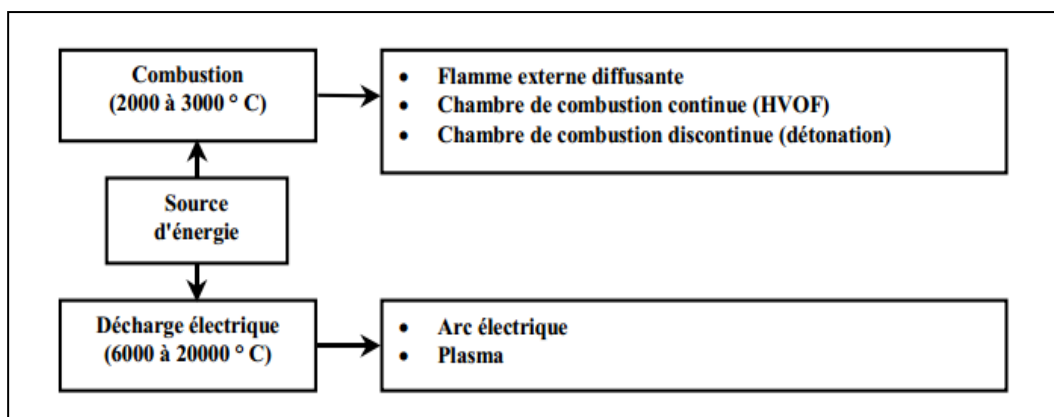


Figure- II.4 : Les différentes sources d'énergie en projection thermique

La formation du revêtement est obtenue par empilement des particules sur le substrat. L'équilibre entre l'énergie cinétique et l'énergie thermique des particules joue à ce niveau un rôle prépondérant. En effet, pour ces deux types d'énergie, l'excès est aussi néfaste que le défaut. Une

particule liquide arrivant à grande vitesse sur le substrat se fragmente et donne naissance à des couches poreuses. Une particule solide rebondit sur le substrat et diminue considérablement le rendement de projection et est aussi une des origines de la présence de contraintes résiduelles dans le dépôt. Il est donc nécessaire d'avoir une bonne répartition entre ces deux énergies de façon à obtenir un bon écrasement des particules.

II.2. 3.Les procédés par combustion :

Une combustion est une réaction chimique entre un carburant (combustible) et un comburant (oxygène) dont l'intérêt est d'être exothermique. Une tuyère est un conduit dans lequel on augmente la vitesse en diminuant la pression du fluide circulant. L'association de ce principe chimique et de ce principe physique permet la réalisation d'une torche de projection à la flamme ou de projection à chambre de combustion.

II.2.3.1. La projection à la flamme

La projection thermique à la flamme permet de déposer des matériaux soit sous forme de fil soit sous forme de poudre grâce à l'utilisation de chalumeau classique comme ceux présentés sur la figure I-7. Cette technique est l'une des plus utilisées dans le monde du fait de sa simplicité de mise en œuvre et de son faible coût.

Ce chalumeau fonctionne sur le principe de la flamme diffusante. Les réactifs utilisés diffusent l'un dans l'autre durant la réaction chimique.

Les principales limitations de cette technique sont : la température maximale atteignable, la faible vitesse du jet, la faible vitesse de combustion... Toutefois, on peut améliorer les performances en réalisant la réaction dans un milieu confiné afin d'augmenter la pression d'introduction des gaz.

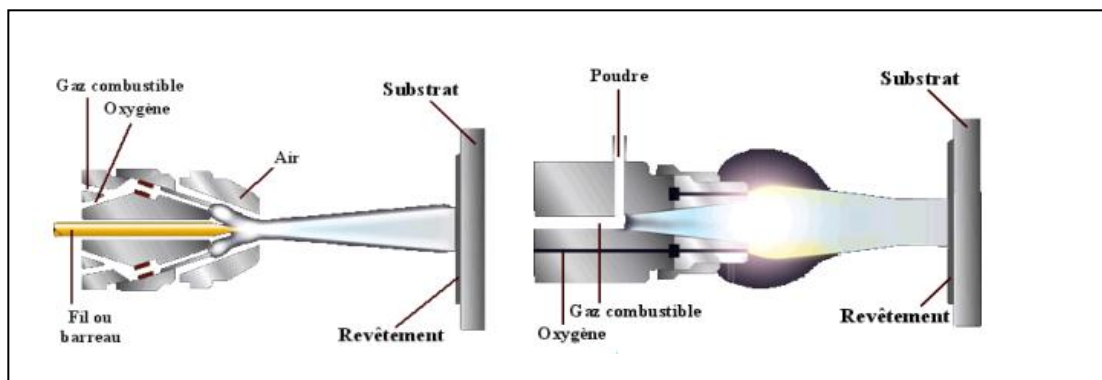


Figure- II.5 : Chalumeau classique à fil (à gauche) et à poudre (à droite)

La projection à la flamme peut être appliquée à la plupart des métaux mais elle n'est généralement pas recommandée pour les matériaux non ferreux ayant un point de fusion inférieur à 1100°C. L'échelle des épaisseurs en principe accessibles est de 1,5 à 6 mm. Les revêtements obtenus sont essentiellement utilisés pour leur résistance à l'usure abrasive et ils contiennent, dans la plupart des cas, des carbures de tungstène, de chrome ou de bore dispersés dans une matrice de fer, de cobalt ou de nickel.

II.2.3.2. La projection par combustion discontinue : (détonation) ou continue (HVOF)

Le plus ancien procédé de projection discontinue est le canon à détonation, connu sous le nom de D-, qui date de 1955 et qui a été mis au point par Union Carbide. Ce procédé qui utilise de l'acétylène comme combustible fonctionne sur le principe d'un moteur à explosion dans lequel le piston est remplacé par la poudre à projeter. Le canon est constitué d'un fût dans lequel sont introduits la poudre et le mélange gazeux. Ensuite, grâce à une étincelle produite par une bougie, on enflamme le mélange ce qui génère une onde de choc (3000 m. s^{-1}) qui entraîne la poudre à une vitesse de l'ordre de 900 m. s^{-1} . Chaque tir permet de déposer une épaisseur de quelques micromètres sur une surface équivalente au diamètre du fût à une cadence d'environ 10 Hz.

Depuis quelques années, de nouveaux procédés basés sur le même principe sont apparus. Ils présentent quelques différences notables, par rapport au procédé précédent, dans le débit gazeux, la distribution des poudres ou d'autres caractères particuliers. Ils ont en commun, une forte accélération communiquée aux particules de matière ce qui peut engendrer des vitesses de l'ordre de Mach 5.

La projection par combustion continue est quant à elle basée sur le principe d'un moteur de fusée. Bien que ce principe soit connu depuis de nombreuses années, ce n'est qu'en 1983 que Browning développe un système de projection à combustion continue sous pression : le Jet- que l'on nomme plus communément procédé HVOF (High Velocity Oxy Fuel).

En fait, les différences qui séparent le D-, le Jet-, le Mach- et le Fare- (qui sont les quatre procédés les plus répandus) s'effacent devant le caractère commun qui se retrouve dans les dépôts tous denses, durs, épais et très adhérents. C'est la répartition entre l'énergie cinétique et l'énergie thermique qui constitue la principale différence entre les procédés supersoniques et le procédé plasma.

Le principe de base du procédé HVOF est un jet à combustion interne (rocket) qui donne des vitesses de gaz supersoniques. La détonation se produit dans un mélange de deux gaz : un comburant, l'oxygène et un carburant dont la nature peut varier (propane, propylène ou mélange à l'acétylène). La vitesse de la flamme ne devient supersonique qu'en sortie de buse (cf. figure I-9).

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. Pour mettre en œuvre l'appareil, il est nécessaire d'allumer une flamme pilote qui permet l'allumage de la flamme principale. Les avantages principaux du procédé HVOF sur la projection au chalumeau sont : l'augmentation de la température des gaz et l'augmentation d'un facteur supérieur à dix de la vitesse d'éjection.

Les procédés hypersoniques ou HVOF permettent de projeter des dépôts allant jusqu'à un millimètre d'épaisseur (voire davantage). On réalise ainsi ce qu'on peut qualifier de revêtement plaqué (ou encore plaquage à la flamme de l'expression anglaise "flameplating").

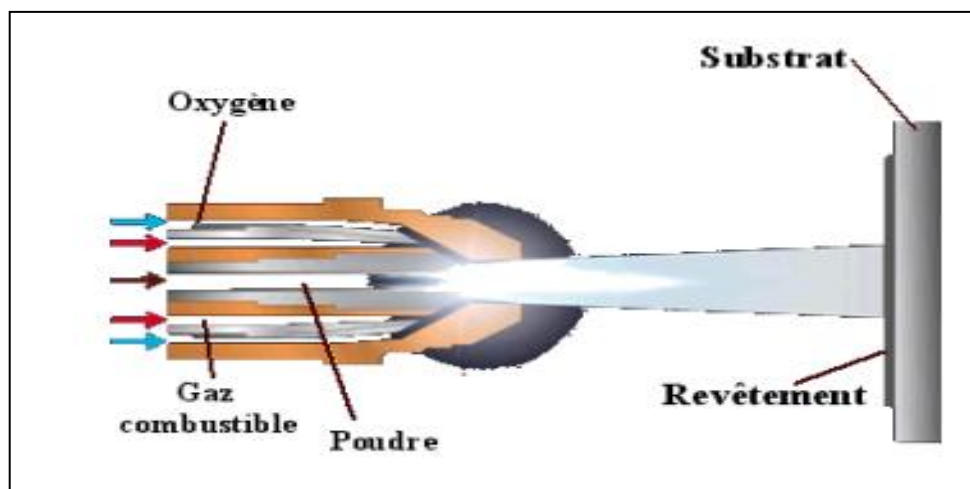


Figure- II.6 : Schéma de principe du procédé HVOF

II.2.3. Les procédés par décharge électrique :

II.2.3.1. La projection à l'arc électrique :

Le procédé de projection par arc électrique est le plus ancien puisque c'est celui qui a été utilisé par Shoop (1911). Il permet de faire fondre un fil et de le projeter sur un substrat à l'aide d'un jet d'air comprimé.

Ce procédé relativement simple reste néanmoins limité car il est applicable uniquement aux matériaux très filables et électriquement conducteurs.

La figure I-10 présente le principe général de la projection à l'arc électrique ainsi qu'une micrographie d'un revêtement en acier au chrome obtenu par ce procédé.

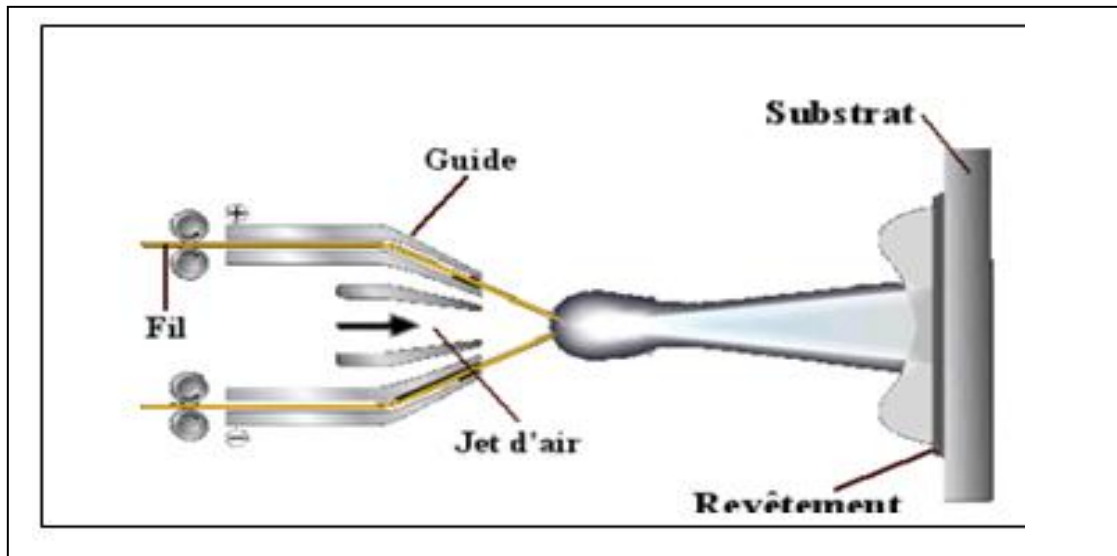


Figure- II.7 : Schéma de principe d'un pistolet à arc électrique

II.2.3.2. La projection plasma :

Dans ce paragraphe, nous allons nous attacher à décrire successivement deux des principaux procédés de projection thermique par plasma :

- La projection plasma atmosphérique : Procédé APS (Atmospheric Plasma Spraying). Ce procédé est le plus ancien (1951), le plus économique et le plus répandu industriellement. Il permet de projeter des céramiques et des métaux peu oxydables
- La projection plasma sous pression réduite : Procédé LPPS (Low Pressure Plasma Spraying) ou VPS (Vacuum plasma Spraying). Ce procédé est apparu en 1975, il permet la projection de matériaux fortement réactifs avec l'oxygène (Titane, alliage de titane, tantale...).

Les caractéristiques générales des revêtements projetés thermiquement par plasma sont liées à quatre règles (vitesses et températures) :

- La température que peut généralement atteindre une torche plasma est de 20000°C.
- Pour qu'un matériau soit projetable, il faut qu'il y ait un écart de 300°C entre sa température de fusion et sa température de sublimation.
- Le substrat reste à une température relativement basse; la structure du matériau revêtu n'est donc pas altérée.

- La vitesse des particules projetées sur la cible est de l'ordre de 300m.s-1(subsonique). Plus on augmente la vitesse, plus on accroît la compacité ainsi que l'adhérence.

II.2.3.2.1. Pistolets plasma :

En 1922, Gerdien invente le générateur de plasma d'arc qui consiste à emprisonner un arc électrique dans un milieu confiné permettant ainsi d'amener les gaz à une température nettement supérieure (entre 12000 et 20000 °C) à celle d'un arc libre (environ6000°C). Le plasma est l'état de la matière dans lequel les composés gazeux sont dissociés et les atomes partiellement ou totalement ionisés.

Cependant, l'apparition des premières torches plasma d'arc soufflé industrielles ne se fera qu'en 1951.

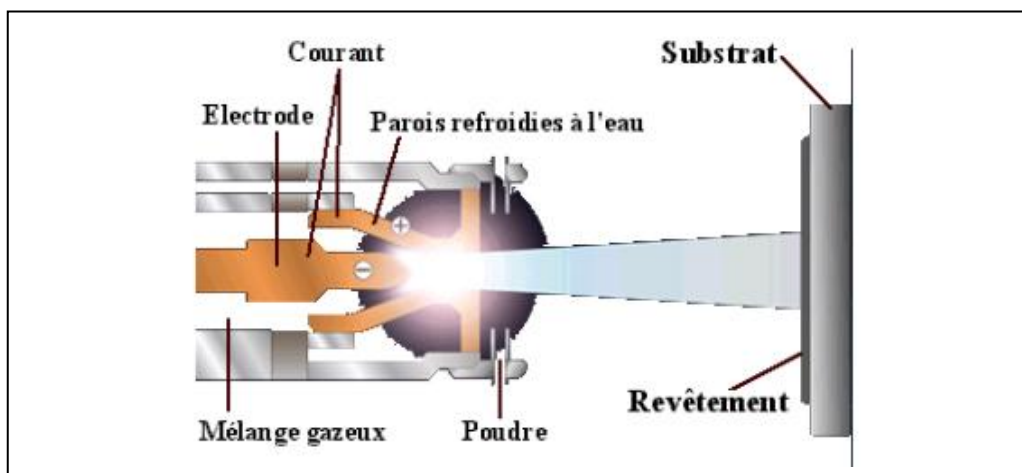


Figure- II.8 : Schéma de principe d'un pistolet plasma

Dans les deux cas de projection précédemment cités, on réalise la projection à l'aide d'un pistolet plasma (cf. figure I-11) qui utilise la décharge d'un arc électrique capable de conduire des courants très intenses entre deux électrodes sous une faible tension. L'arc se distingue des décharges électriques par les propriétés de sa colonne positive. Le plasma qui constitue celle-ci est très proche de l'équilibre (les électrons, ions et atomes ont la même température) et ses propriétés sont les suivantes : fortes densités d'énergie, conductivité électrique, viscosité élevée. Les caractéristiques du jet de plasma en sortie de tuyère (12000 °C et 6000 m.s-1) permettent de fondre la quasi-totalité des matériaux même les plus réfractaires.

Le pistolet à plasma est un appareil dans lequel on injecte un gaz à travers un axe étranglé par des parois froides. Il comporte généralement une cathode et une anode refroidies par une circulation d'eau. On distingue deux modes de fonctionnement pour ce type de pistolet :

- Le pistolet à plasma d'arc interne (ou arc soufflé) : dans ce type de pistolet, le jet de plasma ne conduit pas le courant à l'extérieur de la tuyère.
- Le pistolet à plasma d'arc externe (ou transféré) : dans celui-ci, le jet plasma est entièrement parcouru par le courant, le circuit électrique se refermant sur une anode extérieure (la pièce à traiter), la tuyère étant portée à un potentiel intermédiaire.

II-2.3.2.1. La projection plasma atmosphérique (APS) :

Ce type de projection a lieu à l'air. Le jet plasma aspire l'atmosphère ambiante : ce phénomène est d'autant plus marqué que l'on s'éloigne de la tuyère. On trouve ainsi, dans le cas des métaux, des taux d'oxydes élevés (>30%), et pour certaines céramiques, des changements de composition importants. A l'impact sur le substrat, la présence de gaz entraîne l'inclusion de porosité dans le dépôt. Enfin, la température du substrat doit être limitée pour éviter les phénomènes d'oxydation.

De ce fait, les dépôts ont une adhérence moyenne. Le taux de porosité est très variable et dépend des réglages et des matériaux. Pour certaines applications particulières comme le revêtement d'implants orthopédiques, l'augmentation de la distance de projection permet d'obtenir une porosité pouvant aller jusqu'à environ 20%. Ce pourcentage voulu est nécessaire pour l'ancrage biologique des prothèses dans les tissus osseux. Habituellement, les valeurs du taux de porosité des dépôts obtenus par APS se situent entre 4 et 6%. Dans les meilleures conditions de projection, on peut atteindre une porosité de 2%. L'épaisseur minimale du dépôt, suivant la granulométrie de la poudre, est de 50 à 100 μm . On peut parfois faire des dépôts de plusieurs mm.

II-2.3.2.2. La projection plasma à pression réduite (LPPS) :

Lorsque la couche doit satisfaire à des exigences élevées en matière de densité, de pureté et de résistance à l'oxydation, la projection doit se dérouler en l'absence de gaz réactifs (sous basse pression résiduelle d'argon en général). Une diminution de la pression de l'atmosphère de projection entraîne la disparition des interactions indésirables entre le jet plasma, la matière projetée, le matériau de base et l'atmosphère. Cette diminution entraîne aussi l'augmentation de

la longueur et du diamètre du jet, l'élévation de la vitesse des plasmas et l'homogénéisation de l'écoulement.

La formation des couches s'effectue à haute énergie étant donné que les particules, durant leur trajectoire, ne sont ni refroidies, ni freinées comme cela est le cas en milieu atmosphérique. En général, les installations de projection LPPS sont utilisées à des pressions de 5000 à 10000 Pa.

Les avantages de ce type de procédé peuvent se résumer de la manière suivante :

- Obtention d'un revêtement très dense et d'une meilleure adhérence sur le substrat,
- Meilleur écrasement des particules à basse pression : d'où une très faible porosité (<1%),
- Refroidissement plus lent des particules : d'où une meilleure cohésion du dépôt,
- Absence de couches d'oxydes : donc augmentation de l'adhérence et de la cohésion du dépôt,
- Possibilité de décapage "in situ" du substrat à haute température : d'où un recuit en continu du dépôt,
- Respect de la composition de la poudre initiale.

Des applications de revêtements des métaux nobles (titane, tantale, niobium, tungstène) ont vu le jour mais c'est surtout dans la protection contre la corrosion à chaud d'aubes de turbines à gaz que ce procédé a acquis une grande notoriété.

II-3.Comparaison des différents procédés de projection thermique :

La figure I-12 montre les différentes plages d'utilisation des procédés de projection thermiques en ce qui concerne la température et la vitesse des particules

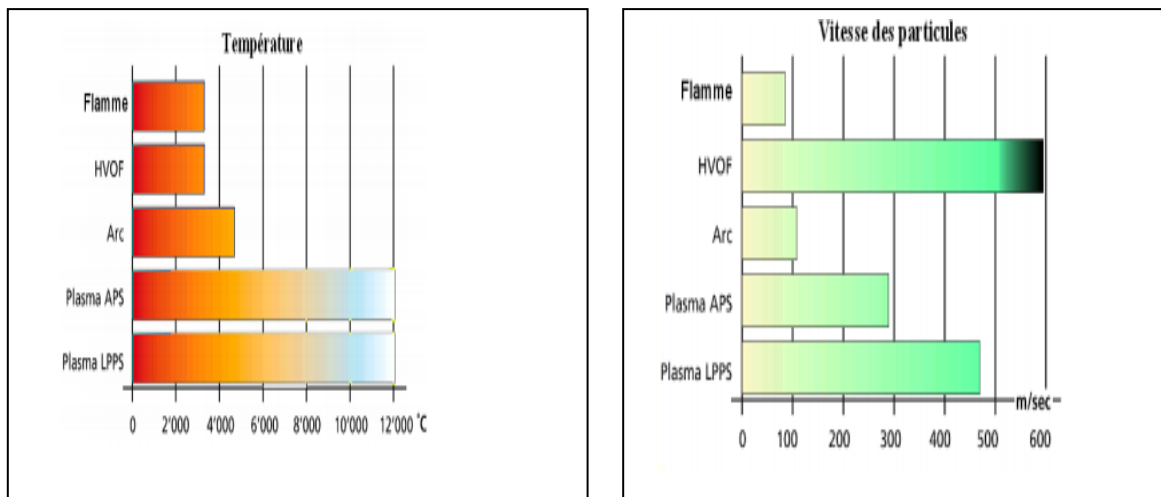


Figure- II.9 :Température d'utilisation et vitesse des particules des procédés de projection thermique.

Les tableaux II-1 et II-2 décrivent quelques-unes des caractéristiques des revêtements en fonction de la méthode de projection utilisée [6].

Dans le tableau II-1 les abréviations suivantes sont utilisées :

- Débit : Débit massique de matière pouvant être employé avec la source considérée,
- Adh. : Adhérence comparative des revêtements au substrat suivant une échelle arbitraire,
- Coh. : Cohésion comparative des revêtements suivant une échelle arbitraire,
- Oxy. : Taux comparatif d'oxyde au sein du revêtement métallique,
- Rend. : Rendement intrinsèque de projection (fortement dépendant du type de matériau).

Source	Débit (kg.h-1)	Adh. (1 à 10 arbitraire)	Coh. (1 à 6 arbitraire)	Oxy. (%)	Rend (%)
Flamme (poudre)	3 - 7	3	2	6 - 12	50
Flamme (fil)	5 - 15	4	3	4 - 8	70
HVOF	3 - 6	8	5	0.5 - 2	70
D-Gun	1 - 2	8	5	0.1 - 0.5	90
Arc électrique	5 - 30	6	4	1 - 5	80
Plasma (APS)	3 - 5	6	4	1 - 5	60
Plasma (LPPS)	3-8	9	6	<0,1	75

Tableau II-1 : Quelques caractéristiques des revêtements / source employée

Dans le tableau II-2 les abréviations suivantes sont utilisées:

- FF : Projection à la flamme (fil),
- FP : Projection à la flamme (Poudre),
- HVOF : Projection à la flamme supersonique,
- Arc. : Projection à l'arc électrique,
- Plasma : Projection à la torche à plasma d'arc soufflé.

	Matériaux	FF	FP	HVOF	Arc	Plasma
Adhérence (MPa)	Métaux ferreux	14	28	62	41	34
	Métaux non-ferreux	21	21	70	41	34
	Oxydes		14-34			21
	Carbures		34-48	83		55-69
Densité (%) Par rapport au matériau massif	Métaux ferreux	90	90	98	90	95
	Métaux non-ferreux	90	90	98	90	95
	Oxydes		95			95
	Carbures		90	98		95
Epaisseur maximale (mm)	Métaux ferreux	1,25 - 2,5	1,25 - 2,5	1,25 - 2,5	1,25 - 2,5	1,25 - 2,5
	Métaux non-ferreux	1,25 - 5	1,25 - 5	1,25 - 5	1,25 - 5	1,25 - 5
	Oxydes		0,4			1-2
	Carbures		0,4	0,6		1-2
Epaisseur minimale (mm)		0,05	0,05	0,05	0,07	0,05

Tableau II-2 : Autres caractéristiques des revêtements / source employée

II- 4. Les procédés de revêtement utilisés :

Les différents procédés de la Métallisation utilisés par M.E.I (Maintenance des équipements industriels) sont :

- la Métallisation par arc électrique.
- la Métallisation par flamme (sujet de notre étude).

II- 4.1. La métallisation par flamme :

II- 4.1.1. Définition :

La métallisation est un terme couramment utilisé pour décrire les revêtements métalliques appliqués par projection thermique. Pour la protection des éléments en acier contre la corrosion, cela désigne la pulvérisation de d'aluminium en fusion sur les surfaces en acier. Dans ce procédé, le métal est amené sous forme de fil ou de poudre vers un pistolet d'application où il est fondu et projeté sur la surface à protéger. Au contact avec la surface, les dépôts d'aluminium de refroidissent instantanément, ce qui crée une barrière protectrice solide qui isole le substrat en acier de l'environnement.

La métallisation compte sur une liaison mécanique entre le l'aluminium et l'acier pour former le revêtement protecteur. Puisque cette liaison est mécanique, une préparation de la surface adéquate est essentielle pour assurer l'efficacité du revêtement à long terme.

La métallisation protège l'acier de deux façons :

A-Barrière protectrice :

Le revêtement pulvérisé constitue lui-même une robuste barrière protectrice entre l'environnement et la surface d'acier, et évite le contact avec l'eau, qui causerait l'oxydation.

B-Protection cathodique:

L'efficacité de la métallisation résulte aussi d'une réaction électrochimique entre l'acier et le zinc, qui conduit ces revêtements à base de zinc à se « sacrifier » pour protéger l'acier contre tout dommage. Cette protection sacrificielle est comparable à la protection que procurent les apprêts riches en aluminium.

II- 4.1.2.Principe de la Métallisation:

Le principe consiste à projeter à l'aide d'un gaz vecteur un matériau dit d'apport chauffé à haute température sur un matériau support pour en modifier ses propriétés (Figure II.10). En s'agglomérant, les particules forment le revêtement. Les liaisons sont purement mécaniques.

II- 4.1.3.Métallisation (projection à la flamme fil ou poudre) :

Le métal d'apport solide, qui peut se présenter sous forme de fil ou poudre, est fondu au moyen d'une source de chaleur importante, provenant de la flamme d'un chalumeau oxyacétylénique

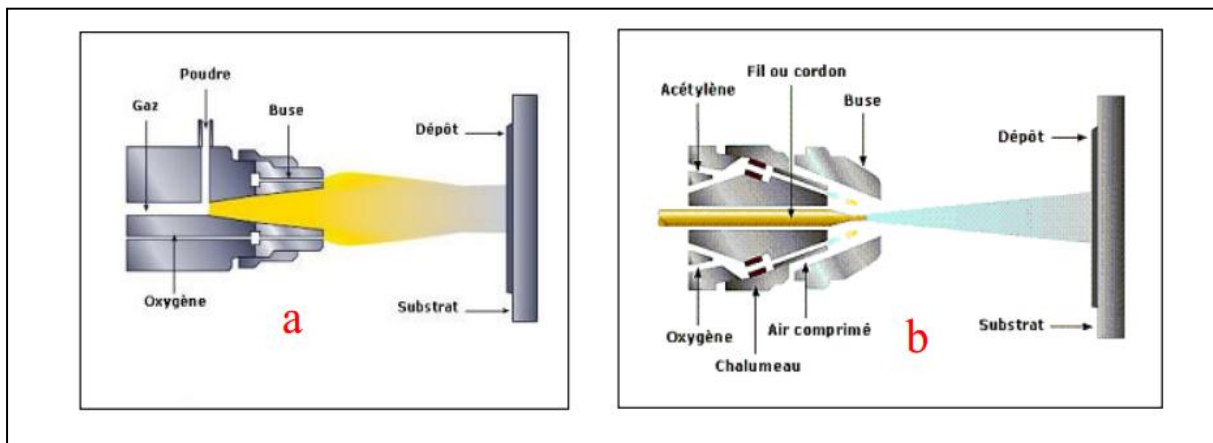


Figure- II.10 : Buse de projection thermique a- à poudre. b- à fil

II- 4.1.4.La mécanique d'accrochage :

L'accrochage s'obtient de différentes façons, suivant que le support est tendre ou dur. Dans le premier cas, sous l'effet du choc, les particules pénètrent dans la couche superficielle du support et s'y accrochent, réalisant ainsi une bonne adhérence du revêtement.

Dans le second cas, tout va dépendre de l'état des particules au moment de l'impact qui est fonction de la nature même du métal d'apport et du mode de fusion adopté pour fondre ce métal. En effet avec l'utilisation de la poudre et particulièrement dans le cas d'une fusion adoptée par flamme oxygaz, une certaine quantité de celle-ci peut passer au travers de la source de chaleur sans être fondue. Ce n'est pas le cas avec les fils ou les cordons dont le métal constitutif est toujours porté à fusion au départ de la buse de projection (Figure- II.10 .b).

Pour le mode de fusion, les pistolets à flamme oxy- gaz permettent d'obtenir des particules fondues à des températures voisines de la température de fusion du métal d'apport, ce qui permet d'envisager qu'elles atteignent le support dans un état relativement liquide.

Le résultat est sensiblement identique pour les pistolets à plasma d'arc alimentés en poudre, du fait d'un passage très court du produit dans la zone de fusion à haute température.

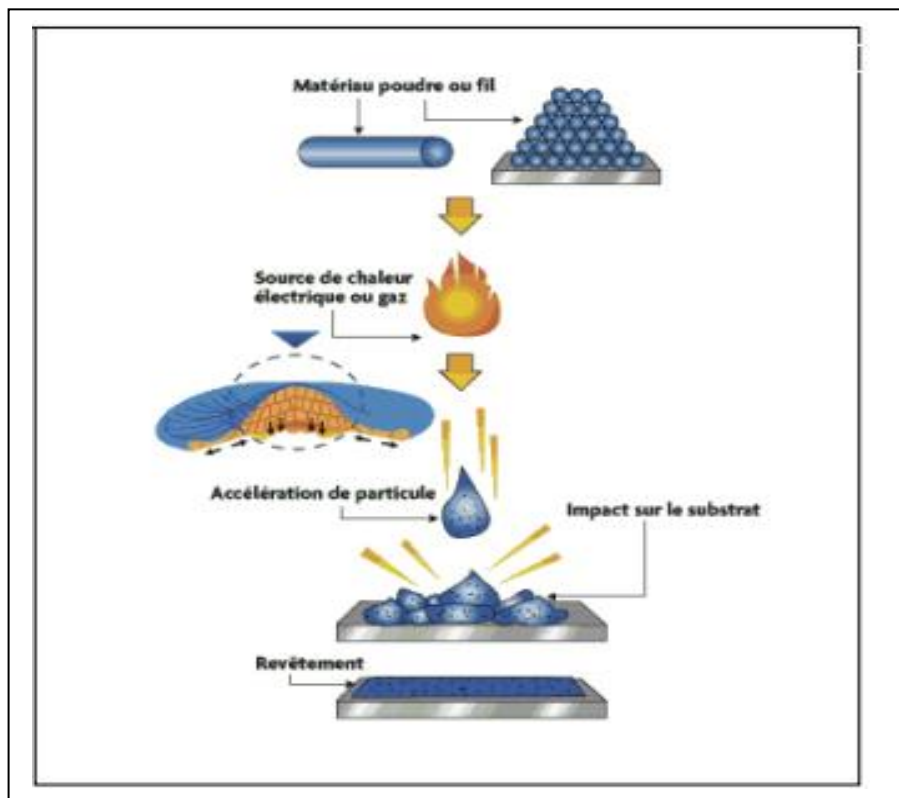


Figure- II.11 : Schéma de principe de la projection thermique à la flamme (poudre ou fil).

Par contre, pour un système à arc électrique, la température des particules fondues est beaucoup plus élevée (de l'ordre de 2000 °c), ce qui permet de penser qu'elles arrivent encore à l'état liquide sur la surface du support.

Par conséquent et suivant les paramètres ci-dessus, on peut constater que le support peut recevoir des particules à l'état solide, magmatique (Pâteux) ou liquide, dont l'accrochage va différer suivant que :

- Les particules sont solides ou magmatiques :

Lorsque la température de fusion du métal d'apport est inférieure ou égale à celle du support, les particules en s'écrasant sur la surface vont s'échauffer par la transformation de l'énergie cinétique en chaleur au moment de l'impact. La liaison mécanique avec le support par fusion localisée, sera alors possible si la surface à traiter a été préalablement préparée. Lorsqu'au contraire la température de fusion du projectile est supérieure à celle du support et qu'il y a affinité entre les deux métaux, on obtiendra par diffusion la formation d'un alliage en surface.

- Les particules sont liquides :

Dans ce cas, lorsque la température à l'impact est proche de la t température de fusion du support, on obtiendra une liaison superficielle à condition qu'il ait affinité entre les deux matériaux considérés.

En résumé, on peut dire :

Avec un acier projeté par un pistolet à flamme sur un support également en acier, on obtiendra un accrochage purement mécanique.

Avec ce même acier projeté par arc électrique sur le même support, on obtiendra des zones de liaisons ponctuelles entre les deux matériaux. La température des particules projetées avec un arc électrique étant plus importante qu'avec la flamme ou le plasma d'arc, il en résulte un

accroissement de la vitesse d'oxydation avec l'oxygène de l'air pendant le transfert. Le métal ainsi projeté subira des modifications plus importantes.

Dans tous les cas, il faut impérativement que les surfaces à traiter soient soigneusement préparées pour recevoir le revêtement afin d'optimiser son accrochage.

II- 4.1.4.Métallisation à la flamme par pistolet à poudre**II- 4.1.4.1.Principe :**

Ce procédé est sans conteste le plus simple des procédés de projection thermique. Il utilise l'énergie d'une réaction chimique, son principe consiste à introduire un matériau sous forme de poudre, au centre d'une flamme oxy-combustible produite par un chalumeau et de le véhiculer grâce à l'énergie cinétique transmise par les gaz de combustion.

II- 4.1.4.2.Fonctionnement

Le pistolet de projection (Fig. II.3) est équipé d'un chalumeau oxy-gazde forme cylindrique alimenté en périphérie par les gaz de combustion (en général un mélange oxy-acétylène ou oxy-propane).

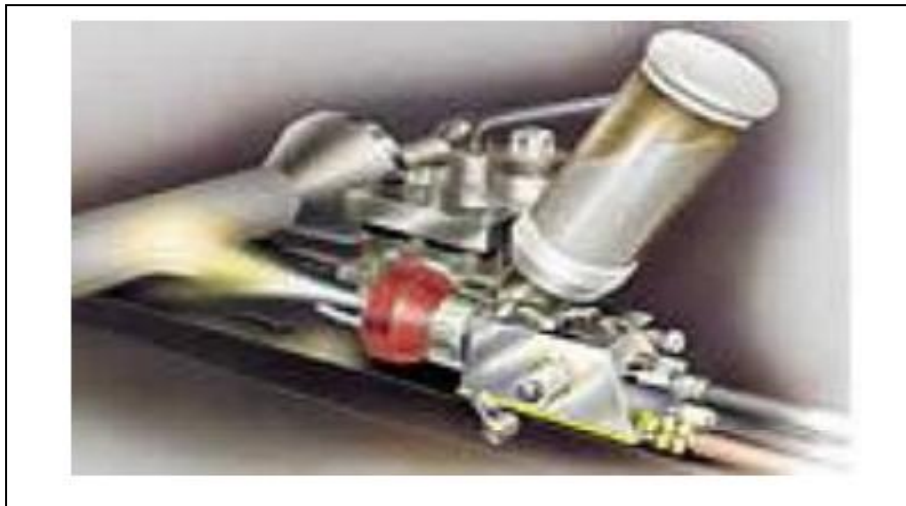


Figure- II.12 : Pistolet à poudre

La poudre est distribuée en son centre par gravité, ou par un distributeur désolidarisé du pistolet.

- distributeur par gravité :

le réservoir à poudre, placé directement au dessus, ou sur le pistolet. La poudre contenue dans ce récipient tombe par gravité directe au centre du chalumeau, ou est entraînée par dépression dans la canalisation de l'un des deux gaz de combustion. Ce procédé est aussi appelé torche à gaz.

- distributeur par pression : un réservoir fermé, situé à proximité du pistolet, est équipé en partie basse d'un distributeur de poudre alimenté en air comprimé. La poudre est véhiculée

jusqu'au pistolet par un tuyau et propulsée sur le substrat par le vecteur d'air comprimé. Le dispositif peut être complété par un vibreur ou une vis d'Archimède afin d'assurer une plus grande régularité de l'écoulement du produit.

- distributeur par dépression : le réservoir est muni d'un dispositif à dépression composé d'une cane d'entrée d'air et d'un suceur relié au dispositif d'aspiration. L'effet GIFFARD, produit par un courant d'air comprimé traversant un système convergent divergent, permet d'entraîner la poudre jusqu'au pistolet.

- distributeur par cyclone : le réservoir à poudre est équipé d'un système cyclonique. Le mouvement tourbillonnaire qui met la poudre en suspension, est assuré par un courant d'air, qui permet de véhiculer celle-ci jusqu'au pistolet de projection.

II- 4.1.4.3. Les applications :

Les températures de la flamme sont de l'ordre de 3000°C, il en résulte que les températures atteintes par les particules projetées ne dépassent pas les 2000°C environ (la chaleur de la flamme assure d'une part la fusion de la poudre et d'autre part le chauffage du support).

La vitesse des particules projetées par la flamme est faible (30 à 50 m/s). C'est pourquoi elles sont souvent accélérées par un vecteur d'air.

La distance entre la buse et le substrat est comprise entre 100 et 150 mm, pour le pistolet à flamme et 80 à 100 mm pour la torche à gaz. Ceci afin que les particules de poudre aient un temps de séjour suffisamment important pour être fondues dans la flamme. Ce procédé permet d'obtenir des dépôts de quelques dixièmes de millimètres d'épaisseur à des taux horaires de dépôt de 2 à 3 kg/h, sans échauffement important du substrat (Température inférieure à 250 °C).

II- 4.1.4.4. Les dépôts

En raison de la faible vitesse des particules, les dépôts obtenus présentent généralement une faible adhérence (20 à 40 MPa) et une porosité élevée (10 à 20 %) par rapport à ceux obtenus avec d'autres techniques de projection.

Les matériaux les plus utilisés restent les alliages auto-fusibles, qui sont réchauffés à 1150 °C après dépôt. Cette opération supplémentaire permet d'améliorer l'adhérence, d'éliminer en partie les oxydes et de diminuer la porosité.

Les dépôts à base d'acier, d'alliages à bas point de fusion ou de polymères sont également réalisables par le procédé flamme poudre.

D'après la littérature [12], les propriétés d'usage d'un revêtement/substrat dépendent des caractéristiques intrinsèques des zones qui le constituent et notamment de l'interface couche -substrat. En effet, cette interface est souvent ressentie comme un point faible dans cette chaîne. Elle conditionne la tenue mécanique du système. Or la fonctionnalité recherchée dans un tel revêtement ne peut être assurée que si, sous une sollicitation mécanique externe, le revêtement reste adhérent au substrat qu'il doit recouvrir et protéger. L'adhérence dépend de l'ensemble des phénomènes et des mécanismes qui maintiennent liés les composants macroscopiques et régissent la résistance à la rupture d'une interface [28].

La formation du dépôt présente deux étapes caractéristiques [31]:

- l'écrasement de chaque gouttelette.
- La formation d'une couche de matériau, résultant de la cinématique liée au processus (mouvement relatif torche/pièce).

Ce mécanisme d'écrasement est un mécanisme complexe dépendant d'une part des caractéristiques des particules elles mêmes (vitesse, composition chimique, température, degré de fusion) et d'autre part de celles du substrat (nature, rugosité, température).

II- 4.1.4.5. Les utilisations :

Ce type de matériel est assez répandu dans toutes les industries. D'un coût d'investissement peu élevé, il permet de résoudre des problèmes d'abrasion, de corrosion, d'usure, d'isolation thermique ou électrique. Il est aussi bien employé pour traiter des pièces neuves que des pièces usées.

II- 4.1.5. Métallisation à la flamme par pistolet à fil :

II- 4.1.5.1. Principe :

Comme pour le procédé à flamme poudre, son principe consiste à introduire un matériau, sous forme de fil, cordon ou baguette, au centre d'une flamme oxy-combustible produite par un chalumeau et à le projeter sur le substrat (Fig. II.4). Mais contrairement à ce dernier, la flamme est uniquement utilisée pour fondre le matériau d'apport, dont la projection des gouttelettes sur le support est assurée par un jet d'air comprimé qui atomise et propulse le matériau fondu [9].

II- 4.1.5.2.Fonctionnement :

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

Le pistolet se compose de deux parties distinctes :

- la partie chalumeau, qui utilise des gaz de combustion identiques à ceux utilisés en flamme poudre, soit oxygène + gaz combustible (généralement acétylène ou propane). Elle se compose d'un mélangeur, d'une buse à gaz annulaire et d'une buse à air.
- la partie entraînement du fil, qui peut être animée soit par un système à turbine, soit par un moteur à air comprimé, soit un moteur électrique. Ces différents types d'entraînement, communiquent un mouvement de rotation à deux molettes enserrant le fil et le poussant au travers de la buse à gaz du chalumeau. Suivant le diamètre du fil, le serrage des molettes peut être

Obtenu par un système à ressort ou par une pression d'air. Dans un tel dispositif, la vitesse d'avance du fil doit pouvoir être réglée en fonction de son diamètre, de sa nature (température de fusion) et de la puissance de chauffe de la flamme.

Dans le cas d'entraînement par turbine à air comprimé, il est nécessaire de passer par un réducteur de vitesse, de manière à communiquer aux molettes un mouvement suffisamment lent. La vitesse d'avance peut varier entre 0.5 et 12 m/mn pour les pistolets portatifs.

Cependant, les types d'entraînement cités ci-dessus s'avèrent insuffisants pour effectuer des dépôts importants, ou lorsqu'on est tenu à des réglages précis de défilement lent, pour l'utilisation de cordons ou baguettes en matériau x réfractaires par exemple. Pour réaliser des rechargements massifs, généralement effectués avec des gros fils rigides qui nécessitent de gros efforts d'entraînement, on utilise des moteurs électriques capables de tirer des fils jusqu'à 5mm de diamètre. Ces moteurs sont généralement dissociés du pistolet et reliés à ce dernier par un flexible.



Figure- II.13 : Poste de métallisation à la flamme en fil (MEI)

II- 4.1.5.3. Les applications :

Les températures de la flamme sont de l'ordre de 3000°C et la température à l'extrémité du fil ou de la baguette peut atteindre 95% de la température de la flamme. Ce qui permet de projeter des céramiques.

La vitesse des particules est plus élevée que pour la flamme poudre, en raison du vecteur d'air comprimé, puisqu'elle atteint 150m/s.

La distance entre la buse et le substrat est comprise entre 100 et 200 mm. Ce procédé permet d'obtenir des dépôts de 1 à 25 kg/h, avec un pistolet portatif suivant la nature et le diamètre du fil, mais peut aussi déposer jusqu'à 40 kg/h avec un pistolet fixe en rechargement massif.

II- 4.1.5.4. Les dépôts :

Tous les matériaux peuvent être projetés avec ce procédé, qu'ils soient tréfilés (sous forme de fil) ou non (sous forme de baguette), ou en poudre (sous forme de cordon). Ces différents conditionnements, permettent des dépôts de toutes sortes et la possibilité d'utiliser un pistolet à flamme fil pour projeter des alliages auto fusibles. L'accrochage du dépôt sur le support se fait de façon mécanique. Mais après une projection d'alliages auto fusibles, il est possible de refondre le dépôt afin de le lier métallurgiquement à son support.

II- 4.1.5.5. Les utilisations :

Ce type de matériel est assez répandu dans toutes les industries.

Il permet de résoudre des problèmes d'abrasion; de corrosion; d'usure; d'isolation thermique ou électrique. Il est aussi bien employé pour traiter des pièces neuves que des pièces usées. C'est le procédé le plus utilisé en anticorrosion pour la projection de zinc, de zinc aluminium ou aluminium.

II- 5. Conclusion :

Ces dernières années, les revêtements se sont développés d'une manière significative et ont permis d'avoir des performances considérables en termes de résistance à l'usure et d'amélioration de la durée de vie des pièces.

Les propriétés du revêtement à prendre en compte, dans le choix de la technique de projection peuvent être classées en quatre grandes catégories :

- Les propriétés mécaniques (modules, fragilité, contraintes internes, coefficient de dilatation thermique...)
- Les propriétés morphologiques (épaisseurs, forme, rugosité inter faciale et superficielle...)
- Les propriétés chimiques (réactivité avec le milieu ambiant et avec le matériau antagoniste dans le cas d'essais tribologiques...)
- Les propriétés microstructurales (défauts, porosité, structure...).

CHAPITRE III

Partie Expérimentales

Chapitre 3 : Caractérisation des revêtements d'une aube en superalliage Incoln 738 par projection thermique

Dans ce chapitre nous faisons le point sur les différentes techniques expérimentales utilisées pour la caractérisation des échantillons revêtus en superalliage à base Nickel Incoln 738 par flamme fil et flamme poudre.

III.1. présentation de l'aube :

L'aube de turbine à gaz est le produit de fonderie, l'un de procédés de formage des métaux qui consiste à coulé un métal ou un alliage liquide dans un moule pour reproduire, après refroidissement, une pièce donnée, conformément à l'aube présentée composée de superalliage base nickel selon la figure III.1.



Fig. III-1 Aube de turbine de troisième étage

III.2. Les échantillons à revêtus (découpage des échantillons) :

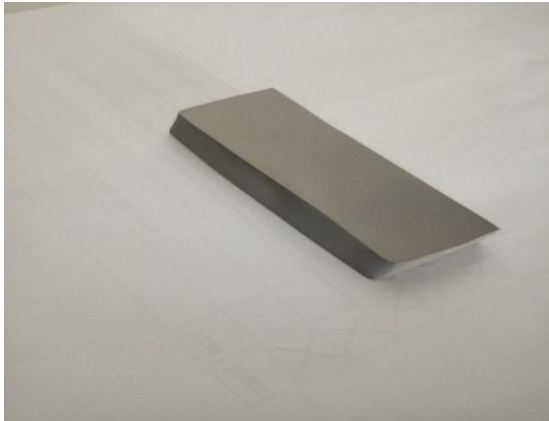
On a fait le découpage d'un morceau pour obtenir deux échantillons avec de dimensions estimées (de dimension 7x2,5x2,5 cm) afin de réaliser deux procédés de revêtement ,projection thermique de flamme à poudre et projection thermique de flamme à fil, et procédé une rectification de surface (mise en propre) avant le sablage.



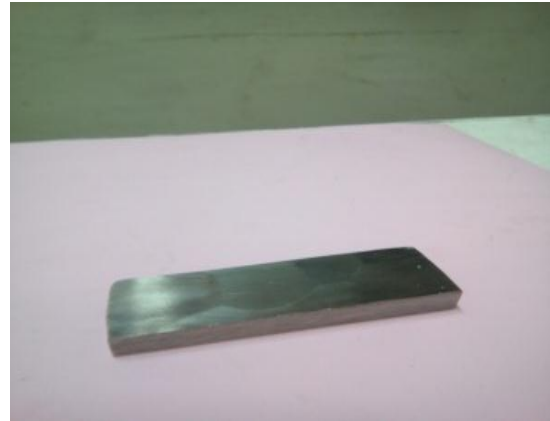
(A)



(B)



(C)



(D)

(A)- pièces de matériaux superalliages d'une aube turbine à Gaz, (d)- pièce rectifiée.
(B)- demi A pour réaliser de procédés,(c)-pièces après sablage.

Fig. III-2 Substrat à revêtu

III.3 procédés de revêtements

Pour les besoins de nos expériences nous avons utilisés plusieurs appareillages soit de déposition de revêtement ou de caractérisation mécanique ou physique, le matériau choisi est le superalliage à base de nickel /Lincoln 738 qui constitue le matériau utilisé pour la fabrication d'ailette mobile de turbine à gaz ou fonctionne dans des conditions mécaniques et thermique sévères.

III.3.1.1 procédé de revêtement flamme poudre :

III.3.1.2 Préparations des surfaces

Afin de préparer les surfaces de nos échantillons on a utilisé une grenailleuse à sable de marque Airblast (Figure 4) , L'abrasif utilisé dans notre cas est de l'oxyde d'alumine. La préparation de surface nous sert à enlever les traces de rouille, de graisse ou tout autre contaminant ainsi qu'à augmenter la rugosité de surface.



Fig III- 3 :grenailleuse.Airblast.

-pour l'échantillon de la projection de flamme à poudre .

-sablage : abrasif corindon(Al_2O_3).

-type de projection :

ROTOTEC 80 de Castollin Eutectic :



fig III-4 La torche Castodyn en marche

-Paramètre de projection

Acétylene	0,7
Oxygene	4 bars
Distance projection	150 mm

- Distance de projection 150 mm

Composition du substrat 1 :

Se	Mo	Nb	Zr	W	Ta	Ni	Co	Fe	Hf	Cr	V	Ti
0.013	1.701	0.854	0.022	3.016	1.447	64.678	8.383	0.372	0.107	15.901	0.057	3.316

Al	Cb	C	B
3.4	0.9	0.10	0.001

Afin de connaître la composition de notre matière de l'aube nous avons utilisé un appareil de détection qui s'appartient au service contrôle de MEI , on dénote que le carbone ne peut se détecter.

III.3.1.3. Description :

III.3.1.4 Poudre utilisable en projection à froid

Sous-couche d'accrocha pour la gamme des rechargements Roto Tec.
La poudre Roto Tec 51000 permet une excellente liaison avec le support grâce à la réaction exothermique provoquée par certains éléments d'alliage lors de leur passage dans la flamme. Étant donné que cette énergie s'applique essentiellement aux particules, seul un minimum de température est transmis à la pièce qui se trouve thermiquement peu affectée, sans risque de déformation ou de changement de structure. Roto Tec 51000 produit un réseau continu de microsoudures qui adhèrent de façon tenace à la surface et produisent un dépôt très résistant d'aspect légèrement rugueux, idéal pour recevoir les rechargements Roto Tec et MétaCeram finaux. Métaux de base :

- ◆ Recommandé pour tous les aciers, y compris l'acier

Inoxydable, les fontes, l'aluminium et ses alliages, le nickel et ses alliages, les alliages cuivreux à l'exception du cuivre pur.

-Composition chimique (%) de la poudre

C	Mo	Al	Ni
<0,25	5,6	5,8	SOLDE

-Caractéristiques mécaniques et physiques types

Granulométrie	32 à 150 µm
Forme des grains	irrégulière
Adhérence	25 - 30 N/mm ²
Épaisseur du dépôt (mm)	0,1 à 0,2 mm
Dureté du dépôt	165 HV/10 g

III.3.1.5 Procédure d'utilisation :

- ◆ Déposer avec les systèmes de projection thermique

Roto Tec 80 et CastoDyn DS 8000.

- ◆ Les surfaces à recharger doivent être parfaitement accessibles, de manière à ce que l'angle favorable de projection de 90° puisse être conservé.

III.4. Préparation de la surface à recharger flamme poudre :

- ◆ La zone usée sur laquelle sera effectuée l'application doit être usinée pour faire disparaître les irrégularités provoquées par l'usure.
- ◆ La surface à recharger doit être propre et exempte de graisse. Les arêtes et les angles doivent être cassés ou arrondis. Les surfaces préparées doivent être légèrement préchauffées pour éviter un effet de condensation (environ 60°C).
- ◆ Rendre la surface rugueuse alors que la pièce est encore à l'état préchauffé soit par jet d'abrasifs angulaires granulométrie 0,7 à 1,5 mm, grenaille d'acier, fonte hématite angulaire, corindon, soit par meulage ou "filetage". Dans le cas du meulage, utiliser une meule avec un liant céramique. Veiller à ce que la surface du métal ainsi préparée reste propre. Les zones qui ne doivent pas être rechargées seront protégées par application de la solution R 104.

III.4.1. Technique de rechargement :

- ◆ Le rechargement de la pièce doit intervenir immédiatement après préparation de la surface de façon à bénéficier de la température installée.
- ◆ Durant l'opération de projection, la température de la pièce ne dépassera pas 250°C.

III.4.2. Paramètres indicatifs :

Les paramètres pour CastoDyn DS 8000 sont comme :

Module de projection standard	SSM10
Réglage du porte- module	3
Réglage de flamme	Neutre
Air sans rallonge (bare)	0-1
Air avec rallonge (bar)	1
Distance de projection mm	150
Vitesse de rotation m/min	25 à30
Avance mm/t	4 à 8

Préssion O₂=4 bar ;Ac>0.7 bar ;Air =6 bar

Paramètre indicatif : Déposer 1 mm d'épaisseur pour une performance Maximale.

III.4.3. Présentation :

Conditionnement : 1,25 kg.

Les produits doivent être conservés dans leur emballage d'origine fermé, dans un endroit sec, afin d'éviter l'absorption d'humidité ou leur endommagement.

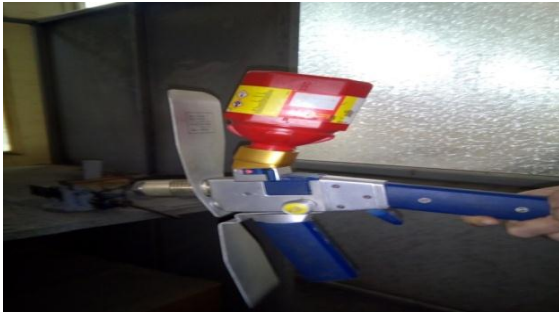


Fig. III-5 La torche Castodyn

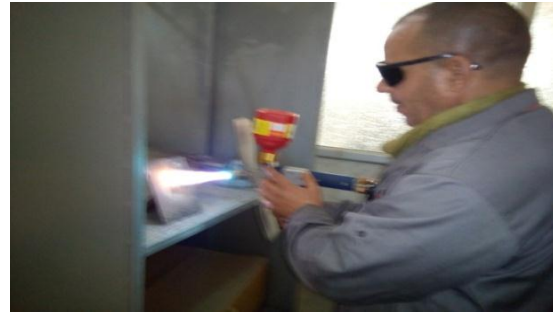


Fig. III-6 la torche Castodyn en marche



Fig. III-7 Échantillon fixée.



Fig. III-8 échantillon revêtu.

III.4.3 préparation projection thermique de flamme à fil :

Pour l'échantillon de la projection de flamme à fil la matière de sablage disponible était NF 080

Le sablage de cet échantillon est effectué à l'aide de grains de sable type NK F080 à MEI filiale sonelgaz de M'sila en utilisant la même grenailleuse indiquée au dessus fig. III.3



Fig. III-9 type de sable utilisé.



Fig. III-10 Grains de sable.



Fig. III-11 Pistole de projection thermique flamme à fil.

III.5. Projection thermique de flamme à fil :

Cette opération était faite à MEI par un appareil nommé METCO (figure : III-11)

La composition de la matière revêtue est identifiée par un appareil portatif d'analyse de composition indiquée sur la figure :

Tableau : composition de substrat 1

Ru	Mo	Nb	Zr	W	Cu	Ni	Co	Fe	Mn	Cr	V	Ti
0.012	1.670	0.781	0.017	3.419	1.017	64.844	8.396	0.357	0.078	16.023	0.043	3.269

Al	Cb	C	B	Ta
3.4	0.9	0.10	0.001	1.75

III.5.1. Paramètres de projection à fil :

métal	Manchon À air	Pression d'allumage			débitmètre		
		oxy	Acéty	Air	oxy	Acéty	Air
MétCo 405	C	30	15	70	91	48	24

Tableau II : *Le Débit de projection de revêtement flamme-fil (Ni-Al, Mo).*

	Oxygène	Acétylène	Air (comprimé)
Débit de projection Ni-Al (L/min)	44	39	52

Tableau III : *les constituants de base fil Ni-Al.*

Symbole	Élément	Masse atomique	Atomes
Ni	Nickel	58.693	1
Al	Aluminium	26.981	1

Tableau IV : *composition de fil Ni -Al*

Al	Si	Fe	Ni	Cu	Zr
97,963	0,641	0,727	0,351	0.215	0,032

III.5.2. Mode opératoire :

à L'opération de revêtement de notre échantillons (1) nous avons suivi les procédures suivantes :

- 1) fixation d'échantillon,
- 2) allumage du gaz combustible,
- 3) échauffement de substrats,
- 4) insertion du fil de métallisation à travers le pistolet,
- 5) activation du serrage de fil à action rapide qui avance le fil jusqu'à la flamme.

Pour l'arrêter, il suffit d'appuyer sur la commande de serrage du fil.



Fig. III-12 réalisation de projection flamme fil

III.6. Etude métallographique :

Afin de révéler la microstructure de notre revêtement on procède à la préparation des échantillons en quatre étapes ; découpage, enrobage, polissage, polissage de finition

III.6.1. découpage :

Après avoir réalisé notre revêtement nous devons faire un découpage de trois éprouvettes pour les deux échantillons ($10 \times 5 \times 3 \text{ mm}^3$) afin d'étudier la structure de dépôt avec les dimensions comme suit : ($10 \times 5 \times 3 \text{ mm}^3$). A l'aide d'une découpeuse à fil qui s'appelle machine d'électroérosion dans l'entreprise MEI.

Afin de maîtriser la manipulation de nos échantillons, il faut faire un découpage qui sa forme s'adapte au support d'appareils.

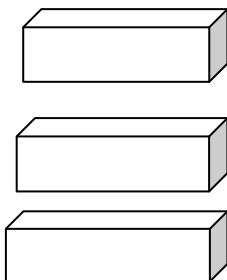


Fig. III-13 Forme de l'échantillon.

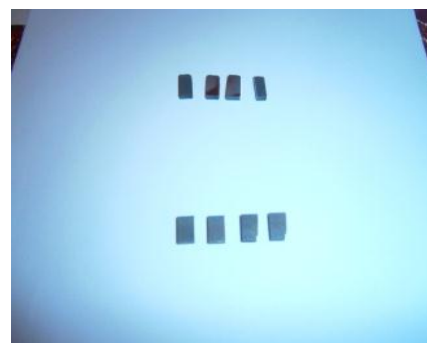


Fig. III-14 Échantillon pour enrobage



Fig. III-15 Machine de découpage à fil (électro-érosion).

III.6.2.L'enrobage :

Afin de pouvoir faire l'étude sur notre échantillon il fallait procéder à l'enrobage à l'aide d'un appareil à froid sous vide montée dans la figure, ce procédé est réalisé à MEI –sonelgaz à M'sila.

III.6.3.Principe :

L'enrobage se fait à l'aide d'une résine thermodurcissable catalysée d'une certaine quantité de durcisseur et qu'elle soit, 100g pour 0.2mg .L'échantillon est immergé dans un moule contenant de la résine. Cette opération permet de faciliter la manipulation des échantillons et d'assurer la planéité pendant le polissage. Cela a été fait à l'aide d'une enrobeuse à froid sous vide à MEI (figure : III.16)



Fig. III-16 appareil d'enrobage sous vide avec compresseur

Généralement l'enrobage se fait par deux méthodes la première est à froid par compresseur sous vide et la deuxième à chaud et c'est la plus préférée car la température diminue la porosité.



Fig. III-17 Échantillons dans la résine



Fig. III-18 moules en chambre sous vide

III.6.4. Observation métallographique :

III.6.5. Préparation des échantillons pour l'observation métallographique

L'observation microscopique a nécessité un polissage fin de la surface de la coupe du dépôt à observer. Le polissage mécanique est obtenu en utilisant une polisseuse possédée de labo d'université de M'sila qui vise à rendre les surfaces uniformes. Il consiste à abraser la surface à l'aide de papiers abrasif de grade progressif (200,400, 600, 800, 1000,1200, 1500, 2000, 2500, 3000,5000).

A cet étape il est nécessaire de respecter la technique de polissage, lors le déroulement de l'opération on fait tourner l'échantillon d'une angle 90° de 3-5mn à chaque utilisation d'un différent abrasif pour éviter les striées de surface polie.

III.6.6 Polissage de finition :

Un polissage de finition très fin avec une poudre d'alumine Al_2O_3 ayant une granulométrie de $0.3\mu m$, en suspension dans l'eau sur un tissu en soie, comme le montre la figure 3.9



Fig. III.19 Planopol-3 <struers>.



Fig. III.20 utilisation d'une patte à polissage fin.

III.7. Diffraction des rayons (DRX) :

La diffraction des rayons X est une technique d'analyse idéale pour l'étude d'échantillons solides cristallisés. A chaque phase cristalline correspond un ensemble caractéristique de pics de diffraction (diffractogrammes). Cette signature unique permet donc une caractérisation et une identification de toutes les phases. La diffraction de faisceau des rayons x se réalise si l'interaction des rayons x avec les atomes des plans (hkl) satisfait la loi de Bragg [86-91] :

$$2 \times d_{hkl} \times \sin \theta = n \times \lambda$$

θ est l'angle du faisceau incident par rapport au plan réticulaire, λ la longueur d'onde du faisceau incident, n un nombre entier qui est l'ordre de diffraction et d_{hkl} la distance interréticulaire, caractéristique du matériau. A l'aide des fiches (ASTM : American Society of Testing Material voir annexe I), on peut identifier les structures et les éléments présents.



Fig. III-21 XPert Pro pour analyse DRX.

Afin d'identifier les composés formés, et leurs structures, nous avons utilisé un diffractomètre de type XPERT PRO du laboratoire d'analyse radio-cristallographique de l'université de M'sila Mohamed Boudiaf, équipé d'un filtre

En Ni et d'une anticathode de cuivre utilisant la radiation $K\alpha$ de longueur d'onde $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$.
Les conditions de travail sont

$U = 30 \text{ kV}$ et $I = 25 \text{ mA}$, l'angle de balayage $2\theta = 10 - 80^\circ$ avec une vitesse égale à $0.05^\circ/\text{s}$.
Les échantillons ont des dimensions ($10 \times 10 \times 2 \text{ mm}$).

La recherche des phases présentes dans le composé a été effectuée par micro informatique en utilisant le logiciel X'Pert High Score plus (Fichiers JCPDS données en annexe I).



Fig. III-22 X'Pert Pro lié a l'ordinateur.

Les spectres de diffraction x obtenus pour les échantillons en superalliage à base Nickel 738 sont illustrés sur les figures (Figure 3.22, Figure 3.23).

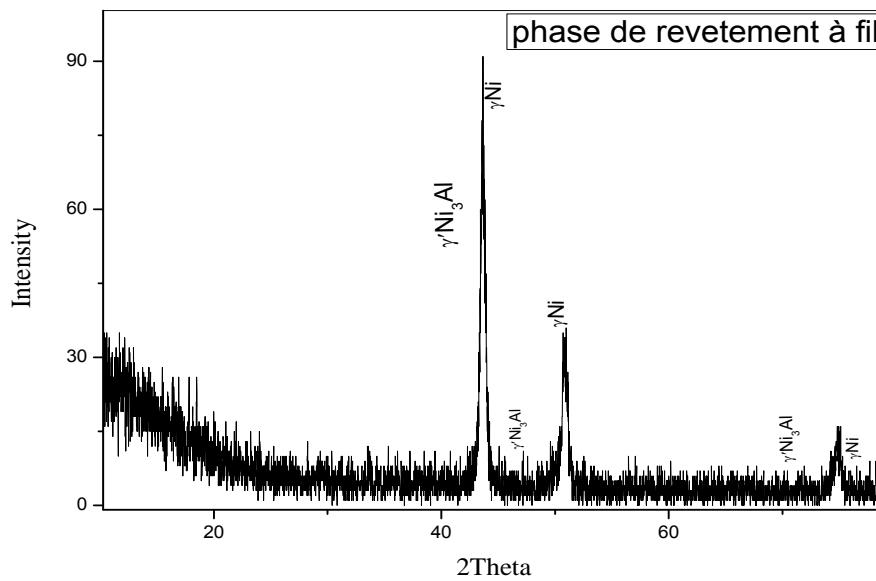


Fig. III-23 spectre de diffraction phases (γ , γ') projection flamme à fil

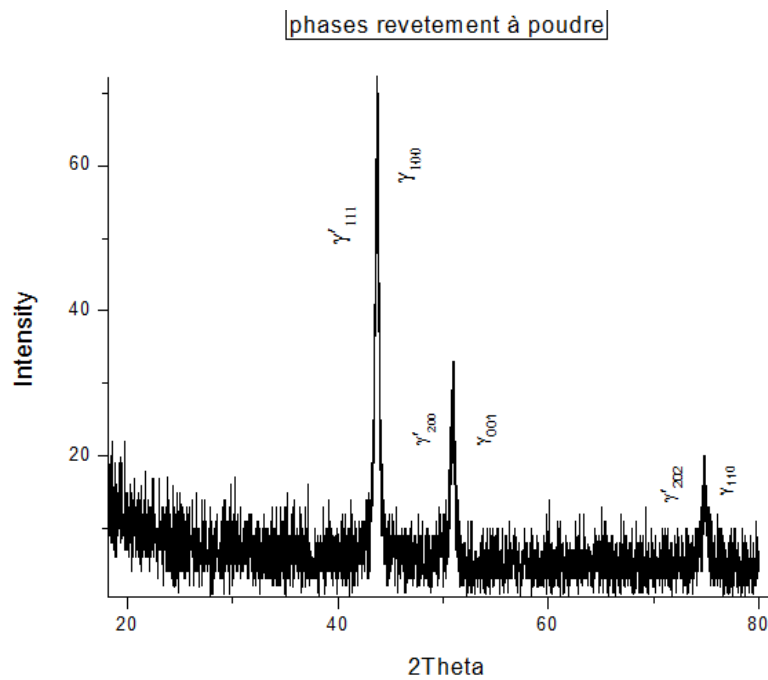


Fig. III-24 spectre de diffraction phases (γ , γ') projection flamme à poudre

Les diffractogrammes montrent les pics principaux caractéristiques du superalliage telles que la matrice γ (Fiche JCPDS n°96-901-3033) et de la phase de précipité γ' (AlNi_3 Fiche JCPDS n°0021-0008) déformé de différentes directions avec des intensités remarquables. La formation de la phase de précipité γ' est assurée par la réaction des atomes de Nickel avec les atomes d'Aluminium de dépôts. Cependant, on remarque l'absence des pics des carbures lorsque l'angle $2\theta < 80^\circ$.

III.7.1. Observations micrographique :

Ces examens ont pour but de caractériser la structure des échantillons revêtus en utilisant un Microscope Optique à Réflexion OLYMPUS BH2 de 1/1000 micro.



Figure III.25 Microscope optique en transmission et réflexion OLYMPUS BH2.

III.7.3. Attaque chimique :

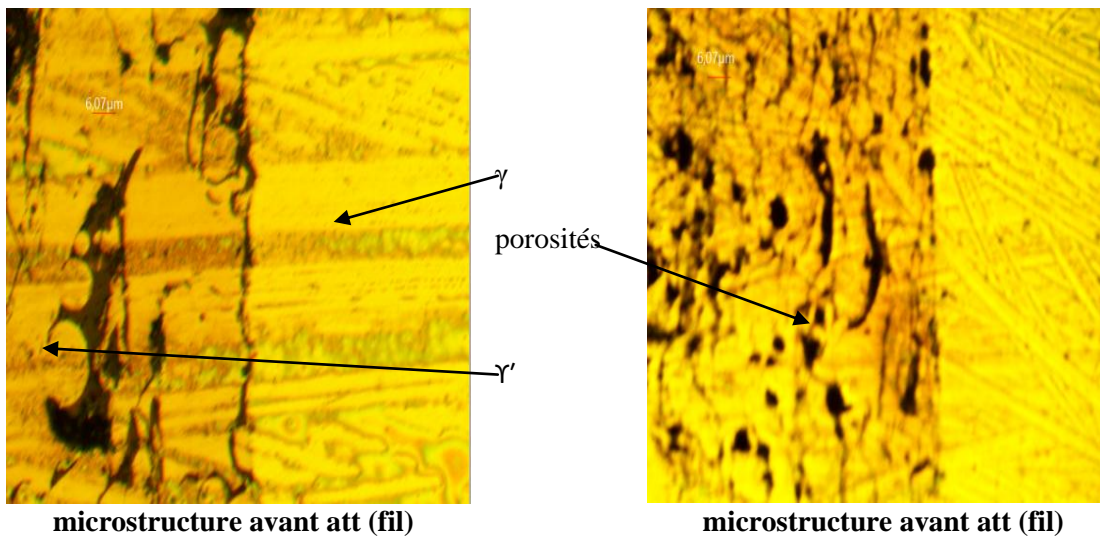
Avant l'étude micrographique, l'échantillon subi une attaque chimique au Nital. Le Nital est une solution à 10 % d'acide nitrique (HNO_3) dans 40% Hcl ,et La surface obtenue par polissage est plongée 3 à 5 secondes dans cette solution, à nouveau nettoyée à l'éthanol et séchée à l'air chaud. Cette dernière opération est très délicate, car il ne faut laisser aucune trace sur la surface.

III.7.4 Résultats des observations :

A l'aide du microscope optique à réflexion OLYMPUS BH2, LEICA LEITZ DMRM qui permet d'obtenir des grossissements jusqu'à x1000.

Les observations ont été réalisées pour suivre l'évolution de la structure de l'échantillon : des observations de substrat et des observations de la couche du revêtement des échantillons, les figures suivantes présentes les microstructures de revêtements.

III.7.4.1. Microstructure de revêtement échantillon à fil :



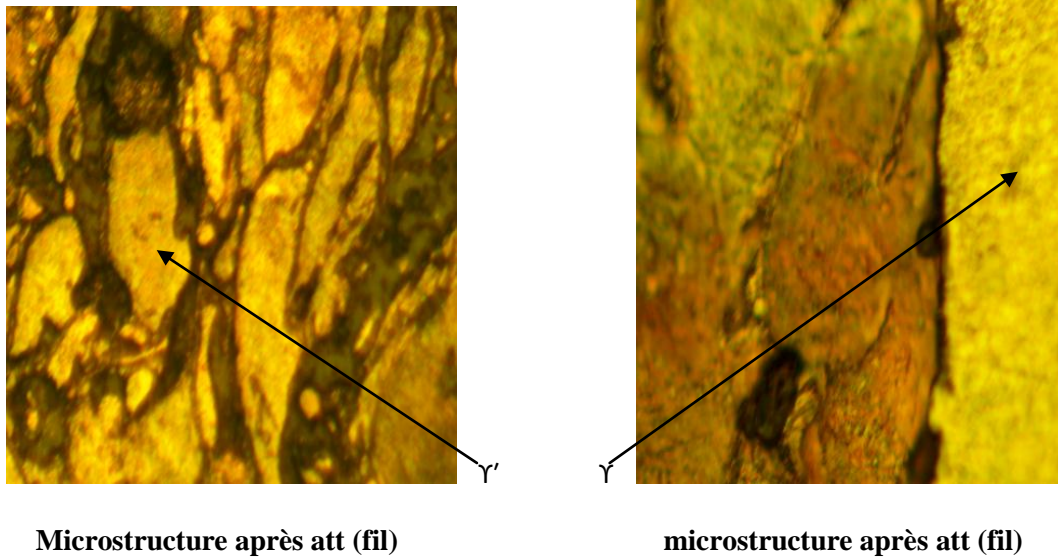


Fig. III-26 structure à fil

D'après ces figures on peut constater la présence de plusieurs phases distinctes, ce qui donne une structure hétérogène.

Les phases révélées ont de types composés, et élémentaire. On peut constater la présence de Ni_3Al (γ'), Al_2O_3 et la matrice est constituée principalement par du Nickel (γ).

III.7.4.2. Microstructure de revêtement à poudre :

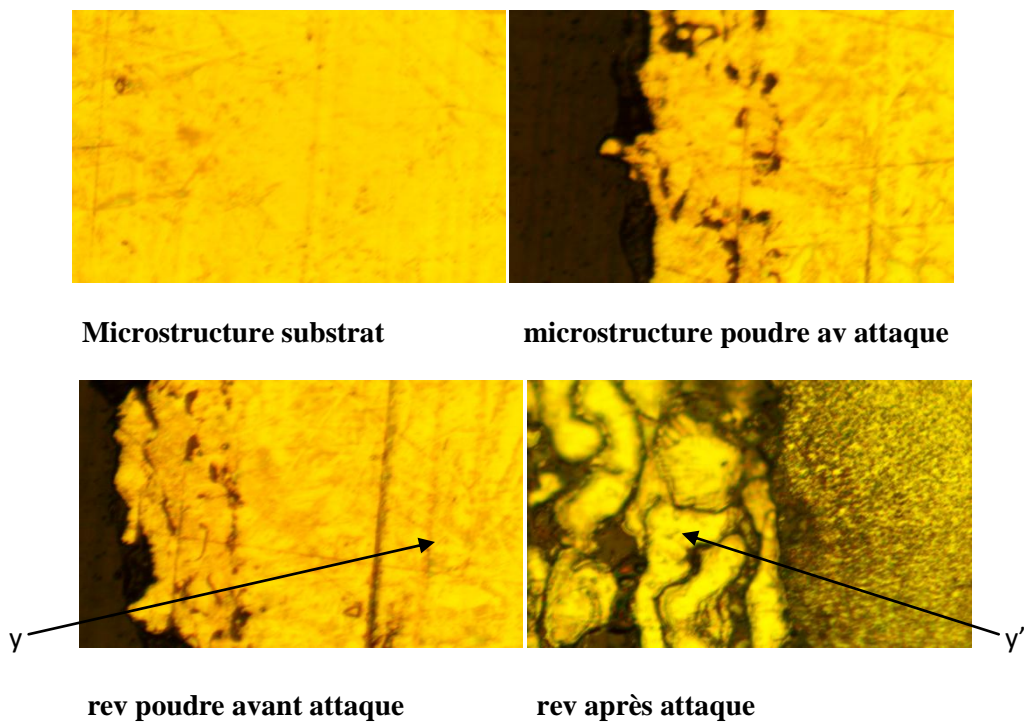


Fig. III-27 structure à poudre

D'après ces figures on peut constater la présence de plusieurs phases distinctes, ce qui donne une structure hétérogène.

Les phases révélées ont de types composés, et élémentaire. On peut constater la présence de Ni_3Al (γ'), et la matrice est constituée principalement par du Nickel (γ). L'adhérence est moins parfaite à celle du fil, avec l'existence d'un nombre important des pores.

III.8. La micro-dureté :



Fig. III-28 Indotec Zwick Roell attaché à micro-ordinateur

III.8.1.Principe :

Le principe de l'essai d'indentation consiste à appliquer un indenteur de forme connue (bille, cône ou pyramide) à la surface du matériau à tester. Sous l'action de la charge d'indentation. L'indenteur s'enfonce dans le matériau en produisant des déformations élastique et plastique dans la zone de contact. Au retrait de l'indenteur, une empreinte résiduelle persiste. Plus la charge appliquée est élevée, plus la taille de l'empreinte résiduelle est grande. Le nombre de dureté est calculé par le rapport entre la charge appliquée (P) et une surface représentative de l'empreinte (A). La relation

S'écrit : $H=P/A$

Les mesures de la micro-dureté ont été réalisées à l'aide d'un pénétrateur de mode Vickers de type Zwick Roel Indotec (voir fig :). La charge appliquée est de $P=25$ g et le temps de 10s., les points de mesures de chaque échantillon sont prélevés du profil longitudinal de l'élément et qu'ils soient 5 sur le substrat et 5 sur la zone de revêtement pour les deux échantillons.

Tableau III.10 .Echantillon 01 :

Evolution de la micro-dureté du échantillon revêtu à fil (Ni Al 3mm) et Évolution de la micro-dureté du substrat.

	Zone de revêtement fil					substrat				
points de mesure	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
Dureté HV projectin à fil	365	295	358	348	358	252	323	411	314	478

Tableau.III.11.échantillon 01 :

la micro-dureté du échantillon revêtu à Poudre (Ni Al 3mm) et Evolution de la micro-dureté du substrat.

	Zone de revêtement poudre					substrat				
points de mesure	0.02	0.04	0.06	0.08	0.1	0.12	0.14	0.16	0.18	0.2
Dureté HV Projection à poudre	98,6	121	103	167	221	258	314	348	283	314

III.8.2.interprétation de résultat :

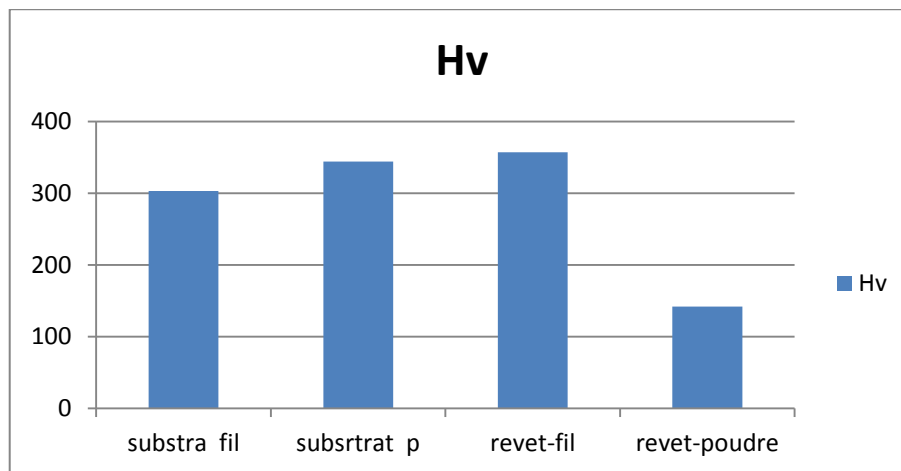


Figure III-29 histogramme des micro-duretés

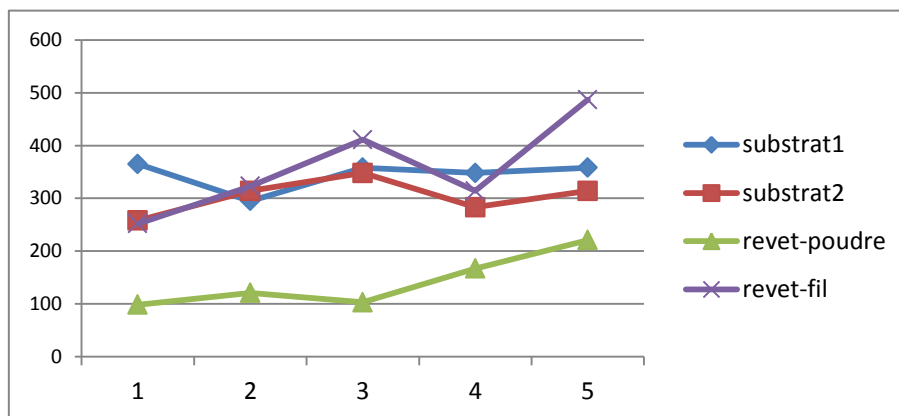


Figure III-30 évolution micro-dureté

La figures 3.29 et 3.30 montre l'évolution de la micro dureté du substrat, revêtements à flamme fil et à flamme poudre. On observe que les valeurs du micro dureté $Hv_{0.25}$ du substrat (Incoln 738) est normal. La micro dureté du revêtement à flamme fil est supérieure à celle du substrat cela peut être expliqué par la formation de la phase durcissant $AlNi_3$ d'important intensité. La micro dureté du revêtement à flamme poudre est inférieure à celle du substrat cela peut être expliqué par la présence des pores de grande ampleur dû a plusieurs facteurs, parmi ces facteurs l'opérateur de la projection était pas professionnel (il n'a pas respecté les conditions opératoires optimales comme l'avance et la distance de la torche).

Conclusion Générale

Conclusion générale

Les alliages à base Nickel durcis par précipitation de la phase (γ') sont utilisés dans les aubes des turbines à gaz sont des matériaux très complexes. Exposés à haut température durant leur service, leur résistance et endurance à température élevée ne sont égalées par aucune classe d'alliage.

L'amélioration des performances des turbines à gaz est un enjeu important, qui nécessite d'identifier et de comprendre les mécanismes de détérioration qui ont lieu durant leur utilisation. Dans les parties les plus chaudes des turbines à gaz (i.e. chambre de combustion), les matériaux utilisés sont soumis à de fortes sollicitations thermiques et mécaniques. Cela est notamment le cas des aubes de turbine. Les températures d'usage sont en effet, de l'ordre de 800°C. Ces sollicitations induisent différents types de dégradation. Les plus fréquemment rencontrés par les aubes de turbine, sont l'érosion, le fluage, la fatigue, la corrosion et l'oxydation.

Afin d'améliorer la durabilité à haute température des aubes de turbine, des revêtements sont réalisés. deux types de revêtements ont été réalisés :

- projection thermique à la flamme - fil (Ni-Al), déposer avec les systèmes de projection thermique CastoDyn DS 8000.
- projection thermique à la flamme - poudre (RotoTec 51000), déposer avec les systèmes de projection thermique RotoTec 80.

la caractérisation des revêtements

le travail présenté intitulé Caractérisation des revêtements d'une aube en superalliage Incoln 738 par projection thermique a pour but de remédié le problème d'usure.

A partir des caractérisations par microscopie optique, et les mesures de micro-dureté et l'analyse par rayons X on a abouti aux principaux résultats :

- la présence de plusieurs phases distinctes, ce qui donne une structure hétérogène. Les phases révélées ont de types composés, et élémentaire. On peut constater la présence de Ni_3Al (γ'), Al_2O_3 et la matrice est constituée principalement par du Nickel (γ).
- l'adhérence du revêtement flamme poudre est moins perfection à celle du fil, avec l'existence d'un nombre important des pores.

- La micro dureté du revêtement à flamme fil est supérieure à celle du substrat cela peut être expliqué par la formation de la phase durcissante $AlNi_3$ d'important intensité. La micro dureté du revêtement à flamme poudre est inférieur à celle du substrat cela peut être expliqué par la présence des pores de grande ampleur dû a plusieurs facteurs, parmi ces facteurs l'opérateur de la projection était pas professionnel (il n'a pas respecté les conditions opératoires optimales comme l'avance et la distance de la torche).
- nous pouvons confirmer que la projection a flamme fil reste dans les applications industriel ordinaire ou il n y a pas une forte exigence de précision mais reste toujours une solution efficace pour prolonger la dure de vie des équipements sans augmenter le cout de ces derniers.

enfin nous proposons d'étudier l'influence des traitement thermiques sur les revêtements.

BIBLIOGRAPHIE

- [1]. INCO, The International Nickel Company INC, One New York Plaza, New YORK, N.Y. 10004
- [2] J.L. BECKERS & Yann GREDAY, Propriétés thermiques : matériaux pour haute température, faculté des sciences appliquées, Département sciences des matériaux, 1995.
- [3] M. COLOMBIE et Coll., Matériaux Métalliques, DUNOD, Paris, 2002
- [4]. Techniques de l'ingénieur, Traité des matériaux métalliques, M755.
- [5]. Général Electric (GE), Catalogue : turbine à gaz MS7000.
- [6]. Techniques de l'ingénieur, Traité des matériaux métalliques, M329.1 : 91
- [7]. Techniques de l'ingénieur, Traitement thermique des superalliages, MD1, M1165, 1996
- [8] B. Daniel, Contribution des techniques neutroniques à l'étude des superalliages monocristallins. Laboratoire de spectrométrie physique
- Université Joseph Fourier.
- [9]. ikaterini Plati, Modelling of γ' Precipitation in Superalloys, Master of philosophy thesis, University of Cambridge, Août 2003
- [10] Techniques de l'ingénieur, Acier et alliage réfractaires MB4, M325-1, (1981)
- [11] Utilisation d'un dépôt de nickel pour le dépôt électrochimique d'un alliage de type MCrAlY afin de préserver des aubes de l'oxydation et de la corrosion, Ecole de mine d'ALBI, 2002 (GRENOBLE I).
- ., (2001), pp. 1713-1725.
- [12]... Anuragh Thakur, Microstructural responses of Nickel-base cast In-738 Superalloy to a variety of pre-weld heat-treatment, Manitoba : The University of Manitoba, 135 p, (1997).
- [13]... R.S. Moshtaghin, S. Asgari, Growth Kinetics of γ_9 precipitates in superalloy IN-738LC during long term aging, Materials and Design 24, 325-330, (2003)
- [14]. Sims C.T., 1987, Superalloy : Genesis and industrial power, ed. John Wiley & sons, pp. 3-26. [Yann Danis, Etude de la soudabilité d'un superalliage base nickel fortement chargé en éléments durcissants titane et aluminium : l'Inconel 738, Thèse Matériaux, Spécialité Mécanique et Ingénierie, Bordeaux : Ecole Doctorale des Sciences physiques pour l'ingénieur, 193p., (2008)
- [15]. Yomei Yoshioka et al, Service temperature estimation for Superalloys 1996, The Mineral Metal and Materials Society, p. 173-179, (1996)

[16]. R.A.Stevens,P.E. Flewitt,The Effects of γ' Precipitate Coarsening During Isothermal Aging and Creep of the Nickel –Base Superalloy In-738,Matériaux Science and Engineering,37,237-247,(1979)

[17].. **A. Prôner**, revêtement par projection thermique, techniques de l'ingénieur : traité matériaux métalliques, 1999 vol M 1645 PP1-20.

[18] **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).

[21]..CITRA-centre d'ingénierie en traitements et revêtements de surface avancés.

[22] Le LERMPS est un laboratoire de l'université de technologie de Belfort Montbéliard.

[23].. **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.

[24.] **F.Folio, J.Michler, G. Barbezat**, Influence of laser surface preparation on adhesion of thermally sprayed coatings , Surface Engineering, Vol, 17 (2001) 490-494.

[25].. **Olivier PREZIOSA**, Elaboration par projection thermique de barrières de diffusion finement structurées dans le cadre de l'élaboration d'aluminium et étude de leurs performances, Thèse pour l'obtention de grade de docteur en science et génie des matériaux, Université de Limoges (2010).

[26].. A. Proner, "Revêtements par projection thermique", Techniques de l'ingénieur, 1999

[27].. J. Fazilleau, "Contribution {la compréhension des phénomènes impliqués dans la réalisation de dépôts finement structurés d'oxydes par projection de suspensions par plasma", Université de Limoges, 2003

[28].. Kreye H., "Characteristics of coatings produced by high velocity flame spraying" Paper N° 24.1-24.9, 12th International Thermal Spraying Conference, London, 4-9 June, 1989

[19] **SOKOLOV Dmitry Evguenievitch**, Thèse de doctorat, Contribution au développement de la projection thermique à très faible pression, Université de technologie de Belfort, 10 mars 2009.

[29].. N. A. Hussary, J. Heberlein, Investigation of arc Behavior and Particle Formation in the Wire Arc Spray Process Using High Speed Photography: Surface Engineering via Applied Research, (Pub.) ASM International, Materials Park, Ohio, USA, (2000), pp737-742 [21] **A.A. Syed, P. Denoirjean, A. Denoirjean, J.C. Labbe, P. Fauchais**, Influence of Substrate surface Oxidation Stage on the Morphology and Flattening of Splats, Proceedings of The 7th European Conference of Thermal Plasma Processes, July 2002, Strasbourg, France, Begel house.

[30] A.P. Newbery, P.S. Grant, Droplet Splashing During Arc Spraying of Steel and the Effect on Deposit Microstructure, *Thermal Spray Technology*, Vol. 9 (No.2), 2000, pp250-258.

[31] A.A. Syed, P. Denoirjean, A. Denoirjean, B. Hannover, J.C. Labbe, P. Fauchais, Oxidation at Different Stages in Stainless Steel Coatings Developed by Air Plasma Spraying On Plain Carbon Steel, *Proceedings of the 7th European Conference of Thermal Spray*, July 2002, Strasbourg, France, Begel House.

[32] Gilles Espié, Oxydation de particules de fer dans un plasma d'arc Ar-H₂, influence sur les propriétés du dépôt, Thèse de doctorat, *Procédés Céramiques et Traitements de Surface*, Université de Limoges, 2000, pp8-11 et pp80-84

[33] A. Vardelle, P. Fauchais, N.J. Themelis, Oxidation of Metal Droplets in Plasma Sprays: *Thermal Spray Science & Technology*, (Ed.) C. Coddet² and S. Sampath, (Pub.) ASM International, Materials Park, Ohio, USA, (1995), pp175-180.

[34] E. R. Sampson, 'Cored wire application using electric arc spray', pp 133-137 of "Thermal Spray Meeting the Challenges of the 21st Century" Ed. C. Coddet, Pub. ASM international, Materials Park, OH-USA, (1998), 1693 pages (Nice).

[35] V.V. Kudinov, P. Y. Pekshev, V. A. Safiullin. Forminf of the structure of Plasma Sprayd Materials, *High Temp. Dust. Laden Jets*, (éd) Solonenko ET Fedorchenko. (1989) 381-

ANNEXE

Name and formula

Reference code: 00-031--0619

Compound name: Chromium Iron Nickel Carbon
Common name: austenite
PDF index name: Chromium Iron Nickel Carbon

Empirical formula: CCrFeNi
Chemical formula: CrNiFeC

Crystallographic parameters

Crystal system: Cubic
Space group: Fm-3m E
Space group number: 225

a (Å): 3,6000
b (Å): 3,6000
c (Å): 3,6000
Alpha (°): 90,0000
Beta (°): 90,0000
Gamma (°): 90,0000

Calculated density (g/cm³): 8,00
Volume of cell (10⁶ pm³): 46,66
Z: 0,39

RIR:

Subfiles and quality

Subfiles: Alloy, metal or intermetallic
Common Phase
Educational pattern
Inorganic

Quality: Low precision (O)

Comments

Creation Date: 01/01/1970
Modification Date: 01/01/1970
Density 8.0 was calculated for 0.75 wt.% C. Material: 13/12 type of stainless steel, composition unknown. The lattice-dimension allows for variations observed. Approximately correct for austenite in most steels

Additional Patterns: To replace 00-023--0298.

References

Primary reference: Goldschmidt., *Metallurgia*, **40**, 103, (1949)

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta [deg]	I [%]
1	1	1	1	2,08000	43,473	100,0
2	2	0	0	1,80000	50,674	80,0
3	2	2	0	1,27000	74,679	50,0
4	3	1	1	1,08300	90,676	80,0
5	2	2	2	1,03700	95,944	50,0
6	4	0	0	0,90000	117,716	30,0

Stick Pattern

Int'l'nSily [%]

100

el Pattern Chromium Iron Nickel Carbon, 00-031-0619

50



Name and formula

Reference code: 00-021--0008

Compound name: AJummum Nickel
PDF index name: AJummum Nickel

Empirical formula: AlNi_3
Chemical formula: AlNi_3

Crystallographic parameters

Crystal system: Tetragonal
Space group: P4/mmm
Space group number: 123

a (Å): 3,7800
b (Å): 3,7800
c (Å): 3,2800
Alpha (°): 90,0000
Beta (°): 90,0000
Gamma (°): 90,0000

Calculated density (g/cm³): 7,19
Volume of cell (10⁶ pm³): 46,87
Z: 1,00

RIR:

Subfiles and quality

Subfiles: Alloy, metal or intermetallic
Inorganic
Quality: Blank (B)

Comments

Creation Date: 01/01/1970
Modification Date: 01/01/1970
Pattern quenched from 1300 C. Structures: Martensitic phase with tetragonal distortion of Ni₃Al structure.

References

Primary reference: Rosen, Goebel., *Trans. Am. Inst. Min. Eng.*, **242**, 742, (1968)

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta [deg]	I [%]
1	1	0	0	3,79000	23,454	4,0
2	0	0	1	3,28000	27,165	5,0
3	1	1	0	2,68000	33,408	5,0

4	1	0	1	2,48000	36,191	2,0
5	1	1	1	2,07000	43,694	100,0
6	2	0	0	1,89000	48,104	40,0
7	0	0	2	1,64000	56,029	20,0
8	2	2	0	1,34000	70,178	15,0
9	2	0	2	1,24000	76,809	20,0
10	3	1	1	1,12600	86,330	25,0
11	2	2	2	1,04000	95,578	10,0
12	1	1	3	1,01000	99,401	10,0

Stick Pattern

Inl'nSily [%]

100

Rel Ptttrrt Alumnu Nid:i, 00-021-0008

50

0

JO

50

60

70

80

90

100

pennon [°2Thet!] rcoppe (Ü!)

Name and formula

Reference code: 96-901-3033

Compound name: 9013032

Common name: 9013032

Chemical formula: $\text{Ni}_{4.00}$ **Crystallographic parameters**

Crystal system: Cubic

Space group: Fm -3 m

Space group number: 225

a (Å): 3,5950

b (Å): 3,5950

c (Å): 3,5950

Alpha (°): 90,0000

Beta (°): 90,0000

Gamma (°): 90,0000

Calculated density (g/cm³): 8,39Volume of cell (10⁶ pm³): 46,46

RIR: 8, 14

Subfiles and quality

Subfiles: User Inorganic

User Metallic

Quality: User From Structure (=)

Comments

Creation Date: 05/04/2013 09:56:16

Modification Date: 05/04/2013 09:56:16

Publication title: High-temperature thermal expansion of six metallic elements measured by dilatation method and X-ray diffraction Locality: synthetic Sample: at T = 1433 K

COD database code: 9013032

ReferencesStructure: Suh, I.-K., Ohta, H., Waseda, Y., *Journal of Materials Science*, 23, 757 - 760, (1988)**Peak list**

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta [deg]	I [%]
1	1	1	1	2,07557	43,570	100,0
2	0	0	2	1,79750	50,750	44,9
3	0	2	2	1,27102	74,608	21,8

Structure

No.	Name	Elem.	X			Biso	sof	wyck.
1	Ni	Ni	0,00000	0,00000	0,00000	0,5000	1,0000	4a

Stick Pattern



Name and formula

Reference code: 00-021--0008

Compound name: AJummum Nickel
PDF index name: AJummum Nickel

Empirical formula: AlNi_3
Chemical formula: AlNi_3

Crystallographic parameters

Crystal system: Tetragonal
Space group: P4/mmm
Space group number: 123

a (Å): 3,7800
b (Å): 3,7800
c (Å): 3,2800
Alpha (°): 90,0000
Beta (°): 90,0000
Gamma (°): 90,0000

Calculated density (g/cm³): 7,19
Volume of cell (10⁶ pm³): 46,87
Z, 1,00

RIR:

Subtiles and quality

Subfiles: Alloy, metal or intermetallic
Inorganic
Quality: Blank (B)

Comments

Creation Date: 01/01/1970
Modification Date: 01/01/1970
Pattern quenched from 1300 C. Structures: Martensitic phase with tetragonal distortion of Ni₃Al structure.

References

Primary reference: Rosen, Goebel., *Trans. Am. Inst. Min. Eng.*, **242**, 742, (1968)

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta [deg]	I [%]
1	1	0	0	3,79000	23,454	4,0
2	0	0	1	3,28000	27,165	5,0
3	1	1	0	2,68000	33,408	5,0

4	1	0	1	2,48000	36,191	2,0
5	1	1	1	2,07000	43,694	100,0
6	2	0	0	1,89000	48,104	40,0
7	0	0	2	1,64000	56,029	20,0
8	2	2	0	1,34000	70,178	15,0
9	2	0	2	1,24000	76,809	20,0
10	3	1	1	1,12600	86,330	25,0
11	2	2	2	1,04000	95,578	10,0
12	1	1	3	1,01000	99,401	10,0

Stick Pattern

Intensity [%]

100

Reference Pattern Aluminum Nitride, 00-021-0008

50

0

2θ

50 60 70 80 90 100
2θ [°]

résumé

Lors de ces dernières décennies, de nombreuses études ont été menées dans le domaine des matériaux et des procédés afin d'augmenter les performances des pièces en service et de comprendre l'origine des mécanismes physiques responsables des propriétés recherchées.

L'amélioration des performances des turbines à gaz est un enjeu important, qui nécessite d'identifier et de comprendre les mécanismes de détérioration qui ont lieu durant leur utilisation.

Dans les parties les plus chaudes des turbines à gaz (*i.e.* chambre de combustion), les matériaux utilisés sont soumis à de fortes sollicitations thermiques et mécaniques. Cela est notamment le cas des aubes de turbine.

Les matériaux utilisés pour résister à de telles sollicitations et dégradations, sont des superalliages à base de nickel. Leurs excellentes propriétés mécaniques leur assurent une bonne résistance aux sollicitations mécaniques. En revanche, leur durée de vie est souvent limitée par les dommages causés par l'environnement.

Afin d'améliorer la durabilité à haute température des aubes de turbine, des revêtements sont réalisés à flamme-fil, à flamme-poudre et leurs caractérisations.

Mots clés: superalliages à base de nickel, revêtement à flamme-fil, revêtement à flamme-poudre, micro-dureté, microscopie, DRX.

ملخص: خلال السنوات الأخيرة، العديد من الدراسات فعلت في مجال المواد وإجراءات قصد تحسين الكفاءة للقطاع خلال العمل التشغيل وكذا المفاهيم الأصلية الميكانيكية المسؤولة عن الخصائص في الأبحاث.

تحسين جودة تيربين الغاز جد مهمة والتي تتطلب معرفة وفهم المؤثرات الميكانيكية التي تسبب التلف أثناء التشغيل.

في الأجزاء المعرضة لدرجة الحرارة الكبيرة بالنسبة لمحركات تيربينات الغاز (عرضة الاحتراق) المواد المستعملة بهدف مقاومة مؤثرات عالية كدرجة الحرارة وهذا هو خصوصاً ما عليه التيربينات.

لكي تقاوم المواد هذه القوى التي تؤدي لتلف تستعمل السبائك النيكلية لسبب مقاومتها الكبيرة التي تضمن تحقيق الأهداف المرجوة.

وما يعيق ذلك ان مدة الحياة الخاصة بها محدودة لتلفها بمحيط العمل لكي نحسن في مدة استعمالها . نعتمد التلبيس بمواد عن طريق الحرارة (اللهب ومعالجتها).

المفاتيح:

superalliages à base de nickel, revêtement à flamme-fil, revêtement à flamme-poudre, micro-dureté, microscopie, DRX.