

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



UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE



Projet de fin d'études

Pour l'obtention de Master en Génie Mécanique

Option : Matériaux et traitement des surfaces

Métallisation des pièces en matières plastiques

Proposé et dirigé par:

Mr. Pr. BACHA

Etudié par :

Larbi salem Amine

Année universitaire 2015/2016

DEDICACE

Je dédie ce modeste travail :

*A ma tendre mère qui m'a été la cause de ma réussite.
A mon très cher père Mohamed qui m'a élevé sur la loyauté et
l'honnête.*

A mes frères

A tous mes oncles et mes tantes

Ainsi que tous mes amis et mes proches et camarades d'étude

Remerciements

*Tout d'abord je remercie **Allah** le tout puissant de m'avoir donné le courage et la patience de mener à bien mon projet de fin d'études. et je remercie mes parents pour leurs soutient moral et encouragement.*

Je remercie mon professeur Nacer-Eddine BACHA, d'avoir bien voulu me proposer le sujet et ensuite encadré mon travail en m'apportant l'orientation et l'aide nécessaire.

Je tiens à remercier :

- *Tous les enseignants du département de génie mécanique.*
- *Je souhaiterai également remercier tous mes collègues du département de génie mécanique*
- *Dilmi Nacer qui ma bien aidé pendant ce travail.*

Sans oublier tous ceux qui ont participés de près et de loin à l'élaboration de ce projet, pour leur soutien inconditionnel.

Sommaire

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre 1: Projection thermique.

1.1 Introduction	2
1.2 Principe général de la projection thermique	3
1.2.1 Source d'énergie.....	4
1.2.2 La formation de revêtement	4
1.3 Les procédés de projection thermique.....	5
1.3.1 Les procédés par combustion	5
1.3.1.1 Projection flamme poudre.....	5
1.3.1.2 Projection flamme-fil	6
1.3.1.3 Projection à la flamme supersonique (HVOF).....	7
1.3.2 Les procédés par décharge électrique.....	7
1.3.2.1 Projection à l'arc électrique.....	7
1.3.2.2 Projection par plasma.....	8

Chapitre 2: Métallisation des plastiques.

2.1 Introduction.....	10
2.2 Les applications de plastique métallisé.....	11
2.3 Processus de métallisation des plastiques.....	13
2.3.1 Matériaux.....	13
2.3.1.1 Polymères.....	13
2.3.1.2 Métaux.....	14
2.3.2 Adhésion.....	15
2.3.2.1 Forces mécaniques.....	15
2.3.2.2 Forces de Van der Waals.....	16
2.3.2.3 Forces électrostatiques.....	16

2.4 Méthodes de métallisations des polymères.....	16
2.4.1 Dépôt par immersion dans les métaux fondus.....	16
2.4.2 Dépôt sous vide.....	16
2.4.2.1 Techniques PVD.....	17
2.4.2.1 Techniques CVD.....	18
2.4.3 Dépôt par voie chimique.....	18
2.4.4 Dépôt par voie électrolytique.....	18
2.4.5 Dépôt par projection thermique.....	19
2.5 Construction des dépôts.....	19
2.6 Etalement des particules.....	20

Chapitre 3: Partie expérimentale

3.1 Introduction.....	21
3.2 Substrat	21
3.3 Préparation de surface.....	22
3.4 Réalisations des revêtements.....	23
3.4.1 Projection thermique à flamme.....	23
3.4.2 Caractéristique de poudre utilisée (RotoTec 19800)....	23
3.4.3 Projection a arc électrique.....	24
3.5 Protection de l'opérateur.....	25
3.6 L'étude métallographie	25
3.6.1 Découpage par Scie à métaux.....	25
3.6.2 Le polissage	25
3.6.3 Le polissage de finition	26
3.6.4 Analyse micrographique	27
3.6.5 Microscope optique	27
3.7 Techniques de mesure d'adhérence.....	28
3.7.1 Le test du plot colle.....	28

Chapitre 4: Résultats et interprétation

4.1. Introduction.....	29
4.2. Projection thermique.....	29
4.3. Etude métallographique.....	35
4.4. Obtention de lamelles individuelles.....	36
4.4.1 Etude des lamelles sur substrats rugueux.....	36
4.4.2. Etude des lamelles sur substrats lisses	38
4.5. Etude de l'adhérence des revêtements.....	40
4.5.1. Etude du facies de rupture.....	41

Liste des tableaux et des figures

Tableau.2.1. description et répartition des polymères utilisés	14
Tableau 3.1: Composition chimique de la poudre Rototec 19800.....	23
Tableau 3.2. Caractéristiques mécaniques et physiques de poudre	24
Figure 1.1. L’historique de la projection thermique	3
Figure 1.2. Principe de la projection thermique.....	3
Figure 1.3. Les différentes sources d’énergie en projection thermique.....	4
Figure 1.4. Coupe d’une couche projetée au moment de l’impact d’une gouttelette.....	5
Figure .1.5. Schéma de principe d’un pistolet flamme-poudre.....	6
Figure 1.6. Principe de la projection à flamme par fil.....	6
Figure 1.7. Schéma de principe de la projection HVOF.....	7
Figure 1.8. Schéma de principe de la projection à l’arc.....	8
Figure 1.9. Schéma de principe de la projection thermique plasma.....	9
Figure 2.1. Domaines d’applications de la métallisation sur plastique.....	11
Figure 2.2. Domain d’application de plastique métallisé (domaine d’Automobile)	12
Figure 2.3. Domain d’application de plastique métallisé (domaine de Cosmétique).....	12
Figure 2.4. Domain d’application de plastique métallisé (domaine de Sanitaire).....	12
Figure 2.5. Domain d’application de plastique métallisé (domaine de Connectique).....	12
Figure 2.6. Répartition des principaux polymères utilisés.....	14
Figure 2.7. Schématisation des types de points d’ancrage mécaniques.....	15
Figure 2.8. Etalement d’une particule sur un substrat.....	20
Figure 3.1. Scie à métaux.....	21
Figure 3.2. Grenailleuse.....	22
Figure 3.3. Torche à flamme Rototec 80 de CastollinEutectic.....	23
Figure 3.4. Unité de projection thermique par arc-électrique.....	24
Figure 3.5. Equipement de la protection de l’opérateur	25
Figure 3.6. Polisseuse.....	26
Figure3.7. polisseuse de finition.....	26
Figure 3.8. Microscope optique utilisé pour l’analyse métallographique.....	27
Figure 3.9. Testeur d’adhérence par arrachement Posi Test.....	28
Figure 4.1 Revêtement de bronze déposé à 200 mm du substrat sans apport d'air.....	29

Figure 4.2 Revêtement de bronze déposé à 300 mm du substrat sans apport d'air.....	30
Figure 4.3 Revêtement de bronze déposé à 500 mm du substrat sans apport d'air.....	31
Figure 4.4 Revêtement de bronze déposé à 300 mm du substrat avec.....	32
refroidissement à l'air comprimé.	
Figure 4.5 Revêtement d'Al déposé à 300 mm du substrat sans refroidissement à l'air.....	33
Figure 4.6 Revêtement d'Al déposé à 400 mm à l'arc électrique sans refroidissement d'air.	34
Figure 4.7 Revêtement d'Al déposé à 500 mm à l'arc électrique sans refroidissement d'air...	34
Figure 4.8 Revêtement de bronze déposé par torche à flamme à 300 mm avec.....	35
refroidissement à l'air comprimé.	
Figure 4.9 Revêtement d'Al déposé par arc électrique à 300 mm sans.....	36
refroidissement à l'air comprimé.	
Figure 4.10 Lamelle de bronze sur substrat rugueux en ABS déposé :à 300 mm de distance.....	37
de projection avec refroidissement d'air comprimé.	
Figure 4.11 Coupe transversale A-A de la lamelle de bronze sur substrat rugueux en ABS.....	37
Figure 4.12 Lamelle d'aluminium sur substrat rugueux en ABS déposé :.....	38
à 300 mm de distance de projection sans refroidissement d'air comprimé	
Figure 4.13 Coupe transversale A-A de la lamelle d'aluminium sur substrat rugueux en ABS.....	38
Figure 4.14 Lamelle de bronze sur substrat lisse en ABS déposé :.....	39
à 300 mm de distance de projection avec refroidissement d'air comprimé	
Figure 4.15 Lamelle d'aluminium sur substrat lisse en ABS déposé	39
à 300 mm de distance de projection avec refroidissement d'air comprimé	
Figure 4.16 Contraintes d'arrachement des revêtements métalliques sur substrat ABS.....	41
Figure 4.17 Faciès de rupture du revêtement de bronze déposé à la torche à flamme.....	42
sur substrat en ABS rugueux.	
Figure 4.18 Faciès de rupture du revêtement d'Al déposé à l'arc électrique sur substrat	42
sur substrat en ABS rugueux.	
Figure 4.19 Faciès de rupture du revêtement de bronze déposé à la torche à flamme sur.....	43
substrat en ABS non rugueux.	
Figure 4.20 Faciès de rupture du revêtement d'Al déposé à l'arc électrique sur substrat	43
sur substrat en ABS non rugueux	

Conclusion générale

Les travaux présents dans ce mémoire ont pour objectif de déterminer les paramètres optimaux pour déposer des revêtements métalliques sur un substrat en matière plastique. La projection thermique a été utilisée pour déposer des revêtements de bronze à l'aide d'une torche à flamme et des revêtements d'aluminium à l'aide d'un arc électrique.

L'a microscopie optique et les essais d'adhérence ont été utilisés pour caractériser la qualité des revêtements déposés. Une étude de lamelle individuelle a été réalisée pour comprendre l'effet d'aplatissement d'une lamelle métallique sur un substrat en matière plastique.

Les résultats ont montré que:

1. L'effet de la distance de projection est extrêmement important. Il est d'autant plus important pour une déposition par une torche à flamme.
2. Lorsque les paramètres opératoires sont optimisés, les revêtements sont uniformes sans déformation du substrat. Il n'y a pas de calcination du substrat en ABS.
3. L'étude de l'aplatissement d'une lamelle individuelle a montré qu'il y a un effet de fusion locale de la lamelle sur le substrat en ABS. Ce phénomène est d'autant plus prononcé pour une déposition par torche à flamme.
4. L'effet de calcination est grandement atténué en ajoutant un refroidissement à l'air comprimé durant la déposition à la torche à flamme.
5. En général, l'augmentation de la rugosité du substrat améliore l'adhérence des revêtements métalliques sur le substrat en ABS.
6. Le faciès de rupture présente une adhérence majoritairement adhésive. La force d'arrachement a atteint 280 psi pour le revêtement en bronze déposé par la torche à flamme et 200 psi pour le revêtement d'aluminium déposé par l'arc électrique. Ces résultats sont vraiment encourageants, et une meilleure compréhension des phénomènes à l'interface lamelle/substrat à l'aide d'une modélisation des transferts thermiques contribuerait à améliorer ce résultat.

- La réalisation de revêtements par projection thermique sur des substrats plastique nécessite l'utilisation de moyens de refroidissement efficaces afin de limiter l'apport de chaleur.
- La nature et la rugosité du substrat influencent, de manière notable, l'étalement des gouttelettes
- Pour l'essai d'adhérence nous constatons que les revêtements déposés sur un substrat ABS rugueux possèdent une meilleure adhérence que ceux déposés sur un substrat lisse
- Après l'étude de facies de rupture nous concluons que la rugosité améliore l'adhérence entre le métal et le plastique.

Introduction

Le marché de la métallisation des matières plastiques est en pleine expansion. Plusieurs raisons motivent ce choix. D'un point de vue économique, choisir une matière plastique permet de réduire la masse de l'objet à métalliser, et donc les coûts énergétiques liés à sa transformation. D'un point de vue technique, les revêtements métalliques assurent une protection aux polymères et leur confèrent de nouvelles propriétés de résistance mécanique, à la corrosion, à la chaleur, aux ultraviolets, et aux solvants. D'un point de vue esthétique, la métallisation des matières plastiques donne un aspect final métallique coloré, et vient compléter la grande liberté de forme, de couleur, d'aspect et de poids autorisée par l'utilisation des polymères.

Dans ce mémoire nous utilisons la métallisation par projection thermique, car La projection thermique regroupe l'ensemble des procédés dans lesquels un matériau d'apport est fondu ou porté à l'état plastique grâce à une source de chaleur, puis est projeté à l'aide d'un gaz vecteur sur la surface à revêtir sur laquelle il se solidifie .

Dans ce cadre, le mémoire de ce travail est organisé selon quatre chapitres :

- Dans le premier chapitre, on présente une étude bibliographique concernant les différentes techniques de projection thermique et leurs principes.
 - Le deuxième chapitre montre des généralités du domaine de métallisation des plastiques, les applications, les différentes Processus et Méthodes de métallisations.
 - Le troisième chapitre traite la description des méthodes expérimentales ainsi que les moyens d'analyses utilisés dans notre travail.
 - Le dernier chapitre montre les différents résultats obtenus et les interprétations.
- Ce travail est clôturé par une conclusion générale.

1.1 INTRODUCTION

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

Évolution des procédés

C'est après la Seconde Guerre mondiale que le domaine d'application de la projection thermique s'est élargi à l'industrie mécanique (apport de revêtement d'acier dans le cadre de rénovation de pièces usagées), puis à l'industrie aéronautique.

La recherche de propriétés de surface spécifiques sur les pièces en service, dont les conditions d'emploi sont de plus en plus sévères, a permis le développement de nouveaux procédés (plasma, canon à détonation, HVOF High Velocity Oxygen Fuel...) et de nouveaux matériaux associés (céramiques, carbures, composites, superalliages...).

Aujourd'hui, les objectifs techniques et économiques des industriels de tous les secteurs vont dans le sens de la réduction des coûts et de l'amélioration des performances. Les pièces constitutives de machines ou équipements, de dimensions de plus en plus réduites, doivent résister à des sollicitations nombreuses :

- sollicitations internes : contraintes mécaniques, fatigue, fluage... ;
- sollicitations externes : frottement, abrasion, température, érosion, fretting ... ;
- sollicitations environnementales : corrosion, oxydation, attaque chimique, chaleur...

La projection thermique va permettre de conférer à chaque zone la propriété de surface nécessaire à son fonctionnement, tout en autorisant des choix de matériaux de base compatibles avec les propriétés à cœur recherchées.

Chapitre 1 : Projection thermique

Secteurs d'activité

Tous les secteurs d'activité sont aujourd'hui concernés par la projection thermique. Si la protection anticorrosion reste le cas d'application le plus fréquent, certains secteurs comme l'automobile présentent des applications multiples parmi lesquelles on peut citer à titre d'exemples : soupapes, segments de piston, anneaux de synchro, disques d'embrayage, sondes lambda, cylindres, pompes, platines d'alternateurs, plaquettes de freins...La figure 1.1 retrace l'historique du développement de la projection thermique. . [1]

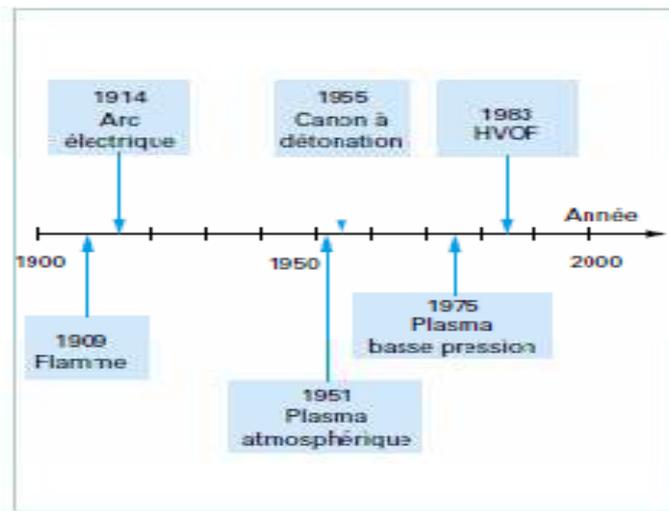


Figure 1.1 : Historique de la projection thermique. [1]

1.2. Principe général de la projection thermique

La projection thermique consiste (voir figure 1.2) 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. . [2]

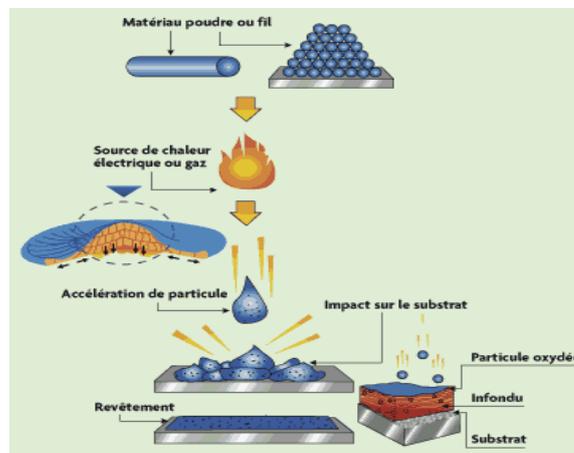


Figure 1.2 : Principe de la projection thermique. [2]

1.2.1. Source d'énergie

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 1.3. 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. [3]

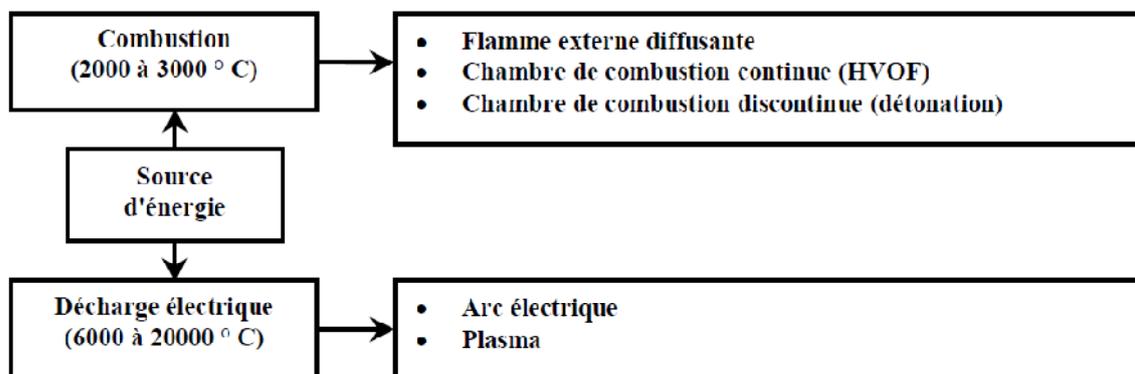


Figure1.3. Les différentes sources d'énergie en projection thermique [3]

1.2.2. La formation du revêtement

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. La figure 1.4 montre une coupe d'une couche projetée au moment de l'impact d'une gouttelette. [4]

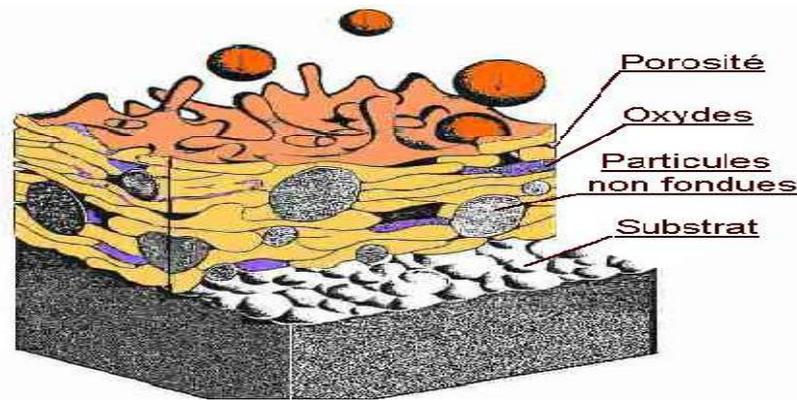


Figure 1.4. Coupe d'une couche projetée au moment de l'impact d'une gouttelette.[4]

Les caractéristiques d'un revêtement peuvent être adaptées par un choix judicieux des paramètres de projection (vitesse, température, puissance, distance de projection, débit...) afin d'aboutir aux propriétés recherchées ou encore par des traitements post-projection. La figure I-4 présente la structure typique d'un revêtement obtenu par projection thermique avec les principaux défauts que l'on peut rencontrer (porosités, particules non fondues, oxydes...).

1.3. Les procédés de projection thermique

Les procédés de projection thermique peuvent être classés en deux catégories :

1.3.1. Les procédés par combustion

Les procédés par combustion sont: le procédé flamme-poudre(FP), procédé flamme fil ou cordon(FF), procédé HVOF et procédé par canon détonation(CD).

1.3.1.1. Projection flamme poudre

Le procédé de projection par flamme est basé sur la combustion d'un carburant sous forme gazeuse avec l'oxygène. Dans la technologie dite flamme-poudre, le matériau est introduit sous forme de poudre dans la flamme diffusante qui le véhicule jusqu'au substrat (figure 1.5). Les températures de la flamme sont de l'ordre de 3000 °C, et donc les températures atteintes par les particules à projeter ne dépassent généralement pas 2000 °C.

La vitesse des particules projetées par la flamme est faible (~50 m/s). La distance entre la buse et le substrat est comprise entre 100 et 200 mm afin que les particules de poudre aient un temps de séjour suffisamment long pour être fondues. Ce procédé permet d'obtenir des dépôts de quelques dixièmes à quelques centièmes de millimètre d'épaisseur à des taux horaires de

Chapitre 1 : Projection thermique

dépôt d'environ 2 à 3 kg/h sans échauffement important du substrat ($T < 250\text{ °C}$). Les matériaux les plus utilisés restent les alliages auto-fusibles (alliages à base Nickel ou Cobalt contenant des éléments de petite taille tels que le bore et/ ou le silicium et chargés éventuellement en carbures) ou encore les matériaux organiques. [5]

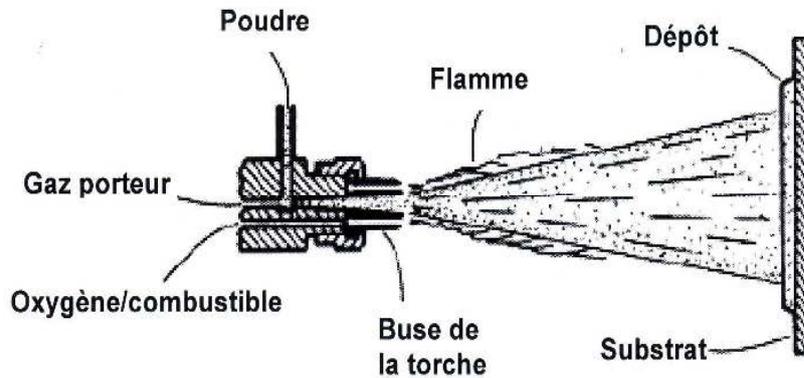


Figure 1.5. Schéma de principe d'un pistolet flamme-poudre. [5]

1.3.1.2. Projection flamme-fil

Son principe, montré schématiquement à la figure 1.6, consiste à introduire un matériau, sous forme de fil, cordon ou baguette, au centre d'une flamme oxy-combustible produite par un chalumeau et à le projeter sur le substrat. Mais contrairement à ce dernier, la flamme est uniquement utilisée pour fondre le matériau d'apport, dont la projection des gouttelettes sur le support est assurée par un jet d'air comprimé qui atomise et propulse le matériau fondu. La température de fusion des matériaux peut atteindre 0,95 de la température de la flamme ($T_{\text{fusion}} = 0,95 T_{\text{flamme}}$). L'épaisseur des dépôts varie de quelques dixièmes de millimètres à quelques millimètres. [6]

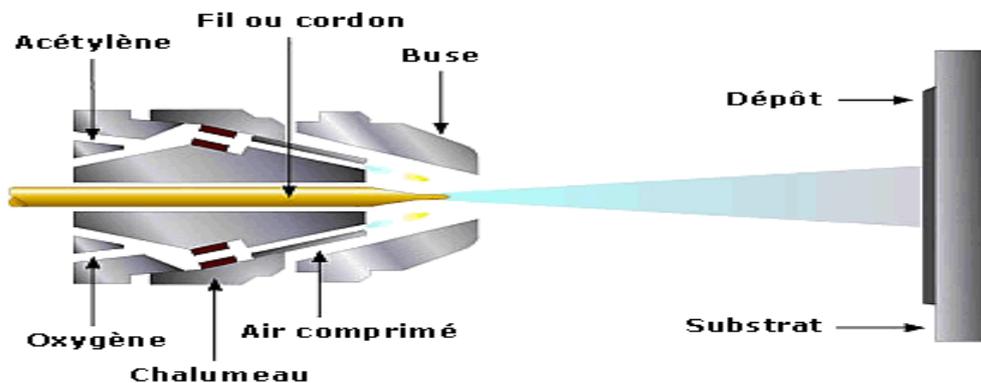


Figure 1.6 : Principe de la projection à flamme par fil. [6]

1.3.1.3. Projection à la flamme supersonique (HVOF)

Le principe de la technique HVOF est le même que celui de la projection à la flamme. Ses particularités sont: en premier un processus de déflagration qui se produit dans un volume confiné et en second une expulsions des gaz à travers un divergent de type Laval (figure 1.7). Carburant et comburant sont injectés dans la chambre de combustion sous pression avec des débits variant entre 100 et 500 NL/min. La réaction de réduction provoque une forte expansion du mélange gazeux qui se propage à vitesse sonique dans la tuyère et passe au-delà dans le divergent et le jet externe. Les mélanges carburant/comburant sont de type gazeux (oxygène – hydrogène/propane/propylène/gaz naturel) ou liquide (air comprimé – kérosène ou white spirit) pour le procédé appelé HVAF (High Velocity Air Fuel). .[7]

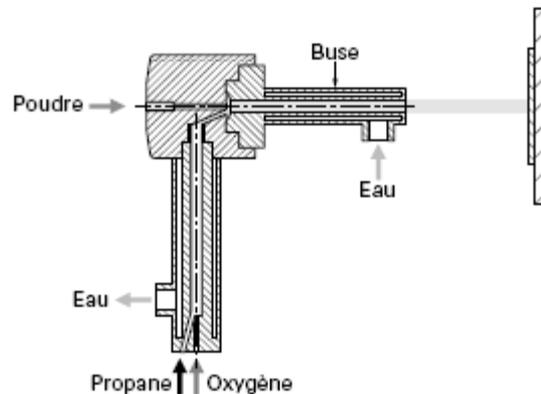


Figure 1.7. Schéma de principe de la projection HVOF .[7]

1.3.2. Les procédés par décharge électrique

Ce sont les procédés à l'arc électrique (AE) et le procédé plasma (PS).

1.3.2.1. Projection à l'arc électrique

La projection à l'arc est le premier procédé ayant utilisé l'énergie d'une décharge électrique. Il consiste en un arc électrique créé entre deux fils consommables et un jet de gaz comprimé qui sert à pulvériser et à projeter le métal fondu en fines gouttelettes sur le substrat. L'équipement consiste en un pistolet de projection, un système d'avancement des fils, un générateur de courant asservi par une régulation automatique et une source de gaz comprimé (généralement de l'air mais l'utilisation d'un gaz neutre est possible). Les fils sont amenés

Chapitre 1 : Projection thermique

dans la zone de fusion du pistolet à travers des électrodes guides qui assurent leur bon positionnement et le transfert du courant (figure 1.8). L'arc électrique est généré entre les deux fils en contact et permet de les fondre. La température dans la zone de fusion peut être de l'ordre de 6000 K. Le métal fondu est pulvérisé grâce au jet de gaz comprimé et projeté sur le substrat. Les épaisseurs des dépôts varient de 0.2 à 3 mm avec un taux de porosité de 5 à 10% et une adhérence de 20 à 40 MPa. La technique est simple et peu coûteuse et permet de déposer la matière avec un débit important (de 5 à 30 kg/h). L'utilisation d'un gaz neutre diminue sensiblement la présence d'oxydes dans le dépôt. Des modifications du pistolet et l'emploi d'un second jet de gaz ont permis de concentrer le flux de matière atomisée et de diminuer la porosité des couches. [8]

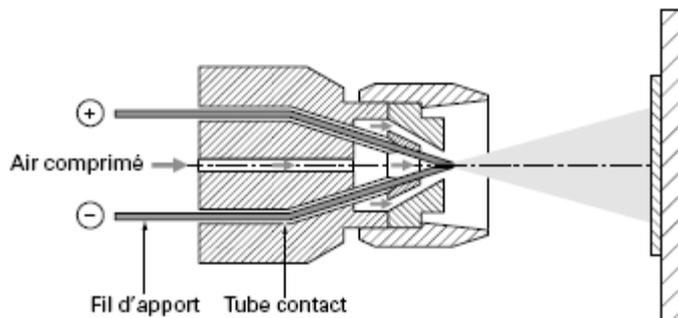


Figure 1.8. Schéma de principe de la projection à l'arc électrique. [8]

Les matériaux projetés sont des métaux conducteurs électriques (aluminium, cuivre, zinc, molybdène), des aciers mais aussi des alliages NiCrAl, NiMoAl. L'une des limites importantes du procédé est la nature des matériaux (tréfilabilité et conductibilité). La gamme des matériaux projetés peut être élargie en utilisant la technologie des fils fourrés qui permet de déposer des carbures (CrC, WC, TiC) et des oxydes ainsi que d'élaborer des couches composites.

1.3.2.2. Projection par plasma

Le principe de ce procédé est l'utilisation d'un arc électrique dans un plasma gazeux.

Le matériau d'apport sous forme de poudre est introduit dans cette source de chaleur d'une température comprise entre 15000 et 20000 (°C). Ce procédé est essentiellement mis en œuvre dans l'air ambiant mais pour obtenir des revêtements plus épais à de plus faible température, il peut être mis en œuvre sous atmosphère contrôlée ou sous vide.

Chapitre 1 : Projection thermique

L'épaisseur de dépôt est variable en fonction des demandes et la porosité est inférieure à 10%.

La figure 1.9 montre une coupe transversale d'une torche plasma. [9]

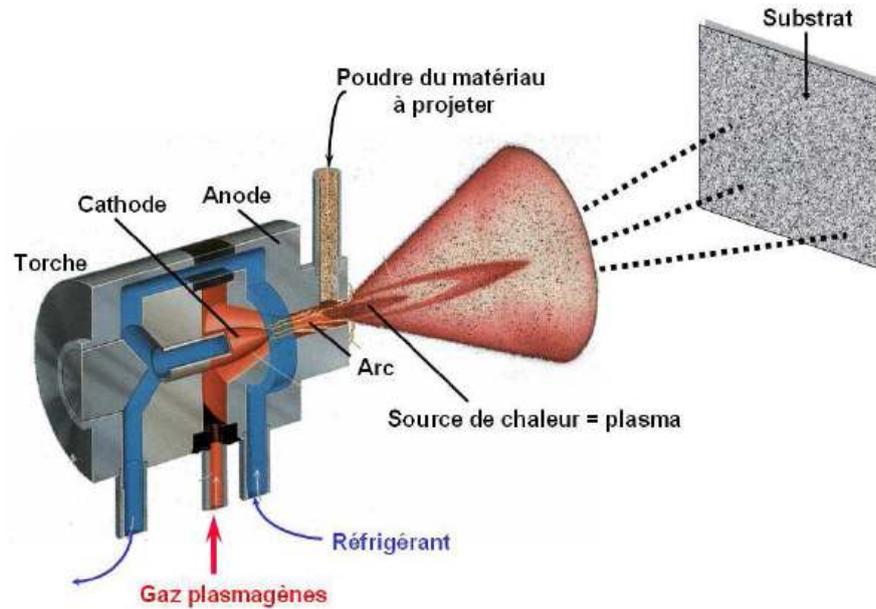


Figure 1.9. Coupe transversale d'une torche plasma.[9]

2.1. INTRODUCTION

Les matières plastiques sont très largement utilisées aujourd'hui pour un grand nombre d'applications. Cependant, toutes ne subissent pas un traitement de métallisation. Mais d'ailleurs, pourquoi métallise-t-on les matières plastiques ? Les raisons en sont multiples.

En effet, d'un **point de vue économique**, choisir une matière plastique telle que l'ABS, par rapport à une pièce métallique, permet de réduire la masse de l'objet à métalliser, les coûts énergétiques liés aux différentes étapes de transformation, de polissage mécanique, ainsi qu'à son transport. De plus, une pièce en ABS présente un aspect brillant après moulage et requiert, par conséquent, des épaisseurs moins élevées qu'une pièce en zamak, pour laquelle il faut combler les porosités de surface.

Pour des **raisons techniques**, les revêtements métalliques assurent une protection aux polymères et leurs confèrent de nouvelles propriétés de résistance mécanique, à la corrosion, à la chaleur, aux ultraviolets, et aux solvants. De plus, il est intéressant d'utiliser les propriétés diélectriques des thermoplastiques et la conductibilité des différentes couches métalliques déposées par voie chimique et/ou électrolytique pour de nombreuses applications telles que les circuits imprimés ou le blindage électrostatique et électromagnétique.

D'un **point de vue esthétique**, la métallisation des matières plastiques a aussi pour but, dans le secteur de la décoration et de la parfumerie, de donner un aspect final métallique coloré.

L'apparition de la plasturgie est encore trop récente pour détrôner totalement les métaux et la forte image qui s'y rattache. Il est donc nécessaire d'ennoblir les matières plastiques par des dépôts d'or, de chrome, d'argent ou de bronze.

Enfin, la métallisation des matières plastiques vient compléter la grande liberté de forme, de couleur, d'aspect et de poids autorisée par l'utilisation des polymères. Ceux-ci sont toujours de plus en plus recherchés par tous les designers et principalement les designers automobiles.[10]

2.2. Les applications de plastique métallisé

La métallisation des plastiques est utilisée dans différents domaines. Elle est utilisée soit pour des raisons purement esthétiques, par exemple dans la décoration ou dans la parfumerie, soit elle est utilisée pour des raisons techniques, telle que l'optique ou l'horlogerie.

Voici un graphique montrant les différents domaines d'application de cette technique :

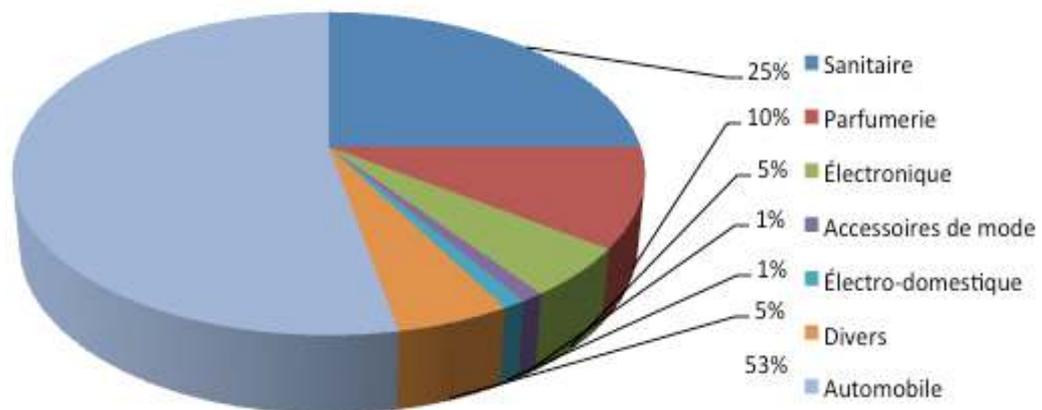


Figure 2.1 : domaines d'applications de la métallisation sur plastique.[10]

Voici une liste d'objets de la vie courante utilisant cette technique :

- Pommeaux de douche
- Capuchons de parfums
- Enjoliveurs
- Rétroviseurs
- poignées de portes
- Sigles
- Phares

Si on prend l'exemple des phares, la métallisation des plastiques permet une bonne réflexion tout en restant léger. [10]

Chapitre 2: Métallisation des plastiques

Quelques images de différents domaines d'applications de plastique métallisé :



Figure2.2. Automobile [24]



Figure 2.3.Cosmétique [24]



Figure2.4. Sanitaire [24]

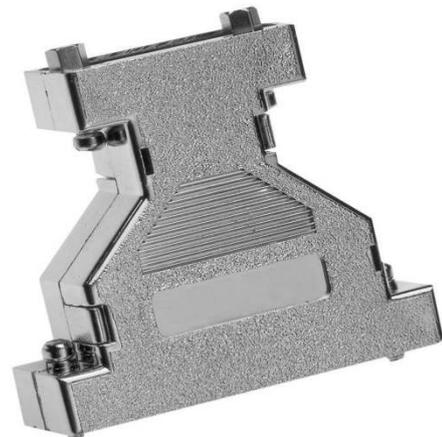


Figure2.5.connectique [25]

2.3. Processus de métallisation des plastiques

2.3.1. Matériaux

Dans le processus de métallisation on voit apparaître les deux matériaux majeurs, le polymère que l'on veut protéger et le métal à déposer.

2.3.1.1. Polymères

Différents polymères sont utilisés comme substrat pour la métallisation. Le choix dépend de l'application et de la technique utilisée.

PMMA

Polymère transparent, très imperméable, ce qui facilite le séchage lors de la mise sous vide. Pour cette raison, il semble être l'un des meilleurs matériaux polymères pour les processus de dépôt en phase vapeur.

ABS

Le polymère le plus utilisé, il offre de bonnes propriétés mécaniques et de cohésion. À éviter pour les techniques de dépôt PVD et CVD en raison de la rugosité de surface trop marquée en particulier pour des applications optiques.

ABS/PC

Ces polymères sont souvent renforcés du polycarbonate. Cela améliore particulièrement les propriétés mécaniques et thermiques de l'ABS. Ce type de matière plastique est spécialement utilisé dans le secteur automobile pour la création de pièces susceptibles de subir des chocs et/ou des déformations.

PP

Polymère très ductile à température ambiante, le polypropylène est particulièrement utilisé dans le secteur de la parfumerie pour sa grande résistance aux solvants.

PA

Les caractéristiques principales des polyamides sont leur grande résistance mécanique (résistance au choc, à la rupture, au fléchissement...) et thermique. [11]

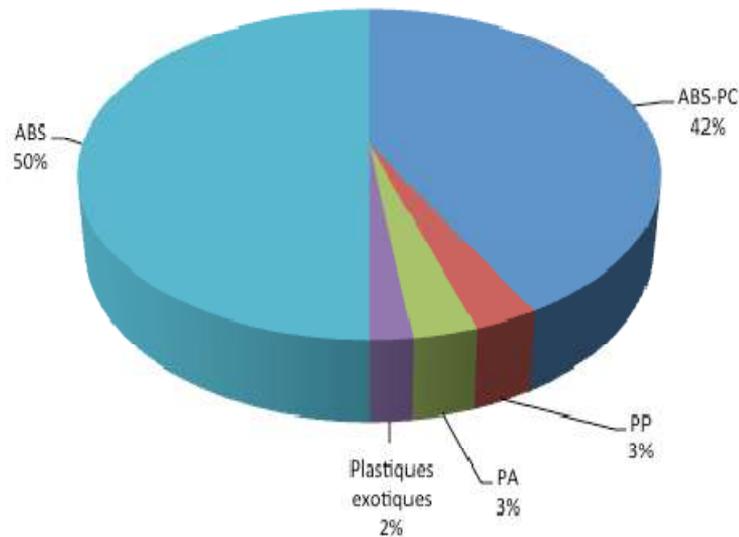


Figure2.6. Répartition des principaux polymères utilisés [11]

Tableau.2.1. description et répartition des polymères utilisés

Matériaux	Propriétés techniques	Exemple d'utilisation
ABS (50%)	<ul style="list-style-type: none"> – Bonnes propriétés mécaniques – Forte cohésion 	<ul style="list-style-type: none"> – Pièces mécaniques dans l'automobile ou médical – Pièces de frottements
PP (3%)	<ul style="list-style-type: none"> – Ductile à température ambiante – Chimiquement inerte 	<ul style="list-style-type: none"> – Parfumerie – Moule thermoformé
ABS-PC (42%)	<ul style="list-style-type: none"> – Très bonnes propriétés mécaniques – Haute résistivité thermique 	<ul style="list-style-type: none"> – Automobile (pare-choc) – Optique

2.3.1.2. Métaux

Il existe une large gamme de métaux utilisés pour la métallisation des polymères, le choix dépend de l'application. Chaque domaine requiert des caractéristiques particulières: la réflexion en optique (aluminium, or, argent), la résistance aux chocs dans le domaine de l'automobile, ...

Certains métaux ou alliages (nickel, cuivre, chrome) sont utilisés en tant que couches intermédiaires entre le substrat et le métal requis en surface, pour assurer une bonne adhérence. Cela permet le dépôt de nombreux métaux par électrodéposition.

2.3.2. Adhésion

L'adhésion est le phénomène qui rend possible la métallisation du plastique. Pour cette raison, il est important de comprendre ce phénomène. De plus, les métaux et les polymères ont des propriétés très différentes qui rendent l'adhésion difficile. La propriété qui rend particulièrement difficile l'adhésion entre ces deux matières est la dilatation thermique. Si le métal et le polymère sont mal collés, la dilatation thermique engendrera leur séparation. Ce sont les forces mécaniques, les forces de Van der Waals et les forces électrostatiques qui permettent la bonne adhésion de ces matières tant différentes.

Pour optimiser l'adhésion, le métal n'est jamais directement apposé sur le plastique, il y a toujours une couche « d'accroche ». Par exemple une couche de chrome entre le plastique et une couche finale d'argent.

2.3.2.1. Forces mécaniques

Vu que la surface du polymère n'est pas parfaitement plate, les deux surfaces peuvent s'imbriquer l'une dans l'autre. Pour rendre cette surface plus accidentée, on crée des points d'ancrage. Comme montré dans la figure 2.7, il existe différents types de points d'ancrages. Ceux qui créent l'adhésion optimale sont les points d'ancrage de la forme (2) parce qu'ils résistent aux forces de traction et cisaillement, tandis que les points (1) et (3) résistent seulement aux forces de cisaillement. Bien que ceci aide à l'adhésion, il faut réussir à avoir le nombre parfait d'irrégularités. Si la surface du substrat est trop poreuse, elle devient fragile, et ainsi pourra casser sous la couche métallique.

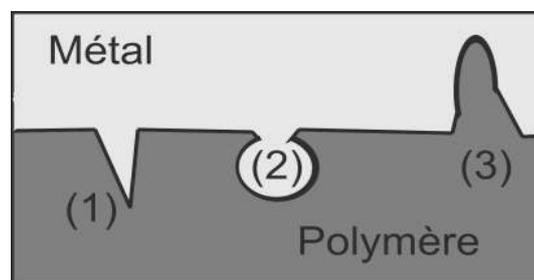


Figure 2.7. Schématisation des types de points d'ancrage mécaniques

2.3.2.2. Forces de Van der Waals

Les Forces cohésives dans les solides changent par rapport à la structure du matériau (ionique, atomique ou moléculaire). La cohésion du polymère est surtout due aux forces dipolaires, et aux ponts hydrogènes. [12]

2.3.2.3. Forces électrostatiques

Si deux matériaux sont en contacts, il peut y avoir un phénomène d'échange jusqu'à ce qu'un équilibre thermodynamique soit établi. Ceci peut se produire soit par diffusion de charges mobiles, soit par le transport de charges d'un donneur d'électron, à un accepteur d'électrons. Dans le cas de la métallisation des plastiques, le métal cède des électrons au polymère. Le métal est ainsi chargé positivement, et le polymère négativement. Ils sont attirés l'un vers l'autre.

2.4. Méthodes de métallisations des polymères

2.4.1. Dépôt par immersion dans les métaux fondus

Les dépôts par immersion dans les métaux fondus sont appliqués essentiellement sur des surfaces en fer ou en acier. En effet, ils sont susceptibles de s'allier avec le métal de base afin de constituer le dépôt. Cette gamme de procédés occupe une place particulière dans le domaine des dépôts métalliques. Industriellement, leur application touche surtout le domaine de la visserie. [13]

2.4.2. Dépôt sous vide

Actuellement, les dépôts sous vide sont exploités industriellement pour leurs propriétés :

- mécaniques : lubrification, résistance à l'usure, à l'érosion, à l'abrasion, au frottement ;
- optiques : réflexion, transmission, détection de rayonnement ;
- électriques : conduction, isolation ;
- physico-chimiques : barrière de diffusion, résistance à la corrosion, catalyse, compatibilité alimentaire ; - décoratives.

Chapitre 2: Métallisation des plastiques

Les procédés de dépôts en phase vapeur regroupent différentes techniques. Leur élaboration se fait généralement sous pression réduite d'où le nom sous vide et à des températures moyennement élevées (200 à 500 °C environ). [14]

Dans ce mode de recouvrement, deux grandes techniques peuvent être distinguées : les techniques PVD (Physical Vapor Deposition), et les techniques CVD (Chemical Vapor Deposition). [15]

2.4.2.1. Techniques PVD

Le traitement PVD, "physical vapour deposition", consiste à vaporiser un matériau afin que les molécules ou atomes vaporisés se déposent sur un substrat sans avoir rencontré d'autres molécules.

La grande distinction avec le traitement CVD est que le matériau à vaporiser est sur une cible à l'intérieur de la machine.

Ces vapeurs sont ensuite condensées sur les surfaces à revêtir. Comme on ne veut pas que la matière vaporisée rencontre d'autres molécules, le principal problème de cette technique est de faire le vide. On nécessite donc d'un réacteur à vide, ou pompe à vide, pour augmenter le libre parcours moyen des particules. Cette étape réduit considérablement la cadence de la production. En effet, il faut attendre que la machine atteigne un vide suffisant avant de pouvoir vaporiser la cible et de pouvoir faire la déposition.

Le traitement PVD est possible sur différents substrats : métaux ou polymères.

Il existe différentes techniques PVD peuvent être recensées en fonction de la nature des trois composantes suivantes :

- Mode de production de la vapeur :
 - évaporation sous vide.
 - pulvérisation cathodique.
 - procédés par arcs.
 - pulvérisation par faisceau d'ions.
- Etat électrique du substrat.
- Nature du gaz constituant le milieu. [16]

2.4.2.2. Techniques CVD

Le procédé de dépôt chimique en phase vapeur consiste à mettre un composé volatil du matériau à déposer en contact soit avec un autre gaz au voisinage de la surface à recouvrir, soit avec la surface elle-même. Il se provoque alors une ou plusieurs réactions chimiques, donnant au moins un produit solide. Les autres produits de réaction doivent être gazeux afin d'être éliminés hors du réacteur. Les dépôts se font à pression variable, mais il faut systématiquement un apport énergétique pour favoriser ces réactions. [17]

On peut différencier les techniques CVD en fonction du type d'énergie utilisée pour activer la réaction chimique :

- La CVD thermique
- OMCVD (Organo-Metallic CVD)
- LCVD (CVD Laser)
- PECVD (Plasma Enhanced CVD) [18]

2.4.3. Dépôt par voie chimique

Il est possible grâce à un dépôt chimique, sous certaines réserves, d'obtenir des revêtements homogènes en épaisseur, même sur des pièces de structures ou de formes très compliquées. Plus besoin d'anodes et plus besoin de source extérieure de courant. Les électrons nécessaires à la réduction des ions métalliques sont fournis à l'électrode selon deux processus différents :

- ionisation d'un métal : méthode dite par déplacement ou par contact.
- oxydation d'une forme réduite en solution : méthode dite par réduction chimique. [16]

2.4.4. Dépôt par voie électrolytique

Dans certains cas comme la métallisation des isolants, après dépôt chimique, les pièces sont généralement soumises à un traitement électrolytique afin de renforcer le dépôt métallique. Ce procédé consiste en l'immersion de la structure à revêtir dans une solution contenant les ions du métal à déposer et de faire passer un courant électrique entre cette structure et une autre électrode.

Chapitre 2: Métallisation des plastiques

Le substrat conducteur d'électricité ou rendu superficiellement conducteur, est branché comme cathode dans la cellule d'électrolyse. Le bain contient en plus des ions métalliques à réduire : des agents complexant, des agents tampons, des sels inertes et des additifs organiques. Le rendement du procédé dépend des paramètres opératoires à savoir la température, la concentration des différents composés dans le bain, le pH, l'agitation, la nature du métal à déposer et l'intensité du courant. Ces paramètres peuvent être ajustés pour produire, selon le besoin, des dépôts épais ou des films minces. [19]

2.4.5. Déposition par projection thermique

La projection thermique regroupe l'ensemble des procédés dans lesquels un matériau d'apport est fondu ou porté à l'état plastique grâce à une source de chaleur, puis est projeté à l'aide d'un gaz vecteur sur la surface à revêtir sur laquelle il se solidifie. La matière à déposer, sous forme de poudre, de fil ou de baguette est fondue totalement ou partiellement dans la source de chaleur qui peut être une flamme, un arc électrique ou un plasma. Ces techniques permettent de projeter une grande gamme de matériaux : métaux et alliages, cermets, céramiques et dans certaines conditions, des polymères. [19]

Dans cette thèse nous utilisons cette méthode pour former une couche métallique sur le plastique.

Parmi les différentes procédés de projection thermique nous choisissons la projection à l'arc électrique et la projection à flamme pour réaliser ce travail.

2.5. Construction des dépôts

Dans le procédé de projection thermique, selon les températures de fusion des particules, relativement à la température de flamme, la particule peut être fondue, semi-fondue ou solide quand elle atteint un substrat ou une surface pré enduite. La température de fusion des particules, la distance de pulvérisation et la vitesse jouent un rôle très important pour assurer que toutes les particules affectent le substrat sont dans un état fondu. D'autre part si les particules sont petites ou si elles conduisent la chaleur facilement, alors il est plus facile de réaliser cet objectif. [20]

Au commencement, la particule est fondue et propulsée en dehors du pistolet sous forme de sphère ; alors, à son premier contact avec le substrat, l'impact crée une onde de choc à l'intérieur de la particule et dans le substrat.

Chapitre 2: Métallisation des plastiques

Après impact, la forme de la particule change en lamelle. Les particules arrivent à grande vitesse et s'écrasent sur la surface de substrat à recouvrir, la forme lamellaire est due au transfert de l'énergie cinétique de la particule en énergie d'écoulement visqueux puis en énergie de surface. [21]

Après la déformation de la particule, le processus de la solidification commence à l'interface entre la particule et le substrat (ou revêtement précédemment déposé). Cette interface forme le radiateur (perte de la chaleur à travers le substrat). En s'aplatissant et se solidifiant, une particule se lie, plus ou moins, aux aspérités du substrat. La formation des lamelles peut s'accompagner d'un phénomène d'éclaboussure à l'impact et /ou à la fin de la phase d'étalement.

2.6. Etalement des particules

En projection thermique, lorsqu'une particule vient impacter sur un substrat, elle s'étale grâce à sa pression interne pour former une lamelle ou « splat » sous différentes formes (figure 2.8).

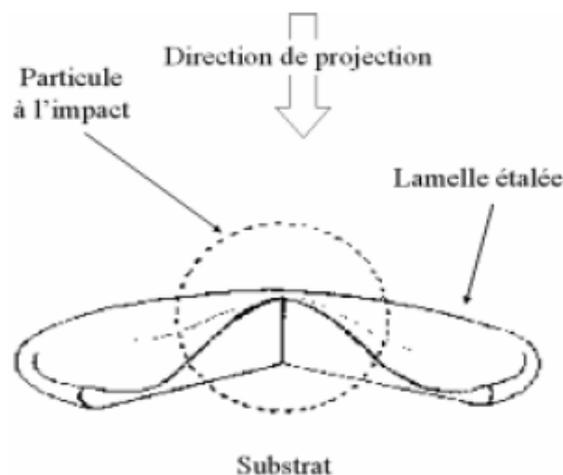


Figure.2.8. Etalement d'une particule sur un substrat. [22]

Chapitre 3 : Partie expérimentale

3.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à la partie expérimentale de notre travail. Les étapes de la réalisation de ce travail sont bien détaillées telles que la préparation des poudres, le découpage des échantillons, et la préparation de leur surface, ainsi que la technique de réalisation des revêtements par projection thermique. Les différents moyens et techniques expérimentales utilisés dans cette étude sont décrits.

3.2. Substrat

Le matériau constituant le substrat, utilisé dans cette étude, sont Les poly (styrène/butadiène/acrylonitrile), plus communément appelés ABS, constituent une famille de copolymères à usages « techniques » du fait de leurs propriétés physiques et chimiques élevées : rigidité, résistance au choc, tenue à la chaleur, aspect de surface, résistance à de nombreux agents chimiques.

Propriétés et caractéristiques	
1. Comportement dans l'eau	s'enfonce (1.07 kg/dm ³)
2. Couleur de flamme	jaune-orange
3. Réaction au feu	charbonne, flamme produisant de la suie non auto-extinguible
4. Odeur	douceâtre
5. Toucher	lisse / dur
6. Sonorité	claire
7. Caractéristiques	insensible aux chocs; même à une température de -40 °C, très bonne résistance mécanique par rapport aux autres matières plastiques
8. Soudage à froid	bon
9. Soudage à chaud	bon
10. Applications	transport de liquides à faible ou haute température, air comprimé et transport de liquides contenant des éléments solides (sable)

Chapitre 3 : Partie expérimentale

3.3. Préparation de surface

L'adhésion des revêtements réalisés par projection thermique est basée principalement sur l'accrochage mécanique, donc pour une meilleure adhérence du dépôt au substrat, nous avons utilisé le grenailage pour créer la rugosité nécessaire pour favoriser l'ancrage mécanique. Cette opération est faite aussi pour éliminer toute trace de graisse de rouille et d'oxydes qui se trouvent éventuellement sur la surface des substrats. L'augmentation de la rugosité de surface est obtenue par un lancement à grande vitesse des particules abrasives, l'alumine, contre l'échantillon à l'aide d'air comprimé sous une grande pression. Le sablage se fait perpendiculairement sur les substrats pendant 4 minutes. Le grenailage est réalisé au niveau du laboratoire LTSM montré à la figure 3.2



Figure 3.2. Grenailleuse

Chapitre 3 : Partie expérimentale

3.4. Réalisations des revêtements

Nous utilisons deux procédés de projection thermique pour métalliser notre plastique.

3.4.1. Projection thermique à flamme

C'est une torche à flamme de type Rototec 80 de Castolin Eutectic désigné par Eutalloy SuperJet. Elle a été utilisée pour la déposition des revêtements sur les différents substrats .Le tableaux 3.1 rassemble les principales caractéristiques de la torche à flamme.



Figure 3.3. Torche à flamme Rototec 80 de Castolin-Eutectic

3.4.2. Caractéristique de poudre utilisée (RotoTec 19800)

L'alliage RotoTec 19800 atomisé au gaz s'utilise avec les systèmes de projection thermique Rototec 80 et Castodyn DS8000.

Il n'y a pas de déformation ni de changement de la structure du support. La structure du revêtement est lamellaire. On obtient une formation de dépôt compact avec une bonne résistance mécanique et une bonne usinabilité. La composition chimique de la poudre utilisée est donnée au tableau 3.1.

Tableau 3.1: Composition chimique de la poudre Rototec 19800

Zn	Sn	Cu
1.0%	10.6%	Base

Chapitre 3 : Partie expérimentale

Les caractéristiques physique et mécanique de la poudre Rototec 19800 sont regroupés au tableau 3.2.

Tableau 3.2: Caractéristiques physiques et mécaniques de la poudre Rototec 19800

Dureté (HV/10)	≈120
Densité apparente	3.0
Granulométrie	45-150
Température max.de service (°C)	400
Epaisseur du dépôt (mm)	max.5
Indice de d'écoulement(s/50 g)	26

3.4.3. Projection à l'arc électrique

Le système de projection à arc électrique comprend des composants qui fournissent et contrôlent de l'air comprimé, de l'électricité et du fil à métalliser utilisés durant le processus de projection à l'arc. Le système de projection à arc offre un niveau élevé de performance et des fonctions avancées pour toutes les applications de métallisation à arc.

Fiable et facile à utiliser, il permet d'exécuter des opérations de projection standard jusqu'à 4 mètres du module de commande (avec un fil de $\varnothing = 1,6$ mm).



Figure 3.4: Unité de projection thermique par arc-électrique ValueArc.

Chapitre 3 : Partie expérimentale

3.5. Protection de l'opérateur

Les risques liés à la chaleur : les flammes atteignent des températures très élevées au voisinage des chalumeaux ou des torches et émettent des rayonnements. Des gants de protection contre la chaleur (norme NF EN 407) et des lunettes ou masques équipés de filtres plus ou moins foncés suivant les applications (norme NF EN 166) sont les principaux moyens de se prémunir contre ces dangers.



Figure 3.5. Equipement de la protection de l'opérateur

3.6. Métallographie

La préparation métallographique sert à préparer les échantillons afin de révéler la microstructure au microscope optique. Nos échantillons sont découpés transversalement afin de visualiser le substrat et le revêtement.

3.6.1 Le polissage

Le polissage a pour but d'éliminer l'irrégularité de surface et donne une surface plus ou moins lisse. Un polissage mécanique comportant trois stades :

Le polissage grossier : Cette opération s'effectue manuellement avec des disques tournants en carbures de silicium (papiers abrasifs de 60, 80, 280, 400, 600, 800, 1000 et 1200), et l'eau

Chapitre 3 : Partie expérimentale

courante comme un lubrifiant. La figure 3.6 montre la polisseuse utilisée au niveau de laboratoire de SDM.



Figure 3.6. Polisseuse

3.6.3. Le 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 sur un tissu en soie. La figure 3.7 représente la polisseuse de finition utilisée.



Figure 3.7. polisseuse de finition

3.6.4. Analyse micrographique

Chapitre 3 : Partie expérimentale

L'examen micrographique a pour but principal la mise en évidence de la structure de l'échantillon.

L'observation micrographique des échantillons est effectuée à l'aide d'un microscope optique de type NEOPHOT 32.

3.6.5. Microscope optique

Un microscope métallographique de type Axiovert de Carl Zeiss a été utilisé pour l'observation de nos revêtements, avec un grandissement qui varie de 100 à 1000 X. Ce microscope est muni d'une camera numérique permettant le transfert des images vers un PC. L'avantage de la microscopie optique, outre sa grande facilité d'utilisation, est de permettre l'observation de grandes surfaces et de collecter ainsi une information globale sur l'aspect de la surface observée.



Figure 3.8: Microscope métallographique Axiovert

3.7. Techniques de mesure d'adhérence

Chapitre 3 : Partie expérimentale

La mesure de l'adhérence permet de mesurer la force (ou l'énergie) nécessaire à la rupture de l'assemblage. La force mesurée est la résultante des forces d'adhésion à l'interface entre les deux matériaux.

3.7.1. Le test du plot collé

Le test du plot collé aussi appelé pull-off test est utilisé pour la mesure d'adhérence entre un substrat et un revêtement.

La figure 3.9 montre le matériel utilisé pour cet essai.



Figure3.9: Testeur d'adhérence par arrachement Posi Test

4.1. Introduction

Une des qualités essentielles d'un revêtement est son adhérence au substrat. L'adhérence dépend de plusieurs paramètres : nature de la poudre, nature du substrat et préparation de la surface du substrat. D'une manière générale, lorsqu'on dépose un revêtement métallique ou céramique sur un substrat métallique, on augmente d'abord la rugosité de surface avant la projection. Dans le cas de la déposition d'un revêtement métallique sur de la matière plastique, il faut, à priori, non seulement augmenter la rugosité de surface du substrat et mais veiller à ne pas trop chauffer sa surface pour ne pas le déformer. Notre première tâche sera d'abord d'étudier la faisabilité de projection d'un métal ou une matière plastique et ensuite s'assurer que le revêtement déposé adhère au substrat sans grave préjudice à ce dernier.

4.2. Projection thermique

Les premiers essais préliminaires ont été réalisés avec une torche à flamme. Dans notre cas, c'est la torche Rototec 80 de Castolin Eutectic. Les paramètres opératoires préliminaires ont été fixés comme suit:

- Distance de projection: 200 mm
- Pas de préchauffage du substrat
- Déplacement de la torche : lent.

Le résultat de cette déposition est montré à la figure 4.1.

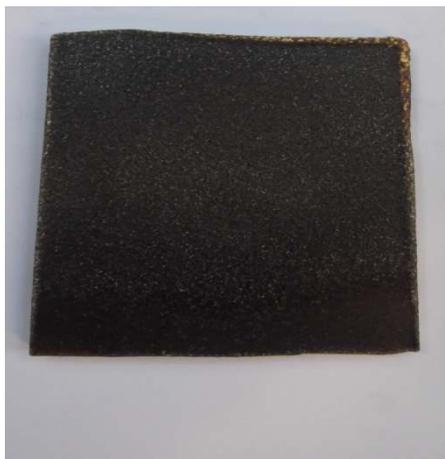


Figure 4.1: Revêtement de bronze déposé à 200 mm du substrat sans apport d'air.

Chapitre 4 : Résultat et interprétation

Nous remarquons que le résultat est sans appel. Le substrat est brûlé et a subi de graves déformations. Il y a des traces de calcination du substrat et le revêtement de bronze a une couleur complètement noire.

A la lumière de cette première expérience, nous avons décidé de corriger la distance de projection et la porter cette fois-ci à 300 mm. Nous espérons que l'apport de chaleur apportée par la flamme sera moins conséquent sur la forme initiale de l'éprouvette en matière plastique. Les paramètres opératoires de la projection thermique ont été modifiés comme suit:

- Distance de projection: 300 mm
- Pas de préchauffage du substrat
- Déplacement de la torche : lent.

Le résultat de cette déposition est montré à la figure 4.2.



Figure 4.2: Revêtement de bronze déposé à 300 mm du substrat sans apport d'air.

Le revêtement produit est nettement amélioré. On reconnaît la couleur de bronze du revêtement. Il n'y a plus de trace de calcination ou de brûlé. Cependant, la déformation du substrat est toujours présente. L'adhérence du revêtement semble, qualitativement correcte. Il n'y a pas de détachement du dépôt et pas de présence de grumeaux en surface. Nous avons pensé à ce moment là que le facteur distance de projection était la clé pour réussir un revêtement de qualité sur la matière plastique. C'est pourquoi nous avons refait l'expérience avec les paramètres opératoires suivants:

- Distance de projection: 500 mm
- Pas de préchauffage du substrat

Chapitre 4 : Résultat et interprétation

- Déplacement de la torche : lent.

Le résultat de cette déposition est montré à la figure 4.3.



Figure 4.3: Revêtement de bronze déposé à 500 mm du substrat sans apport d'air.

Si le substrat n'a subi aucune déformation, la déposition quant à elle souffre d'efficacité. En effet, il n'y a pratiquement pas de dépôt. Les tâches grisâtres que l'on voit sur le substrat sont les quelques gouttelettes qui ont réussi à atteindre le substrat. Dans cette expérience, la distance de projection était tellement importante que probablement les particules de bronze ont eu le temps de refroidir et arrivaient à l'état solide au substrat. Les particules frappaient la surface du substrat et retombaient à terre. Cela explique le faible taux de remplissage de la surface du substrat. Il y a donc une distance optimale au delà de laquelle il ne faut pas projeter.

Au lieu donc de chercher à raffiner la distance de projection, et afin d'améliorer davantage la qualité du revêtement, nous avons décidé d'ajouter un élément qui nous semblait important: l'air comprimé. L'air comprimé sera dirigé contre le substrat pour le refroidir durant tout le temps de déposition du revêtement.

L'expérience suivante a été réalisée avec les paramètres opératoires suivants:

- Distance de projection: 300 mm
- Pas de préchauffage du substrat
- Déplacement de la torche : lent.

Chapitre 4 : Résultat et interprétation

Le résultat de cette déposition est montré à la figure 4.4.

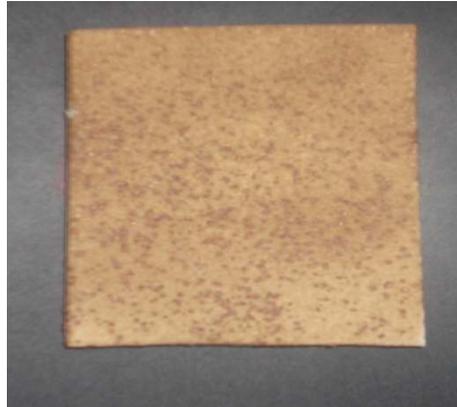


Figure 4.4: Revêtement de bronze déposé à 300 mm du substrat avec refroidissement à l'air comprimé.

Comme le montre clairement la photo de la figure 4.4, nous obtenons notre revêtement de bronze. Le revêtement est parfaitement étalé sur toute la surface du substrat sans que ce dernier ne soit déformé ou brûlé. Il a un bel aspect. Nous avons donc réussi à déposer un revêtement métallique sur un substrat en matière plastique sans déformation avec une très bonne qualité, du moins visuelle.

Ce résultat nous a encouragés à poursuivre notre recherche avec un procédé qui s'affranchirait de la flamme et éliminer donc tout risque de déformation du substrat.

Nous avons donc décidé d'utiliser la projection à l'arc électrique pour déposer des revêtements à base d'aluminium sur des substrats en ABS.

Pour l'arc électrique, l'absence de la flamme diminue l'effet thermique sur la surface du plastique. La distance de projection devient un paramètre primordial dans l'optimisation du dépôt.

Dans la projection thermique des revêtements de bronze sur la matière plastique, nous avons trouvé que la meilleure distance de projection était de 300 mm. A cette distance, on obtenait un revêtement de bronze sans calcination et uniforme mais en ajoutant cependant le refroidissement à l'air comprimé durant toute la déposition.

Chapitre 4 : Résultat et interprétation

Dans la projection à l'arc électrique, nous avons décidé de débiter nos expériences de déposition d'un fil d'aluminium pur à une distance de projection de 300 mm mais sans apport de refroidissement à l'air comprimé.

Pour ce faire, nous avons préparé les surfaces des substrats à la grenailleuse pour les nettoyer et augmenter leur rugosité de surface. Les paramètres opératoires de l'arc électrique étaient fixés comme suit:

- Voltage: 32 V
- Bouton d'avance des fils: 3
- Distance de projection: 300 mm
- Débit d'air soufflé à l'arc: 4 bars

Le résultat de la déposition de l'aluminium pour sur l'ABS est montré à la figure 4.5.



Figure 4. 5: Revêtement d'Al déposé à 300 mm du substrat sans refroidissement à l'air

Nous avons obtenu immédiatement un revêtement uniforme. La matière plastique n'a souffert d'aucun effet thermique. Le revêtement a une couleur gris clair, celle que l'on retrouve lorsque l'aluminium est déposé à l'arc électrique sur un substrat en acier.

Cette distance nous semble très correcte. Mais pour fin de comparaison, nous avons décidé d'augmenter les distances de projection à 400 mm et 500 mm afin de vérifier la qualité du revêtement en bronze par rapport à ceux déposés à la flamme pour des distances supérieures à 300 mm. Ensuite, nous procéderons à la déposition des revêtements d'aluminium sur des

Chapitre 4 : Résultat et interprétation

distances de 200 mm et 150 mm pour vérifier la qualité du revêtement d'aluminium à des distances comparables à celles d'un substrat d'acier.

Les figures 4.6 et 4.7 montrent les revêtements d'aluminium déposés à l'arc électrique à des distances de projection respectivement de 400 mm et 500 mm.



Figure 4.6: Revêtement d'Al déposé à 400 mm à l'arc électrique sans refroidissement d'air.

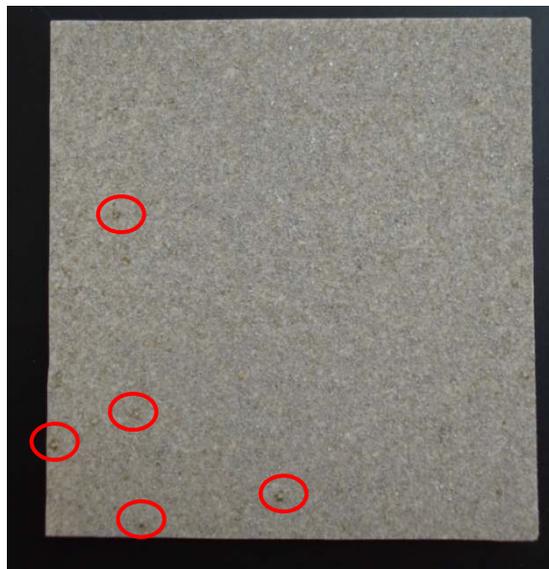


Figure 4.7: Revêtement d'Al déposé à 500 mm à l'arc électrique sans refroidissement d'air.

Chapitre 4 : Résultat et interprétation

Nous remarquons qu'au fur et à mesure que nous augmentons les distances de projection, le revêtement s'assombrit. La couleur gris clair que nous avons relevé dans le revêtement d'Al à 300 mm caractéristique d'un dépôt d'aluminium pur a disparu. L'augmentation de la distance augmente le refroidissement des particules ainsi que leur oxydation. On se retrouve avec un revêtement de plus en plus poreux, oxydé et des particules sphériques complètement solidifiées en vol. Les cercles tracés sur le revêtement d'aluminium déposé à 500 mm en montrent quelques unes.

Au moment où nous devions déposer les revêtements d'aluminium avec l'arc électrique sur des distances de projection de 200 mm et 150 mm, les examens semestriels programmés à la salle 101 avaient commencé et nous avons dû arrêter nos expériences.

4.3. Etude métallographique

L'étude métallographique est particulièrement importante car elle nous révèle qualitativement la qualité de l'interface substrat/revêtement et la qualité du revêtement lui-même.

Dans cette étude métallographique, nous n'avons retenu que les revêtements déposés aux distances optimales trouvées dans ce travail, c'est à dire 300 mm.

Les résultats sont représentés dans les photos des figures 4.8 et 4.9 respectivement pour le revêtement de bronze déposé à la torche à flamme et le revêtement d'aluminium déposé à l'arc électrique.

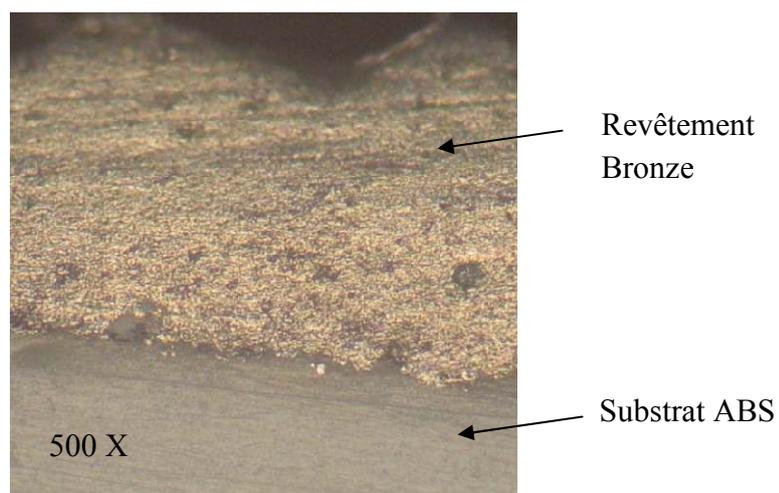


Figure 4.8: Revêtement de bronze déposé par torche à flamme à 300 mm avec refroidissement à l'air comprimé.

Chapitre 4 : Résultat et interprétation

Pour le revêtement de bronze, le dépôt est dense et relativement uniforme. L'interface ne souffre d'aucune déformation. Les petites phases rondes et de couleur marron, qui se trouvent à l'intérieur du revêtement sont des phases riches en étain. C'est un bronze à l'étain.

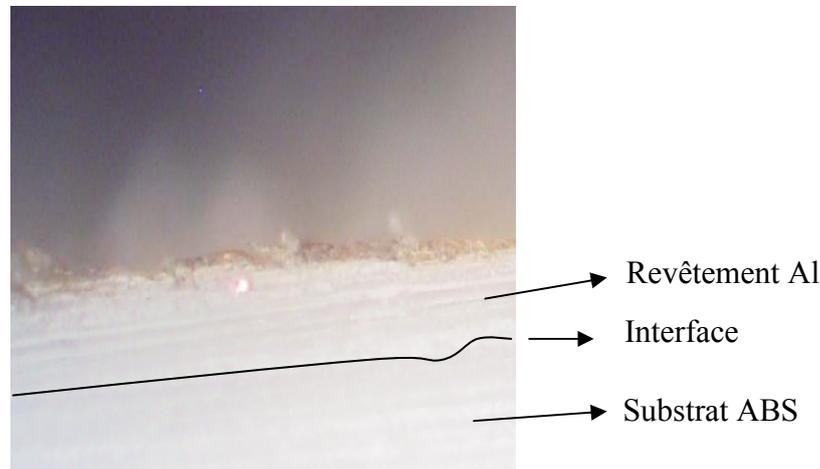


Figure 4.9: Revêtement d'Al déposé par arc électrique à 300 mm sans refroidissement à l'air comprimé.

Pour le revêtement d'aluminium, le revêtement est dense lui aussi. On distingue mal la frontière entre le revêtement et le substrat en ABS. C'est pourquoi, nous avons ajouté une ligne sur la photo de la figure 4.9 pour mieux les démarquer.

Cette dernière observation nous a poussé à étudier le phénomène de déposition de lamelles individuelles pour savoir d'abord comment les lamelles s'aplatissent sur leur substrat, s'il y a une brûlure autour de leur point d'impact et enfin mesurer l'adhérence des revêtements déposés par les deux méthodes de projection thermique.

4.4. Obtention de lamelles individuelles

4.4.1 Etude des lamelles sur substrats rugueux

Lorsqu'on veut étudier plus précisément les lamelles, il est indispensable de pouvoir les observer individuellement. La nature et la rugosité du substrat influencent, de manière notable, l'étalement des gouttelettes. Afin d'évaluer correctement la qualité de cet étalement en fonction de divers paramètres, ces lamelles ont été projetées sur des substrats à surface rugueuses.

Notre objectif est d'étudier les propriétés des premières lamelles qui atteignent un substrat, car ces dernières jouent un rôle essentiel sur l'adhérence de dépôt à son substrat ainsi que sur

Chapitre 4 : Résultat et interprétation

la qualité globale du revêtement.

La pulvérisation des gouttelettes fondues a été réalisée pendant un passage unique et rapide à une distance de 30 cm afin d'obtenir des lamelles isolées. Les figures 4.10 et 4.11 représentent respectivement une lamelle de bronze déposée par torche à flamme et une coupe transversale de cette dernière déposée sur un substrat rugueux.

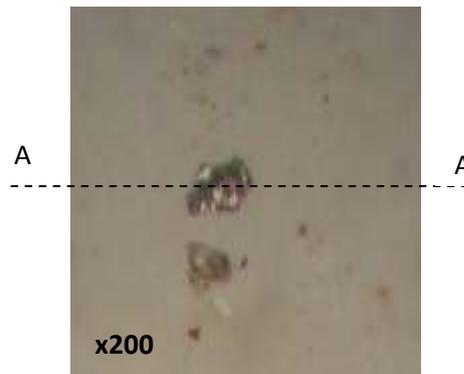


Figure 4.10: Lamelle de bronze sur substrat rugueux en ABS déposé :
à 300 mm de distance de projection
avec refroidissement d'air comprimé



Figure 4.11: Coupe transversale A-A de la lamelle de bronze sur substrat rugueux en ABS

Bien que la microscopie optique n'est l'outil idéal pour ce genre d'observation, nous pouvons dire que la lamelle épouse bien la rugosité de la matière plastique. La lamelle semble se recroqueviller sur l'aspérité de l'ABS avec un minimum de déformation plastique. La surface molle et la faible conductivité thermique de l'ABS contribue à ce genre de résultat.

Les figures 4.12 et 4.13 représentent respectivement une lamelle d'aluminium déposée par arc électrique et une coupe transversale de cette dernière déposée sur un substrat rugueux.

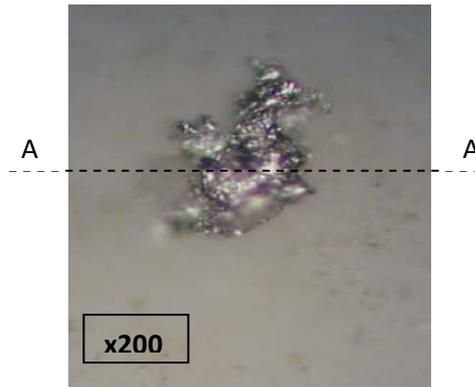


Figure 4.12: Lamelle d'aluminium sur substrat rugueux en ABS déposé :
à 300 mm de distance de projection
sans refroidissement d'air comprimé



Figure 4.13: Coupe transversale A-A de la lamelle d'aluminium sur substrat rugueux en ABS

Ici aussi, nous remarquons que l'étalement de lamelle individuelle n'est pas évident. Il y a un recroquevillement de la masse de la lamelle autour d'un pic de rugosité sans plus. Les coupes transversales n'apportent pas beaucoup d'information dans ce cas car la résolution du microscope optique, l'agrandissement rend difficile toute interprétation.

Ces résultats nous ont poussés à refaire les dépositions des lamelles individuelles sur des substrats à surface lisse afin de palier un peu au manque de résolution du microscope optique.

4.4.2. Etude des lamelles sur substrats lisses

Nous avons réalisé les dépositions de revêtement de bronze projetés à la flamme et les revêtements d'aluminium projetés à l'arc électrique avec les mêmes conditions que ceux utilisées dans l'expérience faite avec substrat rugueux. Le seul paramètre qui change est

Chapitre 4 : Résultat et interprétation

l'emploi d'un substrat ABS à surface lisse. La surface lisse a été obtenue par polissage métallographique du substrat. Les résultats de la déposition de lamelles de bronze et d'aluminium sont montrés respectivement aux figures 4.14 et 4.15. La coupe transversale a été difficile de la localiser exactement lorsque nous avons découpé notre substrat. C'est pourquoi nous allons nous contenter que de la vue de dessus des lamelles.

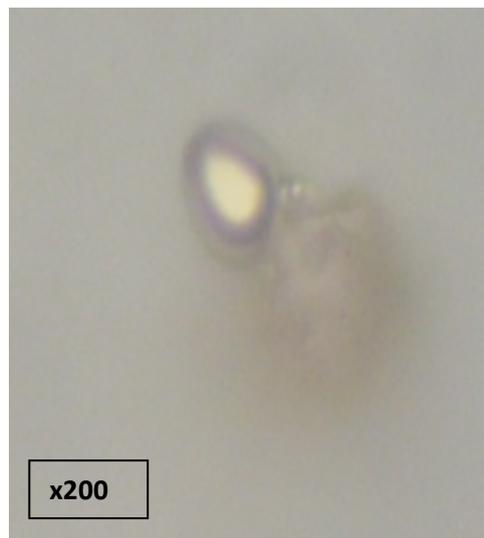


Figure 4.14: Lamelle de bronze sur substrat lisse en ABS déposé :
à 300 mm de distance de projection
avec refroidissement d'air comprimé



Figure 4.15: Lamelle d'aluminium sur substrat lisse en ABS déposé :
à 300 mm de distance de projection
avec refroidissement d'air comprimé

Chapitre 4 : Résultat et interprétation

Lorsque le substrat est lisse, l'effet de l'impact de la lamelle est mieux perceptible. Pour la lamelle de bronze, nous voyons l'étalement de la lamelle qui prend une forme d'une goutte dont l'impact est situé dans la partie large de la goutte et s'étale sous forme plus restreinte jusqu'à terminer par une pointe. La périphérie de la goutte est noircie laissant supposer qu'il y a eu fusion locale de l'ABS à l'impact de la goutte. Au delà de la goutte et de la périphérie en couronne noire, il y a une autre couleur en marron clair, qui est en fait délimite le cratère laissé par la goutte. L'arrière de la goutte est marqué par un nuage brunâtre qui laisse supposer qu'à l'impact, l'énergie thermique de la goutte a surchauffé l'aire située juste en amont de la lamelle. Ce résultat est très intéressant. Une modélisation de l'impact de la particule de bronze sur un substrat en ABS aiderait à mieux comprendre les phénomènes thermiques qui s'y produisent et à mieux comprendre la déformation de la lamelle.

Pour le cas de l'impact de la lamelle d'aluminium sur l'ABS, l'aspect de cette dernière est totalement différent de celui observé avec une torche à flamme. La lamelle s'est étalée complètement sur la surface de l'ABS. Elle présente une couronne sur la périphérie ce qui indique que la lamelle, lors de son écrasement s'est étalée vers l'extérieur de son point d'impact. Les traces de brûlures, de couronne noire sont absentes. Ceci indique que l'effet thermique d'une projection à l'arc électrique est beaucoup moins intense que celle produite par une torche à flamme.

4.5. Etude de l'adhérence des revêtements

Pour compléter cette étude d'écrasement des lamelles, nous allons vérifié la bonne adhérence des revêtements métalliques sur le substrat en ABS en déposant des revêtements de bronze à la torche à flamme et des revêtements d'aluminium par l'arc électrique. L'essai d'adhérence mesurée par arrachement de plots d'aluminium collés sur les revêtements nous permet de déterminer la contrainte nécessaire pour extirper le dépôt de son substrat. De plus, afin de vérifier s'il y a fusion locale des premières lamelles tombant sur le substrat en ABS, nous avons réalisé les essais sur des supports à surface polie.

Le test du plot collé a été mis en place et réalisé pour le substrat en ABS avec et sans préparation de surface. L'évolution de la force d'arrachement du revêtement de son substrat lisse ou rugueux est représentée sur la figure 4.16.

Chapitre 4 : Résultat et interprétation

En général, les revêtements déposés sur un substrat ABS rugueux possèdent une meilleure adhérence que ceux déposés sur un substrat lisse.

Les revêtements déposés par la torche à flamme ont une meilleure adhérence que les revêtements déposés par l'arc électrique. Cependant, nous disons en rappelant que la distance de projection dans le cas de la déposition par arc électrique, n'a pas été optimisée à des distances probablement inférieures à 300 mm.

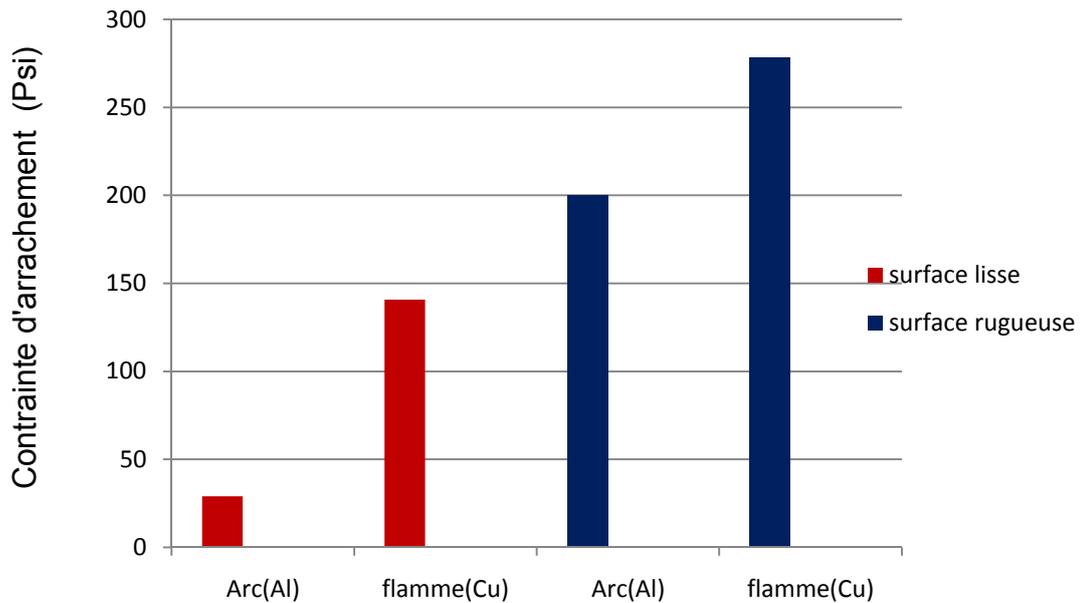


Figure 4.16 . Contraintes d'arrachement des revêtements métalliques sur substrat ABS.

4.5.1. Etude du facies de rupture

Dans cette partie, l'étude porte sur l'étude du facies de rupture et notamment le décollement de la couche de métal ainsi que la nature de la rupture. Les figures 4.16 et 4.17 montrent les endroits d'arrachement des revêtements ainsi que l'envers du plot placé sur le côté droit.

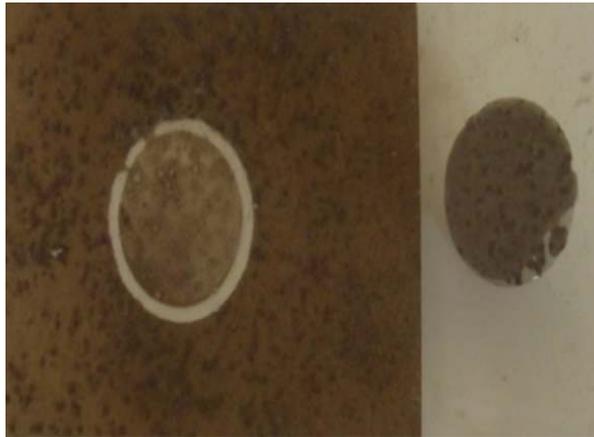


Figure 4.17: Faciès de rupture du revêtement de bronze déposé à la torche à flamme sur substrat en ABS rugueux.



Figure 4.18: Faciès de rupture du revêtement d'Al déposé à l'arc électrique sur substrat en ABS rugueux.

Le faciès de rupture présente une adhérence majoritairement adhésive et ce dans les cas de projection thermique. La force d'arrachement a atteint 280 psi ce qui vraiment appréciable. Environ 10 % du faciès de rupture du revêtement de bronze est de type cohésive. Pour le revêtement d'Al déposé à l'arc électrique, cette force d'arrachement atteint une contrainte de 200 psi. Ces résultats sont vraiment encourageants, car avec une compréhension des phénomènes à l'interface lamelle/substrat à l'aide d'une modélisation des transferts thermiques à ce niveau, ces contraintes d'arrachement pourraient être facilement doublées.

Pour les surfaces des substrats d'ABS non préparé à la grenailleuse, les faciès de rupture sont montrés aux figures 4.19 et 4.20. Pour le revêtement de bronze, la rupture est adhésive avec 10 % de rupture cohésive.

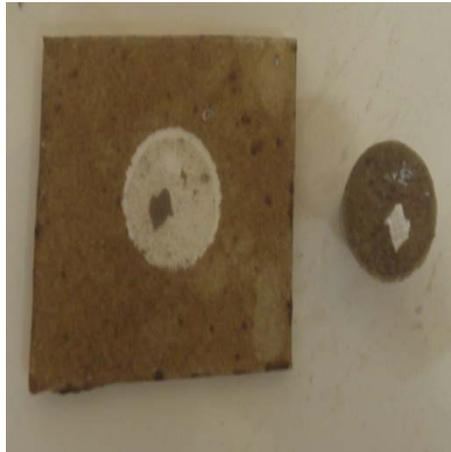


Figure 4.19: Faciès de rupture du revêtement de bronze déposé à la torche à flamme sur substrat en ABS non rugueux.



Figure 4.20: Faciès de rupture du revêtement d'Al déposé à l'arc électrique sur substrat en ABS non rugueux.

Pour le revêtement d'aluminium déposé à l'arc électrique, la rupture est pratiquement à 100 % adhésive. Ceci explique les valeurs relativement des contraintes d'arrachement obtenues dans le cas d'une déposition d'une torche qu'à l'arc électrique.

Bibliographie

[1] HAMIDAT.abd el kader [Etude de la résistance à la corrosion de l'Alu Zinc déposé par projection thermique] Université Saad Dahleb Blida, Mémoire de Master 2015

[2] KHERRAF ALLAOUA [Propriétés mécaniques et biomécaniques de dépôts obtenus par projection thermique « Application de l'Emission Acoustique »]

UNIVERSITE DE BATNA. Thèse de doctorat, 2013

[3] Coddet C., Barbezat G., Fauchais P. et Montavon G., "Projection thermique et revêtements épais : principe de base", Ecole thématique du CNRS, paru dans Revêtements et Traitement de Surface, Presses polytechniques et universitaires romandes, 1998, 467-477.

[4] "Sultzer Metco Spray World: All about Thermal spray Technology", Cd-Rom, 1998.

[5] S. Nourouzi, « Contribution à l'étude du procédé arc-fil pour la réalisation de dépôts métalliques durs résistants à l'usure abrasive », Université de Limoges, Thèse, 2004.

[6] <http://tss.asminternational.org/pertal/site/TS>

[7] 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

[8] Sampson E. R., "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)

[9] Surfatec - <http://www.surfatec.org/> -consulté le 09/01/2014

[10] Jacques JACOT—Jean Daniel LUTHI Séminaire Présenté le 26 Octobre 2012

[11] S. Dalbin , N. Pommier, Métallisation Des plastiques Préparation Par voie chimique. Référence M1550, Editions Technique De L'ingénieur, 2009. www.techniques---ingenieur.fr (consulte octobre2, 2012)

- [12] R. Suchentrunk, Metalizing Of Plastics A Handbook Of Theory And Practise. Ohio, USA : Finishing Publications LTD, ASM International, 1993.
- [13] Définitions de base en traitements de surface, Fiche RTS, normes NF A 91-010, 2010.
- [14] Les techniques PVD, CVD, cours inaugural, Lt-Colonel BOUCHEFFA Youcef, EMP UER de Chimie Appliquée 2010.
- [15] Dieter LANDOLT, Traité des matériaux, corrosion et chimie de surfaces des métaux, presses polytechniques et universitaires Romandes, 2007.
- [16] DEHCHAR Charif. (ELABORATION D'ELECTRODES MODIFIEES PAR METALLISATION DE MATERIAUX NON-CONDUCTEURS).thèse
Ingénieur d'Etat en Génie des Procédés de l'Université BADJI Mokhtar-Annaba
- [17] Ceramic coatings, American society of mechanical engineers, ASME winter annual, 1993.
- [18] PAUL Cornet, Thin film deposition processes, MEMS, 1997.
- [19] G. W. Walter, Corro. Sci. 2005.
- [20] L. Pawlowski, «The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings» (Pub.) Wiley, N.Y , USA , p. 414 , 1995.
- [21] Y. Mebdoua. «Etude Numérique des Phénomènes Thermiques Contrôlant la Solidification d'une Lamelle en Projection Thermique : Application à la Formation du Dépôt» Thèse de Doctorat, Université de Limoges, France, 2008.
- [22] DJEGHDJOUGH Mohamed,[Effet de la température de préchauffage du substrat sur l'adhérence des revêtements déposés par torche à flamme],thèse de magister ,science des matériaux ,] Université Saad Dahleb Blida
- [24] 5_PEGASTECH_greffage-polymeres_mars13
- [25] <http://www.conrad.fr/ce/fr/product/748946/Boitier-adaptateur>