TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS ..... **III**

RÉSUMÉ ..... **IV**

TABLE DES MATIÈRES ..... **VII**

LISTE DES FIGURES ..... **IX**

LISTE DES TABLEAUX ..... **XIII**

LISTE DES ÉQUATIONS ..... **XV**

LISTE DES ABRÉVIATIONS ..... **XVI**

CHAPITRE 1 - INTRODUCTION **1**

1.1 CONTEXTE 1

1.2 PROBLÉMATIQUE 2

1.3 OBJECTIFS 3

CHAPITRE 2 - REVUE DE LA LITÉRATURE **5**

2.1 LA PROJECTION THERMIQUE 5

2.2 REVÊTEMENT RÉSISTANT À LA CORROSION 6

2.3 TRAITEMENTS POSTPROJECTION 8

2.4 LA PROJECTION THERMIQUE DE POUDRES À BASE D'ALUMINE 9

2.5 MODÉLISATION ET OPTIMISATION DU PROCÉDÉ DE PROJECTION PLASMA 10

2.6 TRAJECTOIRES ROBOT 12

2.7 MESURE ET CONTRÔLE 13

2.8 AUTRES AXES DE RECHERCHE EN PROJECTION THERMIQUE 14

2.9 ORIGINALITÉ DU PROJET DE MAÎTRISE 15

CHAPITRE 3 - MÉTHODOLOGIE **16**

3.1 RÉSUMÉ DU PLAN DE TRAVAIL 16

3.2 CARACTÉRISTIQUES DES POUDRES UTILISÉES 17

3.3 ÉQUIPEMENTS DE PROJECTION PLASMA 18

3.4 CAMÉRA POUR VITESSE ET TEMPÉRATURE DES PARTICULES 25

3.5 PRÉPARATION DES ÉCHANTILLONS 26

3.6 CARACTÉRISATION DES ÉCHANTILLONS 31
3.6.1 Porosité *31*
3.6.2 Corrosion *35*
3.6.3 Adhésion *37*
CHAPITRE 4 - RÉSULTATS 40
4.1 ESSAIS PRÉLIMINAIRES 40
4.1.1 Poudre ALO-159 ..... *40*
4.1.2 Poudre Al-1110-HP *43*
4.1.3 Poudre CRO-174 ..... *46*
4.1.4 Poudre CRO-192 ..... *47*
4.1.5 Synthèse des résultats des 4 poudres en subsonique *49*
4.1.6 Essais avec une combinaison anode et cathode en Mach 1 ..... *51*
4.2 REVÊTEMENTS POUR LES ESSAIS DE CORROSION 54
4.2.1 Utilisation d'une couche d'adhésion *55*
4.2.2 Utilisation d'autres produits d'étanchéité *60*
4.2.3 Synthèse des résultats des essais de corrosion *69*
4.3 ÉLABORATION DE REVÊTEMENTS COMPOSITES ÉPOXY AVEC POUDRE CÉRAMIQUE 70
4.3.1 Tests de mélange *70*
4.3.2 Métallographies *74*
4.3.3 Vérification de l'adhésion *75*
4.3.4 Échantillons pour test dans le système chez Rio Tinto Fer et Titane *77*
4.3.5 Synthèse des résultats des mélanges *78*
4.4 REVÊTEMENTS SUR TOURNANTS CONIQUES 79
4.4.1 Protocole d'application *79*
4.4.2 Analyse économique *84*
CHAPITRE 5 - CONCLUSION 87
RÉFÉRENCES 90
ANNEXE A - FICHES TECHNIQUES DES POUDRES 94
ANNEXE B - MÉTALLOGRAPHIES 98
ANNEXE C - PRODUITS D'ÉTANCHÉITÉ 120

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1.1 ROBINET À TOURNANT CONIQUE FLUOROSEAL 1
FIGURE 1.2 ZONES À RECOUVRIR SUR LE TOURNANT CONIQUE 4
FIGURE 3.1 CELLULE DE PROJECTION THERMIQUE DU CMQ 19
FIGURE 3.2 CELLULE DE PROJECTION THERMIQUE (INTÉRIEUR) 19
FIGURE 3.3 VENTILATION ET DÉPOUSSIÉREUR DE LA CELLULE DE PROJECTION THERMIQUE 20
FIGURE 3.4 TORCHE PRAXAIR SG-100 21
FIGURE 3.5 ANATOMIE DE LA TORCHE PLASMA PRAXAIR SG-100 21
FIGURE 3.6 MODULE DE CONTRÔLE POUR LES GAZ EN PROJECTION PLASMA 21
FIGURE 3.7 SYSTÈME DE REFROIDISSEMENT DE LA TORCHE PLASMA 22
FIGURE 3.8 DISTRIBUTEURS DE POUDRE POUR LA PROJECTION PLASMA 23
FIGURE 3.9 CONTRÔLE 7780 UPC POUR LES PARAMÈTRES DE LA PROJECTION THERMIQUE 23
FIGURE 3.10 SOURCE DE COURANT HPS-100 POUR LA TORCHE PLASMA 24
FIGURE 3.11 ROBOT ABB IRB 2600 M2004 24
FIGURE 3.12 POSITIONNEUR ROTATIF AVEC TOURNANT CONIQUE ET CONTRÔLEUR 25
FIGURE 3.13 CAMÉRAS PROJECTION THERMIQUE PLASMA ET HVOF 25
FIGURE 3.14 ORDINATEUR ET CONTRÔLEUR POUR LA VITESSE ET LA TEMPÉRATURE DES PARTICULES 26
FIGURE 3.15 APPAREIL DE GRENAILLAGE 27
FIGURE 3.16 PLAQUE GRENAILLÉE 27
FIGURE 3.17 PARTICULES DE GRENAILLAGE 27
FIGURE 3.18 BAIN DE NETTOYAGE PAR ULTRASONS (VWR INTERNATIONAL, MODÈLE 150 HT) 28
FIGURE 3.19 PLAQUE SUR SUPPORT AVANT LA PROJECTION THERMIQUE 28
FIGURE 3.20 CODE DU PROGRAMME DU ROBOT POUR LA TRAJECTOIRE 29
FIGURE 3.21 REPRÉSENTATION DE LA TRAJECTOIRE DE LA TORCHE 30
FIGURE 3.22 TRONÇONNEUSE MECATOME POUR LA PRÉPARATION DES ÉCHANTILLONS 32
FIGURE 3.23 ÉCHANTILLONS PRÉLEVÉS SUR PLAQUE AVEC 3 REVÊTEMENTS 32
FIGURE 3.24 ÉCHANTILLONS ENROBÉS DANS UN ÉPOXY POUR FACILITER LE POLISSAGE 32
FIGURE 3.25 POLISSEURS BUEHLER AUTOMET 33
FIGURE 3.26 ANALYSE D'IMAGE OMNIMET 34
FIGURE 3.27 MEB 34
FIGURE 3.28 MÉTALLOGRAPHIE ÉCHANTILLON ALHPM1-19 (TAUX DE POROSITÉ DE 1,7%) 35
FIGURE 3.29 CELLULE DE CORROSION 35
FIGURE 3.30 GALVANOMÈTRE VERSA STAT POUR LE TEST DE CORROSION 36

FIGURE 3.31 CAPTURE D'ÉCRAN DU TEST DE POLARISATION LINÉAIRE ÉCHANTILLON CRO192-2 37
FIGURE 3.32 PIONS POUR L'ESSAI DE TRACTION SELON LA NORME ASTM C633 37
FIGURE 3.33 PIONS ASSEMBLÉS APRÈS LE DURCISSEMENT DE LA COLLE 38
FIGURE 3.34 ESSAI DE TRACTION SUR UN ÉCHANTILLON 39
FIGURE 4.1 MÉTALLOGRAPHIE ÉCHANTILLON ALO-14 43
FIGURE 4.2 MÉTALLOGRAPHIE ÉCHANTILLON ALHP-7 45
FIGURE 4.3 MÉTALLOGRAPHIE ÉCHANTILLON ALHP-7 (4,8 % DE POROSITÉ) 45
FIGURE 4.4 MÉTALLOGRAPHIE ÉCHANTILLON CRO174-2 47
FIGURE 4.5 MÉTALLOGRAPHIE ÉCHANTILLON CRO192-6 49
FIGURE 4.6 GRAPHIQUE DE L'EFFICACITÉ DE DÉPOSITION EN SUBSONIQUE 50
FIGURE 4.7 SYNTHÈSE DES MÉTALLOGRAPHIES EN SUBSONIQUE 50
FIGURE 4.8 MÉTALLOGRAPHIE ÉCHANTILLON ALHPM1-19 (1,7 % DE POROSITÉ) 54
FIGURE 4.9 ÉCHANTILLONS NICRHPM1-5 (GAUCHE) ET N122C174-2 (DROITE) 58
FIGURE 4.10 MÉTALLOGRAPHIE ÉCHANTILLON N122C174-2 60
FIGURE 4.11 PRODUIT D'ÉTANCHÉITÉ EP62, 40 MINUTES À 93°C 62
FIGURE 4.12 PRODUIT D'ÉTANCHÉITÉ EP62, 24 HEURES À 24°C + 40 MINUTES À 93°C 62
FIGURE 4.13 PRODUIT D'ÉTANCHÉITÉ EP21ARHT, 160 MINUTES À 93°C 63
FIGURE 4.14 PRODUIT D'ÉTANCHÉITÉ EP21ARHT, 24 HEURES À 24°C + 160 MINUTES À 93°C 63
FIGURE 4.15 MÉTALLOGRAPHIE ÉCHANTILLON 62-24-40 AL1110HP, VUE D'ENSEMBLE 64
FIGURE 4.16 MÉTALLOGRAPHIE ÉCHANTILLON 62-24-40 AL1110HP, ZOOM SUR PRODUIT EP62-1 64
FIGURE 4.17 MÉTALLOGRAPHIE EP21ARHT SUR CRO192-2 (MICROSCOPIE EN CHAMP SOMBRE) 65
FIGURE 4.18 : RÉSULTAT DU TEST DE POLARISATION LINÉAIRE ÉCHANTILLON 21-CRO192-2 66
FIGURE 4.19 RÉSULTAT DU TEST DE POLARISATION LINÉAIRE ÉCHANTILLON 21-CRO192-2 (SABLÉ 1X) 66
FIGURE 4.20 RÉSULTAT DU TEST DE POLARISATION LINÉAIRE ÉCHANTILLON 21-CRO192-2 (SABLÉ 2X) 67
FIGURE 4.21 RÉSULTAT DU TEST DE POLARISATION LINÉAIRE ÉCHANTILLON 21-CRO192-2 67
FIGURE 4.22 : CAPTURE D'ÉCRAN DU TEST DE CORROSION SUR ÉCHANTILLON 21-160-ACIER 68
FIGURE 4.23 CAPTURE D'ÉCRAN TEST DE CORROSION SUR ÉCHANTILLON 21+CRO174 60% VOLUME 72
FIGURE 4.24 MÉTALLOGRAPHIE EP21ARHT + 25 % MASSE DE CRO-174 73
FIGURE 4.25 MÉLANGE EP21ARHT AVEC 45% EN VOLUME DE POUDRE CRO-174 73
FIGURE 4.26 MÉTALLOGRAPHIE DU PRODUIT D'ÉTANCHÉITÉ EP21ARHT SUR ACIER 74
FIGURE 4.27 MÉTALLOGRAPHIE EP21ARHT + 45% VOLUME AL1110HP 74
FIGURE 4.28 MÉTALLOGRAPHIE EP21ARHT + 45% VOLUME CRO174 75
FIGURE 4.29 : MONTAGE DES ÉCHANTILLONS DE TRACTION POUR LA CUISSON 76

FIGURE 4.30 FACIÈS DE RUPTURE DES ÉCHANTILLONS AVEC 45% VOLUME DE POUDRE CRO-174 77
FIGURE 4.31 ÉCHANTILLONS POUR TEST DANS LE SYSTÈME CHEZ RIO TINTO FER ET TITANE 78
FIGURE 4.32 GRAPHIQUE DE LA MOYENNE DES RÉSULTATS DE TRACTION EN MPA 79
FIGURE 4.33 TOURNANTS CONIQUES DANS LE BAIN DE NETTOYAGE PAR ULTRASONS 80
FIGURE 4.34 REVÊTEMENT SUR TOURNANT CONIQUE POUR MÉTALLOGRAPHIE 80
FIGURE 4.35 ÉPAISSEUR DU REVÊTEMENT SUR LA SURFACE EXTÉRIEURE DU TOURNANT CONIQUE 81
FIGURE 4.36 ÉPAISSEUR DU REVÊTEMENT SUR LA SURFACE INTÉRIEURE DU TOURNANT CONIQUE 82
FIGURE 4.37 ÉPAISSEUR DU REVÊTEMENT SUR LE RAYON ENTRE L'EXTÉRIEUR ET L'INTÉRIEUR 82
FIGURE 4.38 TOURNANTS CONIQUES SUR SUPPORT POUR LA CUISSON (APRÈS CUISSON) 84
FIGURE 4.39 QUANTITÉ DE PRODUIT EN FONCTION DU RATIO ET DU FORMAT 85
FIGURE A.1 FICHES TECHNIQUE DES POUDRES 94
FIGURE B.1 MÉTALLOGRAPHIE ÉCHANTILLON ALO-15 98
FIGURE B.2 MÉTALLOGRAPHIE ÉCHANTILLON ALO-16 98
FIGURE B.3 MÉTALLOGRAPHIE ÉCHANTILLON ALO-18 99
FIGURE B.4 MÉTALLOGRAPHIE ÉCHANTILLON ALHP-1 99
FIGURE B.5 MÉTALLOGRAPHIE ÉCHANTILLON ALHP-2 100
FIGURE B.6 MÉTALLOGRAPHIE ÉCHANTILLON ALHP-3 100
FIGURE B.7 MÉTALLOGRAPHIE ÉCHANTILLON ALHP-4 101
FIGURE B.8 MÉTALLOGRAPHIE ÉCHANTILLON ALHP-5 101
FIGURE B.9 MÉTALLOGRAPHIE ÉCHANTILLON ALHP-6 102
FIGURE B.10 MÉTALLOGRAPHIE ÉCHANTILLON ALHP-8 102
FIGURE B.11 MÉTALLOGRAPHIE ÉCHANTILLON CRO174-1 103
FIGURE B.12 MÉTALLOGRAPHIE ÉCHANTILLON CRO174-3 103
FIGURE B.13 MÉTALLOGRAPHIE ÉCHANTILLON CRO174-4 104
FIGURE B.14 MÉTALLOGRAPHIE ÉCHANTILLON CRO174-5 104
FIGURE B.15 MÉTALLOGRAPHIE ÉCHANTILLON CRO174-6 105
FIGURE B.16 MÉTALLOGRAPHIE ÉCHANTILLON CRO174-7 105
FIGURE B.17 MÉTALLOGRAPHIE ÉCHANTILLON CRO174-8 106
FIGURE B.18 MÉTALLOGRAPHIE ÉCHANTILLON CRO192-2 106
FIGURE B.19 MÉTALLOGRAPHIE ÉCHANTILLON CRO192-3 107
FIGURE B.20 MÉTALLOGRAPHIE ÉCHANTILLON CRO192-4 107
FIGURE B.21 MÉTALLOGRAPHIE ÉCHANTILLON CRO192-5 108
FIGURE B.22 MÉTALLOGRAPHIE ÉCHANTILLON CRO192-7 108

Figure B.23 Métallographie échantillon CRO192-8 109
Figure B.24 Métallographie échantillon CRO192-9 109
Figure B.25 Métallographie échantillon CRO192-10 110
Figure B.26 Métallographie échantillon CRO192-11 110
Figure B.27 Métallographie échantillon ALHPM1-16 (3,5 % de porosité) 111
Figure B.28 Métallographie échantillon ALHPM1-20 (3,2 % de porosité) 111
Figure B.29 Métallographie échantillon ALHPM1-21 (4,7 % de porosité) 112
Figure B.30 Métallographie échantillon ALHPM1-24 (2,6 % de porosité) 112
Figure B.31 Métallographie échantillon NiCrM1-7 113
Figure B.32 Métallographie échantillon NiCrHPM1-3 113
Figure B.33 Métallographie échantillon NiCrM1-4 114
Figure B.34 Métallographie échantillon AlHPM1-25 114
Figure B.35 Métallographie échantillon Ni122M1-2 115
Figure B.36 Métallographie échantillon CRO174M1-13 115
Figure B.37 Métallographie échantillon N107C174M1-1 116
Figure B.38 Métallographie échantillon CRO174M1-14 116
Figure B.39 Métallographie échantillon Ni122-1 117
Figure B.40 Métallographie échantillon Ni122-2 117
Figure B.41 Métallographie échantillon CRO174-9 118
Figure B.42 Métallographie échantillon CRO174-10 118
Figure B.43 Métallographie échantillon N122C174-1 119
Figure C.1 Fiche technique Ceramacoat 503-VFG-C 120
Figure C.2 Fiche technique Master Bond EP21ARHT 121
Figure C.3 Fiche technique Master Bond EP62-1 124

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1 Exemple de paramètres pour la poudre Al-1110-HP en Mach 1 31
Tableau 3.2 Exemple de l'efficacité de déposition et autres pour Al-1110-HP en Mach 1 31
Tableau 3.3 Procédure de polissage pour les échantillons avec revêtement 33
Tableau 4.1 Poudre ALO-159 avec anode 2083-730 et cathode 3083-129 41
Tableau 4.2 Poudre ALO-159 avec anode 3083-175 et cathode 3083-129 42
Tableau 4.3 Paramètres pour la poudre Al-1110-HP en subsonique 44
Tableau 4.4 Efficacité de déposition et épaisseur du revêtement Al-1110-HP 44
Tableau 4.5 Paramètres pour la poudre CRO-174 46
Tableau 4.6 Efficacité de déposition et épaisseur du revêtement CRO-174 46
Tableau 4.7 Paramètres pour la poudre CRO-192 48
Tableau 4.8 Efficacité de déposition et épaisseur du revêtement CRO-192 48
Tableau 4.9 Paramètres pour la poudre Al-1110-HP en Mach 1 52
Tableau 4.10 Efficacité de déposition et autres pour Al-1110-HP en Mach 1 53
Tableau 4.11 Résultats de corrosion avec acide chlorhydrique dilué (7%) 55
Tableau 4.12 Paramètres de projection en Mach 1 56
Tableau 4.13 Paramètres de la routine de projection en Mach 1 57
Tableau 4.14 Paramètres de projection en subsonique (cathode 1083A-720) 57
Tableau 4.15 Paramètres de la routine de projection en subsonique (cathode 1083A-720) 57
Tableau 4.16 Paramètres de projection en subsonique (cathode 3083-129) 58
Tableau 4.17 Paramètres de la routine de projection en subsonique (cathode 3083-129) 58
Tableau 4.18 Revêtements et résultats des tests de corrosion avec acide UGS 59
Tableau 4.19 Cuisson du produit d'étanchéité 61
Tableau 4.20 Résultat des tests de corrosion avec les produits d'étanchéité 69
Tableau 4.21 : Mélange du produit d'étanchéité avec la poudre 71
Tableau 4.22 Calcul de la masse de poudre Al-1110-HP pour 60 % volume 71
Tableau 4.23 Calcul de la masse de poudre CRO-174 pour 60 % volume 71
Tableau 4.24 : Résultats des tests de corrosion 72
Tableau 4.25 : Mélange du produit d'étanchéité avec la poudre pour les essais de traction 75
Tableau 4.26 Calcul de la masse des deux types de poudre pour 45 % volume 76
Tableau 4.27 : Résistance à la traction en MPa 77
Tableau 4.28 Calcul de la masse de poudre Al-1110-HP pour 3 tournants coniques 83

Rapport-Gratuit.com

TABLEAU 4.29 CALCUL DE LA MASSE DE POUDRE CRO-174 POUR 3 TOURNANTS CONIQUES 83
TABLEAU 4.30 COÛT POUR RECOUVRIR 3 TOURNANTS CONIQUES (EP21ARHT+AL-1110-HP) 85
TABLEAU 4.31 COÛT POUR RECOUVRIR 3 TOURNANTS CONIQUES (EP21ARHT+CRO-174) 85

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

LISTE DES ÉQUATIONS

$F = \left(R_{p,m}/R_p\right)\log\left(-\left|\Delta E_{cor}\right|/b_a\right)$ ÉQUATION 2.1 6

$P = \frac{i_c}{i_s} \times 100\%$ ÉQUATION 2.2 7

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

LISTE DES ABRÉVIATIONS

Al_2O_3	Alumine
ANOVA	Analyse de variance
CCD	Charge-coupled device
CMQ	Centre de métallurgie du Québec
CRSNG	Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada
Cr_2O_3	Oxyde de chrome
CVD	Chemical vapor deposition
Ecorr	Tension de corrosion
FEP	Éthylène-propylène fluoré
HCl	Acide chlorhydrique
HIP	Pressage isostatique à chaud
HVOF	High-velocity oxy-fuel
Icorr	Courant de corrosion
LPR	Test de polarisation linéaire (linear polarization resistance)
MEB	Microscope électronique à balayage
MgO	Oxyde de magnésium
Nd-YAG	Neodymium-doped yttrium aluminium garnet
pA	Picoampère
PTFE	Polytétrafluoroéthylène (nom commercial : Téflon)
PVD	Physical vapor deposition
R^2	Coefficient de corrélation
RDA2	Projet de recherche et de développement appliqué de niveau 2
SiO_2	Silice (dioxyde de silicium)
SLM	Litres standard par minute
TiO_2	Dioxyde de titane
UGS	UpGraded Slag
ZrO_2	Dioxyde de zirconium

CHAPITRE 1 - INTRODUCTION

1.1 Contexte

La compagnie Rio Tinto Fer et Titane fait face à un problème d'usure prématurée par corrosion des tournants coniques dans les robinets (Figure 1.1[1]) du procédé UGS (UpGraded Slag). Le procédé UGS sert à la purification de l'oxyde de titane et utilise de l'acide chlorhydrique (HCl) 20% à 160°C. Le fabricant de robinets spécialisés Fluoroseal Inc travaille de concert avec Rio Tinto Fer et Titane ainsi que le Centre de métallurgie du Québec (CMQ) pour trouver une solution permettant d'augmenter la durée de vie des tournants coniques.

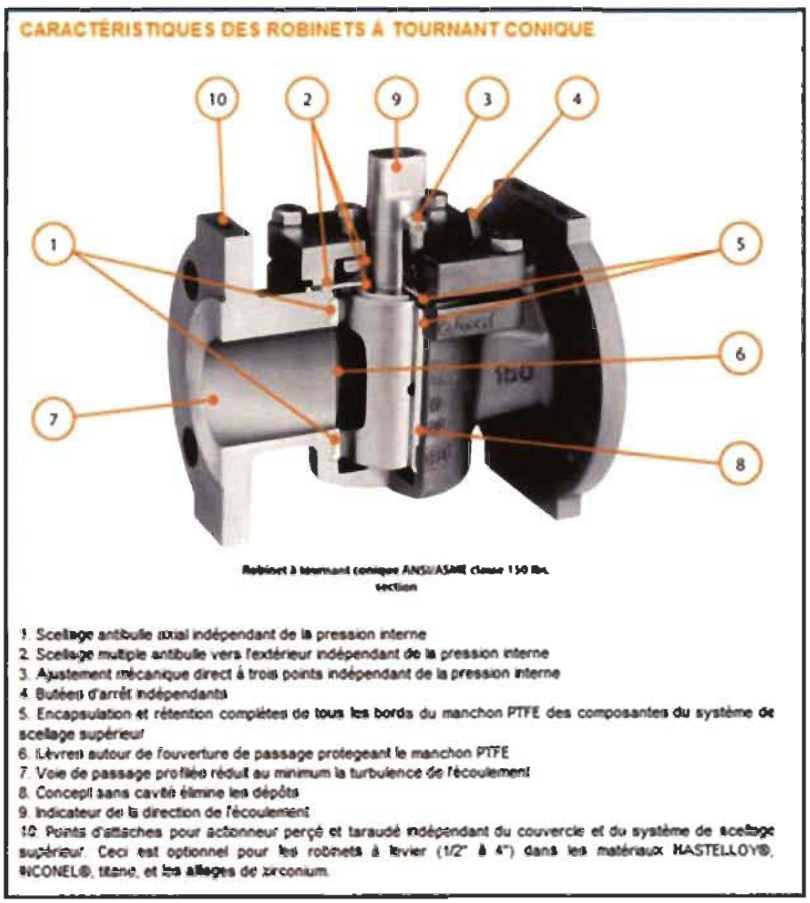


Figure 1.1 Robinet à tournant conique Fluoroseal

[1] Source de l'image : http://www.fluorosealvalves.com/FluoroSeal_Sleeved_fr.php

L'octroi au CMQ et aux deux entreprises partenaires d'une subvention du programme CRSNG RDA2[2] permettra de rechercher des stratégies de protection contre la corrosion de cette pièce de robinet dans un environnement d'acide chlorhydrique concentré à haute température. Dans cette proposition de recherche, le CMQ présente deux stratégies pour augmenter la durée de vie des tournants coniques. La première porte sur le développement d'un alliage à base de zirconium et la seconde sur l'utilisation de la projection thermique pour déposer un revêtement résistant à la corrosion sur des tournants coniques en acier inoxydable actuellement utilisés par la compagnie.

Le travail de recherche présenté dans ce document traite de la deuxième solution qui porte sur la possibilité d'utiliser la projection thermique pour déposer un revêtement protecteur à la surface de la pièce. Le CMQ possède une cellule de projection thermique (plasma et HVOF[3]) permettant de réaliser les revêtements pour les essais.

1.2 Problématique

La problématique rencontrée chez Rio Tinto Fer et Titane concerne la corrosion du tournant conique des robinets utilisés dans le procédé UGS pour la purification de l'oxyde de titane. Le procédé UGS utilise une solution d'acide chlorhydrique concentrée (20% à 22%) avec une température variant de 80°C à 160°C et contenant des particules de dioxyde de titane (TiO_2) en suspension ainsi que des composés de Fe^{2+}, Mg^{2+} et Ca^{2+} sous forme de chlorures. Dans le procédé actuel, les tournants coniques en acier inoxydable 316 ont une durée de vie inférieure à un an.

Une des stratégies envisagées propose de déposer un revêtement céramique par projection thermique plasma sur un tournant conique en acier inoxydable 316 pour augmenter la durée de vie de ce dernier. Les céramiques à base d'oxydes métalliques sont reconnues pour leur stabilité chimique dans les milieux acides.

---

[2] RDA2 : Projet de recherche et de développement appliqué de niveau 2.
[3] HVOF : High-velocity oxy-fuel.

La projection thermique permet de déposer un revêtement à la surface du substrat créant une barrière protectrice dans plusieurs applications (barrière thermique, revêtement résistant à l'usure et à la corrosion) [1] et peut donc s'avérer comme étant une solution au problème de corrosion.

Cependant, ces revêtements contiennent généralement des pores et des porosités qui peuvent laisser la voie libre à l'agent corrosif, lui permettant d'atteindre le substrat [2]. L'étanchéité d'un revêtement peut être améliorée en utilisant des paramètres de procédé minimisant la porosité ou en appliquant un produit d'étanchéité pour colmater les pores en surface. Si la résistance à la corrosion des revêtements par projection thermique s'avère insuffisante pour ce projet, l'utilisation d'un produit d'étanchéité sera nécessaire.

1.3 Objectifs

L'objectif principal demande de trouver une solution au problème de corrosion des tournants coniques permettant d'augmenter la durée de vie de ces derniers. La projection thermique plasma correspond à une des solutions retenues par le CMQ dans la demande de subvention CRSNG RDA2. La majeure partie du travail portera sur la validation de l'utilisation de la projection plasma pour une application de résistance à la corrosion d'un revêtement céramique. Pour atteindre l'objectif principal, le travail se fera en quatre étapes.

La première étape consistera à faire des essais préliminaires permettant de déterminer la ou les poudres les plus prometteuses en fonction de l'analyse métallographique et de l'efficacité de déposition. L'étude portera sur quatre poudres sélectionnées par le chargé de projet du CMQ.

La deuxième étape se composera d'essais de corrosion avec l'acide du procédé UGS à température ambiante sur les revêtements les plus prometteurs. Cette étape permettra de comparer la résistance à la corrosion des revêtements céramiques. Lors de cette étape, l'utilisation de produits d'étanchéité dans le but d'améliorer la résistance à la corrosion des revêtements céramiques sera étudiée. Cette étape permettra de choisir le revêtement avec la meilleure résistance à la corrosion et de déterminer la nécessité ou non d'utiliser un produit d'étanchéité.

La troisième étape consistera à élaborer des revêtements possédant une bonne résistance à la corrosion en présence de l'acide du procédé UGS et à déterminer les caractéristiques de ces revêtements. La résistance à la corrosion et l'épaisseur du revêtement seront les principaux éléments à considérer.

Finalement, la quatrième étape consistera à déposer le revêtement optimal sur des tournants coniques en acier inoxydable 316 pour faire des essais dans des robinets chez Rio Tinto Fer et Titane. Les zones à recouvrir sur le tournant conique sont présentées en jaune sur la Figure 1.2.

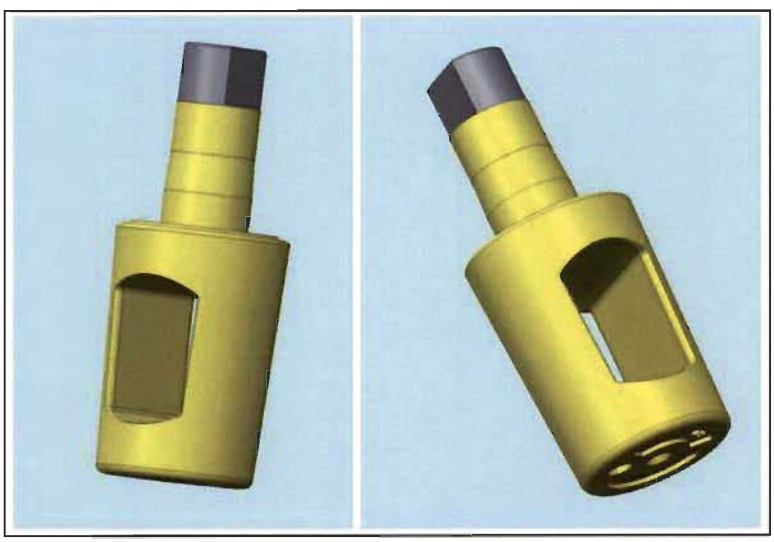


Figure 1.2 Zones à recouvrir sur le tournant conique

CHAPITRE 2 - REVUE DE LA LITÉRATURE

2.1 La projection thermique

La projection thermique entre dans la catégorie des procédés de traitement de surface permettant de protéger ou d'améliorer les propriétés du substrat [1]. Celle-ci permet de revêtir des pièces avec différents types de poudre dans le but d'augmenter certaines propriétés (par exemple : résistance à la corrosion, à l'usure ou à la chaleur) ou pour restaurer ou réparer une pièce.

Les outils de coupe 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 pièce. Certains procédés plus conventionnels comme la cémentation, la nitruration et le placage permettent d'améliorer les propriétés des outils 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 déposition 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 [1].

Les procédés de projection thermique se regroupent sous trois grandes catégories : la projection à la flamme (flame spray), la projection à arc électrique (electric arc spray) et la projection plasma (plasma arc spray) [1]. La projection à froid (cold spray) 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 [1].

2.2 Revêtement résistant à la corrosion

La résistance à la corrosion d'un revêtement obtenu par projection thermique dépend grandement du niveau de porosité (pores, vide et fissures) du revêtement [2], [4]–[9]. Un niveau de porosité élevé laisse la voie libre à l'agent corrosif qui peut atteindre le substrat [2].

Les résultats obtenus par Çelik [4] démontrent que la protection contre la corrosion dépend fortement du taux de porosité, de l'épaisseur et de la rugosité de surface du revêtement. Les observations métallographiques démontrent que les petits défauts comme la porosité et les fissures microscopiques dans le revêtement augmentent avec l'accroissement de l'épaisseur de ce dernier. La résistance à la corrosion du revêtement s'accentue avec une diminution du taux de porosité, de l'épaisseur et de la rugosité de surface du revêtement.

Le taux de porosité peut être mesuré par métallographie (plusieurs auteurs utilisent un logiciel d'analyse d'image [2], [5], [7], [10]–[15]) ou calculé à partir des données mesurées par méthode électrochimique (test de corrosion avec galvanomètre). Çelik [4] utilise l'équation suivante présentée par Oberlander [16] pour calculer la porosité totale d'un revêtement par projection plasma.

$$F = \left(R_{p,m}/R_p\right)\log\left(-\left|\Delta E_{cor}\right|/b_a\right) \qquad \text{Équation 2.1}$$

avec

F : *Porosité totale du revêtement*

$R_{p,m}$: *Résistance de polarisation du métal de base*

R_p : *Résistance de polarisation du revêtement*

ΔE_{cor} : *Tension de corrosion*

b_a : *Pente anodique du test de Tafel du métal de base*

Pour sa part, Liscano [7] calcule le taux de porosités connectées avec l'équation présentée par Siltonen [17].

$$P = \frac{i_c}{i_s} \times 100\% \qquad \text{Équation 2.2}$$

avec

P : *Porosités connectées*
i_c : *Courant de corrosion du revêtement*
i_s : *Courant de corrosion du substrat*

La densité du revêtement peut être augmentée en optimisant les paramètres du procédé de projection et par le choix du type de poudre [6]. Selon Toma [18], les revêtements réalisés avec le procédé par projection plasma présentent une meilleure résistance à la corrosion versus le HVOF. L'étanchéité d'un revêtement peut être améliorée en utilisant des paramètres de procédé minimisant la porosité ou en appliquant un produit d'étanchéité pour colmater les pores débouchant en surface. Plusieurs auteurs [5]–[7] démontrent que l'utilisation d'un produit d'étanchéité permet d'augmenter considérablement la résistance à la corrosion.

Dans certains milieux comme l'eau de mer, l'utilisation d'une couche d'adhésion à base de nickel entre le substrat et le revêtement céramique permet d'augmenter la résistance à la corrosion [8], [9]. Cependant, dans de l'acide chlorhydrique concentré, le nickel ne possède pas une bonne résistance à la corrosion. Les seuls matériaux pouvant résister à l'acide chlorhydrique 20 % à 160 °C sont des plastiques (FEP[4] et PTFE[5]) selon Schweitzer [19]. Dans le cas des robinets (voir la Figure 1.1), du PTFE recouvre l'intérieur du corps du robinet.

[4] FEP : Éthylène-propylène fluoré
[5] PTFE : Polytétrafluoroéthylène (nom commercial : Teflon)

Rapport-Gratuit.com

2.3 Traitements postprojection

Il existe plusieurs traitements postprojection comme l'utilisation d'un produit d'étanchéité, un traitement par laser et le pressage isostatique à chaud (HIP) [1]. Kim [5] a étudié l'effet de l'utilisation de produits d'étanchéité[6] sur les propriétés mécaniques d'un revêtement d'alumine (Al_2O_3) avec 13 % de TiO_2. L'ajout d'un produit d'étanchéité augmente la dureté, la résistance à l'usure et la résistance en traction comparativement au revêtement sans produit d'étanchéité. La profondeur de pénétration du produit d'étanchéité dans le revêtement varie d'un produit d'étanchéité à l'autre (0,2 mm pour l'uréthane, 0,3 mm pour l'époxy et 0,5 mm pour la cétone) [5].

Ahmadi-Pidani [20], [21] utilise un laser Nd-YAG[7] pulsé pour modifier la surface d'un revêtement plasma pour une application de barrière thermique sur un substrat en Inconel 718 (alliage de nickel). L'analyse de la microstructure démontre que le traitement de surface du revêtement céramique à base de dioxyde de zirconium (ZrO_2) réduit significativement la rugosité de surface, élimine les porosités en surface et produit un réseau continu de fissures perpendiculaires à la surface [21]. La modification de la surface par le laser permet de multiplier par 4 le temps au test de résistance aux chocs thermiques [20]. Batista [22], [23] utilise un laser CO_2 continu pour modifier la surface d'un revêtement plasma pour une application de barrière thermique sur un substrat en acier et il obtient des résultats similaires à Ahmadi-Pidani concernant la rugosité de surface, la porosité en surface et les fissures. Ghasemi [24] (laser Nd-YAG pulsé) et Lee [25] (laser CO_2 pulsé) obtiennent eux aussi des résultats similaires à Ahmadi-Pidani.

Abdel-Samad [26] a étudié l'influence du pressage isostatique à chaud sur les propriétés d'un revêtement plasma (poudre ZrO_2 + 24 % MgO[8]). L'utilisation de ce procédé permet de fermer une partie des pores dans le revêtement et diminuer les contraintes résiduelles.

---

[6] Trois produits d'étanchéité : un à base d'uréthane, à base d'époxy et à base de cétone
[7] Nd-YAG : Neodymium-doped yttrium aluminium garnet
[8] MgO : Oxyde de magnésium

2.4 La projection thermique de poudres à base d'alumine

Planche [27] a étudié l'effet du type[9] de procédé de projection sur les propriétés d'un revêtement produit avec une poudre d'alumine. La projection plasma se caractérise par une vitesse de particule plus grande et une température de particule plus élevée, ce qui procure un revêtement plus dense.

Dans son article, Yin [15] démontre que la taille des particules a une grande influence sur la vitesse et la température des celles-ci. La vitesse et la température des particules sont les deux paramètres qui ont généralement la plus grande influence sur les propriétés du revêtement. Yin [15] démontre aussi que plus les particules d'alumine sont petites, plus la vitesse et la température de ces dernières seront élevées. De plus, un revêtement produit avec des petites particules présente un taux de porosité plus faible. L'étude a été réalisée avec trois poudres d'alumine ayant une taille de particules moyenne de 15,3 μm, 19,4 μm et 33,5 μm respectivement pour chaque poudre.

Les résultats de l'article de Sarikaya [28] indiquent que la distance de projection, la température du substrat, l'épaisseur du revêtement et la rugosité de surface du substrat ont une influence significative sur la dureté, le taux de porosité et la rugosité de surface du revêtement à base d'alumine. Il démontre aussi que l'augmentation de l'épaisseur du revêtement (de 100 μm à 600 μm) fait diminuer la dureté et augmenter le taux de porosité ainsi que la rugosité de surface du revêtement.

Saravanan [29] démontre qu'une puissance élevée (33 kW) avec une distance de projection faible (60 à 75 mm) sont appropriées pour la formation d'un revêtement d'alumine dense. Cet auteur utilise la poudre Metco 105 SFP (Al_2O_3 avec taille de particules de 5 à 20 μm, donc similaire à la poudre de Praxair Al-1110-HP).

---

[9] Deux procédés : projection plasma et projection à la flamme. Pour la projection à la flamme, il utilise deux modèles de torche (Retrofit Rokide et Masterjet 2).

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Mawdsley [30] traite de l'optimisation de la poudre Al-1110-HP de Praxair (Al_2O_3 avec taille de particules de 5 à 22 μm) avec l'aide d'un design expérimental. Dans cet article, les paramètres permettant la meilleure résistance à la corrosion d'un revêtement avec la poudre Al-1110-HP dans l'eau salée sont une puissance de 35 kW, une distance de projection de 62 mm et un débit total de gaz (85 % argon + 15 % hydrogène) de 38 SLM[10].

2.5 Modélisation et optimisation du procédé de projection plasma

Plusieurs auteurs [12], [13], [31]–[39] utilisent les réseaux de neurones pour la modélisation du procédé de projection plasma. Guessasma [12], [33], [34] utilise les réseaux de neurones pour analyser et prédire les propriétés de la microstructure (% des phases en présence, taux de porosité et % de particules non fondues) ainsi que pour la vitesse et la température des particules [37], [38]. De son côté, Choudhury [31] se sert des réseaux de neurones pour prédire la vitesse et la température des particules en fonction des paramètres du procédé. Datta [32] modélise les entrées-sorties de la projection plasma avec un réseau de neurones. Pour sa part, Kanta [13], [35] utilise les réseaux de neurones pour prédire les paramètres du procédé pour obtenir le revêtement désiré.

Cizek [40] a fait une recherche systématique sur la projection thermique de l'hydroxypatite[11] pour connaître le rôle de la température et de la vitesse des particules lors de la projection sur un substrat en titane (alliage Ti-6Al-4V). Il a fait une étude sur six facteurs (puissance, débit de gaz primaire, débit de gaz auxiliaire, débit de poudre, débit de gaz pour le transport de la poudre et la distance de projection) pouvant influencer la température et la vitesse des particules lors de la projection. Pour son étude, il a utilisé un plan d'expérience (Taguchi L18, 6 facteurs à 3 niveaux) suivi d'une ANOVA. Les facteurs qui ont une plus grande influence sur la température des particules sont, par ordre d'importance, la distance de projection (45,4%), la puissance (23,7%) et le débit de gaz

[10] SLM : litres standard par minute, 38 SLM = 80,5 CFH.

[11] Hydroxyapatite est utilisée comme substance de remplissage pour remplacer un os amputé ou comme enduit sur certains implants, ce qui favoriserait l'ostéo-intégration.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

primaire (19,3%). Pour la vitesse des particules, c'est la distance de projection (32,5%), le débit de gaz primaire (24,3%) et le débit de gaz auxiliaire (22,8%). De plus, il y a diminution de la température (265 K) et de vitesse (83 m/s) lorsque la distance de projection passe de 75 à 125 mm.

Azarmi [10] utilise le design expérimental pour optimiser les paramètres de la projection plasma avec une poudre à base de nickel. Pour établir le modèle de prédiction, il a fait un total de huit expériences avec deux niveaux pour chacune des six variables (dimension des particules, distance de projection, alimentation de la poudre, courant, débit d'argon et débit d'hydrogène). Avec l'aide de son modèle, il génère plus de 2000 combinaisons et il choisit les six combinaisons de paramètres ayant le taux d'oxyde le plus faible pour faire une expérience de validation du modèle. En utilisant un diagramme de Pareto (confiance de 95 %), il y a trois paramètres significatifs pour le taux d'oxyde (dimension des particules, distance de projection et le débit d'argon). Pour le taux de porosité, il y a trois paramètres significatifs (distance de projection, dimension des particules et le courant). Pour la dureté, celle-ci augmente avec la présence d'oxyde. Les conditions optimales permettent de générer un revêtement contenant moins de 4 % d'oxyde et moins de 2,5 % de porosité.

Gao [11] utilise l'analyse statistique pour étudier les résultats d'un plan d'expériences réalisé avec une matrice Taguchi L9. Chacune des variables étudiées sur le procédé possède 3 niveaux et certains paramètres demeurent constants. Suite à la réalisation des neuf expériences, les mesures sont prises sur les revêtements et une analyse de régression est faite par la suite sur les données. Une ANOVA[12] est utilisée pour analyser les résultats expérimentaux. Une régression simple ne permet pas de prédire les propriétés du revêtement avec précision. L'utilisation d'une régression polynomiale permet de générer un modèle pour prédire les propriétés de la microstructure (fissures à l'interface, porosités, particules non fondues et oxydes) du revêtement avec un coefficient de corrélation (R^2)

[12] ANOVA : Analyse de variance

de plus de 96 % pour les quatre équations. Les paramètres les plus significatifs pour cette étude sont la dimension des particules (x_1), le ratio $H_2 + N_2$ avec l'argon pour le mélange de gaz (x_4), l'interaction entre ces deux paramètres (x_1x_4) et le carré de ces deux paramètres (x_1^2 et x_4^2).

Ramachandran [14] utilise une régression par réponse de surface pour une optimisation du procédé de projection plasma. Les variables typiques qui ont une grande influence sur les propriétés du revêtement sont la puissance, le débit de gaz primaire, la distance de projection, le débit de poudre et débit de gaz pour le transport de la poudre. Un plan de type Box Wilson est reconnu comme étant l'outil le plus efficient pour la régression par réponse de surface. Pour son étude, Ramachandran [14] utilise un plan Box Wilson à cinq facteurs et cinq niveaux avec 32 essais (16 pour la partie fractionnelle, 6 pour la centrale et 10 pour l'axiale). La réponse de surface (quadratique de deuxième ordre) est utilisée pour modéliser l'efficacité de déposition, la résistance en traction, la résistance au cisaillement, le taux de porosité et la dureté du revêtement. L'optimisation se fait de deux façons, par méthode graphique et par méthode numérique (module d'optimisation par critère de maximisation et minimisation en fonction des résultats recherchés). La modélisation par réponse de surface ($R2>0,99$) combinée à l'optimisation a permis de prédire avec succès les paramètres optimaux qui simultanément minimisent la porosité et optimisent l'efficacité de déposition, la résistance à la rupture, la résistance au cisaillement et la dureté du revêtement.

2.6 Trajectoires robot

Les paramètres du procédé qui sont en lien avec le robot lors de la projection thermique comme la trajectoire, la distance de projection, la vitesse de projection et l'angle de la torche par rapport au substrat ont une influence majeure sur la qualité et les propriétés du revêtement [41]. Gadow [41] démontre que l'angle de la torche par rapport au substrat est optimal à 90° et qu'une variation de l'angle fait diminuer l'épaisseur et la dureté du

revêtement. De plus, Kang [42] démontre que l'inclinaison du substrat par rapport à la torche diminue l'épaisseur du revêtement et augmente le taux de porosité.

Pour optimiser la génération de trajectoire pour une géométrie complexe, Gadow [41] et Candel [43], [44] utilisent une approche de programmation hors ligne. Les données géométriques de la pièce (à partir du DAO ou mesuré avec un système de scanneur) sont utilisées pour calculer les vecteurs normaux et la trajectoire pour la projection. Par une interconnexion entre les modules pour la génération de la trajectoire, la simulation de la dynamique des fluides (propriétés des particules et flux de chaleur) et la simulation par éléments finis (distribution de la température et des contraintes dans la pièce), il est possible d'évaluer l'influence du mouvement de la torche sur le transfert de chaleur lors de la projection. Cette simulation du transfert de chaleur permet de générer la trajectoire robot (position et vitesse) pour obtenir un revêtement uniforme. Les auteurs [41], [43], [44] ont démontré que cette méthodologie permet de générer un revêtement avec une épaisseur constante et une dureté homogène sur une surface complexe.

2.7 Mesure et contrôle

Mauer [45] présente une revue des principes et applications pour la mesure de la vitesse et de la température des particules. Il présente quatre méthodes pour la mesure de la température du plasma (Enthaly Probe, Optical Emission Spectroscopy, Boltzmann Plot et Computer Tomography). Pour la mesure de la température des particules, les signaux détectés sont filtrés en deux longueurs d'onde ce qui permet d'utiliser le principe de la pyrométrie bi chromatique. Pour chacune des techniques de mesure de la température du plasma ou des particules, l'auteur présente l'approche théorique, les conditions d'utilisation et les limitations, les sources d'erreurs, la calibration ainsi que des exemples de résultats. Aussi, pour la mesure de la température des particules, l'auteur fait une brève description des sept marques disponibles sur le marché. La comparaison des prises de mesures avec deux appareils (DPV-2000 et Accuraspray-g3, tous les deux de la

compagnie Tecnar Automation Ltd.) donne des résultats similaires si on prend en compte les principes d'opération des deux systèmes.

Zhu [46] utilise l'interférométrie de Moiré et la nanopénétration pour mesurer les contraintes résiduelles transversales pour un revêtement par projection plasma. Les contraintes résiduelles peuvent être en tension, en compression ou neutre. Les contraintes de tension ont tendance à faire fissurer le revêtement (si la valeur de la contrainte est supérieure à la résistance en traction du revêtement). Les contraintes de compression sont préférables, car elles augmentent les propriétés en fatigue. Cependant, une contrainte de compression élevée peut causer de la décohésion. En général, le procédé de projection plasma induit une contrainte résiduelle de compression en surface du revêtement et la valeur de la contrainte diminue de manière non linéaire entre la surface du revêtement et l'interface avec la couche d'adhésion ou le substrat.

Kanta [47] utilise un contrôleur avec logique floue pour le contrôle des paramètres de la projection plasma sur la température et la vitesse des particules. De plus Kanta [39] conclut que l'utilisation d'un réseau de neurones est bien adaptée pour la modélisation et la prédiction tandis que la logique floue est préférable pour le contrôle du procédé. Fauchais [36] arrive à la même conclusion que Kanta [39] concernant l'utilisation d'un réseau de neurones et de la logique floue.

2.8 Autres axes de recherche en projection thermique

La modélisation et la simulation en projection plasma ne se fait pas seulement au niveau des paramètres du procédé et de la caractérisation des revêtements. Il y en a aussi au niveau des phénomènes physiques comme la manière dont la particule se déforme lorsqu'elle entre en contact avec le substrat [48], [49]. D'autres auteurs traitent de la mécanique des fluides, de la thermodynamique et du transfert de chaleur lors de la projection plasma [50]–[52].

2.9 Originalité du projet de maîtrise

Malgré toutes les recherches réalisées jusqu'à maintenant sur la projection thermique, très peu d'auteurs traitent de la résistance à la corrosion dans l'acide chlorhydrique [2], [4]. Tous les écrits recensés en lien avec ce sujet traitent de l'acide chlorhydrique dilué (5% et moins) avec des températures entre 20 et 100 °C et aucun ne traite de l'acide chlorhydrique 20% à 160 °C. Ce projet de maîtrise est donc unique et de plus il répond à une problématique industrielle.

CHAPITRE 3 - MÉTHODOLOGIE

3.1 Résumé du plan de travail

La revue de la littérature a permis de déterminer que le taux de porosité joue un rôle important pour un revêtement contre la corrosion. La première étape consistera à faire des essais préliminaires permettant de déterminer la ou les poudres les plus prometteuses en fonction de l'analyse métallographique (taux de porosité) et de l'efficacité de déposition. L'étude portera sur quatre poudres dont deux poudres à base d'alumine et deux autres à base d'oxyde de chrome (Cr_2O_3). Lors de cette étape, différentes combinaisons d'anode et de cathode seront utilisées (subsonique et Mach 1) dans le but d'obtenir un revêtement dense.

La deuxième étape se composera d'essais de corrosion avec l'acide du procédé UGS à température ambiante sur les revêtements les plus prometteurs. Cette étape permettra de comparer la résistance à la corrosion des revêtements céramiques. Lors de cette étape, l'utilisation de produits d'étanchéité dans le but d'améliorer la résistance à la corrosion des revêtements céramiques sera étudiée. Cette étape permettra de déterminer la nécessité ou non d'utiliser un produit d'étanchéité et de choisir le revêtement avec la meilleure résistance à la corrosion.

La troisième étape consistera à élaborer des revêtements possédant une bonne résistance à la corrosion en présence de l'acide du procédé UGS et à déterminer les caractéristiques de ces revêtements. La résistance à la corrosion et l'épaisseur du revêtement seront les principaux éléments à considérer. De plus, des essais de traction seront réalisés dans le but de vérifier l'adhérence du revêtement.

Finalement, la quatrième étape consistera à déposer le revêtement optimal sur des tournants coniques en acier inoxydable 316 pour faire des essais dans des robinets chez Rio Tinto Fer et Titane.

3.2 Caractéristiques des poudres utilisées

Les poudres à base d'alumine ont une bonne résistance à l'abrasion, à l'érosion et à l'usure par glissement. Elles possèdent aussi de bonnes propriétés dans un environnement acide. Les deux poudres à base d'alumine sélectionnées pour cette étude sont la Al-1110-HP et la ALO-159. Les fiches techniques des poudres sont présentées en annexe A.

La poudre Al-1110-HP se compose essentiellement d'alumine et possède une taille de particules fines (-22µm/+5µm). La taille des particules pour cette poudre se situe entre 5 µm pour les plus petites et 22 µm pour les plus grosses. La taille des particules joue un rôle important sur le taux de porosité du revêtement. Selon Yin [15], lorsque la taille des particules d'alumine est petite, la vitesse et la température des particules seront plus élevées lors de la projection et le taux de porosité du revêtement sera plus faible. Le coût d'achat de cette poudre est de 43,67 $/kg.

La poudre ALO-159 se compose d'alumine avec un ajout de 3% de TiO_2. L'ajout de TiO_2 à alumine permet la formation d'une composition eutectique qui abaisse le point de fusion en fonction de la quantité de TiO_2 [18]. La taille des particules pour cette poudre varie de 45 µm à 106 µm. Le coût d'achat de cette poudre est de 44,77 $/kg.

Les poudres à base d'oxyde de chrome sont dures et possèdent une bonne résistance à l'usure en plus d'être insolubles dans l'acide. Les poudres à base d'oxyde de chrome utilisées pour cette étude sont la CRO-174 et la CRO-192.

Rapport-Gratuit.com

La poudre CRO-174 se compose d'oxyde de chrome et possède une taille de particules fines (-22μm/+5μm). Selon Leivo [6], l'oxyde de chrome a une meilleure résistance à la corrosion et à l'abrasion que l'alumine, mais le coût pour acheter cette poudre est plus élevé. Le coût d'achat de cette poudre est de 47,30 $/kg, donc environ 8% plus cher que la Al-1110-HP.

La poudre CRO-192 se compose d'oxyde de chrome avec un ajout de 5% de silice (SiO_2) et de 3% de TiO_2. Cette poudre possède une taille de particules de 10 μm à 53 μm. L'ajout de SiO_2 et de TiO_2 permet d'obtenir un revêtement avec une meilleure résistance au choc que l'oxyde de chrome seul. Le coût d'achat de cette poudre est de 69,85 $/kg.

3.3 Équipements de projection plasma

La projection plasma doit idéalement se faire dans une cellule fermée avec des équipements de manipulation automatisés [1]. L'effluent de la projection thermique se compose de chaleur, d'un jet de particules à haute vitesse, de fumées et des gaz [1]. Pour protéger le personnel et l'environnement, cet effluent doit être capturé. De plus, la projection plasma génère un niveau de bruit relativement élevé (115 à 125 dBA) [1]. La cellule de projection thermique (Figure 3.1) du CMQ est insonorisée. Pour la capture des fumées et des particules, il y a un système de ventilation et dépoussiéreur (Figure 3.3) à l'extérieur de la bâtisse. Un système de sécurité empêche le fonctionnement de la projection thermique si une des deux portes de la cellule est ouverte (capteurs en haut des portes sur la Figure 3.1) ou si la ventilation ne fonctionne pas. Au fond de la cellule (Figure 3.2) il y a la grille pour le système de ventilation.

Figure 3.1 Cellule de projection thermique du CMQ

Figure 3.2 Cellule de projection thermique (intérieur)

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Figure 3.3 Ventilation et dépoussiéreur de la cellule de projection thermique

La torche représente l'élément principal de la projection plasma. Le CMQ utilise une torche Praxair SG-100 (Figure 3.4). Cette torche a une puissance maximale de 80 kW. Elle permet l'injection de poudre en interne ou en externe. L'injection de poudre en interne produit des revêtements de haute qualité avec une meilleure efficacité de déposition comparativement à l'injection externe. Cette torche est compatible avec l'argon, l'hélium, l'hydrogène et l'azote. Les configurations les plus courantes utilisent des mélanges argon-hydrogène et argon-hélium (voir la Figure 3.6 pour le module de contrôle des gaz, modèle 7722 de Praxair). La Figure 3.5 présente l'anatomie de la torche Praxair SG-100 avec une configuration d'injection de poudre interne. La combinaison anode et cathode peut permettre la projection avec des vitesses de particules en subsonique, Mach I et Mach II.

Figure 3.4 Torche Praxair SG-100

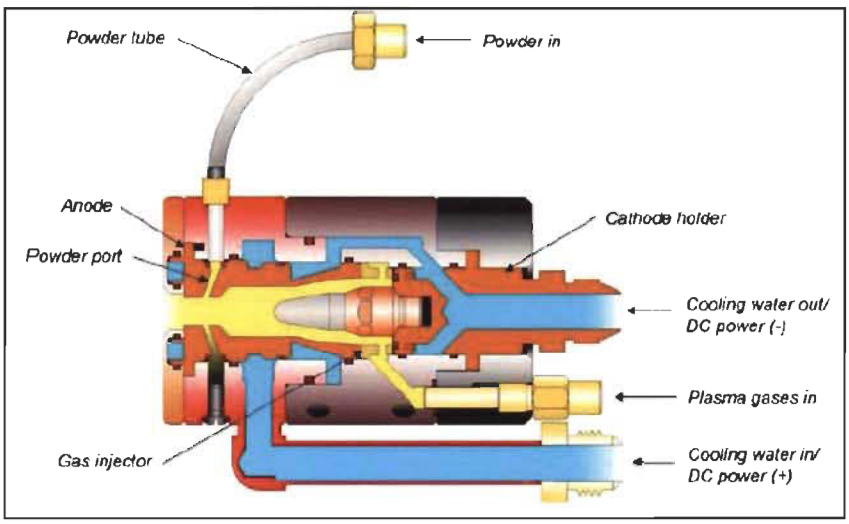


Figure 3.5 Anatomie de la torche plasma Praxair SG-100

Figure 3.6 Module de contrôle pour les gaz en projection plasma

Un système de refroidissement avec échangeur de chaleur (Figure 3.7, modèle 3262 de Praxair) permet la circulation du liquide de refroidissement à l'intérieur de la torche.

Figure 3.7 Système de refroidissement de la torche plasma

Les distributeurs de poudre (Figure 3.8, modèle 1264 de Praxair) permettent d'alimenter la torche. Le contrôle du débit de poudre se fait par l'ajustement de la vitesse de rotation du plateau (tours par minute) et par le débit de gaz pour le transport de la poudre. Avec la torche SG-100, il est possible d'utiliser deux distributeurs de poudre en alternance ou en simultané. Généralement, le premier distributeur contient la poudre pour la couche d'adhésion et le second celle pour le revêtement.

Figure 3.8 Distributeurs de poudre pour la projection plasma

Le système Praxair 7780 UPC contrôle les paramètres de projection thermique (Figure 3.9). Ce système fonctionne avec un écran tactile et permet l'utilisation en mode manuel ou automatisé. En mode automatisé, il suffit de créer une recette et de lui donner un numéro. Lors de la séquence de projection, le programme du robot appelle la recette de projection en utilisant le numéro de celle-ci.

Figure 3.9 Contrôle 7780 UPC pour les paramètres de la projection thermique

La source de courant (Figure 3.10) Praxair HPS-100 qui alimente la torche peut délivrer un courant continu maximum de 1200 ampères et la tension dépend de la configuration de la torche (anode et cathode).

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Figure 3.10 Source de courant HPS-100 pour la torche plasma

L'automatisation de la projection thermique se fait avec l'aide d'un robot ABB IRB 2600 (Figure 3.11) et d'un positionneur rotatif inclinable (Figure 3.12, modèle 16000 de Praxair, vitesse maximum de 350 tours/minute) pour les pièces cylindriques. L'inclinaison du positionneur se fait manuellement et le contrôleur pour la table rotative est indépendant du système robotique.

Figure 3.11 Robot ABB IRB 2600 M2004

Figure 3.12 Positionneur rotatif avec tournant conique et contrôleur

3.4 Caméra pour vitesse et température des particules

L'équipement principal se compose d'une caméra (Figure 3.13), d'un contrôleur (boîtier sous l'ordinateur de la Figure 3.14) et d'un ordinateur. Les deux procédés de projection thermique du CMQ nécessitent des caméras différentes qui doivent être à l'intérieur de la cellule de projection thermique. La première caméra (celle de gauche sur la Figure 3.13) permet la prise de données pour la projection plasma tandis que la seconde sert pour la projection HVOF.

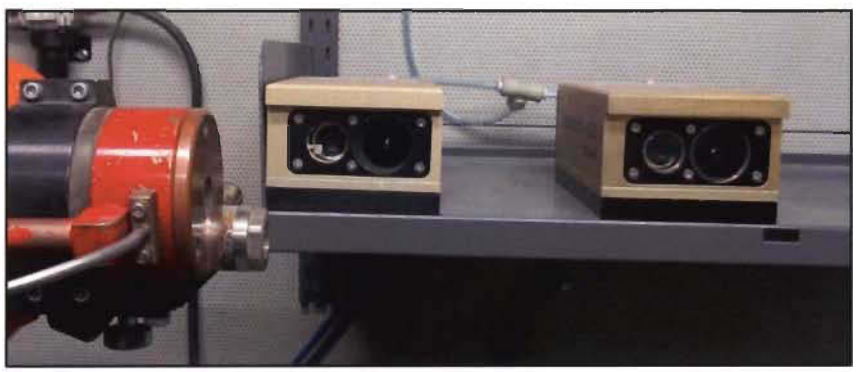


Figure 3.13 Caméras projection thermique plasma et HVOF

Figure 3.14 Ordinateur et contrôleur pour la vitesse et la température des particules

Le contrôleur et l'ordinateur sont à l'extérieur de la salle de projection. Le contrôleur fait la gestion et le traitement des données et l'ordinateur sert d'interface pour l'utilisateur. Les caméras sont de type CCD[13], c'est-à-dire une caméra avec semi-conducteur qui accumule une quantité d'électrons proportionnelle à la quantité de photons reçus.

Le contrôleur numérise les images (vidéo) et les données provenant de la caméra. Il fait la compilation des données et les calculs nécessaires pour retourner les résultats par l'interface utilisateur de l'ordinateur. Cet équipement sert principalement à caractériser les propriétés de la plume (vitesse et température moyenne des particules ainsi que la forme de la plume) lors de la projection.

3.5 Préparation des échantillons

Avant d'entreprendre la projection, la première étape consiste à préparer le substrat par grenaillage (voir la Figure 3.15 pour l'appareil utilisé au CMQ). Day [53] a fait une étude sur l'influence de la préparation du substrat sur les propriétés du revêtement. La rugosité

[13] CCD : Charge-coupled device

de surface et la contamination par la présence de particules de grenaillage sur la surface du substrat (voir la Figure 3.16) ont une influence sur l'adhésion du revêtement.

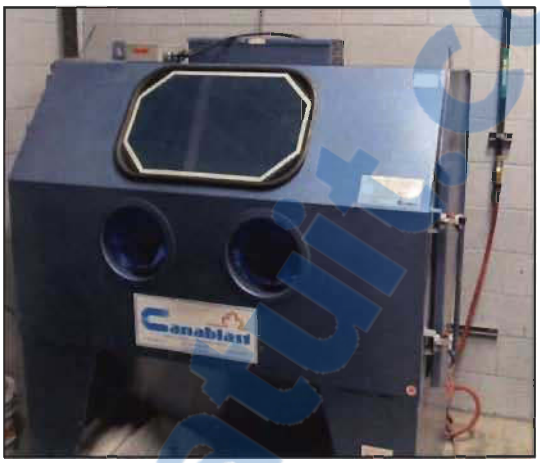


Figure 3.15 Appareil de grenaillage

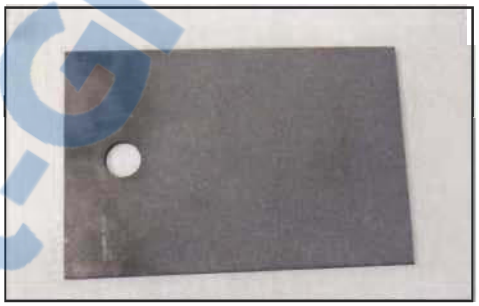


Figure 3.16 Plaque grenaillée

Figure 3.17 Particules de grenaillage

Rapport-Gratuit.com

Le type de particules (Figure 3.17) utilisé pour le grenaillage est de l'alumine avec une taille de «20 grit» (selon la norme ANSI B74.12 Table 3), ce qui donne une taille moyenne de particules de 1 mm de diamètre. Après le grenaillage, les plaques sont nettoyées avec de l'alcool éthylique dénaturé. Pour les pions pour les essais de traction et les tournants coniques, un nettoyage de 15 minutes par ultrasons est effectué dans un bain (voir la Figure 3.18) rempli d'alcool éthylique dénaturé.

Figure 3.18 Bain de nettoyage par ultrasons (VWR International, modèle 150 HT)

Pour la caractérisation des revêtements, l'efficacité de déposition, le taux de porosité et la résistance à la corrosion seront mesurés. Dans le cas de l'efficacité de déposition, la plaque est grenaillée, nettoyée, pesée et installée sur le support pour la projection (Figure 3.19).

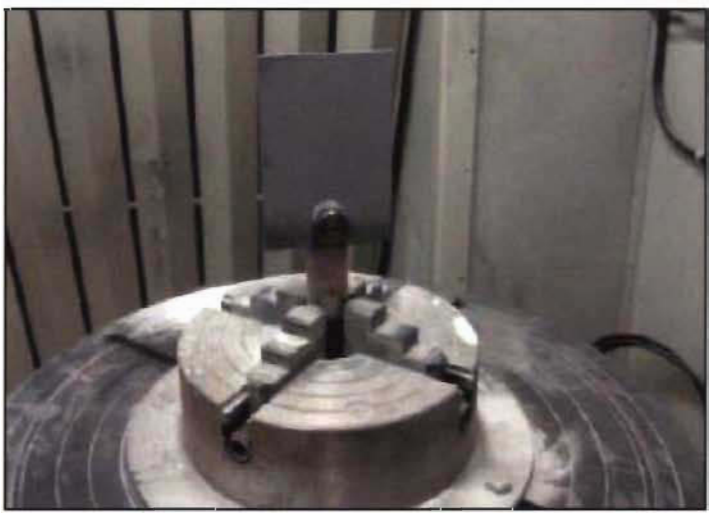


Figure 3.19 Plaque sur support avant la projection thermique

La routine utilisée pour la trajectoire du robot pour la projection plasma pour mesurer l'efficacité de déposition est présenté à la Figure 3.20. Sur une plaque, il est possible de faire trois revêtements avec des paramètres différents (il faut cependant retirer la plaque après chaque revêtement pour la peser et ainsi calculer l'efficacité de déposition). La Figure 3.23 présente une plaque avec trois revêtements. La variable nZ dans le programme permet de déterminer la position de départ du revêtement (c'est-à-dire en haut, au milieu ou au bas de la plaque) ainsi que l'incrémentation du pas pour chaque passe. Les positions p50 et p60 sont les points de référence pour la trajectoire. Ceux-ci sont positionnés à une hauteur correspondante à l'arrête supérieure de la plaque et sont à une distance de 25 mm des arrêtes verticales de la plaque. La fonction RelTool gère la distance de projection en fonction de la variable standoff. La vitesse de déplacement du robot est gérée par la variable vSpray. La Figure 3.21 présente la trajectoire de la torche pour les passes de préchauffe et de projection pour la production d'échantillon et la mesure de l'efficacité de déposition.

```
PROC rMotionPlaque()
    !
            FOR pLoop FROM 1 to nPasses DO
                    SetDO Air_Solenoide, 1;
                    IF passe = 3 then
                    nZ:=-75;
                    ELSEIF passe =2 then
                    nZ:=-40;
                    ELSE
                    nZ:=-5;
                    ENDIF
                    !
                    FOR sLoop FROM 1 to nSteps DO
                            !
                    p51:= Offs(p50,0,0,nZ);
                    p61:= Offs(p60,0,0,nZ);
                            MoveL RelTool(p51,0,0,StandOff), vSpray, z5, tSG100_2_5\WObj:=Cur_Wobj;
                            MoveL RelTool(p61,0,0,StandOff), vSpray, z5, tSG100_2_5\WObj:=Cur_Wobj;
                            nZ:=nZ - nStepSize;
                            !
                    p51:=Offs(p50,0,0,nZ);
                    p61:=Offs(p60,0,0,nZ);
                            MoveL RelTool(p61,0,0,StandOff), vSpray, z5, tSG100_2_5\WObj:=Cur_Wobj;
                            MoveL RelTool(p51,0,0,StandOff), vSpray, z5, tSG100_2_5\WObj:=Cur_Wobj;
                            nZ:= nZ - nStepSize;
                            !
                    ENDFOR
            !
        ToGo:=(nPasses-pLoop);
        PassComplete;
        !
            ENDFOR

    ENDPROC
```

Figure 3.20 Code du programme du robot pour la trajectoire

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

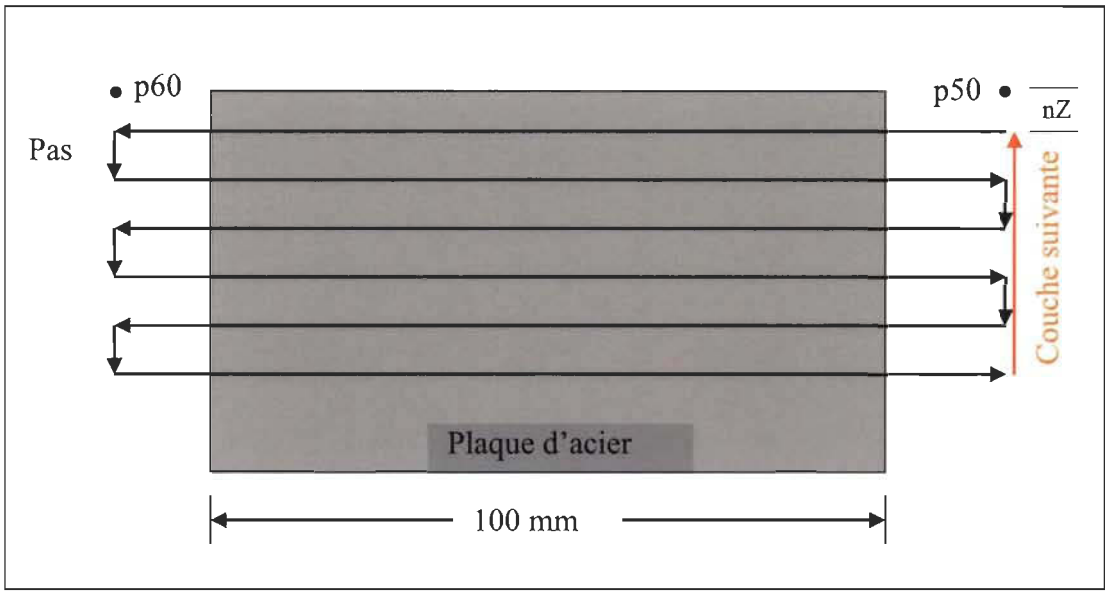


Figure 3.21 Représentation de la trajectoire de la torche

Voici un exemple pour le calcul de l'efficacité de déposition. La poudre utilisée est la Al-1110-HP avec une combinaison d'anode et de cathode Mach 1 (anode 2083-155, cathode 1083A-112 et injecteur 3083-113). Pour les 20 passes de projection, la torche passe devant la plaque 120 fois (6 x 20). Avec une plaque de 100 mm, la distance parcourue devant la plaque est de 12000 mm. Puisque la vitesse de la torche est de 800 mm/s, le temps de projection devant la plaque est de 15 secondes (12000 mm / 800 mm/s = 15 s).

Pour calculer l'efficacité de déposition, la première étape consiste à mesurer le débit de poudre (g/min). Pour mesurer le débit de poudre, on fait sortir de la poudre avec les paramètres de projection (vitesse de rotation du distributeur et débit de gaz pour le transport de la poudre) pendant une minute dans un erlenmeyer (fiole conique avec un fond plat) et on mesure la masse de poudre recueillie. Pour la masse de poudre déposée, on pèse la plaque d'acier avant et après la projection et l'on calcule l'écart de masse.

Voici un exemple de calcul pour l'échantillon ALHPM1-19 :

Débit de poudre : 6,8 g/min

Temps de projection devant la plaque : 15 s

Masse de poudre projetée : 1,7g (6,8 x 15/60)

Masse de poudre déposée : 1,5 g

Efficacité de déposition : 1,5/1,7 = 0,88

Tableau 3.1 Exemple de paramètres pour la poudre Al-1110-HP en Mach 1

Échantillon	Courant (ampères)	Puissance (kW)	Débit Ar (CFH)	Débit He (CFH)	Débit gaz transport poudre (CFH)	Distance projection (mm)	Pas (mm)
ALHPM1-16	1200	53,4	220	50	19	88,9	3
ALHPM1-19	1000	36,0	130	30	19	50,8	3
ALHPM1-21	1000	36,0	100	50	19	50,8	3
ALHPM1-24	1100	44,0	130	50	19	50,8	3

Le Tableau 3.1 présente les paramètres de quatre essais de la première phase. Le Tableau 3.2 présente l'efficacité de déposition, la vitesse et la température des particules ainsi que le taux de porosité moyen pour ces quatre essais.

Tableau 3.2 Exemple de l'efficacité de déposition et autres pour Al-1110-HP en Mach 1

Échantillon	Masse projetée (g)	Masse déposée (g)	Efficacité de déposition	Vitesse des particules (m/s)	Température des particules (°c)	Taux de porosité moyen (%)
ALHPM1-16	1,7	1,2	0,71	860	3230	3,9
ALHPM1-19	1,7	1,5	0,88	550	3290	1,9
ALHPM1-21	1,7	1,5	0,88	520	3320	4,8
ALHPM1-24	1,7	1,4	0,82	600	3300	2,6

3.6 Caractérisation des échantillons

3.6.1 Porosité

Pour mesurer le taux de porosité, une préparation des échantillons est nécessaire. La préparation débute par le découpage de l'échantillon sur la tronçonneuse (Figure 3.22).

Par la suite, les échantillons sont enrobés dans un époxy (durée de durcissement de 10 heures, voir la Figure 3.24) avant de procéder au polissage. Le polissage peut être fait de façon manuelle ou automatique avec le polisseur Buehler Automet (Figure 3.25). La procédure de polissage est présentée dans le Tableau 3.3.

Figure 3.22 Tronçonneuse Mecatome pour la préparation des échantillons

Figure 3.23 Échantillons prélevés sur plaque avec 3 revêtements

Figure 3.24 Échantillons enrobés dans un époxy pour faciliter le polissage

Figure 3.25 Polisseurs Buehler Automet

Tableau 3.3 Procédure de polissage pour les échantillons avec revêtement

Papier grit / Feutre	Sens de rotation	Charge appliquée (lb/éch.)	Médium	Temps (min.)	RPM
180 SiC	Contr.	5	Eau	2 – 3	280
320 SiC	Contr.	5	Eau	2 - 3	280
600 SiC	Contr.	5	Eau	2 -3	280
Pellon1 (anamet)	Contr.	5	3 µm diamant huile	3 - 4	220
Pellon1	Contr.	5	1 µm diamant huile	3 - 4	220
Imperial	Contr.	5	0,05 µm alumine colloïdal	1 - 2	150

Après le polissage, les échantillons sont observés au microscope pour mesurer l'épaisseur du revêtement. Pour les échantillons pour lesquels le taux de porosité est mesuré, cinq images sont prélevées par échantillon au MEB (microscope électronique à balayage, Figure 3.27). Le taux de porosité se mesure par niveau de teinte de gris avec un logiciel d'analyse d'image (logiciel Omnimet de Buehler Figure 3.26).

La Figure 3.28 présente un exemple d'une image obtenue avec le MEB à 750x. Le logiciel d'analyse d'image calcule la proportion de pixels noirs par rapport au reste de l'image. Pour cette métallographie, le taux de porosité mesuré est de 1,7 %.

Figure 3.26 Analyse d'image Omnimet

Figure 3.27 MEB

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

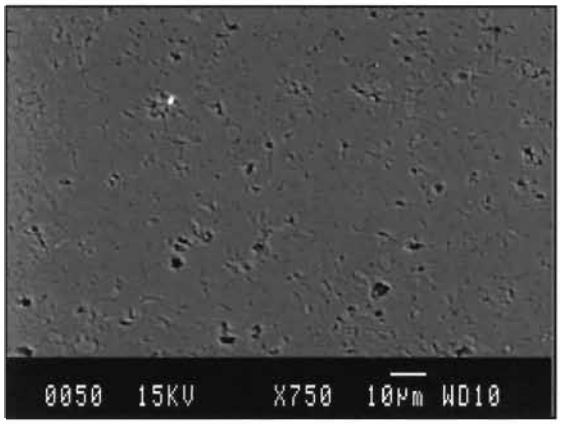


Figure 3.28 Métallographie échantillon ALHPM1-19 (taux de porosité de 1,7%)

3.6.2 Corrosion

Pour le test de corrosion, un échantillon de 25 mm x 25 mm est prélevé sur la plaque avec revêtement et le revêtement est en contact avec la solution (échantillon en test pointé par une flèche blanche sur la Figure 3.29). La surface de contact entre le revêtement et la solution est de 1 cm^2 (trou de diamètre de 11,3 mm). L'électrode de référence est une AgCl/KCl. Le galvanomètre (Figure 3.30) permet de mesurer le potentiel de corrosion, le courant de corrosion ainsi que la résistance du revêtement. Pour mesurer ces valeurs, une polarisation linéaire est utilisée.

Figure 3.29 Cellule de corrosion

Figure 3.30 Galvanomètre Versa STAT pour le test de corrosion

Le test de polarisation linéaire appelée LPR (linear polarization resistance) utilisé consiste à appliquer une valeur de tension variant de –20 mV à +20 mV dans le temps par rapport à la valeur de la tension de corrosion (Ecorr) mesurée en circuit ouvert. Pour chaque valeur de tension, le courant est mesuré et il est possible à partir de la courbe générée de déterminer le courant de corrosion (Icorr) et la résistance.

La Figure 3.31 présente la polarisation linéaire pour l'échantillon avec le revêtement de CRO192-2. Pour cet exemple, la valeur de Ecorr est de -345 mV. Le test LPR se fait donc entre -365 mV et -325 mV. Suite au test LPR, il est possible de déterminer la résistance du revêtement en utilisant le graphique de la tension en fonction du courant. Pour l'exemple de la Figure 3.31, la valeur de Icorr est de 1,408 mA, la résistance est de 15,43 Ω et la corrélation linéaire est de 0,999. Pour chaque échantillon, le test de corrosion effectué consiste en un circuit ouvert de 600 secondes, suivi de 4 essais de polarisation linéaire.

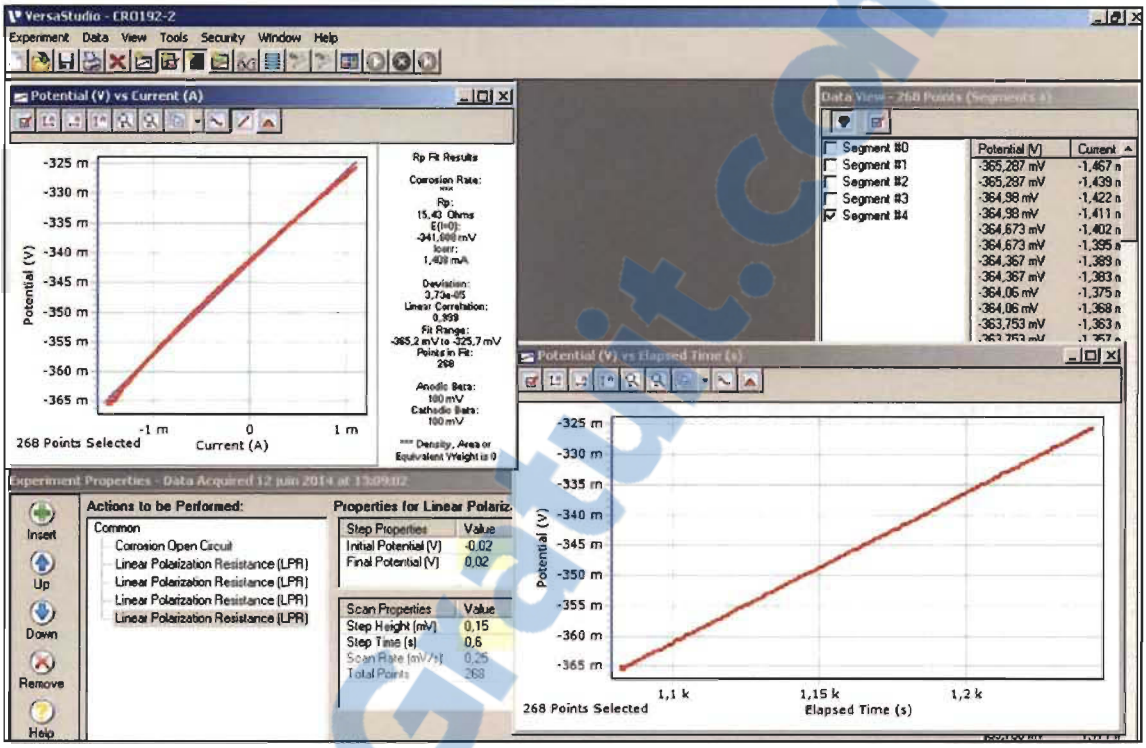


Figure 3.31 Capture d'écran du test de polarisation linéaire échantillon CRO192-2

3.6.3 Adhésion

L'utilisation de l'essai de traction selon la norme ASTM C633 permet de caractériser l'adhésion du revêtement. Pour cet essai, des pions filetés de 1 pouce de diamètre par un pouce de longueur sont utilisés (voir la Figure 3.32). Le revêtement est déposé sur la surface d'un pion et les deux pions sont collés ensemble avec une colle à haute résistance (environ 83 MPa (12000 psi) pour la Master Bond EP15).

Figure 3.32 Pions pour l'essai de traction selon la norme ASTM C633

Rapport-Gratuit.com

Figure 3.33 Pions assemblés après le durcissement de la colle

Lorsque le processus de durcissement de la colle est complété (voir la Figure 3.33), l'assemblage des deux pions collés est monté sur l'appareil de traction. L'assemblage est boulonné sur les supports mobiles permettant l'alignement de l'assemblage pour que la force soit normale à la surface. Lors de l'essai, la force maximale nécessaire pour séparer les pions est enregistrée et permet de calculer la contrainte de résistance en traction. La Figure 3.34 présente un essai de traction réalisé sur un échantillon selon cette norme.

Figure 3.34 Essai de traction sur un échantillon

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

CHAPITRE 4 - RÉSULTATS

4.1 Essais préliminaires

Plusieurs essais ont été conduits dans le but de déterminer la ou les poudres les plus prometteuses pour le revêtement des tournants coniques en acier inoxydable. Ces essais sont exploratoires et permettrons d'obtenir une banque de données pour les essais subséquents. La projection thermique est un nouveau créneau pour le CMQ et ce dernier ne possède aucune base de données de paramètres pour les différentes poudres. Les données de départ pour les essais sont les paramètres fournis par le fabricant de la torche et le fournisseur de poudre. Ces essais sont effectués sur des plaques en acier dans le but de caractériser le revêtement en mesurant l'efficacité de déposition et en réalisant une analyse métallographique. Les essais préliminaires se divisent en deux phases. La première phase porte sur des essais en utilisant les quatre poudres avec une combinaison anode et cathode en subsonique tandis que la deuxième utilise une combinaison anode et cathode en Mach 1 avec la poudre Al-1110-HP. Puisque ces essais sont exploratoires, il n'y a pas de répétitions pour étudier la variabilité.

4.1.1 Poudre ALO-159

Les premiers essais ont permis de déterminer la combinaison anode et cathode permettant d'obtenir une efficacité de déposition satisfaisante avec les poudres à base d'alumine. À partir des données fournies pour la configuration de la torche SG-100 de Praxair, le fabricant recommande d'utiliser l'anode 2083-730 avec la cathode 3083-129 pour des revêtements denses avec des poudres céramiques à base d'oxyde. Cependant, avec la poudre ALO-159, cette configuration donne une efficacité de déposition inférieure ou égale à 15%. Le

Tableau 4.1 présente les paramètres de quelques essais avec la poudre ALO-159 utilisant une configuration anode 2083-730 et cathode 3083-129. Puisque l'efficacité de déposition est très faible, l'épaisseur des revêtements n'a pas été mesurée.

Pour ces essais, les variables manipulées sont le débit de gaz pour le transport de la poudre, la distance de projection et le courant. Les constantes pour ces essais sont une vitesse de déplacement de la torche de 800 mm/s, un débit d'argon de 104 CFH, un débit d'hélium de 50 CFH, un débit de poudre de 34 g/min (une masse projetée de 8,5 g par échantillon), un pas de 4 mm, une largeur d'échantillon de 100 mm, 6 passes de préchauffe, 20 passes de projection et 3 pas par passe.

Tableau 4.1 Poudre ALO-159 avec anode 2083-730 et cathode 3083-129

Échantillon	Débit gaz transport poudre (CFH)	Distance projection (mm)	Courant (ampères)	Puissance (kW)	Masse déposée (g)	Efficacité de déposition
ALO-3	10,5	101,6	575	17,83	0,7	0,08
ALO-4	10,5	101,6	575	17,83	0,7	0,08
ALO-5	10,5	76,2	600	18,60	1,1	0,13
ALO-6	10,5	76,2	550	17,05	0,7	0,08
ALO-7	12	76,2	575	17,83	0,9	0,11
ALO-8	8	76,2	575	17,83	0,5	0,06
ALO-9	9	76,2	575	17,83	0,4	0,05
ALO-10	11	76,2	575	17,83	1,1	0,13
ALO-11	10	76,2	700	24,22	1,2	0,14
ALO-12	10	76,2	400	13,52	1,3	0,15
ALO-13	10	76,2	575	18,40	1	0,12

La configuration en subsonique qui donne les meilleurs résultats avec la poudre ALO-159 se compose de l'anode 3083-175 et de la cathode 3083-129. Pour cette configuration, Praxair recommande une valeur de courant entre 550 et 600 ampères, un débit d'argon de 104 CFH, un débit d'hélium de 50 CFH, un débit de gaz pour transporter la poudre entre 8 et 11 CFH, un débit de poudre de 34 g/min et une distance de projection entre 76,2 et 101,6 mm. Les paramètres utilisés avec cette configuration sont un courant de 575 ampères, un débit d'argon de 104 CFH, un débit d'hélium de 50 CFH, un débit de gaz

pour transporter la poudre de 10 CFH, un débit de poudre de 34 g/min (une masse projetée de 8,5 g par échantillon), un pas de 5 mm, une largeur d'échantillon de 100 mm, 6 passes de préchauffe, 20 passes de projection et 3 pas par passe. Pour la distance de projection, les valeurs utilisées sont les deux extrêmes recommandés ainsi que la valeur centrale. Les paramètres pour les échantillons ALO-16 et ALO-18 sont les mêmes, car l'anode et la cathode étaient usées lors de la réalisation des échantillons ALO-15 et ALO-16 (tension plus faible à courant égal). L'échantillon ALO-18 a été réalisé avec une anode et une cathode neuves. Lorsque l'anode et la cathode sont usées, il y a une diminution de la puissance (tension plus faible, donc à courant égal, puissance inférieure). Cette diminution de puissance a un effet néfaste sur l'efficacité de déposition et sur l'épaisseur du revêtement.

Tableau 4.2 Poudre ALO-159 avec anode 3083-175 et cathode 3083-129

Échantillon	Distance projection (mm)	Tension (Volts)	Puissance (kW)	Masse déposée (g)	Efficacité de déposition	Épaisseur revêtement (µm)
ALO-14	76,2	30	17,25	3,5	0,41	328
ALO-15	101,6	24,5	14,09	2,5	0,29	244
ALO-16	88,9	25,8	14,84	2,7	0,32	233
ALO-18[14]	88,9	30	17,25	3,6	0,42	358

La mesure de l'épaisseur du revêtement se fait par analyse métallographique. Les valeurs d'épaisseur de revêtement présentées dans le Tableau 4.2 proviennent de la moyenne de trois mesures. La Figure 4.1 présente un exemple de l'étude métallographique de l'échantillon ALO-14. La zone centrale de la métallographie constitue le revêtement et les traits rouges avec une valeur numérique donnent les mesures d'épaisseur du revêtement. La zone la plus claire représente le substrat (plaque d'acier) et les zones noires dans le revêtement désignent les pores ou des zones de vide. On constate que pour les échantillons ALO-14, ALO-15, ALO-16 et ALO-18 (Figure 4.1 ainsi que Figure B.1 à Figure B.3 de

[14] Changement de l'anode et de la cathode.

l'annexe B), le taux de pore est relativement élevé, ce qui fait en sorte que ces revêtements ne possèderont pas une bonne résistance à la corrosion (présence de pores connectés).

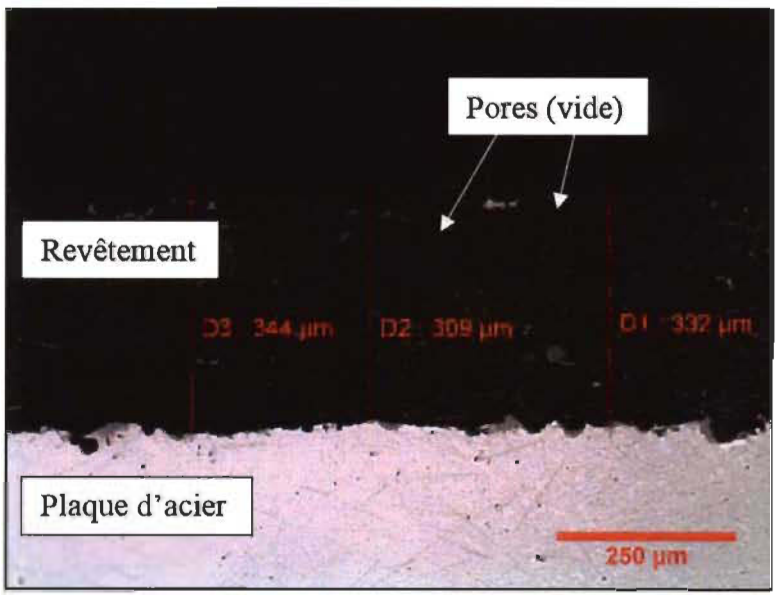


Figure 4.1 Métallographie échantillon ALO-14

4.1.2 Poudre Al-1110-HP

Le Tableau 4.3 présente les paramètres utilisés pour la projection de la poudre Al-1110-HP en subsonique (anode 3083-175 et cathode 3083-129). La difficulté rencontrée avec cette poudre est de déterminer le débit de gaz pour le transport de la poudre avec la vitesse de rotation du distributeur de poudre pour obtenir un débit de poudre constant (éviter la pulsation, car les particules de cette poudre sont très petites). Pour ces essais, les variables manipulées sont le débit d'argon, le débit d'hélium et le courant. Les constantes pour ces essais sont une vitesse de déplacement de la torche de 800 mm/s, un débit de gaz pour transporter la poudre de 19 CFH, un débit de poudre de 10 g/min (une masse projetée de 2,5 g par échantillon), une distance de projection de 76,2 mm, un pas de 4 mm, une largeur d'échantillon de 100 mm, 6 passes de préchauffe, 20 passes de projection et 3 pas par passe.

Tableau 4.3 Paramètres pour la poudre Al-1110-HP en subsonique

Échantillon	Débit Ar (CFH)	Débit He (CFH)	Courant (ampères)	Puissance (kW)
ALHP-1	124	50	600	19,56
ALHP-2	124	50	500	16,8
ALHP-3	124	25	500	15,25
ALHP-4	124	25	600	16,2
ALHP-5	104	25	600	18
ALHP-6	104	25	500	15,25
ALHP-7	104	50	500	16,55
ALHP-8	104	50	600	19,74

Tableau 4.4 Efficacité de déposition et épaisseur du revêtement Al-1110-HP

Échantillon	Masse déposée (g)	Efficacité de déposition	Épaisseur revêtement (µm)
ALHP-1	2,2	0,80	269
ALHP-2	1,9	0,69	232
ALHP-3	1,8	0,65	227
ALHP-4	1,4	0,51	185
ALHP-5	1,7	0,62	234
ALHP-6	1,9	0,69	218
ALHP-7	2,4	0,87	308
ALHP-8	1,9	0,69	235

Puisque cette poudre possède une grande efficacité de déposition avec des métallographies intéressantes (taux de porosité plus faible que la poudre ALO-159), elle sera utilisée pour la deuxième série d'essais. L'échantillon ALHP-7 possède la meilleure efficacité de déposition. Les métallographies sont présentées à la Figure 4.2 ainsi qu'en annexe B de la Figure B.4 à la Figure B.10. Le taux de porosité moyen sur l'échantillon ALHP-7 a été mesuré à partir de cinq images prises à différents endroits avec le MEB. L'utilisation du MEB permet d'obtenir un bon contraste, ce qui facilite le calcul du taux de porosité avec un logiciel d'analyse d'image. La Figure 4.3 présente une des cinq images pour l'échantillon ALHP-7. Le taux de porosité moyen est de 5,4 % pour les cinq images.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

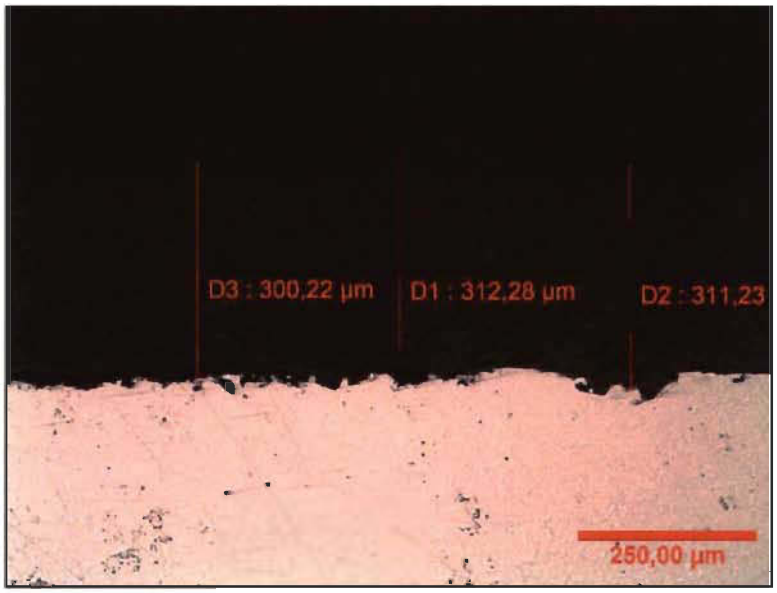


Figure 4.2 Métallographie échantillon ALHP-7

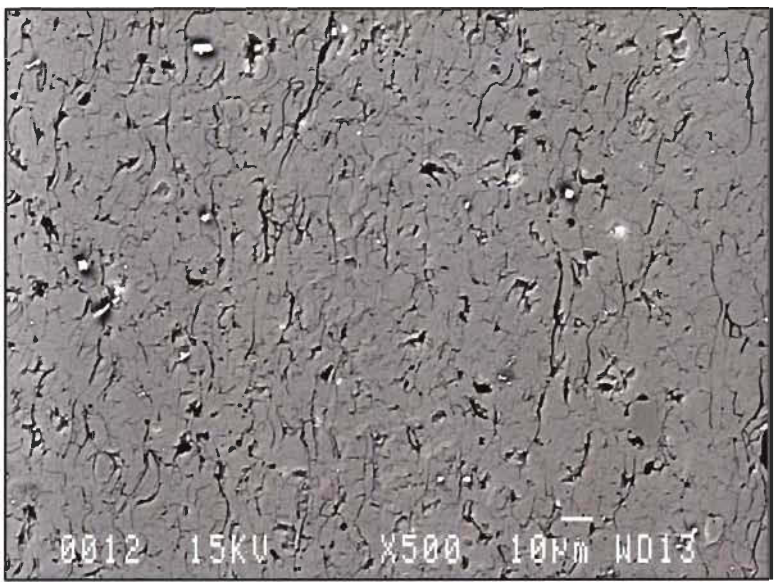


Figure 4.3 Métallographie échantillon ALHP-7 (4,8 % de porosité)

4.1.3 Poudre CRO-174

Le Tableau 4.5 présente les paramètres utilisés pour la projection de la poudre CRO-174 en subsonique (anode 3083-175 et cathode 3083-129). Pour ces essais, les variables manipulées sont le débit d'argon, le débit d'hélium et le courant. Les constantes pour ces essais sont une vitesse de déplacement de la torche de 800 mm/s, un débit de gaz pour transporter la poudre de 11,5 CFH, un débit de poudre de 20 g/min (une masse projetée de 5 g par échantillon), une distance de projection de 76,2 mm, un pas de 4 mm, une largeur d'échantillon de 100 mm, 6 passes de préchauffe, 20 passes de projection et 3 pas par passe.

Tableau 4.5 Paramètres pour la poudre CRO-174

Échantillon	Débit Ar (CFH)	Débit He (CFH)	Courant (ampères)	Puissance (kW)
CRO174-1	102	55	1000	25
CRO174-2	102	55	900	22,59
CRO174-3	102	45	900	22,14
CRO174-4	102	45	1000	26
CRO174-5	92	45	1000	24
CRO174-6	92	45	900	21,96
CRO174-7	92	55	900	23,4
CRO174-8	92	55	1000	24,5

Tableau 4.6 Efficacité de déposition et épaisseur du revêtement CRO-174

Échantillon	Masse déposée (g)	Efficacité de déposition	Épaisseur revêtement (µm)
CRO174-1	3,2	0,64	235
CRO174-2	4	0,80	340
CRO174-3	3,9	0,78	311
CRO174-4	3,8	0,76	319
CRO174-5	3,3	0,66	257
CRO174-6	3,2	0,64	259
CRO174-7	3	0,60	231
CRO174-8	2,6	0,52	233

Pour cette poudre, les revêtements possèdent des fissures transversales (sur la métallographie de l'échantillon CRO174-2 de la Figure 4.4, il y a une fissure visible). Sur les autres échantillons, il y a aussi des fissures transversales, mais la métallographie a été prise dans une zone sans fissure. La présence de fissures transversales jusqu'au substrat fait en sorte que ces revêtements ne possèderont pas une bonne résistance à la corrosion. Les métallographies de ces revêtements sont présentées à la Figure 4.4 ainsi qu'en annexe B de la Figure B.11 à la Figure B.17.

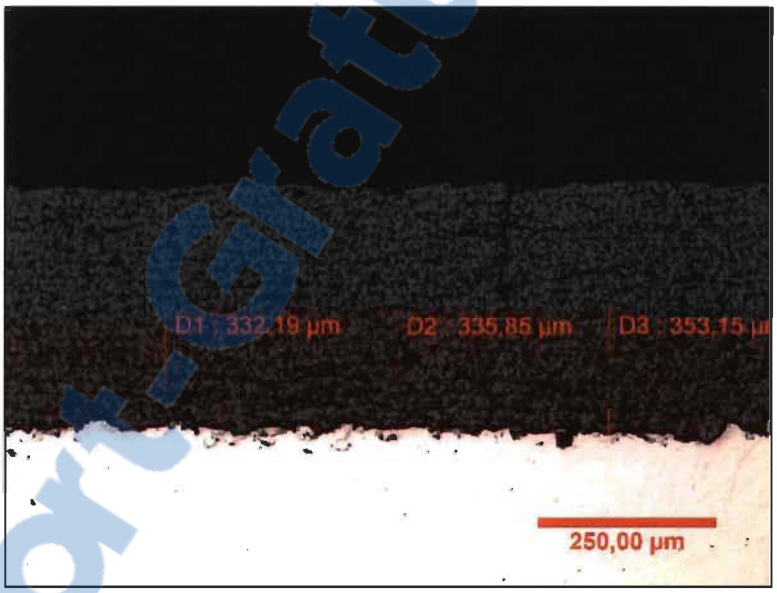


Figure 4.4 Métallographie échantillon CRO174-2

4.1.4 Poudre CRO-192

Le Tableau 4.7 présente les paramètres pour la poudre CRO-192 en subsonique (anode 3083-175 et cathode 3083-129). Pour ces essais, les variables manipulées sont le débit d'argon, le débit d'hélium et le courant. Puisque la plume est plus large avec cette poudre, un premier essai (CRO192-1) a été réalisé avec un pas de 6 mm, mais celui-ci était un peu trop grand. Un pas de 4,5 mm a donc été utilisé pour les essais suivants (2 à 11).

Rapport-Gratuit.com

Les constantes pour ces essais sont une vitesse de déplacement de la torche de 800 mm/s, un débit de gaz pour transporter la poudre de 11 CFH, un débit de poudre de 18 g/min (une masse projetée de 3 g par échantillon), une distance de projection de 76,2 mm, une largeur d'échantillon de 100 mm, 6 passes de préchauffe, 20 passes de projection et 2 pas par passe.

Tableau 4.7 Paramètres pour la poudre CRO-192

Échantillon	Débit Ar (CFH)	Débit He (CFH)	Courant (ampères)	Puissance (kW)
CRO192-2	122	35	800	17,36
CRO192-3	102	35	800	16,4
CRO192-4	102	55	800	16,96
CRO192-5	122	55	900	20,07
CRO192-6	122	55	700	15,96
CRO192-7	122	55	750	16,95
CRO192-8	122	35	700	15,12
CRO192-9	102	35	700	14,63
CRO192-10	102	55	700	15,26
CRO192-11	122	55	800	18

Tableau 4.8 Efficacité de déposition et épaisseur du revêtement CRO-192

Échantillon	Masse déposée (g)	Efficacité de déposition	Épaisseur revêtement (µm)
CRO192-2	1,5	0,50	209
CRO192-3	1,1	0,37	136
CRO192-4	1,2	0,40	166
CRO192-5	1,7	0,57	226
CRO192-6	1,8	0,60	255
CRO192-7	1,7	0,57	228
CRO192-8	1,3	0,43	155
CRO192-9	1	0,33	129
CRO192-10	1,4	0,47	195
CRO192-11	1,5	0,50	169

Cette poudre présente une efficacité de déposition inférieure à la poudre CRO-174. Les paramètres utilisés avec cette poudre donnent un revêtement très poreux, ce qui est très

néfaste pour la résistance à la corrosion. Les métallographies de ces revêtements sont présentées à la Figure 4.5 ainsi qu'en annexe B de la Figure B.18 à la Figure B.26.

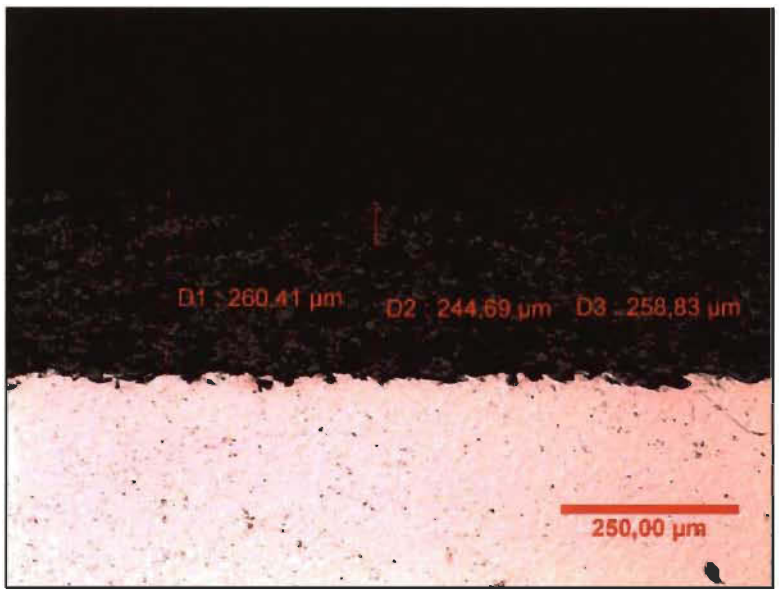


Figure 4.5 Métallographie échantillon CRO192-6

4.1.5 Synthèse des résultats des 4 poudres en subsonique

Parmi les quatre poudres, la Al-1110-HP possède la plus grande efficacité de déposition ainsi que le revêtement le plus dense. La Figure 4.6 présente pour chaque poudre l'échantillon ayant la meilleure efficacité de déposition. Il s'avère que les deux poudres avec les tailles de particules les plus petites (-22 µm/+5 µm pour la Al-1110-HP et la CRO174) possèdent une plus grande efficacité de déposition que les deux autres poudres (-53 µm/+10 µm pour la CRO192 et -106 µm/+45 µm pour la ALO-159). La Figure 4.7 présente une section des métallographies de l'échantillon ayant la meilleure efficacité de déposition pour chaque poudre. Ce montage permet de comparer visuellement la densité des revêtements. Le revêtement ALHP-7 est le plus dense tandis que l'ALO-18 et le CRO192-6 sont moins denses. Dans le cas du revêtement CRO174-2, il y a présence de

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

fissures. En fonction de l'analyse métallographique et de l'efficacité de déposition, la poudre Al-1110-HP s'avère être la plus prometteuse pour une application de résistance à la corrosion.

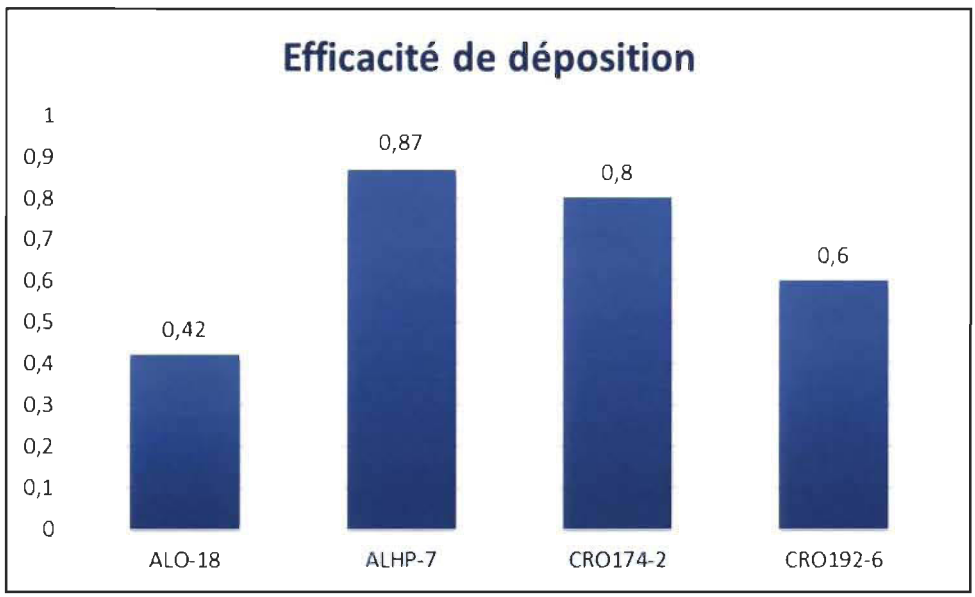


Figure 4.6 Graphique de l'efficacité de déposition en subsonique

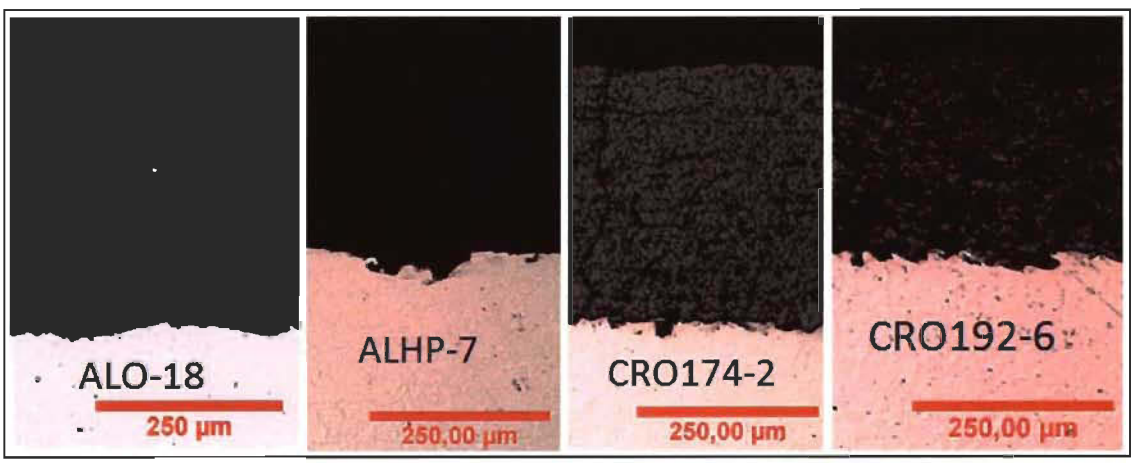


Figure 4.7 Synthèse des métallographies en subsonique

4.1.6 Essais avec une combinaison anode et cathode en Mach 1

L'utilisation d'une combinaison anode et cathode en Mach 1 permet d'obtenir une vitesse de particules plus élevée qu'une combinaison en subsonique. Une vitesse de particules plus grande donne un revêtement plus dense. Le CMQ a fait l'acquisition d'une caméra pour mesurer la vitesse et la température moyennes des particules lors de la réalisation de cette phase. Le but de cette deuxième série d'essais préliminaires avec une combinaison d'anode et de cathode en Mach 1 est de produire des revêtements plus denses que ceux de la première série. En fonction des résultats de la première série, la poudre Al-1110-HP sera la seule utilisée avec une combinaison d'anode et de cathode en Mach 1 (anode 2083-155, cathode 1083A-112 et injecteur 3083-113).

Ces essais permettront d'obtenir une banque de données pour les essais subséquents. Pour ces essais, les variables manipulées sont le débit d'argon, le débit d'hélium, la distance de projection, le pas, le débit de poudre et le courant. Les constantes pour ces essais sont une vitesse de déplacement de la torche de 800 mm/s, un débit de gaz pour transporter la poudre de 19 CFH, une largeur d'échantillon de 100 mm, 6 passes de préchauffe, 20 passes de projection et 3 pas par passe. Le Tableau 4.9 présente les paramètres pour les différents essais réalisés. Dans la revue de la littérature, Mawdsley [30] mentionne que les paramètres permettant la meilleure résistance à la corrosion d'un revêtement avec la poudre Al-1110-HP dans l'eau salée sont une puissance de 35 kW, une distance de projection de 62 mm et un débit total de gaz (85 % argon + 15 % hydrogène) de 38 SLM[15]. Quelques essais ont été réalisés avec une valeur de puissance proche de 35 kW.

[15] SLM : litres standard par minute, 38 SLM = 80,5 CFH.

Tableau 4.9 Paramètres pour la poudre Al-1110-HP en Mach 1

Échantillon	Débit Ar (CFH)	Débit He (CFH)	Distance projection (mm)	Pas (mm)	Débit Poudre (g/min)	Courant (ampères)	Puissance (kW)
ALHPM1-1	130	30	76,2	4	5,4	700	23,59
ALHPM1-2	130	30	63,5	4	5,4	700	24,36
ALHPM1-3	130	30	50,8	3	5,4	700	24,22
ALHPM1-4	130	30	50,8	3	10	700	24,08
ALHPM1-5	130	30	50,8	3	6,8	700	24,08
ALHPM1-6	130	30	63,5	3	6,8	700	24,08
ALHPM1-7	130	30	63,5	3	6,8	800	27,60
ALHPM1-8	130	30	76,2	3	6,8	800	27,60
ALHPM1-9	130	20	76,2	3	6,8	800	27,60
ALHPM1-10	130	30	76,2	3	6,8	900	31,05
ALHPM1-11	130	30	88,9	3	6,8	900	31,05
ALHPM1-12	130	30	101,6	3	6,8	1000	35,00
ALHPM1-13	200	50	88,9	3	10	1100	47,85
ALHPM1-14	200	50	88,9	3	6,8	1100	47,63
ALHPM1-15	170	40	88,9	3	6,8	1100	43,89
ALHPM1-16	220	50	88,9	3	6,8	1200	53,40
ALHPM1-17	200	50	88,9	3	6,8	1200	51,96
ALHPM1-18	180	50	88,9	3	6,8	1200	50,04
ALHPM1-19	130	30	50,8	3	6,8	1000	36,00
ALHPM1-20	130	30	76,2	3	6,8	1000	36,00
ALHPM1-21	100	50	50,8	3	6,8	1000	36,00
ALHPM1-22	180	50	50,8	3	6,8	1200	51,60
ALHPM1-23	220	50	76,2	3	6,8	1200	56,40
ALHPM1-24	130	50	50,8	3	6,8	1100	44,00

Le Tableau 4.10 présente l'efficacité de déposition pour tous les échantillons ainsi que le taux de porosité moyen sur les échantillons sélectionnés comme étant les plus prometteurs. Pour mesurer le taux de porosité moyen pour un échantillon, cinq images ont été prises à différents endroits avec le MEB. L'utilisation du MEB permet d'obtenir un bon contraste, ce qui facilite le calcul du taux de porosité avec un logiciel d'analyse d'image. Une sélection des métallographies prises au MEB sont présentées à la Figure 4.8 ainsi qu'en annexe B de la Figure B.27 à la Figure B.30. De plus, pour certains paramètres de projection, la vitesse et la température des particules ont été mesurées.

Tableau 4.10 Efficacité de déposition et autres pour Al-1110-HP en Mach 1

Échantillon	Masse projetée (g)	Masse déposée (g)	Efficacité de déposition	Particules		Taux porosité moyen (%)
				Vitesse (m/s)	Temp. (°c)	
ALHPM1-1	1,35	0,6	0,44	500	3600	
ALHPM1-2	1,35	0,8	0,59			
ALHPM1-3	1,35	0,9	0,67			
ALHPM1-4	2,5	1,2	0,48			
ALHPM1-5	1,7	1,1	0,65			
ALHPM1-6	1,7	1	0,59			
ALHPM1-7	1,7	1,1	0,65			
ALHPM1-8	1,7	1,2	0,71			
ALHPM1-9	1,7	1,1	0,65			
ALHPM1-10	1,7	1,2	0,71			
ALHPM1-11	1,7	1,2	0,71			
ALHPM1-12	1,7	1,1	0,65	570	3250	
ALHPM1-13	2,5	1	0,40	680	3250	
ALHPM1-14	1,7	0,9	0,53			
ALHPM1-15	1,7	1,1	0,65	670	3280	
ALHPM1-16	1,7	1,2	0,71	860	3230	3,9
ALHPM1-17	1,7	0,9	0,53	800	3230	
ALHPM1-18	1,7	1,1	0,65	740	3240	
ALHPM1-19	1,7	1,5	0,88	550	3290	1,9
ALHPM1-20	1,7	1,4	0,82			3,4
ALHPM1-21	1,7	1,5	0,88	520	3320	4,8
ALHPM1-22	1,7	0,8	0,47	760	3280	
ALHPM1-23	1,7	0,6	0,35	800	3400	
ALHPM1-24	1,7	1,4	0,82	600	3300	2,6

En comparant le taux de porosité moyen de l'échantillon ayant la meilleure efficacité de déposition avec la poudre Al-1110-HP en subsonique (échantillon ALHP-7 avec un taux moyen de 5,4%, Figure 4.3) par rapport aux meilleurs échantillons en Mach 1, il est possible de conclure que le taux de porosité est plus faible avec la combinaison en Mach 1. Puisque le revêtement est plus dense (moins de pores) en Mach 1, la résistance à la corrosion devrait être meilleure.

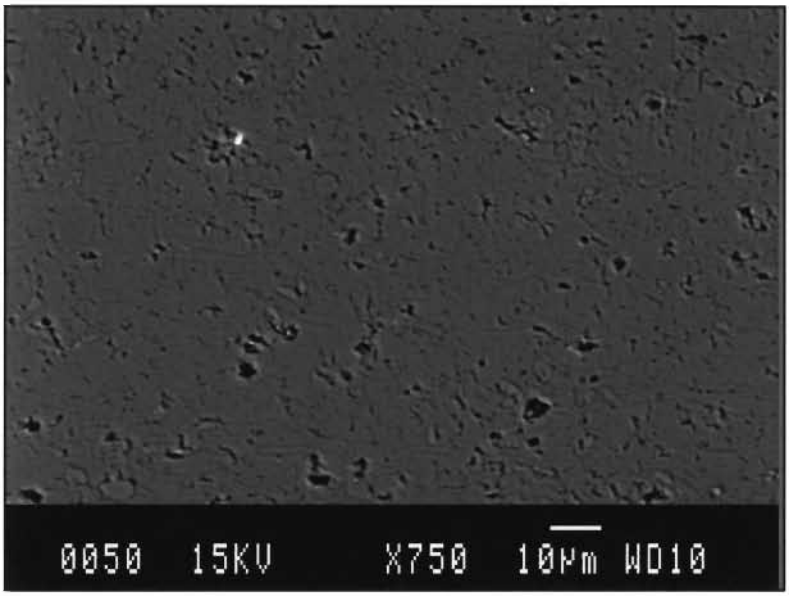


Figure 4.8 Métallographie échantillon ALHPM1-19 (1,7 % de porosité)

4.2 Revêtements pour les essais de corrosion

Avant de recevoir l'acide du procédé UGS, des essais de corrosion ont été réalisés avec de l'acide chlorhydrique dilué (7%) sur les alliages de zirconium ainsi que sur des échantillons des essais préliminaires. Il s'avère qu'avec l'acide chlorhydrique dilué (7%), la résistance est de l'ordre du MΩ pour les alliages de zirconium, tandis que pour les revêtements céramiques des essais préliminaires, elle se situe entre 40 et 71 Ω (voir le Tableau 4.11). Les alliages de zirconium possèdent donc une résistance d'environ 10^4 fois plus élevée que celle des revêtements céramiques.

Un produit d'étanchéité commercial sous le nom de Ceramacoat 503-VFG-C (voir l'annexe C, produit à base d'alumine et de phosphate) a donc été appliqué sur deux échantillons de revêtement de céramique pour essayer d'améliorer leur résistance à la corrosion. Pour les deux revêtements avec ce produit, la résistance est de 155 et 184 Ω. L'utilisation de ce produit d'étanchéité a permis d'augmenter la valeur de la résistance par un facteur d'environ 3.

Tableau 4.11 Résultats de corrosion avec acide chlorhydrique dilué (7%)

	Revêtement		Test de corrosion	
Échantillon	Poudre	Porosité (%)	Icorr (µa)	R (ohms)
acier nu	N/A	N/A	3200	6,5
ALHP-7	Al-1110-HP	Pas mesuré	550	40
	avec Ceramacoat	N/A	145	155
ALHPM1-15	Al-1110-HP	Pas mesuré	300	71
	avec Ceramacoat	N/A	120	184
ALHPM1-19	Al-1110-HP	1,9	370	59
ALHPM1-20	Al-1110-HP	3,4	405	53
ALHPM1-21	Al-1110-HP	4,8	350	63
ALHPM1-24	Al-1110-HP	2,6	320	68

Puisque les revêtements des essais préliminaires possèdent une résistance relativement faible comparativement aux alliages de zirconium avec l'acide chlorhydrique dilué (7%), la suite de la recherche portera sur deux avenues. La première propose d'utiliser une couche d'adhésion entre le substrat en acier et le revêtement céramique tandis que la deuxième porte sur la recherche et l'utilisation d'autres produits d'étanchéité plus performants.

4.2.1 Utilisation d'une couche d'adhésion

Les deux poudres sélectionnées pour la couche d'adhésion possèdent une bonne résistance à la corrosion et à l'oxydation. Celles-ci sont à base de nickel avec ajout de chrome. La Ni-107 est composée de 80% Ni et de 20% Cr tandis que la Ni-122 contient 76% Ni, 18% Cr et 6% Al (voir les fiches techniques en annexe A). Certains essais ont été réalisés en Mach 1 et d'autres avec deux configurations en subsonique. Les deux configurations en subsonique utilisent l'anode 2083-730 avec la cathode 1083A-720 pour la première et la cathode 3083-129 pour la seconde. Les paramètres de ces essais sont présentés dans les tableaux 4.14 à 4.19. La vitesse de déplacement de la torche de 500 mm/s est la seule valeur constante pour tous ces essais.

Tableau 4.12 Paramètres de projection en Mach 1

Échantillon	Poudre	Courant (ampères)	Puissance (kW)	Débit Ar (CFH)	Débit He (CFH)	Débit gaz transport poudre (CFH)	Débit poudre (g/min)
NiCrM1-7	Ni-107	1000	34,5	80	55	10	54
NiCrHPM1-3	Ni-107	1000	35,4	80	55	10	54
	Al-1110-HP	1000	37	130	30	19	6,8
AlHPM1-25	Al-1110-HP	1000	37	130	30	19	6,8
NiCrHPM1-4	Ni-107	1000	35,4	80	55	10	54
	Al-1110-HP	1000	37	130	30	19	6,8
NiCrHPM1-5	Ni-107	1000	35,5	80	55	10	54
	Al-1110-HP	1000	37,1	130	30	19	6,8
Ni122M1-2	Ni-122	1000	35,3	80	55	10	39,6
CRO174M1-13	CRO-174	1200	44,04	75	75	12	15
N107C174M1-1	Ni-107	1000	34,8	80	55	10	54
	CRO-174	1200	44,16	75	75	12	15
CRO174M1-14	CRO-174	1200	43,68	75	75	12	15

La routine de projection commence toujours avec 6 passes de préchauffe. Pour la couche d'adhésion, le revêtement se fait en 5 passes dans le but d'obtenir une épaisseur d'environ 100 μm. Pour le revêtement céramique, le nombre de passes varie en fonction du type de poudre et de l'épaisseur désirée. Lorsque le revêtement possède une couche d'adhésion et un revêtement céramique, la séquence de projection se fait en continu (préchauffe, couche d'adhésion et revêtement céramique sans éteindre la torche).

La dimension du pas varie en fonction de la largeur de la plume dans le but de faire un revêtement plat (éviter un effet de vague). La combinaison du pas avec le nombre de pas détermine la dimension du revêtement. Pour les combinaisons de pas avec le nombre de pas donnant une valeur de 12 (3x4, 4x3 ou 6x2), il y a trois revêtements par plaque. Pour les combinaisons avec une valeur de 36 (3x12, 4x9 et 6x6), il y a seulement un revêtement qui recouvre la majeure partie de la plaque (voir la Figure 4.9). Les échantillons qui recouvrent toute la plaque ont été produits dans le but de pouvoir découper plusieurs sections de ce revêtement pour faire des essais avec les produits d'étanchéité.

Tableau 4.13 Paramètres de la routine de projection en Mach 1

Échantillon	Distance de projection (mm)	Nombre de passes		Pas (mm)	Nombre de pas
		Préchauffe	Revêtement		
NiCrM1-7	88,9	6	5	4	3
NiCrHPM1-3	88,9	6	5	4	3
	63,5	0	20	3	4
AlHPM1-25	63,5	6	30	3	3
NiCrHPM1-4	88,9	6	5	4	3
	63,5	0	30	3	4
NiCrHPM1-5	88,9	6	5	4	9
	63,5	0	27	3	12
Ni122M1-2	88,9	6	5	4	3
CRO174M1-13	76,2	6	30	6	2
N107C174M1-1	88,9	6	5	4	3
	76,2	0	40	6	2
CRO174M1-14	76,2	6	40	6	2

Tableau 4.14 Paramètres de projection en subsonique (cathode 1083A-720)

Échantillon	Poudre	Courant (ampères)	Puissance (kW)	Débit Ar (CFH)	Débit He (CFH)	Débit gaz transport poudre (CFH)	Débit poudre (g/min)
Ni122-1	Ni-122	800	24,48	104	43	10	39,6
CRO174-9	CRO-174	850	26,52	104	43	12	15
N122C174-1	Ni-122	800	25,6	104	43	10	39,6
	CRO-174	850	27,29	104	43	12	15

Tableau 4.15 Paramètres de la routine de projection en subsonique (cathode 1083A-720)

Échantillon	Distance de projection (mm)	Nombre de passes		Pas (mm)	Nombre de pas
		Préchauffe	Revêtement		
Ni122-1	88,9	6	5	4	3
CRO174-9	76,2	6	20	6	2
N122C174-1	88,9	6	5	4	9
	76,2	0	35	6	6

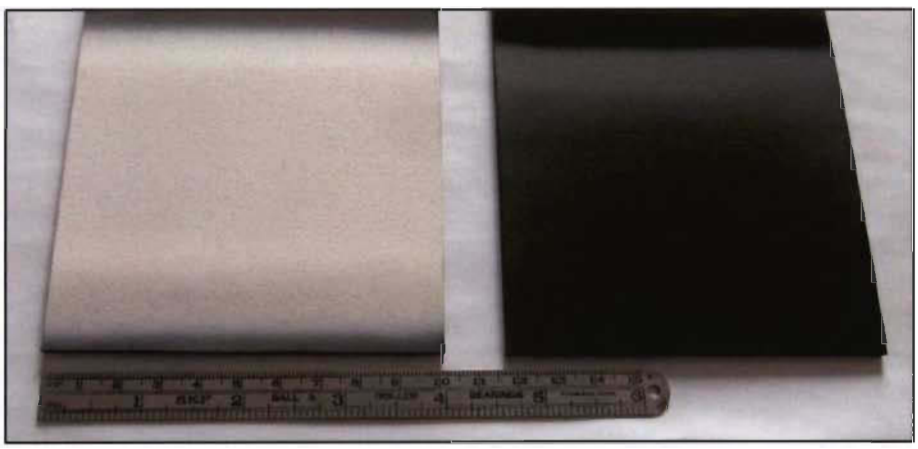
Rapport-Gratuit.com

Tableau 4.16 Paramètres de projection en subsonique (cathode 3083-129)

Échantillon	Poudre	Courant (ampères)	Puissance (kW)	Débit Ar (CFH)	Débit He (CFH)	Débit gaz transport poudre (CFH)	Débit poudre (g/min)
Ni122-2	Ni-122	800	26,4	82	44	10	39,6
CRO174-10	CRO-174	800	26,8	90	43	12	15
N122C174-2	Ni-122	800	26,64	82	44	10	39,6
	CRO-174	800	26,64	90	43	12	15

Tableau 4.17 Paramètres de la routine de projection en subsonique (cathode 3083-129)

Échantillon	Distance de projection (mm)	Nombre de passes		Pas (mm)	Nombre de pas
		Préchauffe	Revêtement		
Ni122-2	76,2	6	5	4	3
CRO174-10	76,2	6	20	6	2
N122C174-2	88,9	6	5	4	9
	76,2	0	35	6	6



Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Figure 4.9 Échantillons NiCrHPM1-5 (gauche) et N122C174-2 (droite)

Le Tableau 4.18 présente l'épaisseur du revêtement (mesure minimum de la métallographie arrondie au µm) ainsi que les résultats des essais de corrosion avec l'acide UGS. Pour les revêtements avec une seule poudre, l'efficacité de déposition a été calculée.

Tableau 4.18 Revêtements et résultats des tests de corrosion avec acide UGS

	Revêtement			Test de corrosion	
Échantillon	Poudre	Épaisseur (µm)	Efficacité déposition	Icorr (µa)	R (ohms)
Acier nu	N/A	N/A	N/A	10057	2,16
NiCrM1-7	Ni-107	92	0,44	15471	1,4
NiCrHPM1-3	Ni-107	117	N/A	209	104
	Al-1110-HP	320	N/A		
NiCrHPM1-4	Ni-107	104	N/A	90,7	239,8
	Al-1110-HP	634	N/A		
AlHPM1-25	Al-1110-HP	649	0,88	177,6	122,4
Ni122M1-2	Ni-122	92	0,61	1458	14,9
CRO174M1-13	CRO-174	137	0,3	82,7	263
N107C174M1-1	Ni-107	124	N/A	119,7	181,7
	CRO-174	208	N/A		
CRO174M1-14	CRO-174	200	0,3	107	203,2
Ni122-1	Ni-122	86	0,66	270,8	80,3
Ni122-2	Ni-122	85	0,51	1508	14,4
CRO174-9	CRO-174	151	0,45	283,7	76,5
CRO174-10	CRO-174	175	0,58	238,8	91
N122C174-1	Ni-122	154	N/A	39,9	544,4
	CRO-174	222	N/A		
N122C174-2	Ni-122	134	N/A	35,6	610,7
	CRO-174	300	N/A		

La combinaison de la poudre Ni-122 pour la couche d'adhésion avec la poudre CRO-174 donne le meilleur résultat pour le test de corrosion (544 et 610 Ω). Puisque les revêtements avec une couche d'adhésion possèdent une résistance relativement faible comparativement aux alliages de zirconium avec l'acide UGS (pour les alliages de Zr, la résistance est de l'ordre du MΩ), une étude d'optimisation des paramètres s'avère inutile. La suite de la recherche portera sur des produits d'étanchéité. Les métallographies des revêtements du Tableau 4.18 sont présentées à la Figure 4.10 ainsi qu'en annexe B de la Figure B.31 à la Figure B.43.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

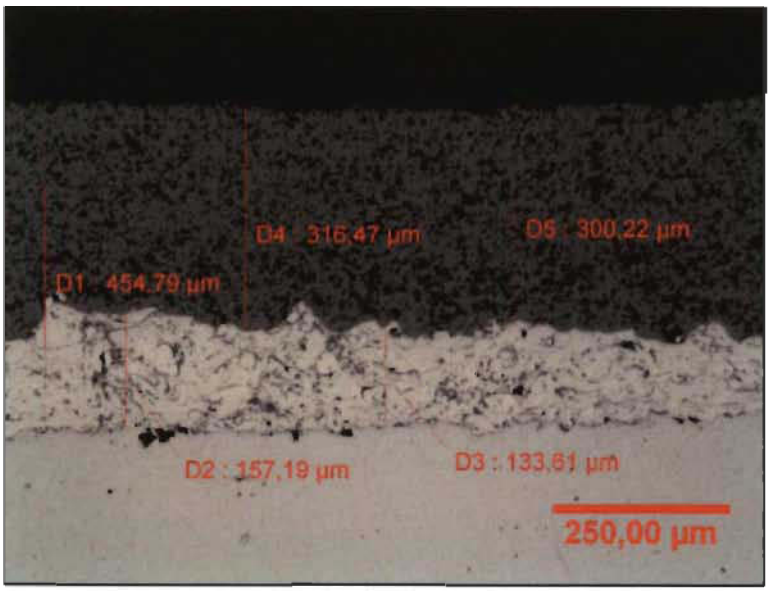


Figure 4.10 Métallographie échantillon N122C174-2

4.2.2 Utilisation d'autres produits d'étanchéité

Il existe quelques produits d'étanchéité commerciaux pour sceller les revêtements de projection thermique. Pour obtenir une bonne résistance à la corrosion dans l'acide du procédé UGS, il faut trouver un produit qui résiste à l'acide chlorhydrique 20%. La viscosité du produit a une incidence directe sur la pénétration de celui-ci dans le revêtement. Les produits qui possèdent une bonne résistance à l'acide chlorhydrique sont relativement visqueux et risquent d'avoir une faible profondeur de pénétration dans le revêtement (voir les fiches techniques de Master Bond en annexe C). Après discussion avec un représentant de l'assistance technique chez Master Bond, il a été convenu que les produits EP21ARHT et EP62-1 pourraient permettre de sceller les revêtements et augmenter sensiblement la résistance à la corrosion.

Les deux produits d'étanchéité ont été appliqués sur des échantillons pour vérifier s'il est possible d'améliorer la résistance à la corrosion. Les produits ont été appliqués sur un revêtement d'alumine (échantillon NiCrHPM1-5), un revêtement d'oxyde de chrome (échantillon N122C174-2) et sur une plaque d'acier pour une base de comparaison.

Tableau 4.19 Cuisson du produit d'étanchéité

Échantillon	Revêtement	Produit d'étanchéité	Cuisson
62-40 acier	N/A	EP62-1	40 minutes à 93°C
62-40 CR0174	N122C174-2		
62-40 AL1110HP	NiCrHPM1-5		
62-24-40 acier	N/A		24 heures à 24°C + 40 minutes à 93°C
62-24-40 CR0174	N122C174-2		
62-24-40 AL1110HP	NiCrHPM1-5		
21-160 acier	N/A	EP21ARHT	160 minutes à 93°C
21-160 CR0174	N122C174-2		
21-160 AL1110HP	NiCrHPM1-5		
21-24-160 acier	N/A		24 heures à 24°C + 160 minutes à 93°C
21-24-160 CR0174	N122C174-2		
21-24-160 AL1110HP	NiCrHPM1-5		

Suite à la cuisson, des métallographies ont été réalisées pour caractériser la pénétration du produit d'étanchéité dans le revêtement. Un colorant (fluorescent dye, une poudre jaune) a été ajouté à une partie du produit d'étanchéité pour mieux le distinguer lors de l'observation au microscope. Sur la Figure 4.13, il est possible de bien voir la partie avec le colorant (pour métallographie) de la partie sans colorant (pour les essais de corrosion).

Le produit EP62-1 est moins visqueux que l'EP21ARHT. Lors de la cuisson, le produit devient fluide et à tendance à s'étendre sur la plaque, surtout lorsque la cuisson est exécutée immédiatement après l'application (voir la Figure 4.11). Après la cuisson, le produit EP62-1 a une couleur orangée tandis que l'EP21ARHT est transparent. Dans tous les cas, les deux produits d'étanchéité n'ont pas pénétré dans les revêtements. La Figure 4.15 ainsi que la Figure 4.16 présentent le revêtement de l'échantillon NiCrHPM1-5 avec l'ajout du produit EP62-1. Ces deux images démontrent bien que le produit demeure à la surface du revêtement céramique (pas de pénétration du produit dans le revêtement).

Figure 4.11 Produit d'étanchéité EP62, 40 minutes à 93°C

Figure 4.12 Produit d'étanchéité EP62, 24 heures à 24°C + 40 minutes à 93°C

Figure 4.13 Produit d'étanchéité EP21ARHT, 160 minutes à 93°C

Figure 4.14 Produit d'étanchéité EP21ARHT, 24 heures à 24°C + 160 minutes à 93°C

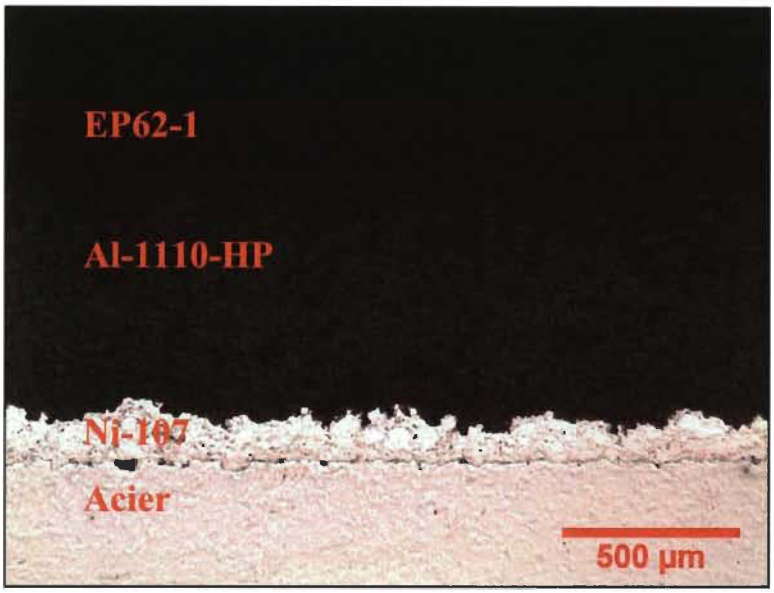


Figure 4.15 Métallographie échantillon 62-24-40 AL1110HP, vue d'ensemble

Figure 4.16 Métallographie échantillon 62-24-40 AL1110HP, zoom sur produit EP62-1

Puisque les deux produits d'étanchéité ne pénètrent pas dans un revêtement relativement dense, le produit EP21ARHT a été appliqué sur un échantillon avec un revêtement plus poreux (échantillon CRO192-2). Les essais de pénétration du produit d'étanchéité dans un revêtement poreux démontrent que le produit pénètre dans les pores à la surface, mais

ne se rend pas jusqu'au substrat en acier (voir la Figure 4.17). L'épaisseur du produit EP21ARHT varie beaucoup sur le revêtement poreux, elle passe de 78 µm à pratiquement rien dans la section gauche de la Figure 4.17.

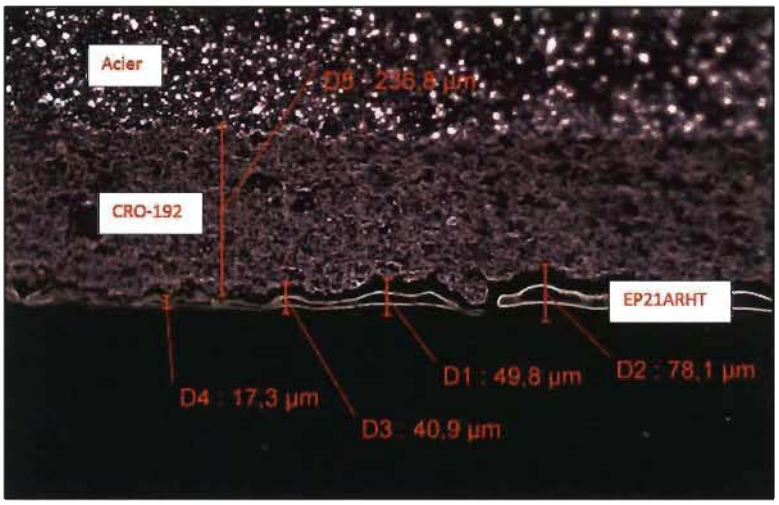


Figure 4.17 Métallographie EP21ARHT sur CRO192-2 (microscopie en champ sombre)

En utilisant la partie linéaire du test LPR, la résistance du revêtement CRO192-2 avec l'ajout du produit EP21ARHT est de 35,6 MΩ (Figure 4.18) comparativement à 15,43 Ω (Figure 4.21) pour le même revêtement sans le produit d'étanchéité. La résistance est donc $2x10^6$ fois plus élevée avec le produit d'étanchéité. Pour vérifier la pénétration du produit d'étanchéité, la surface de l'échantillon a été sablée une première fois pour enlever une partie du produit EP21ARHT (jusqu'à la surface des points supérieurs du revêtement de CRO192) et la résistance a diminué à environ 200 kΩ. Un deuxième sablage a été effectué pour aller plus en profondeur dans le revêtement de CRO192 et la résistance a diminué à 27 kΩ (voir le Tableau 4.20).

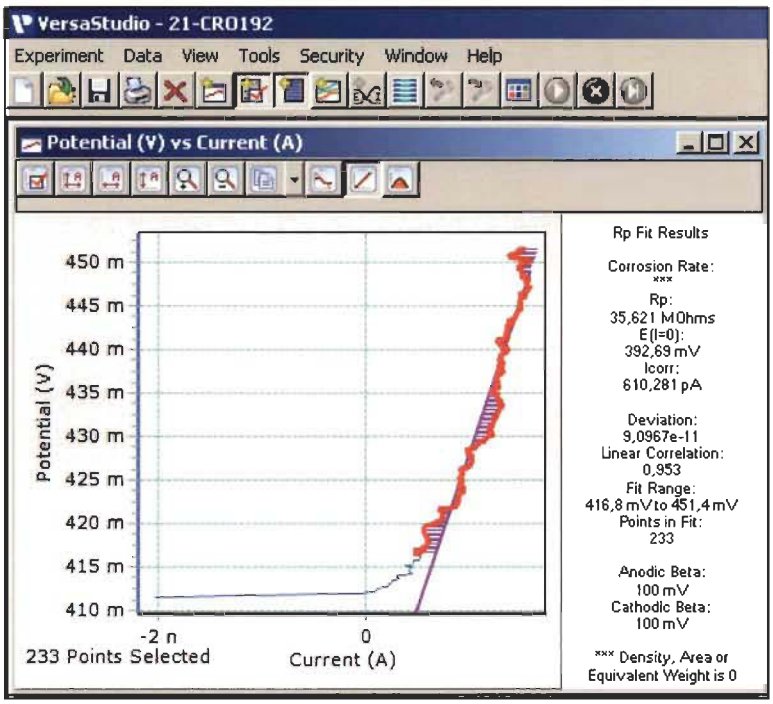


Figure 4.18 : Résultat du test de polarisation linéaire échantillon 21-CRO192-2

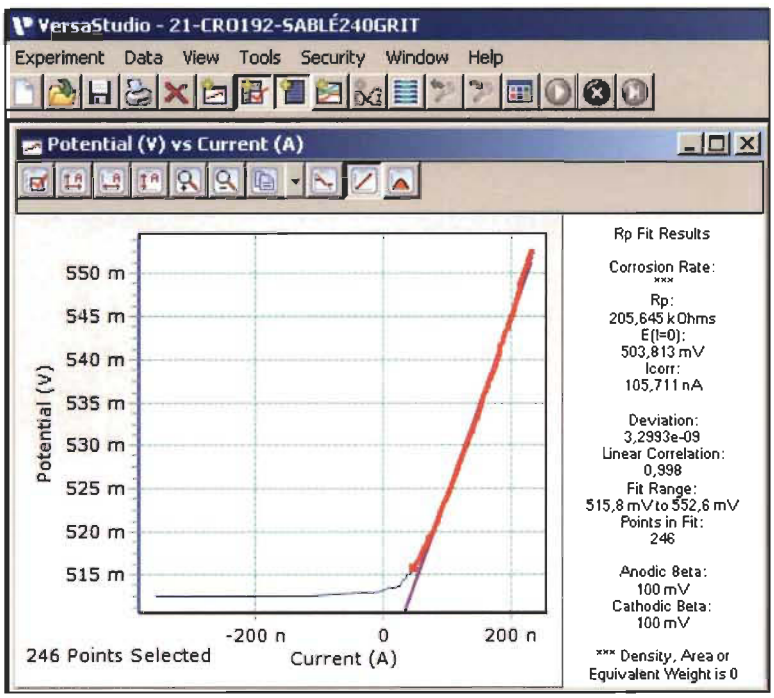


Figure 4.19 Résultat du test de polarisation linéaire échantillon 21-CRO192-2 (sablé 1x)

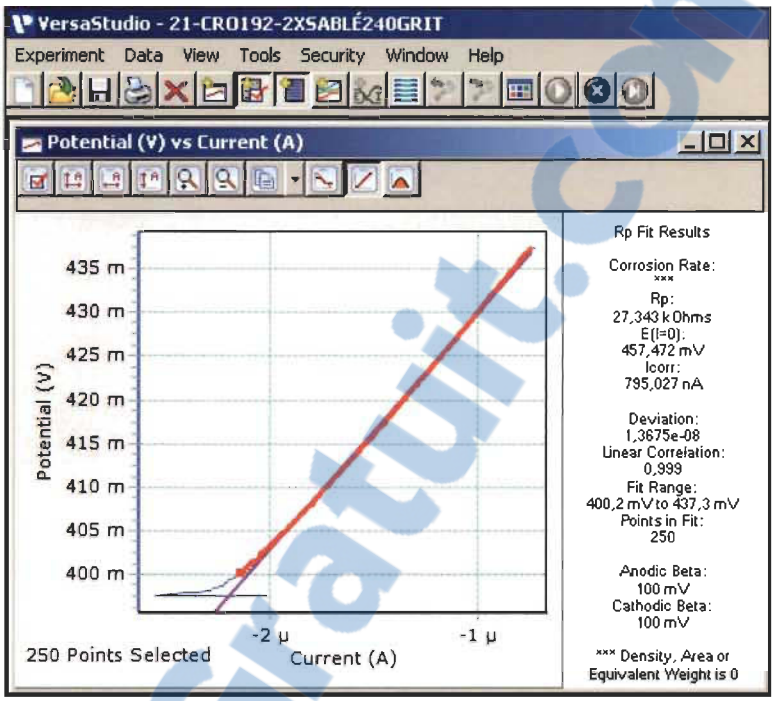


Figure 4.20 Résultat du test de polarisation linéaire échantillon 21-CRO192-2 (sablé 2x)

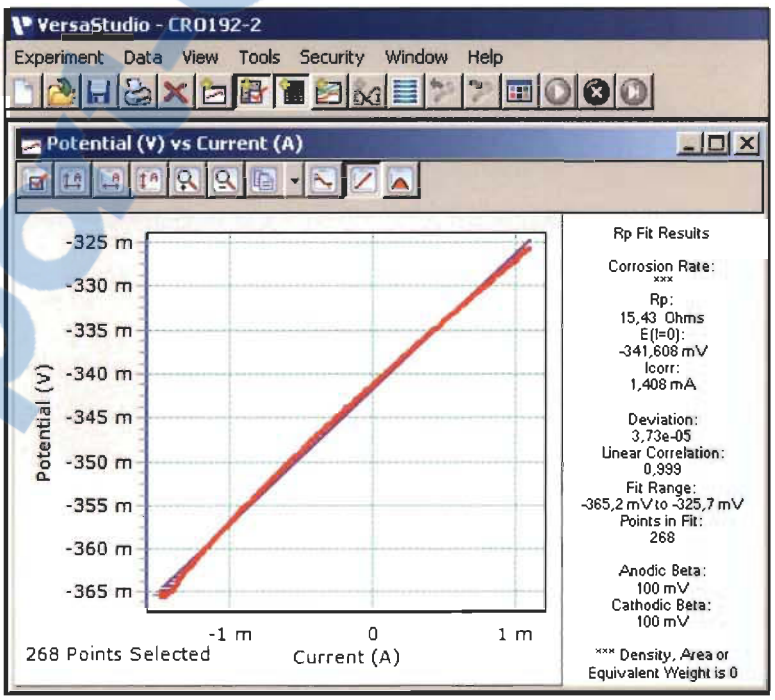


Figure 4.21 Résultat du test de polarisation linéaire échantillon 21-CRO192-2

Rapport-Gratuit.com

Les tests de corrosion donnent de très bons résultats avec le produit d'étanchéité EP21ARHT. Ce produit résiste tellement bien à l'acide UGS qu'il n'y a pas de réaction de corrosion. La Figure 4.22 présente le test de corrosion sur l'échantillon d'acier recouvert avec le produit d'étanchéité EP21ARHT. Pour la variation de tension de 530 à 570 mV, le courant oscille entre 313 et 325 pA (picoampères) sans tendance linéaire. Dans ce cas, il n'y a pas de réaction de corrosion et aucune conclusion ne peut être tirée du test LPR. Pour être en mesure de tirer une conclusion sur la résistance à la corrosion pour le produit EP21ARHT avec l'acide UGS, un test d'impédance serait nécessaire. Cependant, le CMQ ne possède pas ce module pour le moment et il est donc impossible de réaliser cet essai à l'interne.

Dans le cas de l'échantillon 21-CRO192-2 (Figure 4.17), le produit EP21ARHT n'a pas isolé totalement le revêtement poreux (variation de l'épaisseur du produit) et ceci explique le fait qu'il a été possible de mesurer la résistance du revêtement.

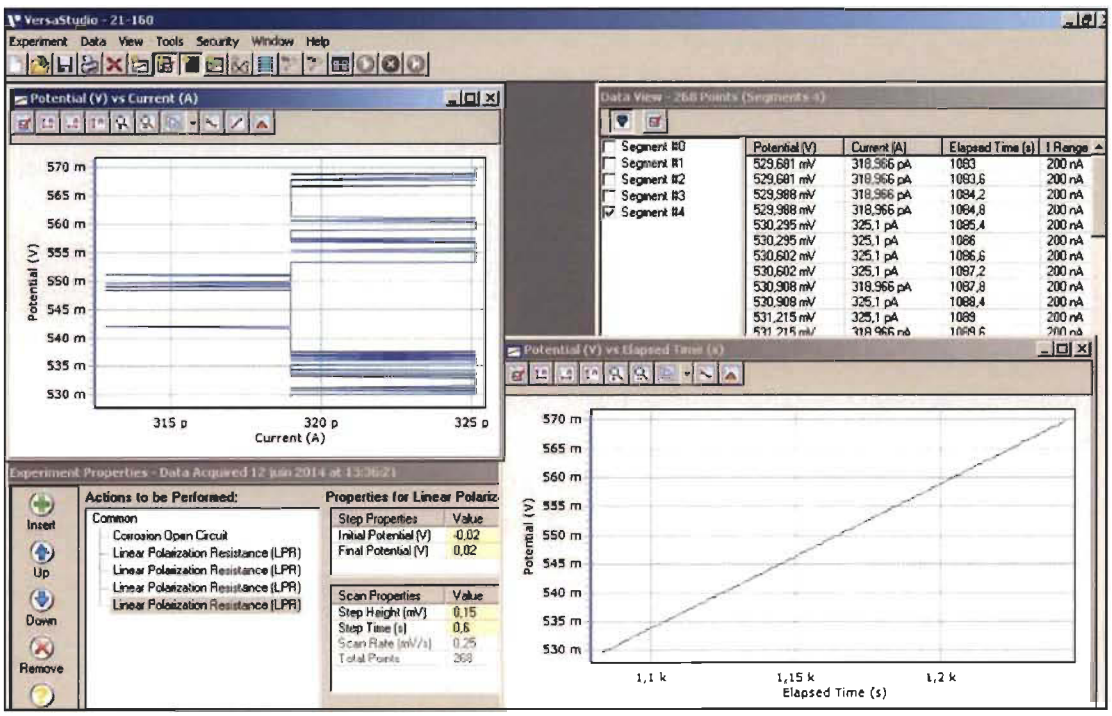


Figure 4.22 : Capture d'écran du test de corrosion sur échantillon 21-160-Acier

Tableau 4.20 Résultat des tests de corrosion avec les produits d'étanchéité

Échantillon	Produit	Potentiel circuit ouvert (mV)	Courant (pA)	Moyenne LPR	
				Icorr	Résistance
21-160-acier	EP21ARHT	550	320	N/A	N/A
21-160-AL1110HP	EP21ARHT	670	320	N/A	N/A
21-160-CRO174	EP21ARHT	682	200	N/A	N/A
62-40-acier	EP62-1	-152	2000	N/A	N/A
21-CRO192-2	EP21ARHT	431	N/A	610 pA	35,6 MΩ
21-CRO192-2 sablé (1x)	EP21ARHT	532	N/A	106 nA	205,6 kΩ
21-CRO192-2 sablé (2x)	EP21ARHT	418	N/A	795 nA	27,3 kΩ
CRO192-2	N/A	-345	N/A	1,4 mA	15,4 Ω

4.2.3 Synthèse des résultats des essais de corrosion

Les meilleurs résultats pour le test de corrosion avec l'acide UGS sur des revêtements par projection thermique sont de 544 et 610 Ω (poudre Ni-122 pour la couche d'adhésion et revêtement céramique avec la poudre CRO-174). Puisque ces revêtements possèdent une résistance relativement faible comparativement aux alliages de zirconium avec l'acide UGS (pour les alliages de Zr, la résistance est de l'ordre du MΩ), il s'avère inutile de faire une étude d'optimisation des paramètres de la projection thermique et il faut regarder du côté des produits d'étanchéité.

Les résultats des tests de corrosion démontrent que le produit d'étanchéité EP21ARHT a une très bonne résistance à l'acide du procédé UGS. Que le produit soit appliqué directement sur l'acier ou sur un revêtement céramique, il n'y a pas de différence, car ce dernier crée une barrière étanche à l'acide UGS. Il est à noter que le produit EP21ARHT est reconnu comme étant résistant à l'acide chlorhydrique 20 %.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Le produit EP62-1 répond un peu moins bien que le produit EP21ARHT à l'acide UGS et est reconnu pour résister à l'acide chlorhydrique 10 % et non 20 %. De plus, le produit EP62-1 est moins visqueux et devient très fluide lors de la cuisson, ce que rend son utilisation moins intéressante pour recouvrir une pièce cylindrique (tournant conique). Le produit EP21ARHT sera donc celui utilisé pour la suite des essais.

4.3 Élaboration de revêtements composites époxy avec poudre céramique

4.3.1 Tests de mélange

Puisque le produit EP21ARHT possède une bonne résistance à la corrosion avec l'acide UGS, il est possible de recouvrir un revêtement céramique avec ce produit. Cependant, ce produit ne pénètre pas dans le revêtement céramique et dans ce cas le revêtement par projection thermique devient donc superflu. Selon la fiche technique (voir l'annexe C), le produit EP21ARHT peut être utilisé autant comme produit d'étanchéité ou revêtement.

En utilisant le produit EP21ARHT comme revêtement, il est possible de créer un revêtement composite époxy avec poudre céramique. Des essais ont été réalisés sur des échantillons en acier sur lesquels de la poudre (CRO-174 et Al-1110-HP) a été ajoutée dans le mélange du produit d'étanchéité. La poudre représente 25% de la masse du mélange pour le premier cas et 60% du volume du mélange pour le deuxième cas. Avec la valeur de la masse volumique des deux parties du produit EP21ARHT et de celle de la poudre, il est possible de calculer la masse de poudre nécessaire pour que celle-ci représente 60% du volume (voir le Tableau 4.22 et le Tableau 4.23).

Tableau 4.21 : Mélange du produit d'étanchéité avec la poudre

Mélange	Partie A (g)	Partie B (g)	Poudre (g)
EP21ARHT + AL1110HP-25%m	0,2	0,1	0,1
EP21ARHT + CRO174-25%m	0,2	0,1	0,1
EP21ARHT + AL1110HP-60%v	0,2	0,1	0,54
EP21ARHT + CRO174-60%v	0,2	0,1	0,93

Tableau 4.22 Calcul de la masse de poudre Al-1110-HP pour 60 % volume

	Masse volumique (g/cm^3)	Masse (g)	Volume (cm^3)	% masse	% volume
EP21-A	1,22	0,20	0,16	0,24	0,26
EP21-B	1,08	0,10	0,09	0,12	0,14
AL-1110-HP	1,40	0,54	0,39	0,64	0,60
EP21+Al1110HP	1,31	0,84	0,64	1,00	1,00

Tableau 4.23 Calcul de la masse de poudre CRO-174 pour 60 % volume

	Masse volumique (g/cm^3)	Masse (g)	Volume (cm^3)	% masse	% volume
EP21-A	1,22	0,20	0,16	0,16	0,25
EP21-B	1,08	0,10	0,09	0,08	0,14
CRO174	2,40	0,93	0,39	0,76	0,60
EP21+CRO174	1,91	1,23	0,64	1,00	1,00

Les essais de corrosion démontrent que l'ajout de poudre au produit EP21ARHT n'influence pas la résistance du revêtement, car les résultats sont similaires à ceux du produit appliqué directement sur le substrat ou sur un revêtement (Figure 4.23, test LPR non concluant). Le fait de mélanger directement la poudre au produit d'étanchéité enlève l'étape de projection thermique, augmente l'épaisseur du revêtement composite époxy avec poudre céramique et devrait permettre d'augmenter la résistance à l'érosion comparativement au produit EP21ARHT utilisé seul.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Cependant, avec 60% en volume de poudre, le mélange devient très pâteux et difficile à appliquer sur le substrat. Dans le cas du 25% masse, le mélange est relativement fluide et lors de la cuisson, la poudre se retrouve surtout à la surface de plaque. La Figure 4.24 présente un mélange de 25% en masse de la poudre CRO-174 au produit EP21ARHT. Dans ce cas, 25% en masse représente 14% en volume. Il y a donc peu de poudre dans ce mélange et elle est surtout située près du substrat en acier.

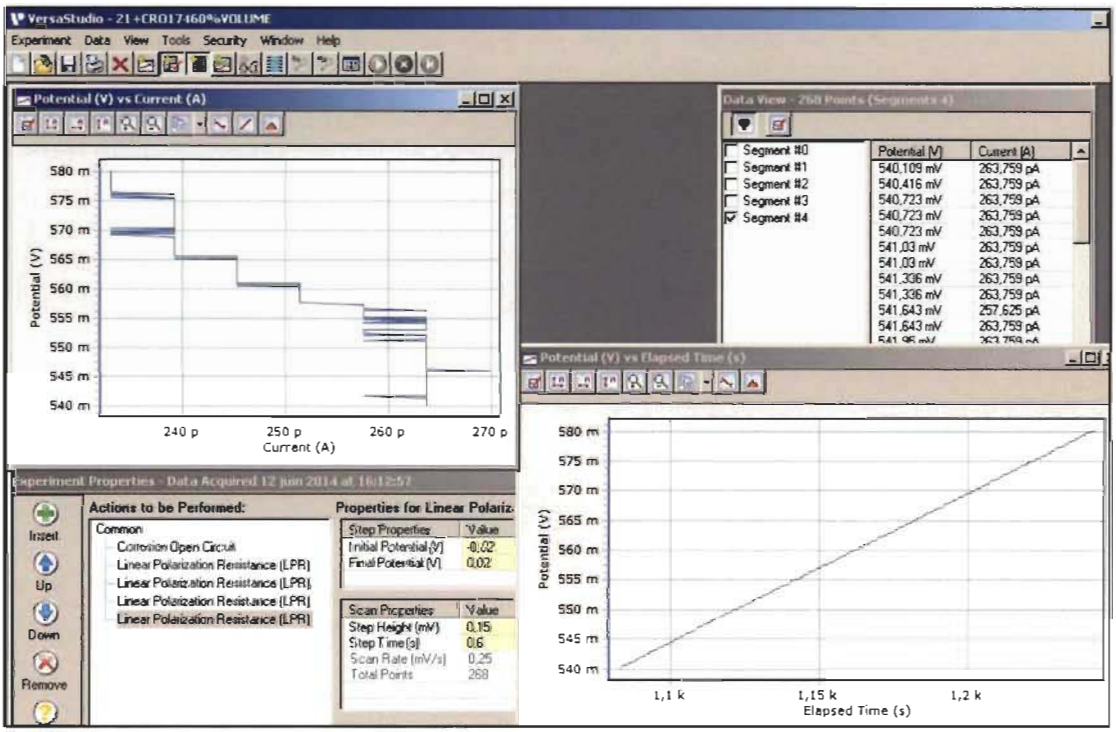


Figure 4.23 Capture d'écran test de corrosion sur échantillon 21+CRO174 60% volume

Tableau 4.24 : Résultats des tests de corrosion

Échantillon	Produit	Potentiel circuit ouvert (mV)	Courant (pA)	Moyenne LPR	
				Icorr	Résistance
21+AL1110HP 25%m	EP21ARHT	640	233	N/A	N/A
21+CRO174 25%m	EP21ARHT	414	227	N/A	N/A
21+AL1110HP 60%v	EP21ARHT	615	343	N/A	N/A
21+CRO174 60%v	EP21ARHT	542	264	N/A	N/A

La quantité maximale de poudre pouvant être ajoutée au produit EP21ARHT pour obtenir un mélange qui peut être appliqué avec un pinceau correspond à 45% en volume (voir la Figure 4.25 pour l'aspect du mélange avant l'application). Pour faciliter l'application, le mélange doit être chauffé à environ 35 °C. Avec 45 % en volume de poudre, le mélange est plus homogène et il y a de la poudre dans toute l'épaisseur du revêtement (Figure 4.28).

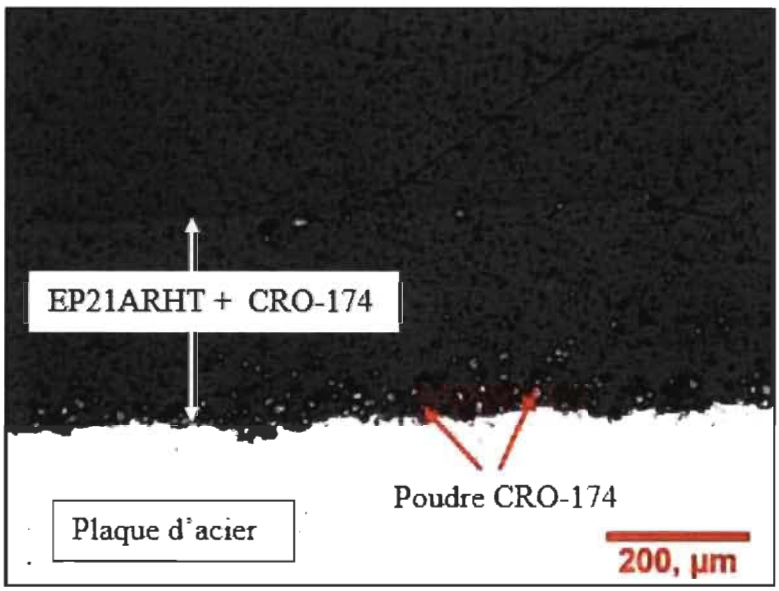


Figure 4.24 Métallographie EP21ARHT + 25 % masse de CRO-174

Figure 4.25 Mélange EP21ARHT avec 45% en volume de poudre CRO-174

4.3.2 Métallographies

Pour la caractérisation métallographique, le produit d'étanchéité seul ainsi que les deux mélanges avec 45% en volume de poudre ont été appliqués sur une plaque en acier qui a été grenaillée. L'épaisseur moyenne du produit EP21ARHT est de 60 µm (Figure 4.26) et passe à environ 200 µm (Figure 4.27 et Figure 4.28) avec l'ajout de 45% en volume de poudre.

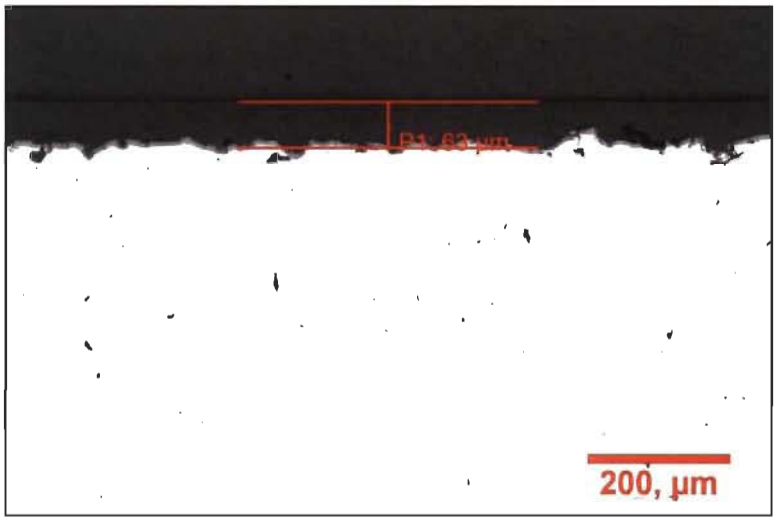


Figure 4.26 Métallographie du produit d'étanchéité EP21ARHT sur acier

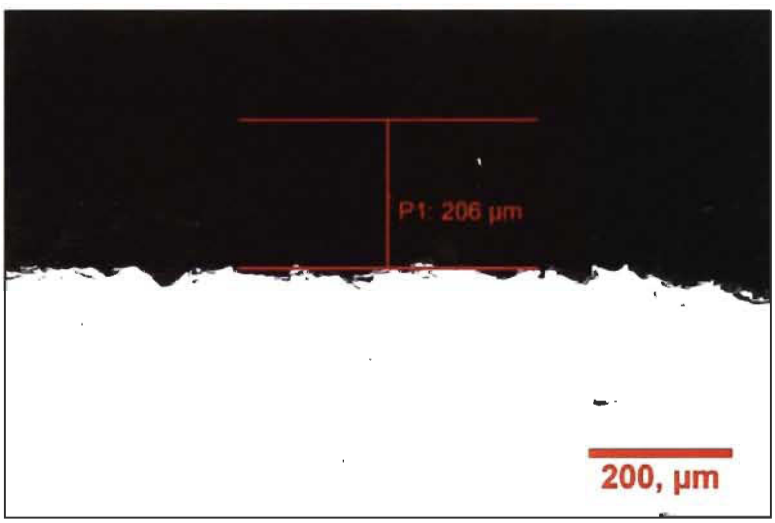


Figure 4.27 Métallographie EP21ARHT + 45% volume AL1110HP

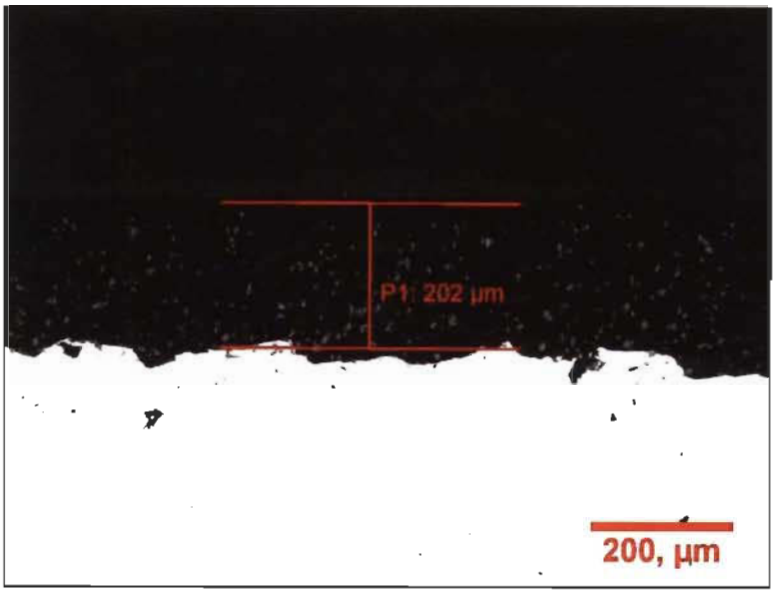


Figure 4.28 Métallographie EP21ARHT + 45% volume CRO174

4.3.3 Vérification de l'adhésion

Il reste à voir si l'ajout de poudre diminue l'adhésion du produit d'étanchéité (résistance en traction). Pour faire cette vérification, le mélange a été appliqué entre deux pions en acier pour faire des assemblages pour le test de traction. Pour la cuisson du produit, la procédure utilisée correspond à une température de 93°C pendant 3 heures avec une charge de 300 grammes (voir la Figure 4.29 pour le gabarit pour la cuisson). Pour les essais de traction, il y a trois assemblages avec seulement le produit d'étanchéité EP21ARHT, quatre avec le produit EP21ARHT + 45% volume de poudre Al-1110-HP et quatre assemblages avec le produit EP21ARHT + 45% volume de poudre CRO-174. Le Tableau 4.25 présente le mélange utilisé pour faire deux échantillons.

Tableau 4.25 : Mélange du produit d'étanchéité avec la poudre pour les essais de traction

Mélange	Partie A (g)	Partie B (g)	Poudre (g)
EP21 + AL1110HP-45%v	0,3	0,15	0,44
EP21 + CRO174-45%v	0,3	0,15	0,76

Tableau 4.26 Calcul de la masse des deux types de poudre pour 45 % volume

	Masse volumique (g/cm^3)	Masse (g)	Volume (cm^3)	% masse	% volume
EP21-A	1,22	0,30	0,16	0,16	0,35
EP21-B	1,08	0,15	0,09	0,08	0,20
Al-1110-HP	1,40	0,44	0,31	0,49	0,45
CRO174	2,40	0,76	0,32	0,63	0,45

Avant de faire l'essai de traction, l'excès du mélange qui déborde sur les pions doit être enlevé par sablage. Les résultats de traction démontrent que l'ajout des deux types de poudre ne diminue pas la résistance en traction (voir le Tableau 4.27). Pour les trois cas, la moyenne est très similaire. Les faciès de rupture des échantillons démontrent que le mélange de la poudre avec le produit d'étanchéité est relativement homogène (voir la Figure 4.30).

Figure 4.29 : Montage des échantillons de traction pour la cuisson

Tableau 4.27 : Résistance à la traction en MPa

	EP21ARHT	EP21ARHT + 45%V Al-1110-HP	EP21ARHT + 45%V CRO-174
1	38,26	37,82	41,11
2	38,38	38,57	39,49
3	39,73	39,23	40,59
4	N/A	38,05	40,29
Moyenne	**38,79**	**38,42**	**40,37**
Écart-type	**0,82**	**0,63**	**0,67**

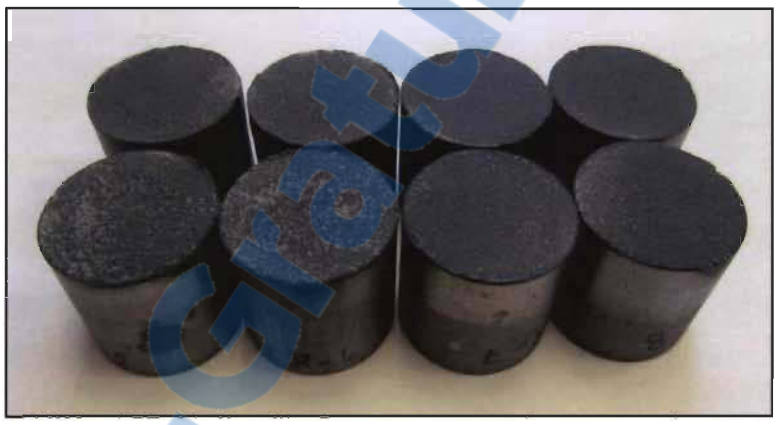


Figure 4.30 Faciès de rupture des échantillons avec 45% volume de poudre CRO-174

4.3.4 Échantillons pour test dans le système chez Rio Tinto Fer et Titane

Trois échantillons en acier de 2 pouces de diamètre par 1,5 pouce de hauteur ont été recouverts avec le produit d'étanchéité EP21ARHT seul ainsi que les deux mélanges avec 45% volume de poudre. Sur la Figure 4.31, l'échantillon de gauche est recouvert avec le produit d'étanchéité EP21ARHT seul, celui du centre contient 45 % volume de poudre AL1110HP tandis que celui de droite contient 45% volume de poudre CRO174. Au moment d'écrire ce document, les échantillons sont dans les filtres du procédé UGS dans le système chez Rio Tinto Fer et Titane pour voir s'ils résistent bien à la corrosion dans l'acide UGS à 160 °C. La masse pour les trois échantillons de la Figure 4.31 est, de gauche à droite, 587,3g, 588,4g et 589,1g. Lorsque les échantillons seront retirés du système, l'aspect visuel et la perte de masse seront les indicateurs de la résistance à la corrosion.

Rapport-Gratuit.com

Figure 4.31 Échantillons pour test dans le système chez Rio Tinto Fer et Titane

4.3.5 Synthèse des résultats des mélanges

Les essais de corrosion démontrent que l'ajout de poudre au produit EP21ARHT n'influence pas la résistance du revêtement, car les résultats sont similaires à ceux du produit appliqué directement sur le substrat ou sur un revêtement, c'est-à-dire un test LPR non concluant. Le fait de mélanger directement la poudre au produit d'étanchéité enlève l'étape de projection thermique, augmente l'épaisseur du revêtement composite époxy avec poudre céramique (200 μm au lieu de 60 μm) et devrait permettre d'augmenter la résistance à l'érosion comparativement au produit EP21ARHT utilisé seul.

La quantité maximale de poudre pouvant être ajoutée au produit EP21ARHT pour obtenir un mélange qui peut être appliqué avec un pinceau correspond à 45% en volume. Pour faciliter l'application, le mélange doit être chauffé à environ 35 °C. Avec 45 % en volume de poudre, le mélange est plus homogène et il y a de la poudre dans toute l'épaisseur du revêtement.

Les résultats de traction démontrent que l'ajout des deux types de poudre ne diminue pas la résistance en traction et que les valeurs sont très similaires (Figure 4.32).

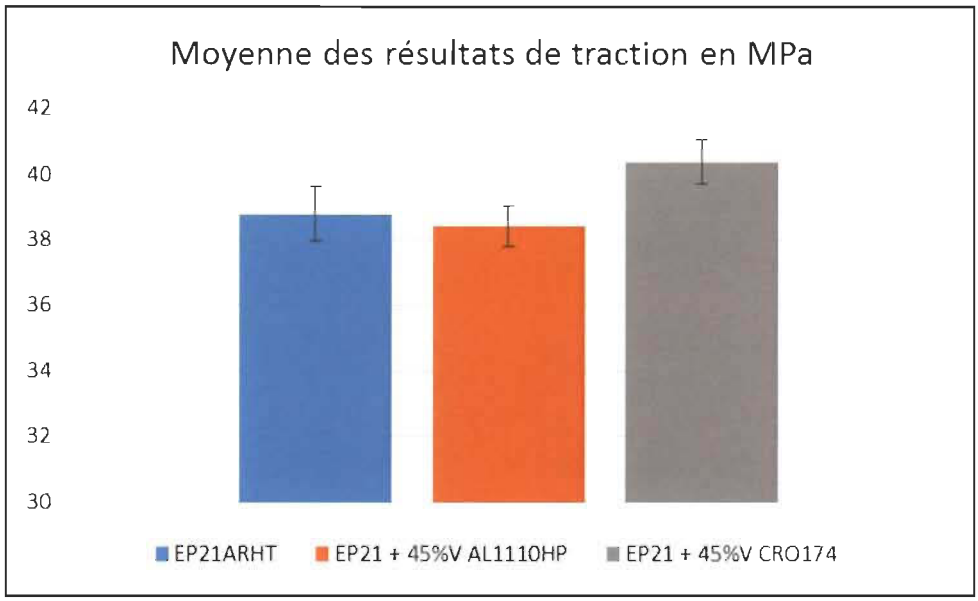


Figure 4.32 Graphique de la moyenne des résultats de traction en MPa

4.4 Revêtements sur tournants coniques

4.4.1 Protocole d'application

Les deux revêtements époxy avec poudre céramique contenant 45 % en volume de poudre ont été appliqués sur des tournants coniques en acier inoxydable. Les tournants coniques utilisés pour appliquer le revêtement sont les mêmes que ceux qui sont utilisés chez Rio Tinto Fer et Titane. En appliquant un revêtement époxy avec poudre céramique d'environ 200 µm, il sera possible de polir la surface du revêtement pour obtenir le fini de surface adéquat et ainsi éviter des fuites de la valve. L'épaisseur finale nécessaire du composite époxy avec poudre céramique est de 127 µm après polissage. Cette épaisseur apporte une bonne protection contre la corrosion et retardera l'usure, donc le temps avant que l'acide UGS ne puisse atteindre le substrat.

Avant d'appliquer le revêtement composite, la première étape consiste à faire un grenaillage des surfaces à recourir. Suite au grenaillage, les tournants coniques subissent un nettoyage de 15 minutes par ultrasons dans un bain d'alcool éthylique dénaturé (Figure

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

4.33). Par la suite, les pièces doivent être séchées et manipulées avec des gants propres pour éviter de les contaminer.

Figure 4.33 Tournants coniques dans le bain de nettoyage par ultrasons

Afin de valider la méthode d'application du revêtement époxy avec poudre céramique en utilisant un pinceau, un essai a été réalisé sur un tournant conique pour vérifier par métallographie l'épaisseur du revêtement. La Figure 4.34 présente le tournant conique pour validation possédant un revêtement composite époxy avec la poudre CRO-174.

Figure 4.34 Revêtement sur tournant conique pour métallographie

Les métallographies (Figure 4.35 à Figure 4.37) démontrent que l'épaisseur du revêtement est relativement uniforme sur la surface extérieure ainsi que sur la surface intérieure, mais elle est très mince dans le rayon qui fait le lien entre ces deux surfaces. Il faut noter que la cuisson (93 °C pendant 3 heures) a été réalisée suite à l'application du mélange. Pour éviter ce problème lors de l'application du mélange sur les tournants coniques pour les essais dans les valves chez Rio Tinto Fet et Titane, une attention particulière sera portée lors de l'application du mélange dans cette zone et la cuisson se fera en deux étapes (24 heures à la température ambiante et par la suite 93 °C pendant 3 heures).

Le fait de laisser durcir le mélange pendant 24 heures avant de faire la cuisson à 93 °C (procédure de cuisson optimale selon le fournisseur, voir la fiche technique) permet de diminuer le risque que le produit devienne fluide et qu'il s'écoule à l'extérieur des rayons.

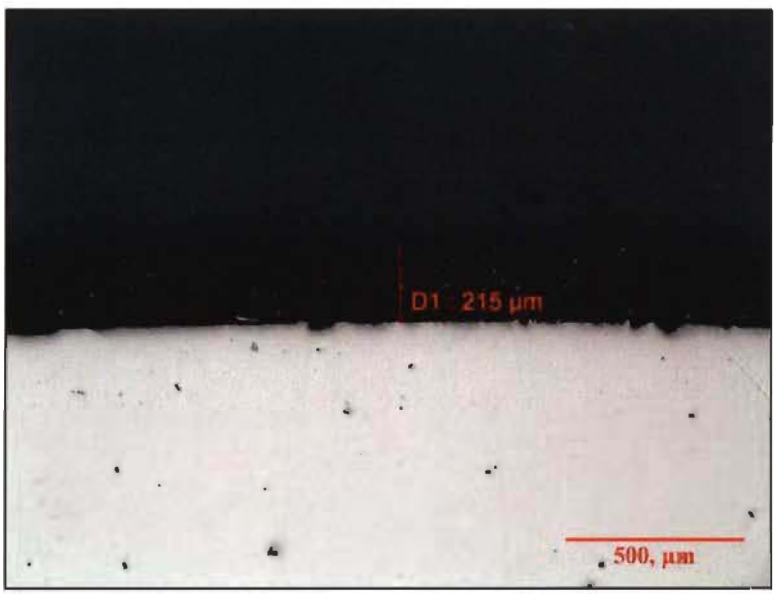


Figure 4.35 Épaisseur du revêtement sur la surface extérieure du tournant conique

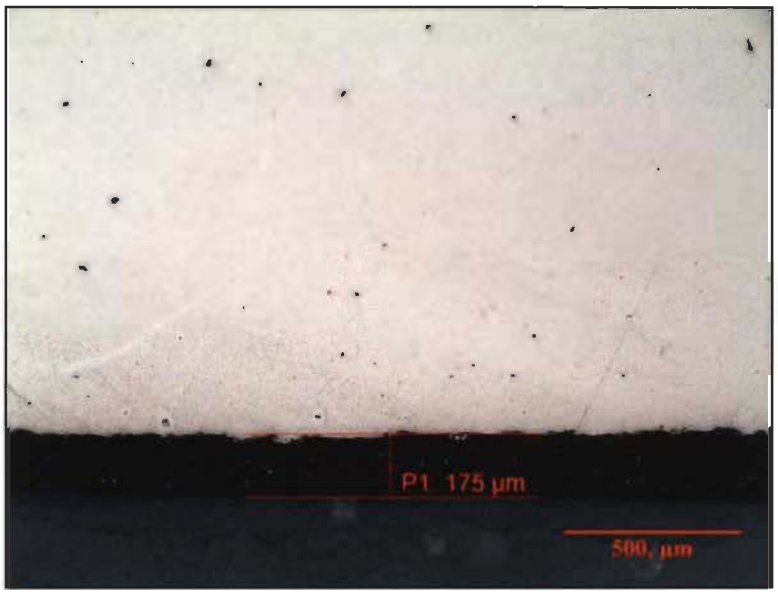


Figure 4.36 Épaisseur du revêtement sur la surface intérieure du tournant conique

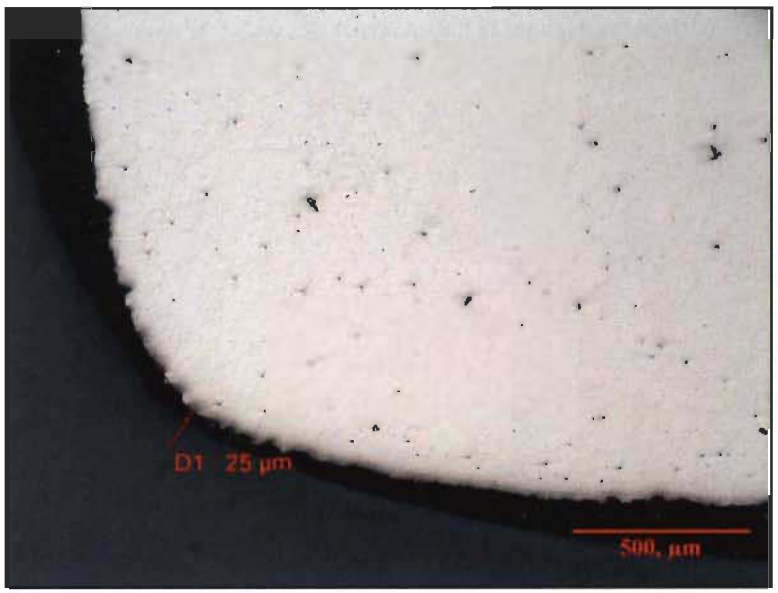


Figure 4.37 Épaisseur du revêtement sur le rayon entre l'extérieur et l'intérieur

En considérant une épaisseur de revêtement époxy avec poudre céramique de 200 µm et la surface de 332 cm^2 à recouvrir[16] (voir la Figure 1.2), le volume de mélange nécessaire pour un tournant conique est de 6,64 cm^3. En utilisant un facteur de 1,4 pour la variation sur l'épaisseur et la perte, le volume nécessaire de mélange pour couvrir trois tournants coniques est d'environ 28 cm^3. Le Tableau 4.28 et le
Tableau 4.29 présentent le calcul pour obtenir 28 cm^3 de mélange avec 45 % en volume de poudre pour les deux poudres.

Tableau 4.28 Calcul de la masse de poudre Al-1110-HP pour 3 tournants coniques

	Masse volumique (g/cm^3)	Masse (g)	Volume (cm^3)	% masse	% volume
EP21-A	1,22	12,00	9,84	0,34	0,35
EP21-B	1,08	6,00	5,56	0,17	0,20
AL-1110-HP	1,40	17,64	12,60	0,49	0,45
EP21+Al1110HP	1,27	35,64	27,99	1,00	1,00

Tableau 4.29 Calcul de la masse de poudre CRO-174 pour 3 tournants coniques

	Masse volumique (g/cm^3)	Masse (g)	Volume (cm^3)	% masse	% volume
EP21-A	1,22	12,00	9,84	0,25	0,35
EP21-B	1,08	6,00	5,56	0,12	0,20
CRO174	2,40	30,24	12,60	0,63	0,45
EP21+CRO174	1,72	48,24	27,99	1,00	1,00

Pour la cuisson (24 heures à la température ambiante et par la suite 93 °C pendant 3 heures), les tournants coniques ont été placés sur un support (Figure 4.38). Le revêtement noir est celui avec la poudre CRO-174 et le blanc avec la poudre Al-1110-HP.

[16] La surface a été calculée avec le logiciel SolidWorks à partir du dessin du tournant conique.

Figure 4.38 Tournants coniques sur support pour la cuisson (après cuisson)

4.4.2 Analyse économique

Le coût en matériel pour recouvrir le modèle de tournant conique choisi par les deux partenaires du projet est fonction de la quantité du produit EP21ARHT et de la poudre. Le CMQ a déboursé 900$ pour l'achat de 355 cm^3 de produit EP21ARHT. Le format de 0,5 pinte donne 0,75 pinte de mélange, car le ratio est 2 :1 (voir la Figure 4.39).

Pour recouvrir trois tournants coniques, la quantité du produit EP21ARHT nécessaire est de 15,4 cm3 (9,84 cm3 pour la partie A et 5,56 cm3 pour la partie B). Le coût pour le produit EP21ARHT est de 39,04$ (15,4/355*900=39,04). Pour les deux poudres, le coût est de 0,77 $ dans le cas de la poudre Al-1110-HP et de 1,43$ pour la CRO-174. Le coût en matériel pour recouvrir un tournant conique avec un revêtement époxy avec poudre céramique est de 13,27$ avec la poudre Al-1110-HP et de 13,49$ avec la poudre CRO-174.

http://www.masterbond.com/packaging/common-mixing-ratios-two-part-systems-

Understanding Mixing R

Common Mixing Ratios for Two Part Systems by Volume

One to One (1:1)

Part A= 100%
Part B= 100%
If you were ordering a pint kit, this means you would be receiving one full pint of Part A and one full pint of Part B. After mixing Part A and Part B together, you will have 2 full pints of material.

Master Bond offers a variety of two part systems with different mixing ratios.

Sizing options featuring a 1:1 mix ratio:

½ Pint Kit = 1 pint of material
Pint Kit= 2 pints of material
Quart Kit= 2 quarts of material
Gallon Kit= 2 gallons of material
5 Gallon Kit= 10 gallons of material

Two to One (2:1)

Part A= 100%
Part B= 50%
If you were ordering a pint kit, this means you would be receiving one full pint of Part A and half a pint of Part B. After mixing Part A and Part B together, you will have 1.5 pints of material.

Sizing options featuring a 2:1 mix ratio:

½ Pint Kit = 0.75 pint of material
Pint Kit= 1.5 pints of material
Quart Kit= 1.5 quarts of material
Gallon Kit= 1.5 gallons of material
5 Gallon Kit= 7.5 gallons of material

Figure 4.39 Quantité de produit en fonction du ratio et du format

Tableau 4.30 Coût pour recouvrir 3 tournants coniques (EP21ARHT+Al-1110-HP)

	Masse (g)	Volume (cm^3)	Prix	Coût ($)
EP21-A	12,00	9,84	900 $ pour 355 cm^3	N/A
EP21-B	6,00	5,56		N/A
Mélange EP21		15,4		39,04
AL-1110-HP	17,64	12,60	43,67$ /kg	0,77
EP21+Al1110HP				39,81

Tableau 4.31 Coût pour recouvrir 3 tournants coniques (EP21ARHT+CRO-174)

	Masse (g)	Volume (cm^3)	Prix	Coût ($)
EP21-A	12,00	9,84	900 $ pour 355 cm^3	N/A
EP21-B	6,00	5,56		N/A
Mélange EP21		15,4		39,04
CRO-174	30,24	12,60	47,30$ /kg	1,43
EP21+CRO-174				40,47

La fabrication de tournants coniques en alliage de zirconium représente un coût relativement élevé comparativement à ceux en acier inoxydable. Puisque le zirconium réagit fortement avec l'oxygène à haute température, la fusion de cet alliage doit se faire dans un four sous vide comme dans le cas des alliages de titane. De plus, un traitement de pressage isostatique à chaud doit être fait suite à la coulée pour faire migrer les défauts internes vers la surface et les cavités sont réparées par soudage. Selon monsieur Gheorghe Marin, directeur du CMQ, le coût de fabrication de pièce en alliage de zirconium peut s'élever à environ 200$/lb comparativement à environ 10$/lb pour la même pièce en acier inoxydable.

Pour les tournants coniques utilisés lors de ce projet, la masse est de 2,2 kg (4,9 lb) pour ceux en acier inoxydable 316 et de 1,8 kg (4 lb) pour ceux en alliage de zirconium. Il y a donc une différence significative concernant le coût de fabrication d'un tournant conique en acier inoxydable comparativement à un autre en alliage de zirconium. L'ajout d'un revêtement époxy avec poudre céramique sur un tournant conique en acier inoxydable s'avère être une solution à faible coût comparativement à l'utilisation d'un alliage de zirconium. La durée de vie des deux types de tournant conique permettra de déterminer la solution la plus économique.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

CHAPITRE 5 - CONCLUSION

L'objectif de ce travail était d'étudier la possibilité d'utiliser la projection thermique pour une application de résistance à la corrosion et de trouver une solution au problème de corrosion des tournants coniques dans le procédé UGS chez Rio Tinto Fer et Titane.

Les résultats des essais préliminaires ont démontré que parmi les quatre poudres utilisées, la poudre Al-1110-HP possède les revêtements les plus denses ainsi que la plus grande efficacité de déposition. Les revêtements avec la poudre CRO-174 présentent des fissures transversales tandis que les revêtements avec les poudres ALO-159 et CRO-192 sont plus poreux. En fonction de l'analyse métallographique et de l'efficacité de déposition, la poudre Al-1110-HP s'avère être la plus prometteuse pour une application de résistance à la corrosion.

Les résultats des essais de corrosion ont démontré que les revêtements par projection thermique possèdent une résistance relativement faible comparativement aux alliages de zirconium. Les meilleurs résultats pour le test de corrosion avec l'acide du procédé UGS sur des revêtements par projection thermique sont de 544 et 610 Ω tandis que pour les alliages de zirconium, la résistance est de l'ordre du MΩ. Puisque la résistance à la corrosion des revêtements par projection thermique était plutôt faible, une optimisation des paramètres de la projection thermique s'avérait inutile et la suite de l'étude a porté sur l'utilisation de produits d'étanchéité.

Les résultats des tests de corrosion avec le produit d'étanchéité EP21ARHT ont présenté une très bonne résistance à l'acide du procédé UGS. Que le produit soit appliqué directement sur le substrat ou sur un revêtement céramique, il n'y a pas de différence, car ce dernier crée une barrière étanche à l'acide UGS. Cependant, ce produit ne pénètre pas dans les revêtements de projection thermique, car sa viscosité est trop grande.

Rapport-Gratuit.com

L'élaboration d'un revêtement composite époxy avec poudre céramique possède une bonne résistance à la corrosion. Les essais de corrosion démontrent que l'ajout de poudre au produit EP21ARHT n'influence pas la résistance à la corrosion du revêtement, car les résultats sont similaires à ceux du produit appliqué directement sur le substrat ou sur un revêtement produit par projection thermique. Le fait de mélanger directement la poudre au produit d'étanchéité enlève l'étape de projection thermique, augmente l'épaisseur du revêtement (200 μm au lieu de 60 μm) et devrait permettre d'augmenter la résistance à l'érosion comparativement au produit EP21ARHT utilisé seul.

La quantité maximale de poudre pouvant être ajoutée au produit EP21ARHT pour obtenir un mélange qui peut être appliqué avec un pinceau correspond à 45% en volume. Avec 45 % en volume de poudre, le mélange est homogène après la cuisson et il y a de la poudre dans toute l'épaisseur du revêtement. Les tests d'adhésions démontrent que l'ajout de poudre ne diminue pas la résistance en traction.

Trois échantillons en acier de 2 pouces de diamètre par 1,5 pouce de hauteur ont été recouverts avec le produit d'étanchéité EP21ARHT seul ainsi que les deux mélanges avec 45% volume de poudre. Au moment d'écrire ce document, les échantillons sont dans les filtres du procédé UGS au niveau des échangeurs de chaleur dans le système chez Rio Tinto Fer et Titane pour voir s'ils résistent bien à la corrosion dans l'acide UGS à 160 °C. Les conditions de ce test sont plus sévères que les conditions d'utilisation d'un tournant conique, car les échantillons sont libres dans les filtres et peuvent bouger et subir des chocs.

Les deux revêtements époxy avec poudre céramique (Al-1110-HP et CRO-174) contenant 45 % en volume de poudre ont été appliqués sur des tournants coniques en acier inoxydable. Les tournants coniques utilisés pour appliquer le revêtement sont les mêmes que ceux qui sont utilisés chez Rio Tinto Fer et Titane. En appliquant un revêtement époxy

avec poudre céramique d'environ 200 µm, il est possible de polir la surface du revêtement pour obtenir le fini de surface adéquat. L'épaisseur finale nécessaire du composite époxy avec poudre céramique est de 127 µm après polissage.

L'introduction de ces tournants coniques dans les robinets chez Rio Tinto Fer et Titane permettra de comparer la durée de vie de ceux-ci par rapport aux tournants coniques utilisés actuellement (acier inoxydable 316 sans revêtement) et aux tournants coniques en alliage de zirconium développé par le CMQ.

Si le revêtement composite époxy avec poudre céramique s'avère être le choix le plus économique, une nouvelle voie de recherche serait de travailler sur une méthode permettant d'optimiser la fabrication du mélange et l'application de celui-ci. Lorsque les parties A et B du produit EP21ARHT sont mélangées avec la poudre, le délai maximum pour appliquer tout le mélange sur les tournants coniques est d'environ 30 minutes. De plus, l'application du mélange avec un pinceau peut provoquer la présence de petites bulles d'air dans le revêtement et des retouches doivent être faites après la cuisson pour éliminer celles-ci avant le polissage final. Une avenue intéressante serait d'utiliser une enceinte sous vide pour permettre le dégazage lors de la première étape de la cuisson à température ambiante pendant 24 heures.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

RÉFÉRENCES

[1] J. R. Davis, *Handbook of thermal spray technology*. Materials Park, Ohio: ASM International, 2004.

[2] D. Yan, J. He, X. Li, Y. Dong, Y. Liu, et J. Zhang, « Corrosion behavior in boiling dilute HCl solution of different ceramic coatings fabricated by plasma spraying », *J. Therm. Spray Technol.*, vol. 13, nº 4, p. 503-507, 2004.

[3] A. S. Khanna, S. Kumari, S. Kanungo, et A. Gasser, « Hard coatings based on thermal spray and laser cladding », *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.*, vol. 27, nº 2, p. 485-491, 2009.

[4] E. Çelik, I. A. Şengil, et E. Avci, « Effects of some parameters on corrosion behaviour of plasma-sprayed coatings », *Surf. Coat. Technol.*, vol. 97, nº 1-3, p. 355-360, 1997.

[5] H.-J. Kim, C.-H. Lee, et Y.-G. Kweon, « The effects of sealing on the mechanical properties of the plasma-sprayed alumina-titania coating », *Surf. Coat. Technol.*, vol. 139, nº 1, p. 75-80, 2001.

[6] E. M. Leivo, M. S. Vippola, P. P. A. Sorsa, P. M. J. Vuoristo, et T. A. Mäntylä, « Wear and corrosion properties of plasma sprayed Al2O3 and Cr2O3 coatings sealed by aluminum phosphates », *J. Therm. Spray Technol.*, vol. 6, nº 2, p. 205-210, 1997.

[7] S. Liscano, L. Gil, et M. H. Staia, « Effect of sealing treatment on the corrosion resistance of thermal-sprayed ceramic coatings », *Surf. Coat. Technol.*, vol. 188-189, nº 1-3 SPEC.ISS., p. 135-139, 2004.

[8] Z. Liu, Z. Chu, Y. Dong, Y. Yang, X. Chen, X. Kong, et D. Yan, « The effect of metallic bonding layer on the corrosion behavior of plasma sprayed Al2O3 ceramic coatings in simulated seawater », *Vacuum*, vol. 101, p. 6-9, 2014.

[9] Z. Liu, Y. Dong, Z. Chu, Y. Yang, Y. Li, et D. Yan, « Corrosion behavior of plasma sprayed ceramic and metallic coatings on carbon steel in simulated seawater », *Mater. Des.*, vol. 52, p. 630-637, 2013.

[10] F. Azarmi, T. W. Coyle, et J. Mostaghimi, « Optimization of atmospheric plasma spray process parameters using a design of experiment for alloy 625 coatings », *J. Therm. Spray Technol.*, vol. 17, nº 1, p. 144-155, 2008.

[11] F. Gao, X. Huang, R. Liu, et Q. Yang, « Optimization of plasma spray process using statistical methods », *J. Therm. Spray Technol.*, vol. 21, nº 1, p. 176-186, 2012.

[12] S. Guessasma et C. Coddet, « Neural computation applied to APS spray process: Porosity analysis », *Surf. Coat. Technol.*, vol. 197, nº 1, p. 85-92, 2005.

[13] A. F. Kanta, G. Montavon, M. P. Planche, et C. Coddet, « Artificial neural networks implementation in plasma spray process: Prediction of power parameters and in-flight particle characteristics vs. desired coating structural attributes », *Surf. Coat. Technol.*, vol. 203, nº 22, p. 3361-3369, 2009.

[14] C. S. Ramachandran, V. Balasubramanian, et P. V. Ananthapadmanabhan, « Multiobjective optimization of atmospheric plasma spray process parameters to

deposit yttria-stabilized zirconia coatings using response surface methodology », *J. Therm. Spray Technol.*, vol. 20, n° 3, p. 590-607, 2011.

[15] Z. Yin, S. Tao, X. Zhou, et C. Ding, « Particle in-flight behavior and its influence on the microstructure and mechanical properties of plasma-sprayed Al2O3 coatings », *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 28, n° 6, p. 1143-1148, 2008.

[16] E. L. B.C. Oberlander, *Mater Sci Technol 8*, p. 657-665, 1992.

[17] S. L. C., K. Niemi, P. Vuoristo, in: C.C. Berndt (Ed.) P. Siltonen, « Proceedings of the International Thermal Spray Conference and Exposition », présenté à ASM International, 1992, p. 853.

[18] F. L. Toma, C. C. Stahr, L. M. Berger, S. Saaro, M. Herrmann, D. Deska, et G. Michael, « Corrosion resistance of APS- and HVOF-sprayed coatings in the Al 2O 3-TiO 2 system », *J. Therm. Spray Technol.*, vol. 19, n° 1-2, p. 137-147, 2010.

[19] P. A. Schweitzer, *Corrosion Resistance Tables: Metals, Nonmetals, Coatings, Mortars, Plastics, Elastomers and Linings, and fabrics - 4th ed.* Marcel Decker Inc, 1995.

[20] R. Ahmadi-Pidani, R. Shoja-Razavi, R. Mozafarinia, et H. Jamali, « Improving the thermal shock resistance of plasma sprayed CYSZ thermal barrier coatings by laser surface modification », *Opt. Lasers Eng.*, vol. 50, n° 5, p. 780-786, 2012.

[21] R. Ahmadi-Pidani, R. Shoja-Razavi, R. Mozafarinia, et H. Jamali, « Laser surface modification of plasma sprayed CYSZ thermal barrier coatings », *Ceram. Int.*, vol. 39, n° 3, p. 2473-2480, 2013.

[22] C. Batista, A. Portinha, R. M. Ribeiro, V. Teixeira, M. F. Costa, et C. R. Oliveira, « Surface laser-glazing of plasma-sprayed thermal barrier coatings », *Appl. Surf. Sci.*, vol. 247, n° 1-4, p. 313-319, 2005.

[23] C. Batista, A. Portinha, R. M. Ribeiro, V. Teixeira, M. F. Costa, et C. R. Oliveira, « Morphological and microstructural characterization of laser-glazed plasma-sprayed thermal barrier coatings », *Surf. Coat. Technol.*, vol. 200, n° 9, p. 2929-2937, 2006.

[24] R. Ghasemi, R. Shoja-Razavi, R. Mozafarinia, et H. Jamali, « Laser glazing of plasma-sprayed nanostructured yttria stabilized zirconia thermal barrier coatings », *Ceram. Int.*, vol. 39, n° 8, p. 9483-9490, 2013.

[25] J. H. Lee, P. C. Tsai, et C. L. Chang, « Microstructure and thermal cyclic performance of laser-glazed plasma-sprayed ceria-yttria-stabilized zirconia thermal barrier coatings », *Surf. Coat. Technol.*, vol. 202, n° 22-23, p. 5607-5612, 2008.

[26] A. Abdel-Samad, E. Lugscheider, K. Bobzin, et M. Maes, « The influence of hot isostatic pressing on plasma sprayed coatings properties », *Surf. Coat. Technol.*, vol. 201, n° 3-4, p. 1224-1227, 2006.

[27] M. P. Planche, S. Costil, C. Verdy, et C. Coddet, « Different spray processes for different Al2O3 coating properties », *Appl. Phys. Mater. Sci. Process.*, vol. 99, n° 3, p. 665-671, 2010.

[28] O. Sarikaya, « Effect of some parameters on microstructure and hardness of alumina coatings prepared by the air plasma spraying process », *Surf. Coat. Technol.*, vol. 190, n° 2-3, p. 388-393, 2005.

[29] P. Saravanan, V. Selvarajan, et M. P. Srivastava, « Experimental study of particle deposition characteristics of alumina using plasma spraying », *J. Therm. Spray Technol.*, vol. 10, n° 1, p. 138-141, 2001.

[30] J. R. Mawdsley, Y. J. Su, K. T. Faber, et T. F. Bernecki, « Optimization of small-particle plasma-sprayed alumina coatings using designed experiments », *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 308, n° 1-2, p. 189-199, 2001.

[31] T. A. Choudhury, N. Hosseinzadeh, et C. C. Berndt, « Artificial Neural Network application for predicting in-flight particle characteristics of an atmospheric plasma spray process », *Surf. Coat. Technol.*, vol. 205, n° 21-22, p. 4886-4895, 2011.

[32] S. Datta, D. K. Pratihar, et P. P. Bandyopadhyay, « Modeling of input-output relationships for a plasma spray coating process using soft computing tools », *Appl. Soft Comput. J.*, vol. 12, n° 11, p. 3356-3368, 2012.

[33] S. Guessasma et C. Coddet, « Microstructure of APS alumina-titania coatings analysed using artificial neural network », *Acta Mater.*, vol. 52, n° 17, p. 5157-5164, 2004.

[34] S. Guessasma, G. Montavon, et C. Coddet, « Modeling of the APS plasma spray process using artificial neural networks: Basis, requirements and an example », *Comput. Mater. Sci.*, vol. 29, n° 3, p. 315-333, 2004.

[35] A. F. Kanta, M. P. Planche, G. Montavon, et C. Coddet, « In-flight and upon impact particle characteristics modelling in plasma spray process », *Surf. Coat. Technol.*, vol. 204, n° 9-10, p. 1542-1548, 2010.

[36] P. Fauchais, M. Vardelle, et A. Vardelle, « Reliability of plasma-sprayed coatings: Monitoring the plasma spray process and improving the quality of coatings », *J. Phys. Appl. Phys.*, vol. 46, n° 22, 2013.

[37] S. Guessasma, G. Montavon, P. Gougeon, et C. Coddet, « Designing expert system using neural computation in view of the control of plasma spray processes », *Mater. Des.*, vol. 24, n° 7, p. 497-502, 2003.

[38] S. Guessasma, Z. Salhi, G. Montavon, P. Gougeon, et C. Coddet, « Artificial intelligence implementation in the APS process diagnostic », *Mater. Sci. Eng. B Solid-State Mater. Adv. Technol.*, vol. 110, n° 3, p. 285-295, 2004.

[39] A. F. Kanta, G. Montavon, M. Vardelle, M. P. Planche, C. C. Berndt, et C. Coddet, « Artificial neural networks vs. fuzzy logic: Simple tools to predict and control complex processes - Application to plasma spray processes », *J. Therm. Spray Technol.*, vol. 17, n° 3, p. 365-376, 2008.

[40] J. Cizek et K. A. Khor, « Role of in-flight temperature and velocity of powder particles on plasma sprayed hydroxyapatite coating characteristics », *Surf. Coat. Technol.*, vol. 206, n° 8-9, p. 2181-2191, 2012.

[41] R. Gadow, A. Candel, et M. Floristán, « Optimized robot trajectory generation for thermal spraying operations and high quality coatings on free-form surfaces », *Surf. Coat. Technol.*, vol. 205, n° 4, p. 1074-1079, 2010.

[42] C. W. Kang, H. W. Ng, et S. C. M. Yu, « Plasma spray deposition on inclined substrates: Simulations and experiments », *J. Therm. Spray Technol.*, vol. 16, n° 2, p. 261-274, 2007.

[43] A. Candel et R. Gadow, « Optimized multiaxis robot kinematic for HVOF spray coatings on complex shaped substrates », *Surf. Coat. Technol.*, vol. 201, n° 5, p. 2065-2071, 2006.

[44] A. Candel et R. Gadow, « Trajectory generation and coupled numerical simulation for thermal spraying applications on complex geometries », *J. Therm. Spray Technol.*, vol. 18, n° 5-6, p. 981-987, 2009.

[45] G. Mauer, R. Vaen, et D. Stöver, « Plasma and particle temperature measurements in thermal spray: Approaches and applications », *J. Therm. Spray Technol.*, vol. 20, n° 3, p. 391-406, 2011.

[46] J. Zhu, H. Xie, Z. Hu, P. Chen, et Q. Zhang, « Cross-sectional residual stresses in thermal spray coatings measured by moiré interferometry and nanoindentation technique », *J. Therm. Spray Technol.*, vol. 21, n° 5, p. 810-817, 2012.

[47] A. F. Kanta, G. Montavon, M. P. Planche, et C. Coddet, « In-flight particle characteristics control by implementing a fuzzy logic controller », *Surf. Coat. Technol.*, vol. 202, n° 18, p. 4479-4482, 2008.

[48] V. A. Barvinok et V. I. Bogdanovich, « Physical and mathematical simulation of the formation of mesostructure-ordered plasma coatings », *Tech. Phys.*, vol. 57, n° 2, p. 262-269, 2012.

[49] H. R. Salimijazi, L. Pershin, T. W. Coyle, J. Mostaghimi, S. Chandra, Y. C. Lau, L. Rosenzweig, et E. Moran, « Effect of droplet characteristics and substrate surface topography on the final morphology of plasma-sprayed zirconia single splats », *J. Therm. Spray Technol.*, vol. 16, n° 2, p. 291-299, 2007.

[50] S. Basu, E. H. Jordan, et B. M. Cetegen, « Fluid mechanics and heat transfer of liquid precursor droplets injected into high-temperature plasmas », *J. Therm. Spray Technol.*, vol. 17, n° 1, p. 60-72, 2008.

[51] B. Selvan, K. Ramachandran, B. C. Pillai, et D. Subhakar, « Numerical modelling of Ar-N 2 plasma jet impinging on a flat substrate », *J. Therm. Spray Technol.*, vol. 20, n° 3, p. 534-548, 2011.

[52] B. Selvan, K. Ramachandran, K. P. Sreekumar, T. K. Thiyagarajan, et P. V. Ananthapadmanabhan, « Numerical and experimental studies on DC plasma spray torch », *Vacuum*, vol. 84, n° 4, p. 444-452, 2009.

[53] J. Day, X. Huang, et N. L. Richards, « Examination of a grit-blasting process for thermal spraying using statistical methods », *J. Therm. Spray Technol.*, vol. 14, n° 4, p. 471-479, 2005.

Annexe A - Fiches techniques des poudres[17]

Pure Metal and Metal Alloy Powders

Powders

	Nominal Chemistry	Powder Name	Flow Density	Size	OEM Specs/ Trade Names	Application Data
Molybdenum Based Powders (continued)						
Molybdenum Blend	Ni 17.8 Cr 4.3 Si 1.0 Fe 1.0 B 0.8 Mo rem	AI-1054	2.58 g/cm^3	-325 mesh/+16 µm -45 µm/+16µm		• Coating structure promotes oil retention • High wear resistance • Low-coefficient resistance
Nickel Based Powders						
Nickel Atomized	Ni 99.0 min	NI-101	neg. 3.3 g/cm^3	-325 mesh/+10 µm -45 µm/+10 µm	B50TF17 CLA/B	• Coatings are dense and moderately hard • Good corrosion and oxidation properties • Good for repair of Ni based and SS parts • Can be used for a ceramic bond coat • Easily machined • Useful up to 1000°F (538°C)
		NI-969	25 sec 3.3 g/cm^3	-200/+325 mesh -75 µm/+45 µm		
		NI-914-3	20 sec 4.29 g/cm^3	-325 mesh/+16 µm -45 µm/+16µm		
Ni-20Cr Atomized	Cr 20.0 Ni Rem	NI-105	neg. 3.7 g/cm^3	-325 mesh/+5 µm -45 µm/+5 µm	PWA 1319	• Good corrosion and oxidation properties • Produces bright and smooth coatings • Exhibits good bonding characteristics • Resists oxidation and corrosive gases up to 1800°F (982°C) • Suitable as a ceramic bond coat • Good for general repair and build-up
		NI-106	22 sec 3.4 g/cm^3	-230 mesh/+10 µm -63 µm/+10 µm	B50TF40 CLB PWA 1317 MSRR 9507/27	
		NI-107	16 sec 4.3 g/cm^3	-140/+325 mesh -106 µm/+45 µm	B50TF40 CLA PWA 1315 MSRR 9507/8	
		NI-105-7/ 1262F	15 sec 4.4 g/cm^3	-270 mesh/+20 µm -53 µm/+20 µm		
Ni-50Cr Atomized	Cr 46.0+ Ni Rem	NI-980-1/ 1260F	17 sec 4.3 g/cm^3	-270 mesh/+20 µm -53 µm/+20 µm		• Coatings are resistant to corrosive gases (V and S) • Good boiler coating material
		NI-980-4	17 sec 4.01 g/cm^3	-325 mesh/+16 µm		
NiCrSiFeB Atomized	Cr 11.0 Si 4.0 Fe 3.0 B 2.5 Ni Rem	1274H	16 sec 4.4 g/cm^3	-230 mesh/+20 µm -63 µm/+20 µm		• Hard, machinable coating, as-sprayed or fused • Resists abrasions, erosion, fretting and cavitation
NiCrBSiFe Atomized	Cr 14.5 Fe 4.5 Si 4.5 B 3.2 Ni Rem	NI-167	16 sec 4.2 g/cm^3	-140/+325 mesh -106 µm/+45 µm	AMS 4775	• Self-fluxing type alloy • Good corrosion and wear properties • May be blended with a carbide and applied via spray/fuse process • Serviceable up to 1500°F (816°C)
		NI-167-6	16 sec 4.13 g/cm^3	-325 mesh/+16 µm -45 µm/+16 µm		
	Cr 16.5 Si 4.1 Fe 4.5 B 3.1 C 0.8 Ni Rem	NI-1024/ 1275H	16 sec 4.3 g/cm^3	-270 mesh/+20 µm -53 µm/+20 µm		
NiWCrSiB Atomized	W 17.0 Cr 15.0 Si 4.0 B 3.0 Ni Rem	1276F	16 sec 4.5 g/cm^3	-270 mesh/+20 µm -53 µm/+20 µm		• Hard, machinable coating, as-sprayed or fused • Resists abrasion and erosion at high temperatures

Figure A.1 Fiches technique des poudres

[17] Source : catalogue Praxair

Pure Metal and Metal Alloy Powders

Powders

	Nominal Chemistry	Powder Name	Flow Density	Size	OEM Specs/ Trade Names	Application Data
Nickel Based Powders (continued)						
Ni-5Al Atomized	Al 5.0 Ni Rem	NI-185	25 sec 3.1 g/cm^3	-170/+325 mesh -90 µm/+45 µm	B50TF56 CLB PWA 1380 EMS 57746 T1C1 PM 819-56 DMR 33.011 CPW 490 BMS-1067 Type XIII	• Water-atomized Ni-Al powder • Good oxidation and corrosion properties • Can be used for a ceramic bond coat • Good for general repair and build-up • Thick coatings are possible • Easily machined
Ni-5Al Clad	Al 5.0 Ni Rem	AI-1037	18 sec 3.8 g/cm^3	-170/+325 mesh -90 µm/+45 µm	PWA 1337 B50TF56 CLA	• Clad Ni-Al powder • Properties similar to NI-185 • Superior deposition efficiency • Smoke-free sprayability
		NI-970	22 sec 3.3 6g/cm^3	-170/+325 mesh -90 µm/+45 µm	PWA 1337 B50TF56 CLA	
Ni-5Al Composite	Al 5.0 Ni Rem	NI-109	16 sec 3.9 g/cm^3	-170/+325 mesh -90 µm/+45 µm	B50TF56 CLA PWA 1337 EMS 57746 T1C2 EMS 52432 XX CPW 247	• Composite Ni-Al powder • Self-bonds to most metallic surfaces • Properties similar to NI-185
Ni-20Al Composite	Al 18.7 Ni Rem	NI-108	22 sec 3.1 g/cm^3	-170/+270 mesh -90 µm/+53 µm	PWA 1321 B50TF13 CLB B50TF33 CLA	• Self-bonds to most metallic surfaces • Useful up to 1200°F (649°C) • Good oxidation and corrosion properties
Ni-18Cr-6Al Composite	Cr 18.0 Al 6.0 Ni Rem	NI-122	20 sec 3.3 g/cm^3	-120/+325 mesh -125 µm/+45 µm	B50TF119 CLA PWA 1347 EMS 57748 T1C2	• Self-bonds to most metallic surfaces • Good oxidation and corrosion properties • Good for general repair and build-up • Thick coatings are possible
NiCrAlFeMo Composite	Cr 8.0 Al 7.0 Fe 5.0 Mo 5.0 Ni Rem	NI-630	16 sec 3.9 g/cm^3	-140/+325 mesh -106 µm/+45 µm	EMS 56762	• Machinable stainless steel type coating • Self-bonds to most metallic surfaces • Good oxidation and corrosion properties • Good for repair and build-up • Thick coatings are possible • Useful up to 1600°F (871°C)
Ni-5Al-5Mo Composite	Al 5.5 Mo 5.0 Ni Rem	NI-453	16 sec 3.9 g/cm^3	-170/+325 mesh -90 µm/+45 µm	EMS 57749 T1 CL2 B50TF166 CLA	• Self-bonds to most metallic surfaces • Good toughness and hardness • Good for repair and build-up • Useful up to 600°F (316°C)
NiCrCoTiW (Similar to Rene® 80) Atomized	Cr 14.0 Co 9.5 Ti 5.0 W 4.0 Mo 4.0 Ni Rem	NI-183	16 sec 4.2 g/cm^3	-140/+325 mesh -106 µm/+45 µm	B50TF183 CL/B	• Good for repair and build-up of similar-chemistry superalloy components
		NI-183-1	4.12 g/cm^3	-325 mesh/+5 µm -45 µm/+5 µm		
NiCrFeNb-TaMoTi (Similar to Alloy 718) Atomized	Cr 19.0 Fe 18.0 Nb+Ta 5.1 Mo 3.1 Ti 1.0 Ni Rem	NI-202	16 sec 4.3 g/cm^3	-120/+325 mesh -125 µm/+45 µm	B50TF202 CLA	• Excellent high-temperature oxidation and corrosion properties • Good for repair and build-up of similar-chemistry superalloy components • Useful up to 1800°F (982°C)
		NI-202-1	16 sec 4.1 g/cm^3	-170/+325 mesh -90 µm/+45 µm	B50TF202 CLB	
		NI-202-2	19 sec 4.3 g/cm^3	-325 mesh/+10 µm -45 µm/+10 µm		
		NI-202-3/ 1278F	19 sec 4.1 g/cm^3	-325 mesh/+16 µm -45 µm/+16 µm	B50TF202 CLD	

Figure A.1 Fiches technique des poudres (suite)

Ceramic Powders

Powders

	Nominal Chemistry	Powder Name	Flow Density	Size	OEM Specs/ Trade Names	Application Data
Aluminum Oxide Based Powders						
Al_2O_3 Fused	Al_2O_3 99.0 min	ALO-101	neg. 1.1 g/cm^3	-325 mesh/+5 µm -45 µm/+5 µm	PWA 1310	• Good for abrasion, erosion and sliding wear • Good in alkali and acid environments • Excellent dielectric properties • Useable between 1550-3000°F (843-1649°C)
	Al_2O_3 99.3 min	AI-1110-HP	neg. 1.4 g/cm^3	-22 µm/+5 µm	MSRR9507/9 EMS 56773	
Al_2O_3 Fused	Al_2O_3 99.0 min	ALO-114	neg. 1.28 g/cm^3	-325 mesh/+5 µm -45 µm/+5 µm		
Al_2O_3 Fused	Al_2O_3 99.5 min	AI-1010-HP	neg. 1.39 g/cm^3	-325 mesh/+5 µm -45 µm/+5 µm	PWA 1310 MSRR 9507/9	
Al_2O_3 Fused	Al_2O_3 99.5 min	AI-1010-FHP	neg. 1.30 g/cm^3	-325 mesh/+5 µm -45 µm/+5 µm		
Al_2O_3-3TiO_2 Fused	TiO_2 3.0 Al_2O_3 Rem	ALO-105	neg. 1.6 g/cm^3	-270 mesh -53 µm	A50TF87 CLA	• Good for abrasion, erosion and sliding wear • Good in alkali and acid environments • Requires grinding
		ALO-159	neg. 1.6 g/cm^3	-140/+325 mesh -106 µm/+45 µm	A50TF87 CLB PWA 1311 DMR 33.013	
Al_2O_3-13TiO_2 Fused	TiO_2 13.0 Al_2O_3 Rem	ALO-187	neg. 1.6 g/cm^3	-325 mesh/+10 µm -45 µm/+10 µm		• Properties similar to Al_2O_3-3TiO_2, but softer and less resistant to chemicals • Useable up to 1000°F (538°C)
		ALO-188	neg. 1.2 g/cm^3	-31 µm/+5 µm		
Al_2O_3-40TiO_2 Fused	TiO_2 40.0 Al_2O_3 Rem	ALO-121	neg. 1.6 g/cm^3	-325 mesh/+5 µm -45 µm/+5 µm		• Properties similar to Al_2O_3-13TiO_2, but softer and less resistant to chemicals • Useable up to 1000°F (538°C) • Excellent finishing properties
Chromium Oxide Based Powders						
Cr_2O_3 Reacted and Sintered	Cr_2O_3 99.0 min	CRO-131	neg. 2.5 g/cm^3	-325 mesh/+5 µm -45 µm/+5 µm	CPW 320 BMS 10-67K Type IV	• Hard, dense wear-resistant coatings • Insoluble in acids, alkalis and alcohol • Useable up to 1000°F (540°C) • Excellent engraving properties
		CRO-167	neg. 2.4 g/cm^3	-325 mesh/+10 µm -45 µm/+10 µm		
		CRO-167-1	neg. 2.5 g/cm^3	-325 mesh/+15 µm -45 µm/+15 µm		
		CRO-172	46 sec 2.6 g/cm^3	-325 mesh/+20 µm -45 µm/+20 µm		
		CRO-174	neg. 2.4 g/cm^3	-22 µm/+5 µm	CPW 320	
		CRO-179	neg. 2.5 g/cm^3	-31 µm/+10 µm		

Figure A.1 Fiches technique des poudres (suite)

Ceramic Powders

Powders

	Nominal Chemistry	Powder Name	Flow Density	Size	OEM Specs/ Trade Names	Application Data
Chromium Oxide Based Powders (continued)						
Cr_2O_3-SiO_2TiO_2 Agglomerated and Sintered	SiO_2 5.0 TiO_2 3.0 Cr_2O_3 Rem	CRO-192	neg. 1.4 g/cm^3	-270 mesh/+10 µm -53 µm/+10 µm		• Similar properties to Cr_2O_3 • Hard, dense wear-resistant coatings • Resists impact better than Cr_2O_3
Cr_2O_3 Agglomerated	Cr_2O_3 99.0 min	CRO-214	1.73 g/cm^3	-325 mesh/+16 µm -45 µm/+16 µm		
		CRO-214-1	1.80 g/cm^3	-270 mesh/+16 µm -53 µm/+16 µm		
Zirconium Oxide Based Powders						
ZrO_2-22MgO Fused	MgO 22.0 ZrO_2 Rem	ZRO-103	neg. 2.3 g/cm^3	-200 mesh/+10 µm -75 µm/+10 µm	PWA 1333 MSRR 9507/21	• Good thermal barrier properties • Resistant to molten metals • Good particle erosion resistance • Useful up to 1700°F (927°C)
ZrO_2-8Y_2O_3 Agglomerated and Sintered	Y_2O_3 7.5 ZrO_2 Rem	ZRO-192	41 sec 1.8 g/cm^3	-140/+325 mesh -106 µm/+45 µm	A50TF278 EMS 57750 Type I	• Excellent thermal barrier properties • Stabilizes during spray process • Useful up to 2450°F (1343°C)
		ZRO-113/ ZRO-114	5 sec 1.53 g/cm^3	-140 mesh/+11 µm -106 µm/+11 µm	A50TF278 CLC PWA 1375	
		ZRO-195-2	33 sec 2.18 g/cm^3	-170/+325 mesh -90 µm/+45 µm	MSRR 9507/46	
		AI-1075	30 sec 2.3 g/cm^3	-140/+325 mesh -106 µm/+45 µm	PWA 1375 A50TF278 CL B/C	
		ZRO-236/ 1484I	40 sec 1.9 g/cm^3	-140/+325 mesh -106 µm/+45 µm	PWA 1375 A50TF228 CL B/C	
		ZRO-236-1		-140 mesh/+16 µm -106 µm/+16 µm	A50A557	
ZrO_2-8Y_2O_3 Agglomerated and Sintered	Y_2O_3 7.5 ZrO_2 Rem	ZRO-271	1.58 g/cm^3	-120 mesh/+16 µm -125 µm/+16 µm		• Ultra-low-monoclinic powder • High purity • Low radiation • Excellent thermal barrier properties • Useful up to 2450°F (1343°C)
		ZRO-271-3	1.55 g/cm^3	-325 mesh/+5 µm -45 µm/+45 µm		
		ZRO-271-4	0.95 g/cm^3	-140 mesh/+11 µm -106 µm/+11 µm	A50AG1 CLA	
		ZRO-271-5	37 sec 1.70 g/cm^3	-120/+325 mesh -125 µm/+15 µm		
ZrO_2-12Y_2O_3 Agglomerated and Sintered	Y_2O_3 12 ZrO_2 Rem	AI-1078	31 sec 2.2 g/cm^3	-120 mesh/+15 µm -125 µm/+15 µm	PWA 36375	• Excellent thermal barrier properties • Stabilizes during spray process • Useful up to 2100°F (1150°C)
ZrO_2-20Y_2O_3 Agglomerated and Sintered	Y_2O_3 20 ZrO_2 Rem	AI-1066	29 sec 2.3 g/cm^3	-120 mesh/+15 µm -125 µm/+15 µm	PWA 36087-2	• Very good thermal barrier properties • Stabilizes during spray process • Useful up to 1550°F (845°C)
ZrO_2-14Y_2O_3 Agglomerated and Sintered	Y_2O_3 14.0 ZrO_2 Rem	ZRO-292	1.70 g/cm^3	-120 mesh/+16 µm -125 µm/+16 µm		
ZrO_2-20Y_2O_3 Agglomerated and Sintered	Y_2O_3 20.0 ZrO_2 Rem	ZRO-299	2.17 g/cm^3	-120 mesh/+10 µm -125 µm/+10 µm		
ZrO_2-9.5Y_2O_3 Agglomerated and Sintered	Y_2O_3 9.5 Yb_2O_3 5.6 Gd_2O_3 5.2	ZRO-256	1.92 g/cm^3	-140 mesh/+11 µm -106 µm/+11 µm	EMS 56726	

Figure A.1 Fiches technique des poudres (suite)

Rapport-Gratuit.com

Annexe B - Métallographies

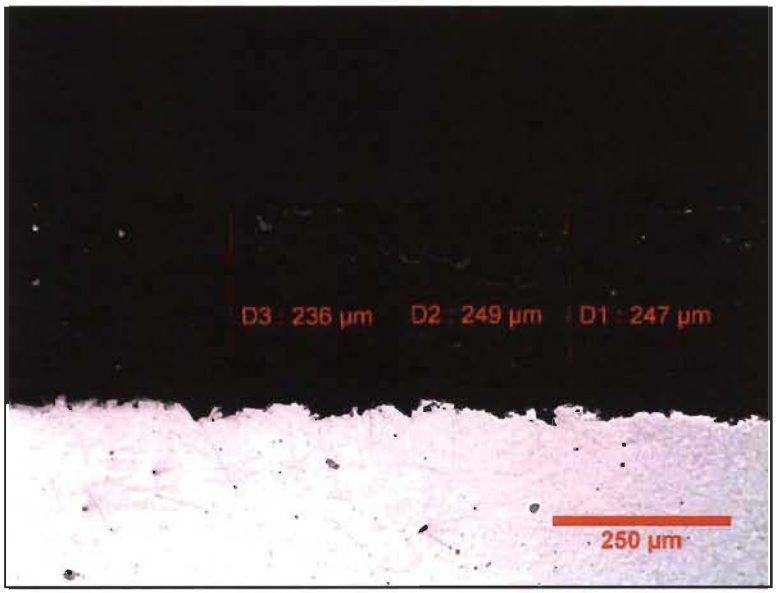


Figure B.1 Métallographie échantillon ALO-15

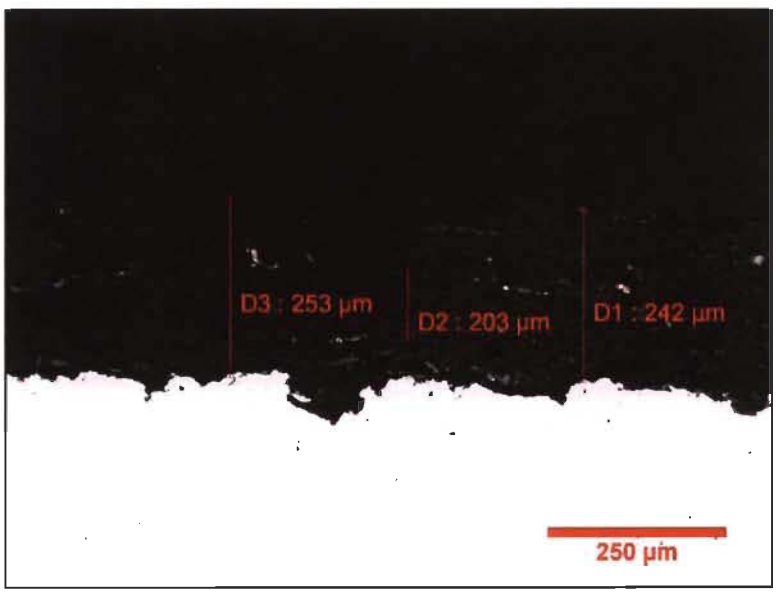


Figure B.2 Métallographie échantillon ALO-16

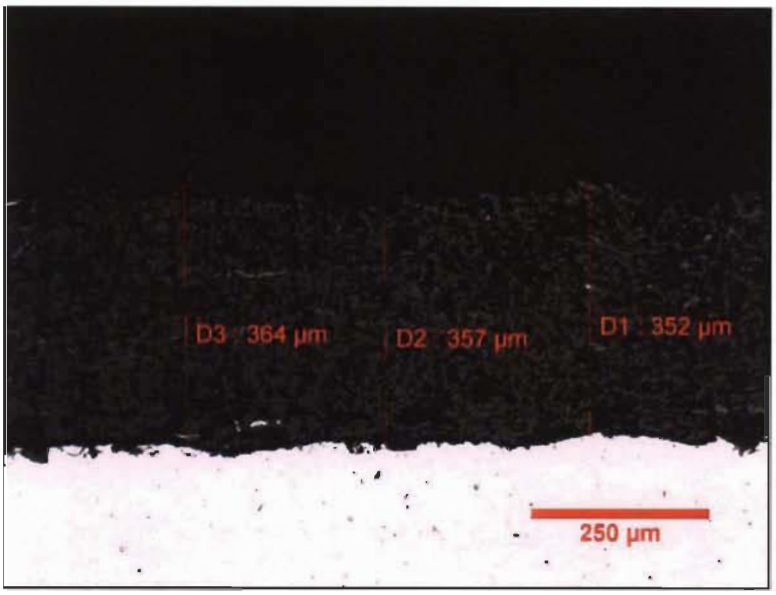


Figure B.3 Métallographie échantillon ALO-18

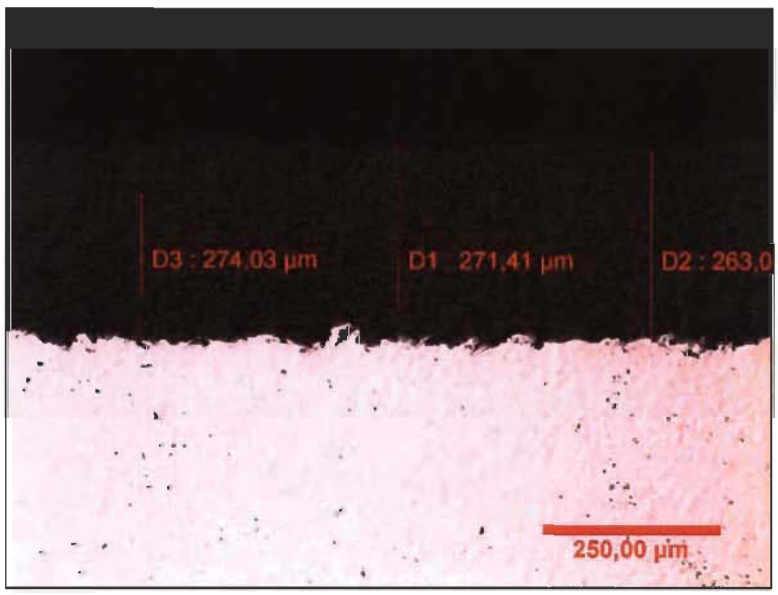


Figure B.4 Métallographie échantillon ALHP-1

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

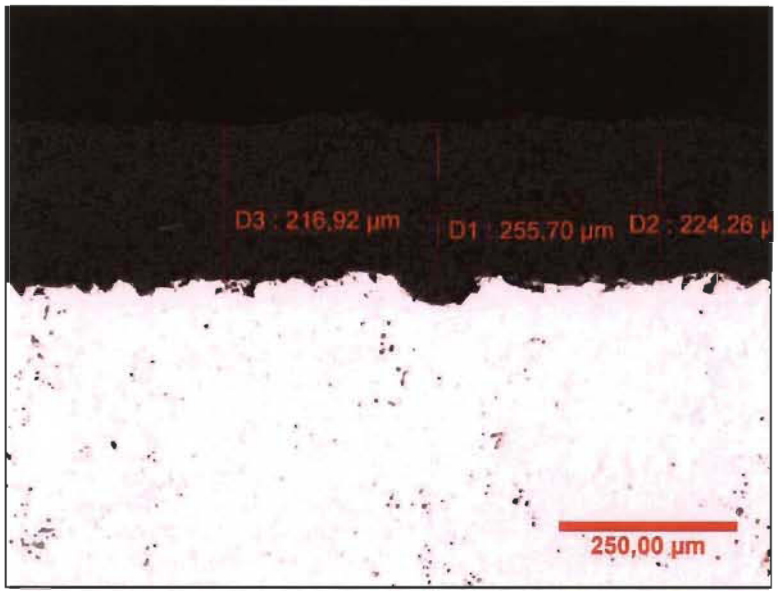


Figure B.5 Métallographie échantillon ALHP-2

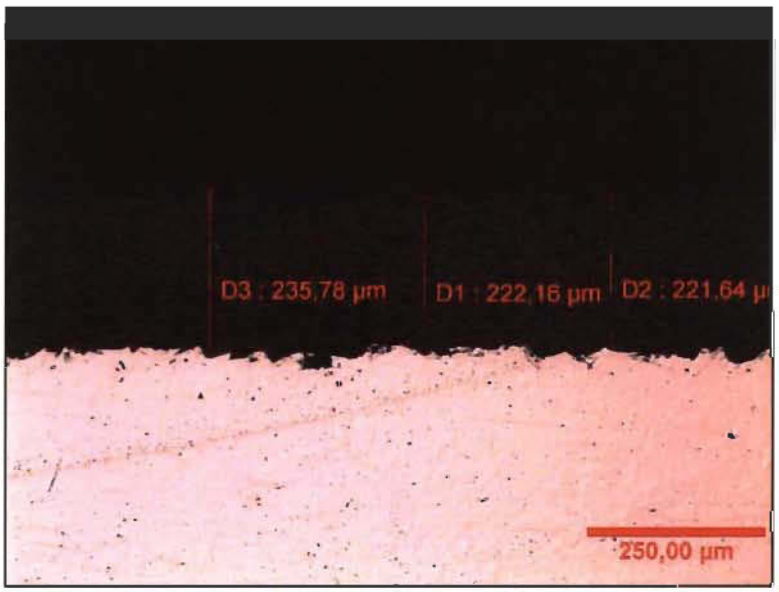


Figure B.6 Métallographie échantillon ALHP-3

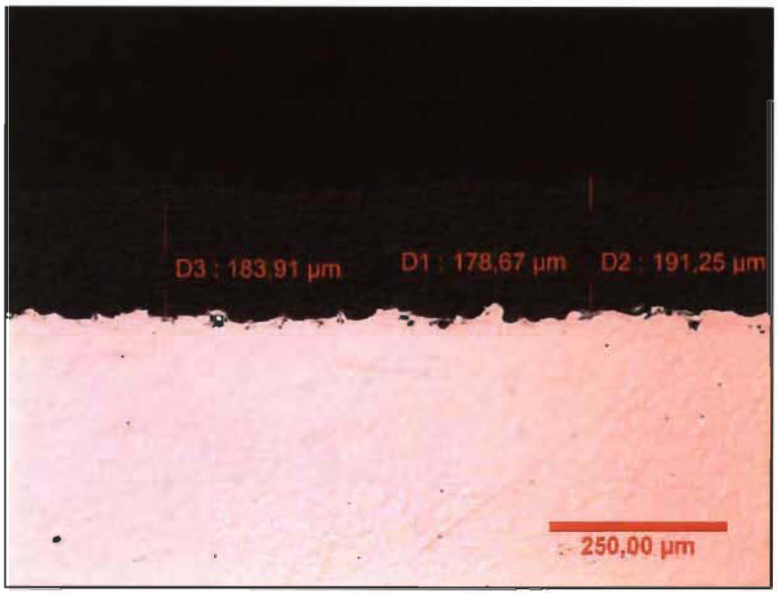


Figure B.7 Métallographie échantillon ALHP-4

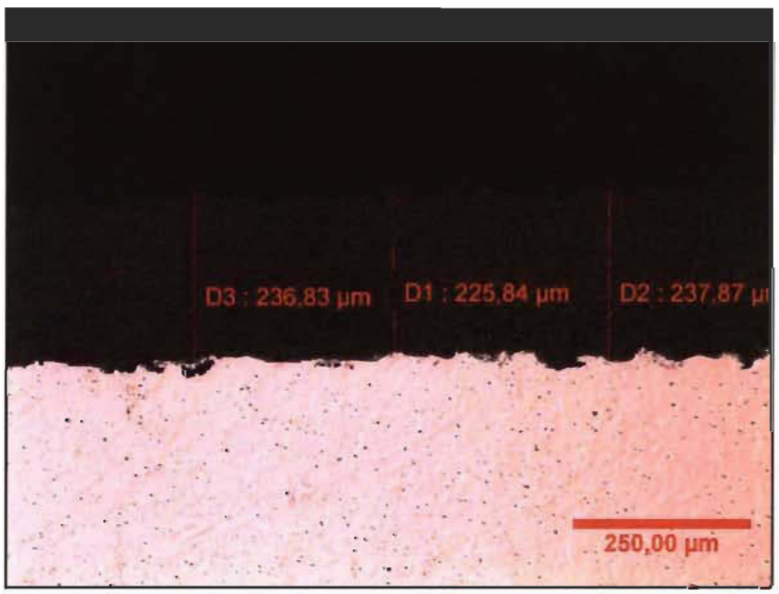


Figure B.8 Métallographie échantillon ALHP-5

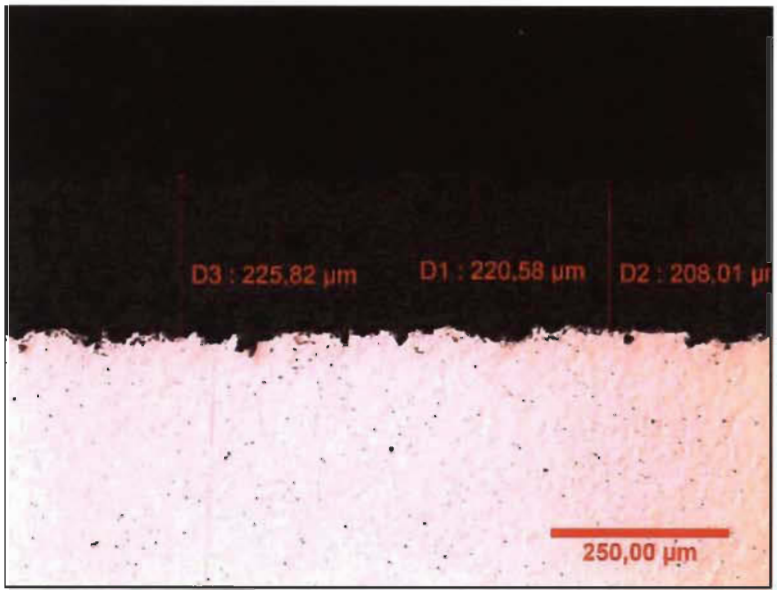


Figure B.9 Métallographie échantillon ALHP-6

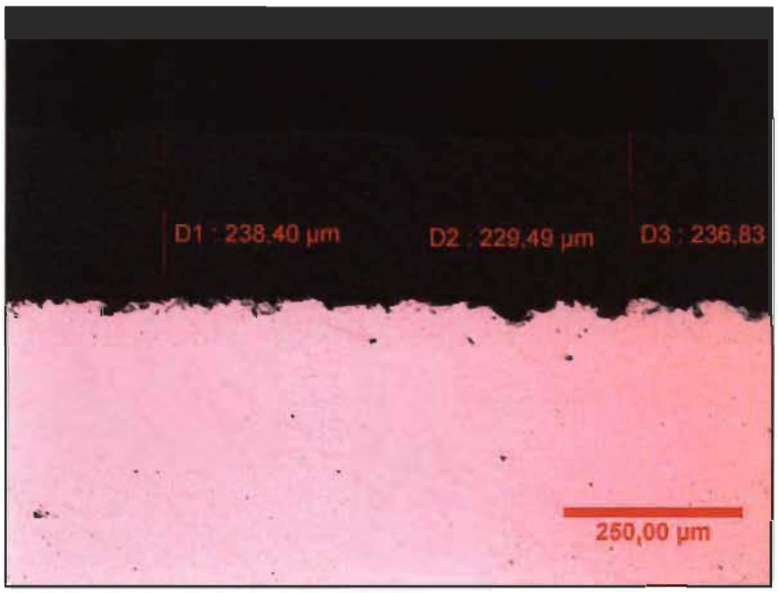


Figure B.10 Métallographie échantillon ALHP-8

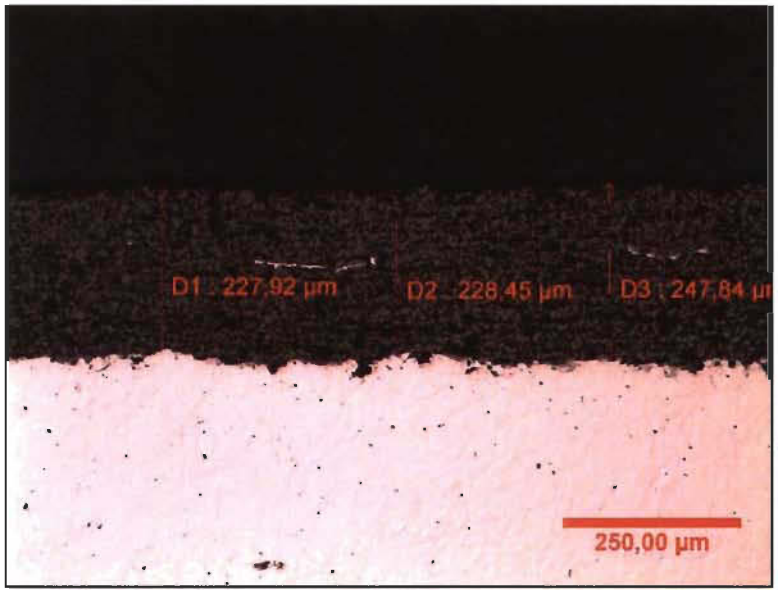


Figure B.11 Métallographie échantillon CRO174-1

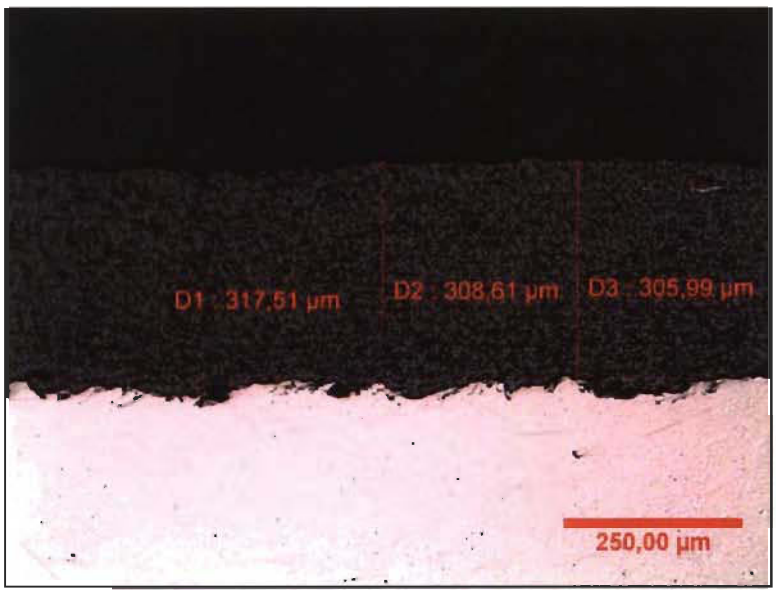


Figure B.12 Métallographie échantillon CRO174-3

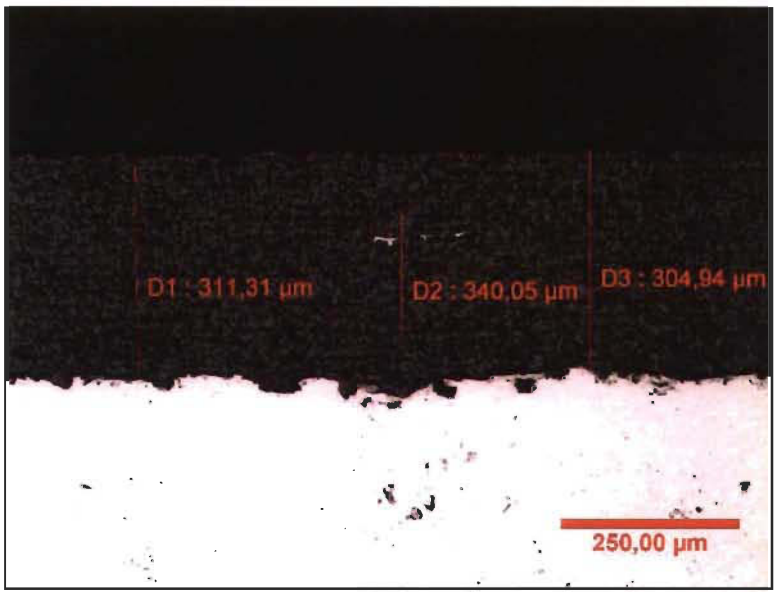


Figure B.13 Métallographie échantillon CRO174-4

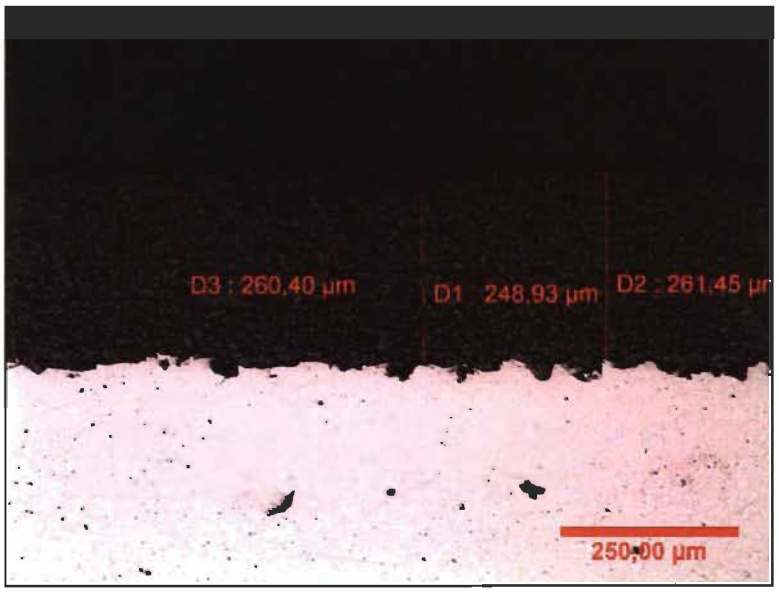


Figure B.14 Métallographie échantillon CRO174-5

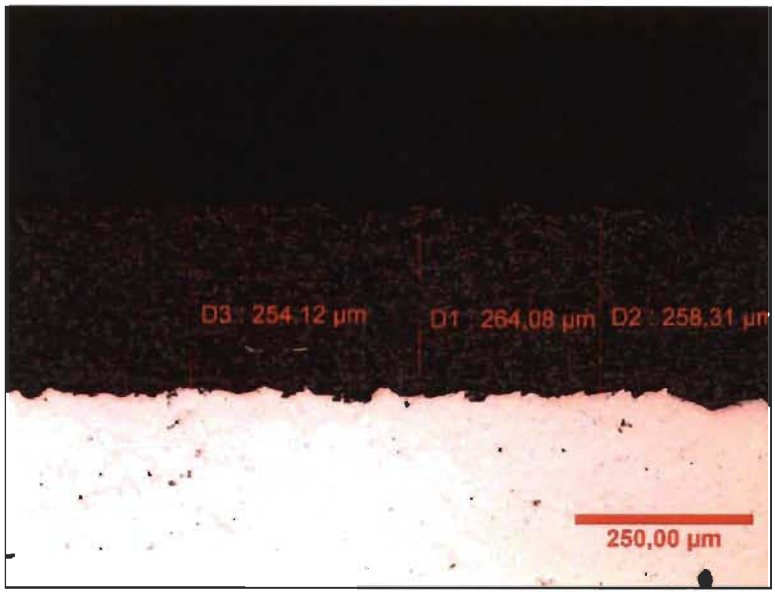


Figure B.15 Métallographie échantillon CRO174-6

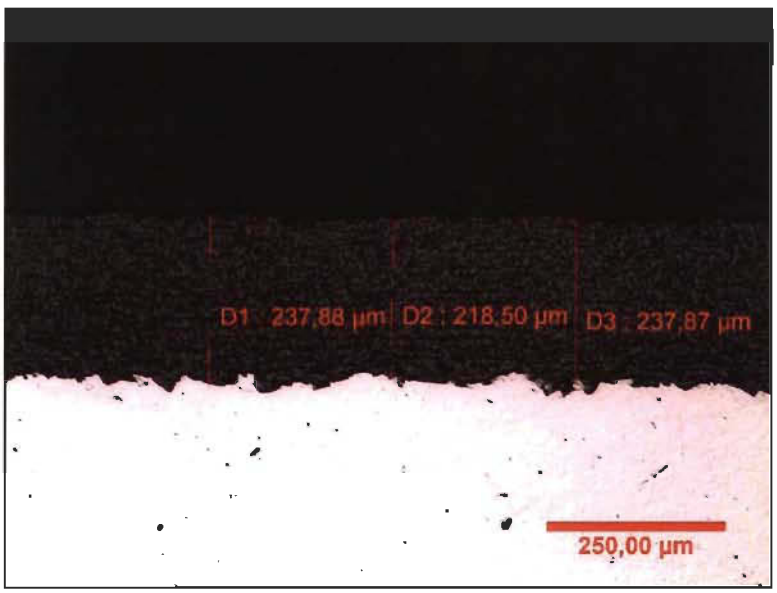


Figure B.16 Métallographie échantillon CRO174-7

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

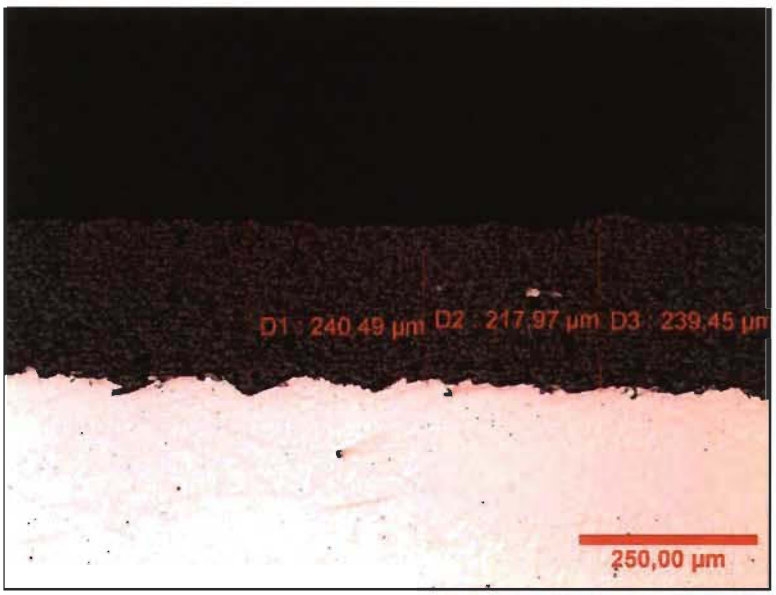


Figure B.17 Métallographie échantillon CRO174-8

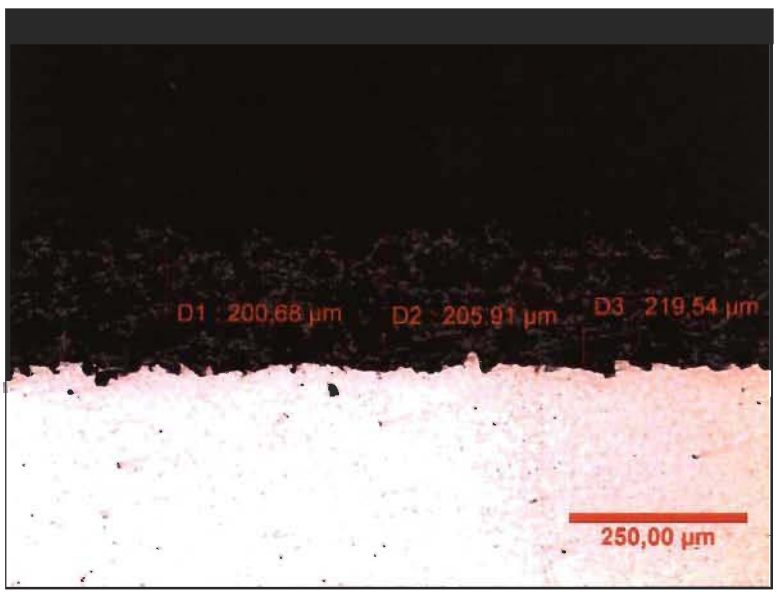


Figure B.18 Métallographie échantillon CRO192-2

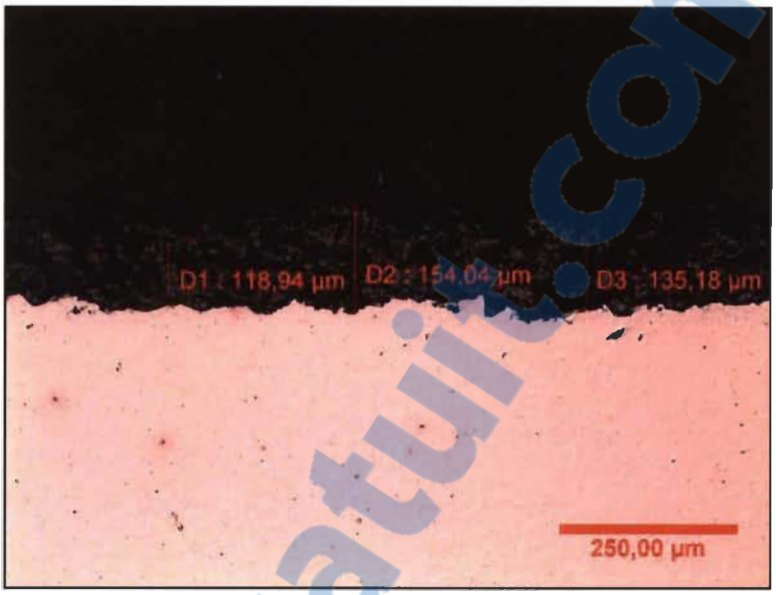


Figure B.19 Métallographie échantillon CRO192-3

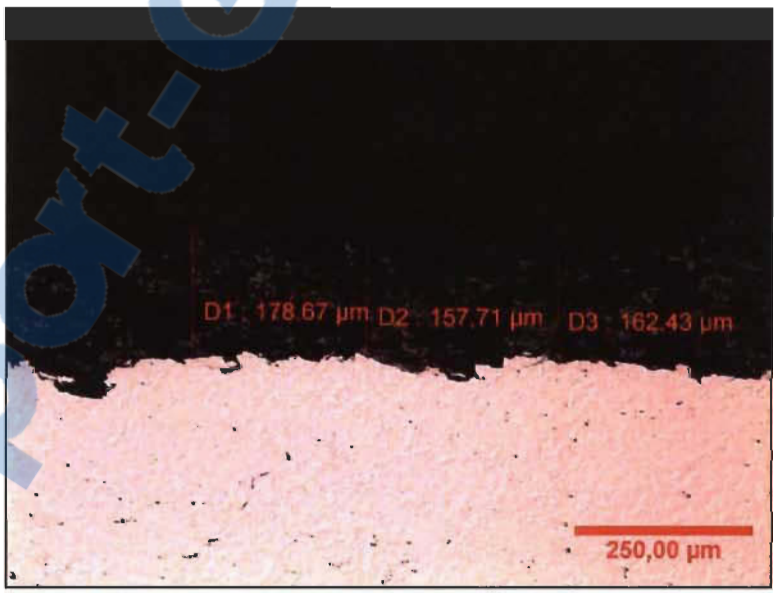


Figure B.20 Métallographie échantillon CRO192-4

Rapport-Gratuit.com

Figure B.21 Métallographie échantillon CRO192-5

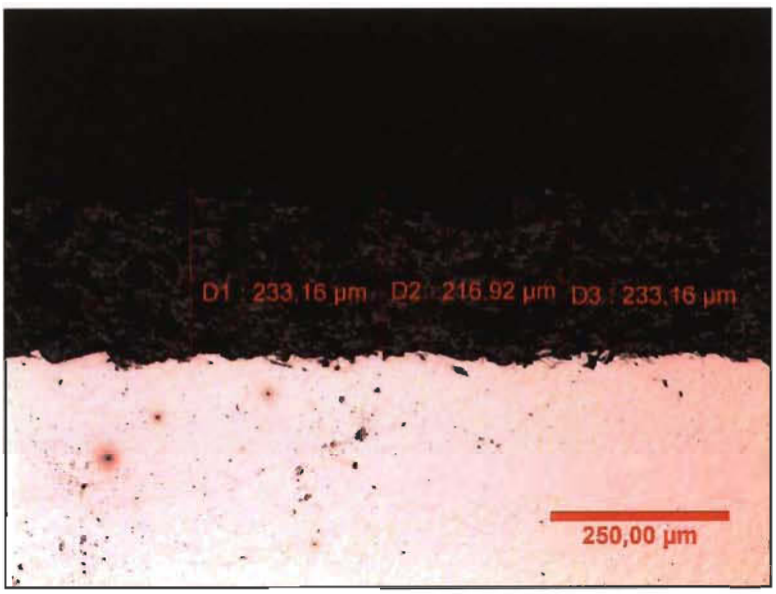


Figure B.22 Métallographie échantillon CRO192-7

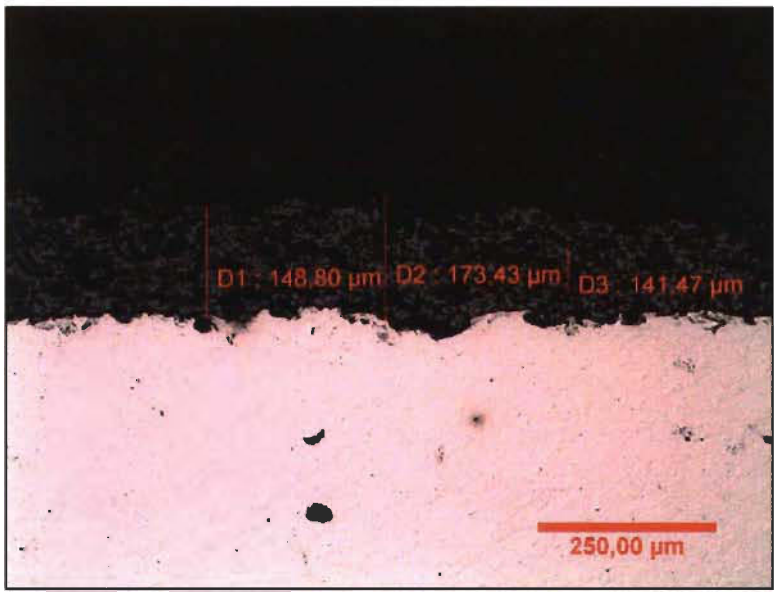


Figure B.23 Métallographie échantillon CRO192-8

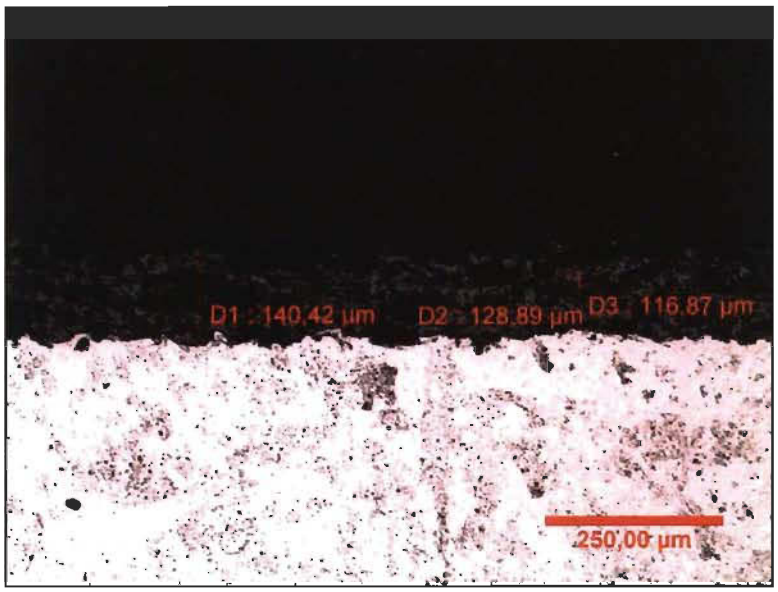


Figure B.24 Métallographie échantillon CRO192-9

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

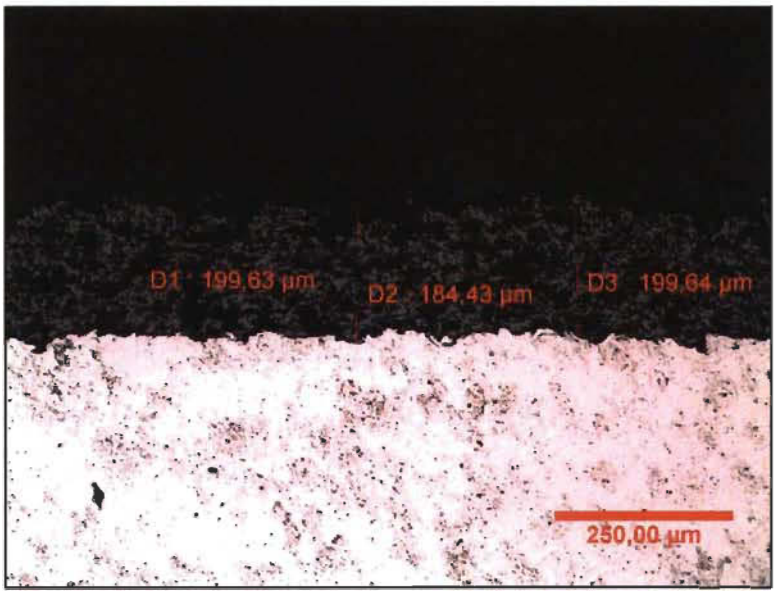


Figure B.25 Métallographie échantillon CRO192-10

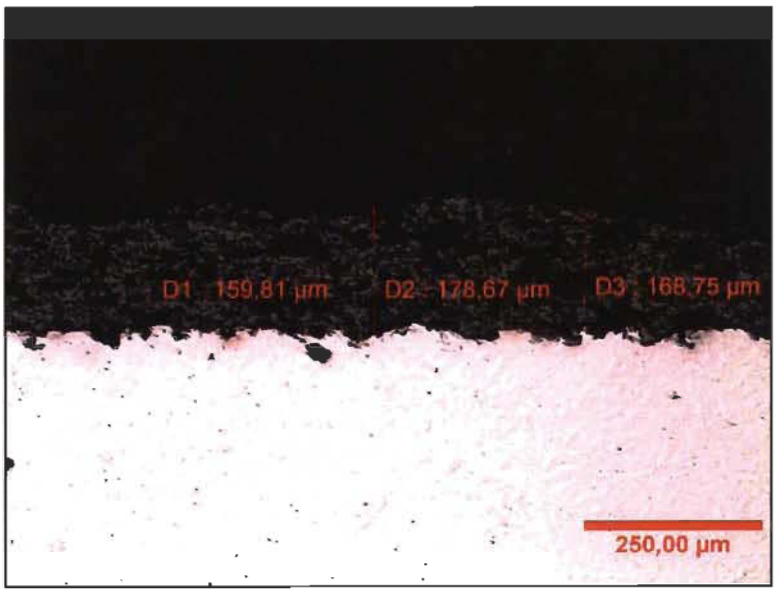


Figure B.26 Métallographie échantillon CRO192-11

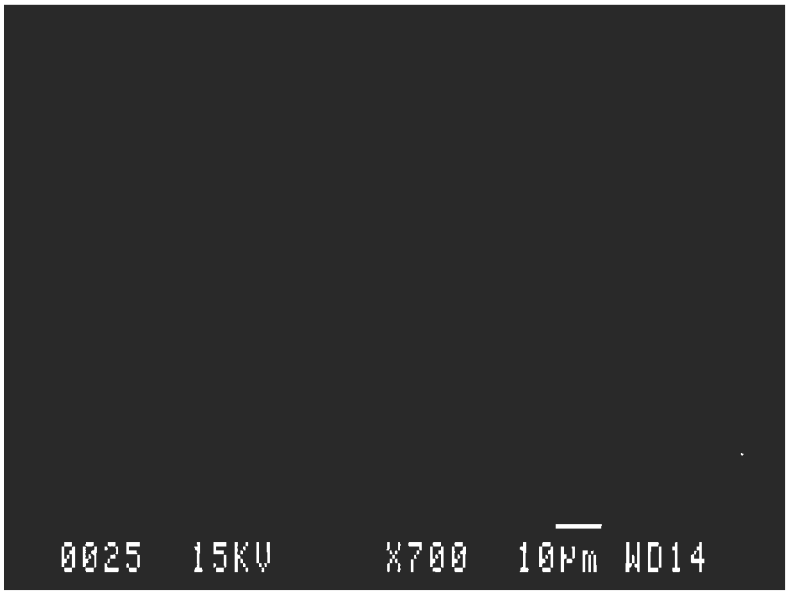


Figure B.27 Métallographie échantillon ALHPM1-16 (3,5 % de porosité)

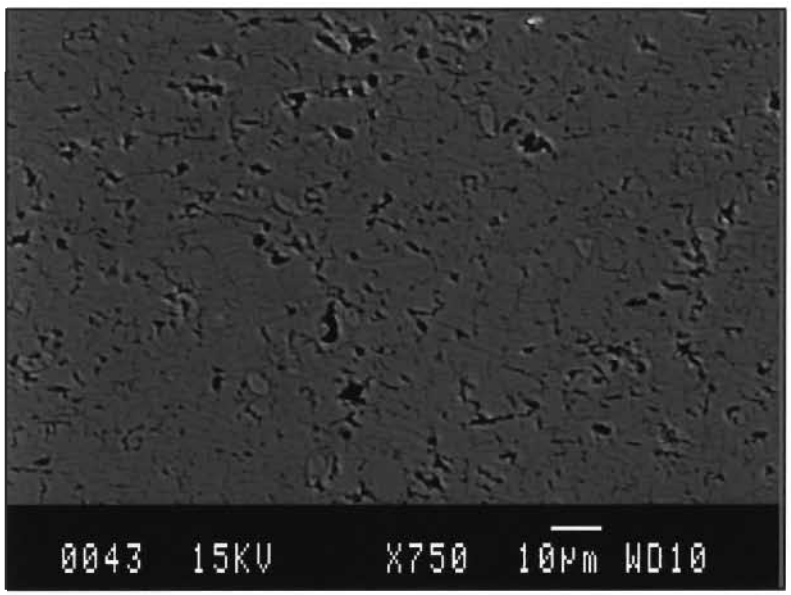


Figure B.28 Métallographie échantillon ALHPM1-20 (3,2 % de porosité)

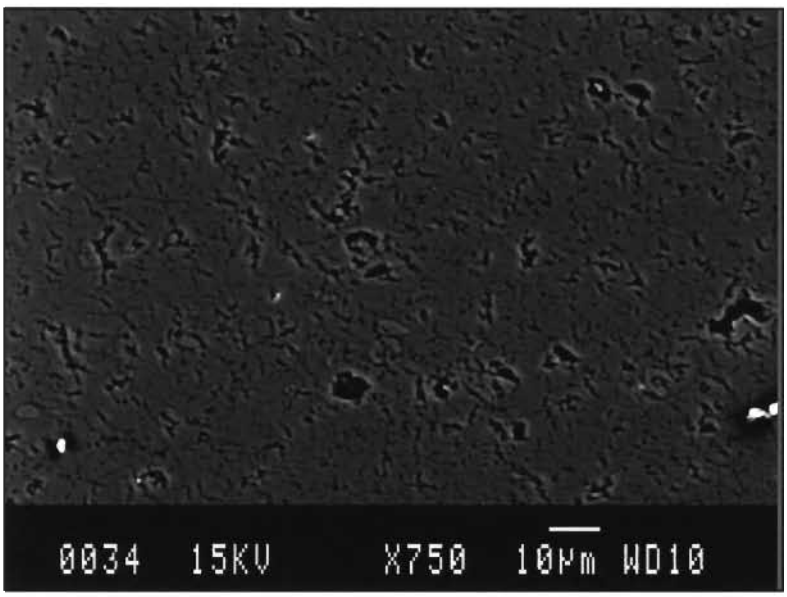


Figure B.29 Métallographie échantillon ALHPM1-21 (4,7 % de porosité)

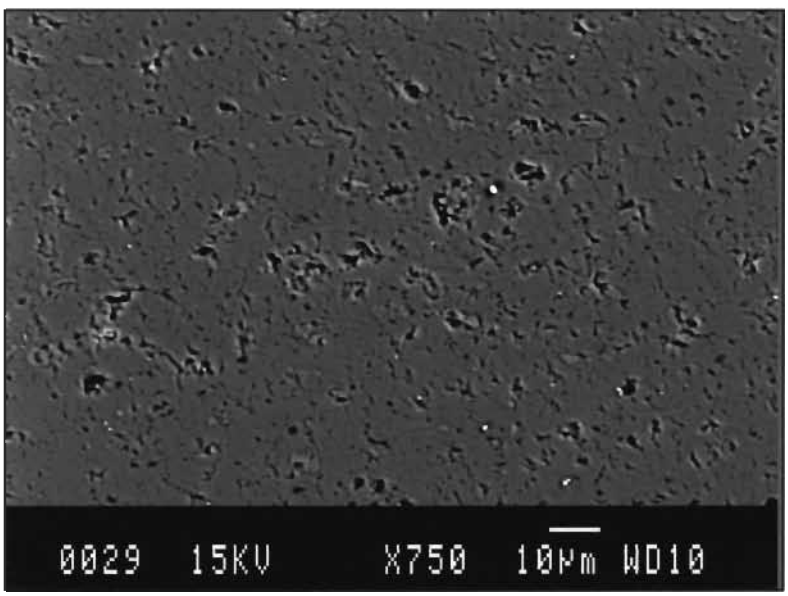


Figure B.30 Métallographie échantillon ALHPM1-24 (2,6 % de porosité)

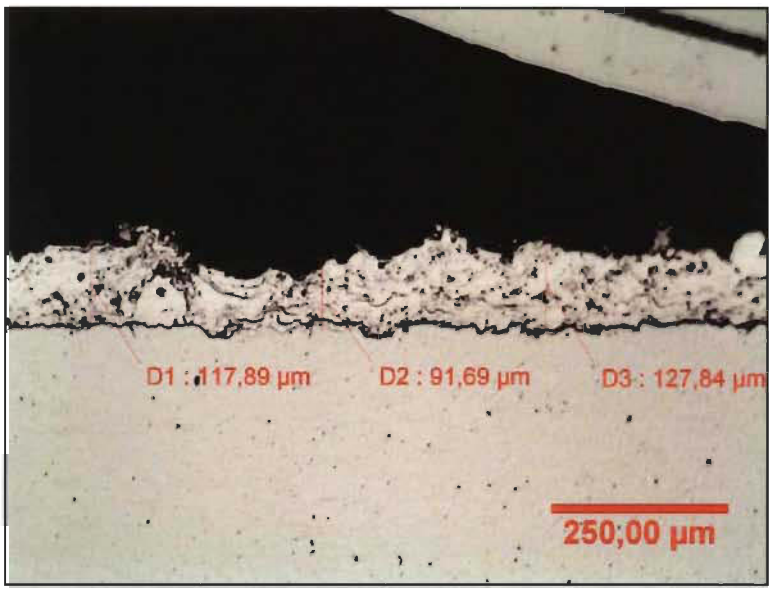


Figure B.31 Métallographie échantillon NiCrM1-7

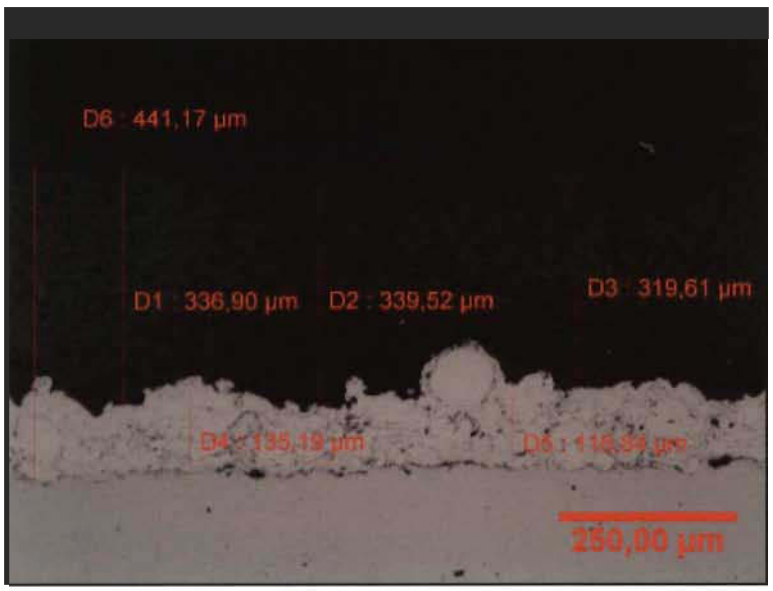


Figure B.32 Métallographie échantillon NiCrHPM1-3

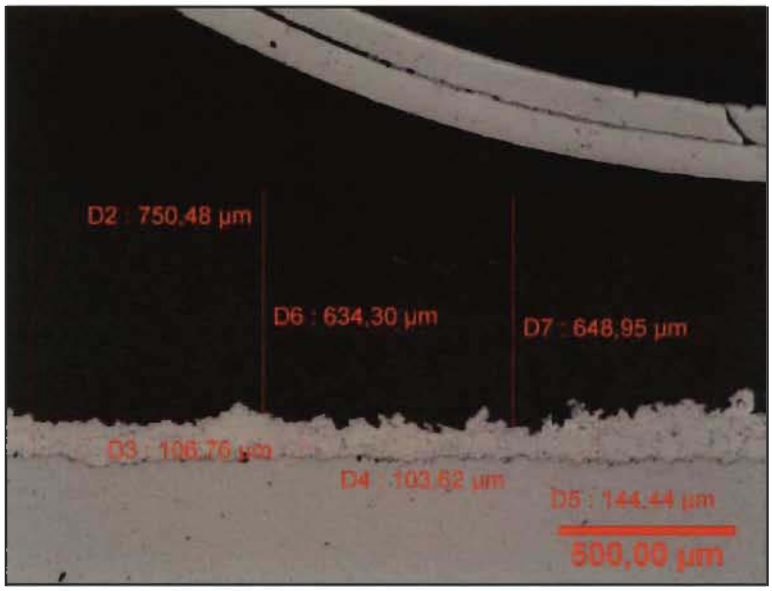


Figure B.33 Métallographie échantillon NiCrM1-4

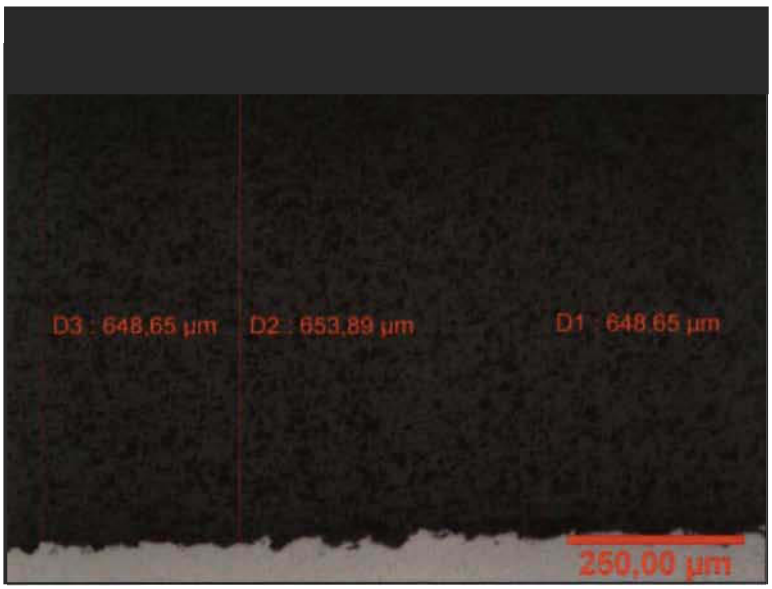


Figure B.34 Métallographie échantillon AlHPM1-25

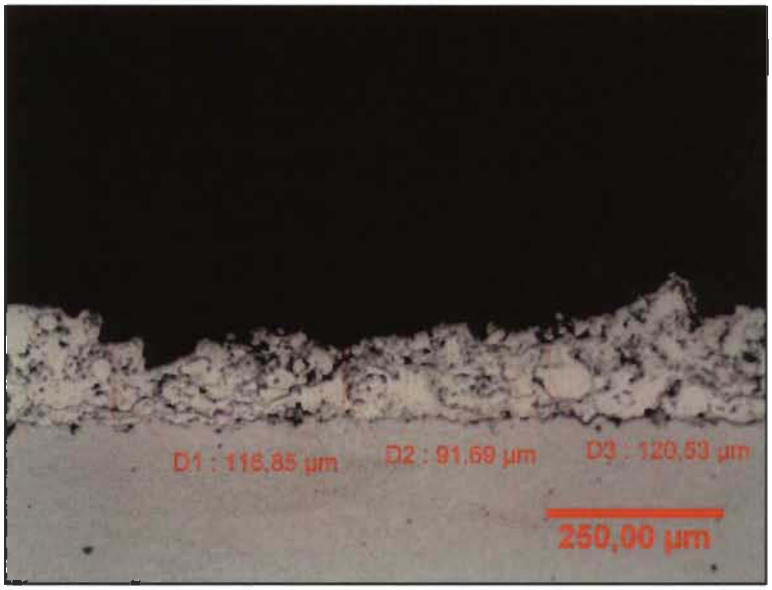


Figure B.35 Métallographie échantillon Ni122M1-2

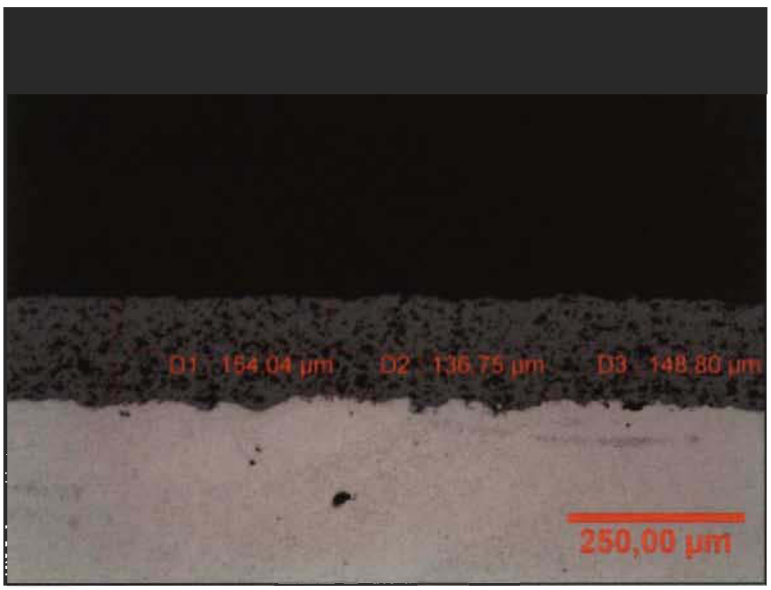


Figure B.36 Métallographie échantillon CRO174M1-13

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

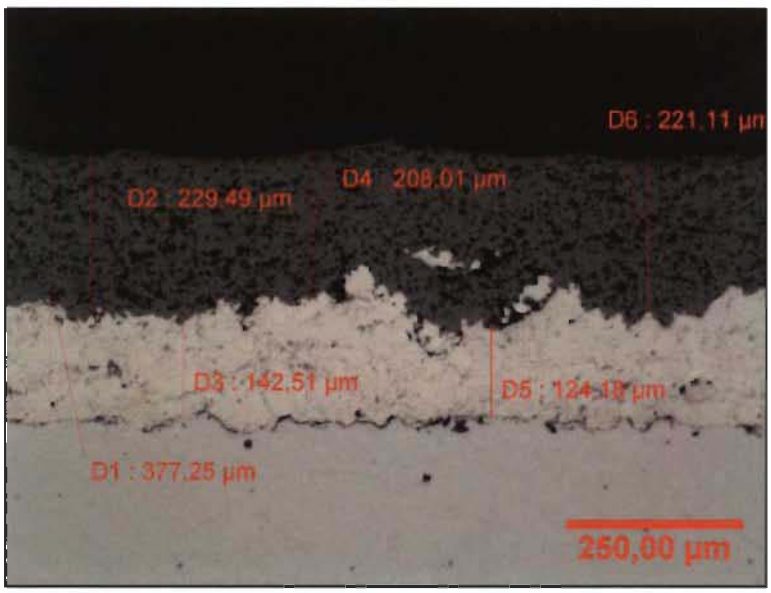


Figure B.37 Métallographie échantillon N107C174M1-1

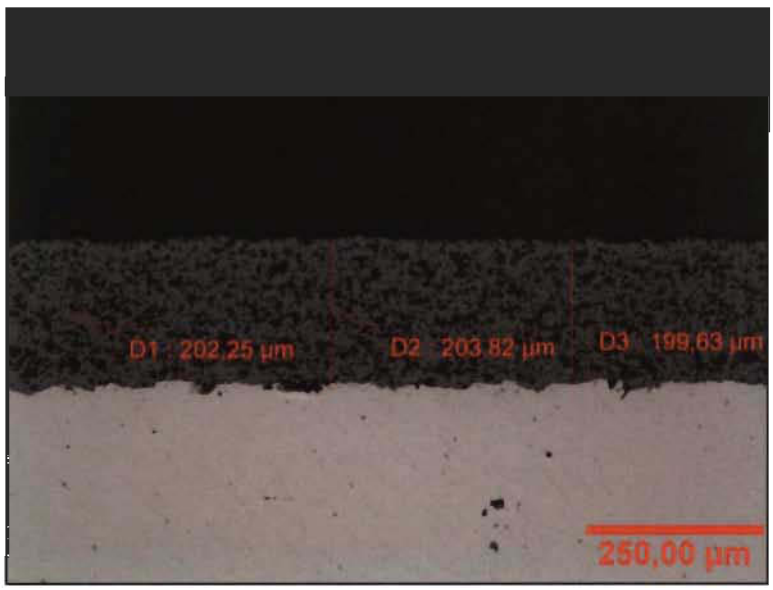


Figure B.38 Métallographie échantillon CRO174M1-14

Figure B.39 Métallographie échantillon Ni122-1

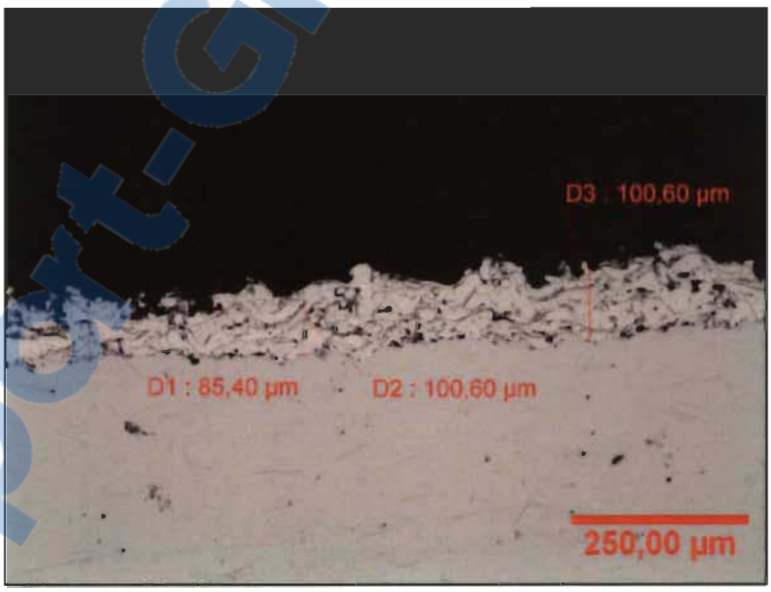


Figure B.40 Métallographie échantillon Ni122-2

Rapport-Gratuit.com

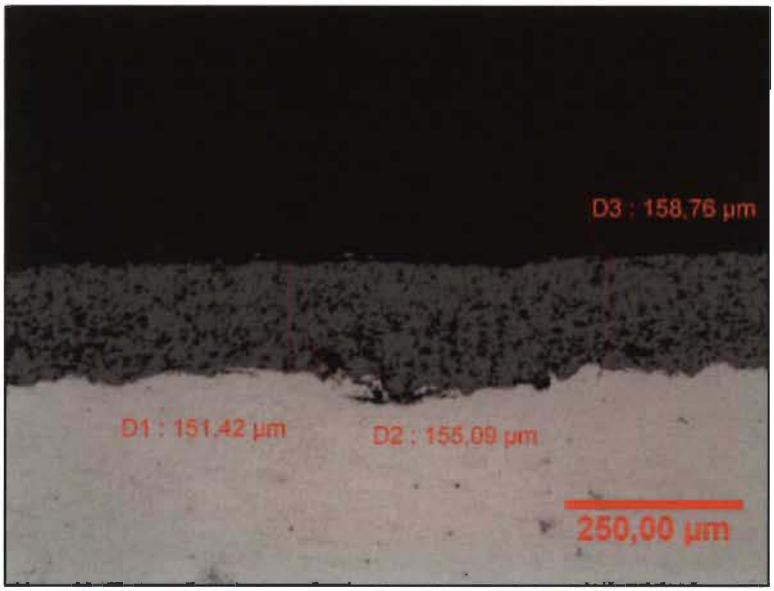


Figure B.41 Métallographie échantillon CRO174-9

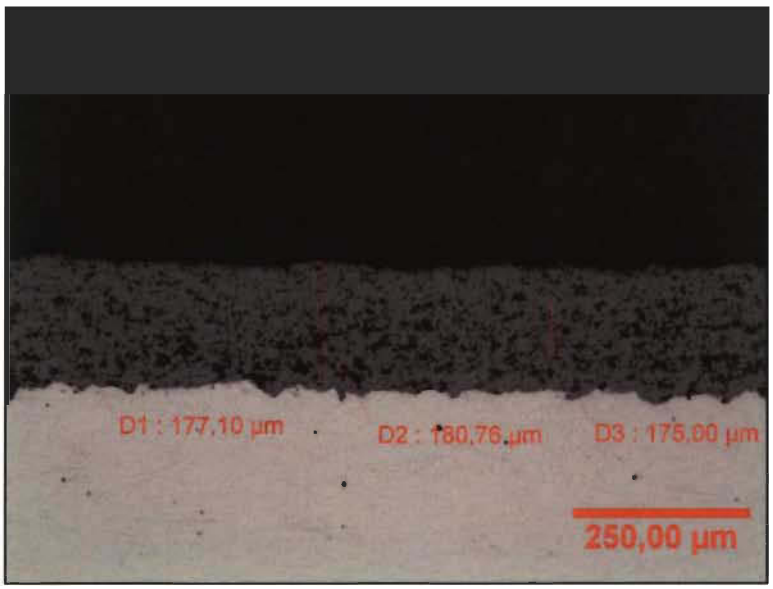


Figure B.42 Métallographie échantillon CRO174-10

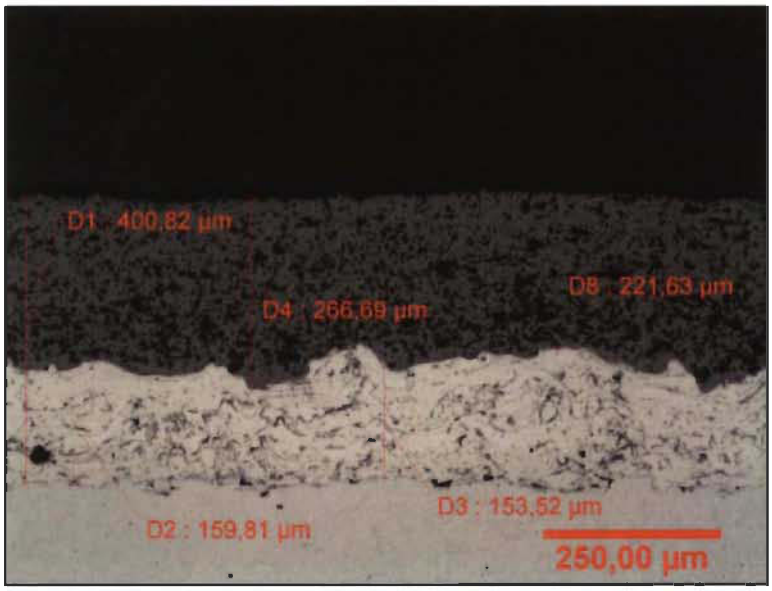


Figure B.43 Métallographie échantillon N122C174-1

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Annexe C - Produits d'étanchéité

HIGH TEMPERATURE THERMAL SPRAY SEALANTS

Technical Bulletin A5-S3

PRODUCT HIGHLIGHTS

542 — Single part, low viscosity, water-dispersed, aluminum phosphate solution for penetrating ultra fine thermal spray applications to 3000 °F (1650 °C).

503-VFG-C — Single part, alumina-filled, phosphate-bonded, abrasion and corrosion resistant sealer for thermal spray applications to 3000 °F (1650 °C).

CP2000 — Single part, urethane-based, gloss black, low viscosity, room temperature curing, abrasion and corrosion resistant sealer for applications to 400 °F (204 °C).

CP2070 — Two part, novolac-epoxy with exceptional abrasion and corrosion resistance for continuous operations to 300 °F (150 °C) and intermittent use to 400 °F (204 °C).

CP4010 — Single part, silicone-based, low viscosity, heat-curable, aluminum-filled sealer offering exceptional moisture resistance to 1100 °F (593 °C).

Ceramacoat™ 503-VFG-C applied to thermal spray substrate.

THERMAL SPRAY SEALERS

Type	INORGANIC	INORGANIC	URETHANE	NOVOLAC-EPOXY	SILICONE
Product Number	542	503-VFG-C	CP2000	CP2070	CP4010
Tradename	Ceramabind™	Ceramacoat™	Corr-Paint™	Corr-Paint™	Corr-Paint™
Color (cured)	Clear	White ⑥	Gloss Black	Gray	Aluminum
Maximum Temperature °F (°C)	3000 (1650)	3000 (1650)	400 (204)	300 (150)	1100 (593)
No. Components	1	1	1	2	1
Mix Ratio, by weight (by volume)	NA	NA	NA	100:42 (2:1)	NA
Viscosity, cP ①	35-45	5,000-7,000	200-240	800-1000	200-600
Specific Gravity, g/cc	1.47	2.34	1.05	1.10	1.05
Solids by Weight, %	41.0	76.0	67.0	100.0	44.2
Solids by Volume, %	22.0	53.7	49.0	100.0	41.6
WFT, mils (microns) ②	4.54 (115.3)	1.86 (47.3)	2.00 (50.5)	1.00 (25.4)	2.4 (61.0)
DFT, mils (microns) ③	1.00 (25.4)	1.00 (25.4)	1.00 (25.4)	1.00 (25.4)	1.0 (25.4)
Theoretical Dry Film Coverage ④ @ 1 mil, ft²/gal (m²/liter)	353 (8.7)	861 (21.1)	722 (17.7)	1604 (39.3)	611 (14.9)
Curing, Min Air Set, Hrs ⑤	1.0-2.0	1.0-2.0	0.5	8.0	1.0
Curing, Heat Cure, °F, Hrs	200, 1 + 500, 1 + 700, 1	200, 1 + 500, 1 + 700, 1	RT, 24 or 250, 1	RT, 24	450, 1 or 480, 0.75
Application Temperature, °F	50-90	50-90	50-90	50-90	50-120
Thinner	Water	503-T, Water	Hi-Flash Naptha	Xylene	Water
Flash Point, °F/°C	NA	NA	140 (60)	> 200 (93)	>212 (100)
Volatiles, lbs/gal	0.00	0.00	2.86	0.00	0.86
Shelf Life, months	6	6	12	12	6
Storage Temperature, °F	55-85	55-85	40-80	40-90	55-85

Reference Notes

① Viscosity is measured using a Brookfield LV Viscometer.
② Estimated Wet Film Thickness (WFT).
③ Recommended Dry Film Thickness (DFT).
④ Actual coverage will vary depending on material losses during mixing and application.
⑤ Where a value is provided for "Min Air Set", it is recommended that the coating set at room temperature for, at minimum, the specified time prior to curing.
⑥ Available in dark grey and blue.

Abbreviations

NA - Not Applicable
NR - Not Required
DFT - Dry Film Thickness
WFT - Wet Film Thickness

Surface Preparation Notes

All surfaces should be free of oil, grease, dirt, corrosives, oxides, paints or other foreign matter. No further preparation is required when coating ceramics, refractories or graphites. Quartz should be sandblasted whenever possible. Smooth metal surfaces should be sandblasted or etched using Aremco's Corr-Prep CPR2000.

Aremco Products makes no warranty express or implied concerning the use of this product. The user assumes all risk of use or handling whether or not in accordance with directions or suggestions, or used singly or in combination with other products.

AREMCO PRODUCTS, INC. P.O. Box 517, 707-B Executive Boulevard, Valley Cottage, NY 10989
(845) 268-0039 • FAX: (845) 268-0041 • *E-mail:* aremco@aremco.com • *Website:* www.aremco.com

Rev. 5/12

Figure C.1 Fiche technique Ceramacoat 503-VFG-C

MASTERBOND EP21ARHT Technical Data Sheet

EP21ARHT Master Bond Polymer System

Two component epoxy adhesive, sealant, coating and encapsulating system

Key Features

- ✓ Exceptional chemical resistance to acids
- ✓ Room temperature curing
- ✓ Serviceable from -60°F to +400°F
- ✓ High bond strength
- ✓ Low viscosity
- ✓ 100% reactive

Product Description

Master Bond EP21ARHT is a two component epoxy resin system for high performance bonding, sealing, coating and encapsulating. It has a convenient 100 to 50 mix ratio by weight and is formulated to cure at ambient temperatures or more quickly at elevated temperatures. It has exceptional resistance to a wide array of chemicals, particularly to acids (a more detailed list appears below). It is especially noteworthy for its resistance to sulfuric and hydrochloric acids.

EP21ARHT is 100% reactive and contains no solvents or diluents. It has very low linear shrinkage upon cure. Also, it has outstanding physical properties and electrical insulation values. EP21ARHT can be used as an adhesive, sealant, coating, potting or encapsulating material. EP21ARHT is especially useful for coating tanks and other vessels that may contain acids. It is serviceable over the wide temperature range of -60°F to +400°F. It adheres well to a wide variety of substrates including metals, glass, ceramics and many rubbers and plastics. The standard version of this system has a lower viscosity with good flow. A non-drip version called EP21ARHTND is also available. Part A is clear and Part B is amber clear. This epoxy compound is widely used in aerospace, electronic, electrical, chemical processing applications and in other applications where chemical resistance to acids is needed.

Product Advantages

- 100% reactive compound does not contain any solvents or diluents
- Versatile cure schedules: ambient temperature cures or fast elevated temperature cures
- High bonding strength to both similar and dissimilar substrates
- Wide temperature service capability from -60°F to +400°F
- Good electrical insulator. Low viscosity. Ideal for potting and encapsulation
- Outstanding chemical resistance, particularly to acids

Typical Properties

Hardness, 75°F	>75 Shore D
Tensile lap shear strength, aluminum to aluminum, 75°F	2,500 psi
Tensile strength, 75°F	>9,000 psi
Volume resistivity, 75°F	$>10^{14}$ ohm-cm
Dielectric constant, 75°F, 60 Hz	3.8
Dielectric strength, 75°F, (1/8" test specimen)	440 volts/mil
Coefficient of thermal expansion	40-45 x 10^{-6} in/in/°C
Service temperature range	-60°F to +400°F [-51°C to +204°C]

Figure C.2 Fiche technique Master Bond EP21ARHT

MASTERBOND EP21ARHT Technical Data Sheet

Mixing and Curing

Mixing ratio, Part A to B	100:50 by weight
Viscosity of Part A, 75°F	60,000-110,000 cps
Viscosity of Part B, 75°F	4,000-6,000 cps
Working life after mixing, 75°F; 100 gram batch	30-50 minutes
Cure schedule options	
75°F	24-48 hours
200°F	2-3 hours
Optimum cure schedule	Overnight at 75°F followed by 2-3 hours at 200°F
Shelf life at 75°F, in original, unopened containers	1 year

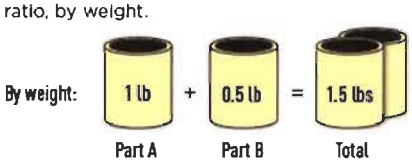
Chemical Resitance Data

EP21ARHT was tested as a coating of about 0.020 inches thick on sand blasted steel. It was cured for 24 hours at 75°F followed by 2-3 hours at 200°F. The system was then immersed in the following chemicals.

> 360 Days No Failures Observed after 14 Months, Test Discontinued				
Butyl Acetate	Cellosolve	Distilled Water	Ethanol	Hydrochloric Acid (10%)
Hydrochloric Acid (20%)	Nitric Acid (10%)	Nitric Acid (15%)	Phosphoric (10%, 20%, 30%)	Potassium Hydroxide (50%)
Sulfuric Acid (10%)	Sulfuric Acid (30%)	Sulfuric Acid (70%)	Sulfuric Acid (96-98%)	
1-6 Months Adversely Affected—Softened, Weight Gain or Loss				
Acetic Acid (50%)	Chromic Acid (30%)	Formic Acid	Hydrofluoric Acid (Concentrated)	Nitric Acid (Concentrated)

Preparation of Adhesive

Master Bond EP21ARHT is prepared for use by thoroughly mixing Part A with Part B in a convenient 100 to 50 mix ratio, by weight.



Mixing should be carried out slowly to avoid entrapping air. The working life of a mixed 100 gram batch is about 30-50 minutes. It can be significantly lengthened by using shallower mixing vessels or mixing smaller size batches.

Preparation of Bonding Surfaces

For bonding and sealing uses, surfaces should be carefully cleaned, degreased and dried to obtain maximum bond strengths. When bonding to metal surfaces, chemical etching or mechanical abrading should be employed so that the bonded joints exhibit optimal properties. In fact, most substrates should be roughened with sandpaper, emery paper or mechanically abraded to maximize adhesion.

Adhesive Application

EP21ARHT can be conveniently applied with a roller, brush or spatula. When coating, enough mixed material should be applied to obtain a final coating thickness of 10-20 mils for durable service. However, certain applications may require thicker coatings for optimal performance. As an adhesive, a bond line thickness of 4-6 mils is usually sufficient. Thicker glue lines do not increase the strength of a joint but do not necessarily give lower strengths because the EP21ARHT system does not contain any volatiles. The parts to be bonded should be pressed together with just enough pressure to maintain intimate contact during cure. Care should be taken not to squeeze out the material when fixturing. When used for potting, vacuum degassing may be needed to remove any air bubbles.

Figure C.2 Fiche technique Master Bond EP21ARHT (suite)

Cure

EP21ARHT can be cured at room temperature or more rapidly at elevated temperatures. At room temperature, EP21ARHT cures in 24-48 hours. Faster cures can be realized at elevated temperatures, e.g 2-3 hours at 200°F. As mentioned previously, it is recommended to cure overnight at room temperature followed by a post cure for 2-3 hours at 200°F to optimize its chemical resistance. Thinner bond lines cure more slowly at room temperature than thicker ones. Remove any excess epoxy compound promptly before it hardens, wipe with a rag and solvent such as acetone, toluene, or xylene.

Packaging

Product is available in:

- 1/2 Pint kits
- Pint kits
- Quart kits
- Gallon kits
- 5 Gallon kits

EP21ARHT is also available for use with a gun dispenser.

Handling and Storage

All epoxies should be used with good ventilation and skin contact should be avoided. For safe handling details, please consult the product MSDS. Optimum storage is at or below 75°F in closed containers. No special storage conditions are necessary. Containers should, however, be kept closed when not in use to avoid contamination. Cleanup of spills and equipment is readily achieved with aromatic or ketone solvents employing proper precautions of ventilation and flammability.

Certifications

RoHS COMPLIANT

Not to Be Used for Specification Purposes

The values contained herein are considered typical properties only and are not intended to be used as specification limits. For assistance in preparing specifications, please contact Master Bond technical support for further details.

Notice

Master Bond believes the information on the data sheets is reliable and accurate as is technical advice provided by the company. Master Bond makes no warranties, expressed or implied, regarding the accuracy of the information, and assumes no liability regarding the handling and use of this product.

117C13

Figure C.2 Fiche technique Master Bond EP21ARHT (suite)

EP62-1 Master Bond Polymer System

Two component epoxy resin system features excellent physical strength properties

Key Features

- ✓ Superior resistance to a wide variety of chemicals, even at high temperatures
- ✓ Very long pot life at ambient temperatures
- ✓ Rapid cures at moderately elevated temperatures
- ✓ Exceptional temperature resistance to 450°F

Product Description

Master Bond EP62-1 is a two component epoxy system that has an exceptionally long working life at ambient temperatures and cures rapidly at moderately elevated temperatures. It has a very forgiving 100 to 10 mix ratio by weight. The pot life of 100 grams is greater than 12 hours. Typical cure schedules range from 4-6 hours at 60-70°C, 20-40 minutes at 80-100°C or 10 minutes at 125°C. The cured epoxy resin exhibits remarkably high thermal stability with a glass transition temperature ranging from 160-165°C. Also noteworthy is its outstanding chemical resistance to acids, bases, many solvents and other chemicals, even at elevated temperatures (as listed in the table below). This system has excellent electrical insulation properties. The color of Part A is clear and Part B is dark brown in color. EP62-1 is primarily used as an adhesive, sealant and coating where a long open time is desirable and where the epoxy will be exposed to very aggressive conditions.

Product Advantages

- Easy to use, very forgiving 100 to 10 mix ratio by weight (will fully cure using 100 to 5 mix ratio)
- Superb electrical insulation properties
- Contains no solvents
- Outstanding dimensional stability

Typical Properties

Elongation, 75°F	<2%
Glass transition temperature (T_g)	160-165°C
Volume resistivity, 75°F	>10^{14} ohm-cm
Tensile lap shear strength, aluminum to aluminum, 75°F	>2,300 psi
Tensile strength, 75°F	>8,500 psi
Tensile modulus, 75°F	500,000-550,000 psi
Hardness, 75°F	>80 Shore D
Dielectric constant, 75°F, 60 Hz	3.25
Service temperature range	-60°F to +450°F [-51°C to +232°C]

Figure C.3 Fiche technique Master Bond EP62-1

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Mixing and Curing

Shelf life at 75°F, in original unopened containers	1 year
Mixing ratio, Parts A to B	100:10 by weight
Viscosity of Part A, 75°F	10,000-14,000 cps
Viscosity of Part B, 75°F	100-1,000 cps
Viscosity of mixed compound, 75°F	4,000-8,000 cps
Working life after mixing, 75°F; 100 gram batch	>12 hours
Cure schedule options	
60-70°C	>4-6 hours
80-100°C	20-40 minutes
125°C	10 minutes

Special Chemical Resistance Data

Below is a partial list of chemical resistance for EP62-1 as a 0.010" coating under a 1 month immersion:

Resistant at 180°F, Immersion >30 Days

Hydrochloric acid (10%)	Sodium chloride (50%)	Ethyl acetate	Methanol
Phosphoric acid (50%)	Sodium hydroxide (50%)	Ammonium hydroxide	Ethanol
Sulfuric acid (10%)	Potassium hydroxide (50%)	Hydrogen peroxide (99%)	MEK
Sulfuric acid (70%)	Toluene	Distilled water	Jet fuel

Preparation of Adhesive & Bonding Surface

Please note: The curing agent, Part B, for the EP62-1 system is a super-cooled liquid which can crystallize if it is thermally or physically shocked. If crystallization has occurred, heat the material to around 120°F to liquefy. The compound will remain in the liquid form after addition to the epoxy resin, Part A. Master Bond Polymer System EP62-1 is prepared for use by thoroughly mixing Part A with Part B in a non-critical 100 to 10 mix ratio by weight. Mixing should be done slowly to avoid entrapping air. The working life of a mixed 100 gram batch is greater than 12 hours. It can be further lengthened by using shallow mixing vessels or mixing smaller size batches. All bonding surfaces should be carefully cleaned, degreased and dried to obtain maximum bond strength. Certain metal or plastic surfaces should be mechanically or chemically etched in order to maximize bond strength.

Adhesive Application

For bonding or sealing, EP62-1 can be conveniently applied with a brush or paint roller. Enough mixed adhesive should be applied to obtain an adhesive bond line thickness of 4-6 mils. Porous surfaces may require somewhat more adhesive to fill the voids than non-porous ones. Thicker glue lines do not increase the strength of a joint but do not necessarily give lower results since EP62-1 does not contain any volatiles. The parts to be bonded should then be pressed together with just enough pressure to maintain intimate contact during cure. Care should be taken not to squeeze out adhesive during fixturing.

Cure

Master Bond EP62-1 cures at moderately elevated temperatures as desired. Typical cure conditions range from 4-6 hours at 60-70°C, 20-40 minutes at 80-100°C or 10 minutes at 125°C. Another option to minimize flow after application is to allow EP62-1 to cure at room temperature for 12-24 hours, followed by an elevated temperature cure.

Packaging

Product is available in:

- 1/2 Pint kits
- Pint kits
- Quart kits
- Gallon kits
- 5 Gallon kits

Specialty packaging also is available in gun kits, and premixed & frozen syringes.

Figure C.3 Fiche technique Master Bond EP62-1 (suite)

Handling and Storage

All epoxy resins should be used with good ventilation and skin contact should be avoided. For safe handling details, please consult the product MSDS. Optimum storage is at or below 75°F in closed containers. No special storage conditions are necessary. Containers should, however, be kept closed when not in use to avoid contamination. Cleanup of spills and equipment is readily achieved with aromatic or ketone solvents employing proper precautions of ventilation and flammability.

Certifications

RoHS COMPLIANT

Not to Be Used for Specification Purposes

The values contained herein are considered typical properties only and are not intended to be used as specification limits. For assistance in preparing specifications, please contact Master Bond technical support for further details.

Notice

Master Bond believes the information on the data sheets is reliable and accurate as is technical advice provided by the company. Master Bond makes no warranties, expressed or implied, regarding the accuracy of the information, and assumes no liability regarding the handling and use of this product.

A07C14

Figure C.3 Fiche technique Master Bond EP62-1 (suite)