



Avis de Soutenance

Monsieur Libin LALU KOITHARA

Présentera ses travaux en soutenance

Soutenance prévue le **mercredi 16 décembre 2020** à 14h00

Lieu : UTBM Site de Sévenans, 90010 Belfort cedex

Salle : P228

Titre des travaux : Caractérisation et prédiction du rendement de projection lors du procédé de projection à froid – cas de la métallisation des polymères

Ecole doctorale : SPIM - Sciences Physiques pour l'Ingénieur et Microtechniques

Section CNU : 28

Unité de recherche : Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne

Directeur de thèse : Sophie COSTIL

Codirecteur de thèse : Rija Nirina RAOELISON HDR NON HDR

Soutenance : Publique A huis clos

Membres du jury :

<u>Nom</u>	<u>Qualité</u>	<u>Etablissement</u>	<u>Rôle</u>
M. Gilles MARIAUX	Professeur	ENSIL-ENSCI	Examineur
M. Francesco DELLORO	Maître de recherche	Mines ParisTech	Examineur
Mme Sophie COSTIL	Professeur	Université de technologie de Belfort-Montbéliard	Directrice de thèse
M. Rija Nirina RAOELISON	Maître de conférences	Université de technologie de Belfort-Montbéliard	Co-directeur de thèse
M. Vincent GUIPONT	Professeur associé	Mines ParisTech	Rapporteur
M. Bertrand JODOIN	Professeur	Université d'Ottawa	Rapporteur

Mots-clés : Projection à froid, Rendement de projection, Dispersion, Analyse CFD, Métallisation des polymères, Conductivité électrique

Résumé de la thèse (en français) :

Ce travail de thèse porte sur la métallisation de substrat polymère par projection à froid en visant un rendement de dépôt optimal à l'aide d'une analyse expérimentale combinée à la simulation numérique. Les observations expérimentales du jet de poudre à l'aide d'une analyse ombroscopique ont permis de révéler un comportement générique constitué d'une zone confinée uniforme en sortie immédiate de la buse suivi d'une zone dispersée. Le flux supersonique en sortie de la buse étant essentiellement axial, les poudres sont entraînées pour former un jet uniforme. Au-delà d'une certaine distance, une dispersion apparaît. Cette distance est très importante car elle caractérise le comportement des poudres. Elle peut altérer les conditions d'élaboration des revêtements dès lors qu'une déviation de la trajectoire des poudres peut conduire à des collisions obliques sur la surface du substrat et réduire la composante normale de la vitesse de collision. Il a été clairement observé que cette distance critique est influencée par la combinaison de la densité et du diamètre des poudres (ρpD_p) bien qu'il n'y ait pas de tendance généralisable lorsqu'on étend l'étude sur une large variance de ρpD_p . Une étude par une simulation CFD a permis de mieux comprendre le comportement phénoménologique de l'écoulement fluide/poudres. En sortie de buse, le cisaillement de l'air environnant par le jet supersonique crée des tourbillons auto-entretenus qui génèrent une oscillation des propriétés locales du fluide. Cette turbulence est répétitive et produit une instabilité dans les parties supérieure et inférieure de l'écoulement. La force de traînée exercée par le fluide n'est pas à l'origine de la déviation radiale de la trajectoire des poudres. Du point de vue phénoménologique, c'est la considération d'un effet Magnus qui permet de reproduire qualitativement et aussi quantitativement la dispersion expérimentale. Le diamètre simulé du jet de poudre correspond relativement bien au diamètre expérimental et corrobore en cela le rôle de l'effet Magnus. Les poudres de tailles fines sont moins sensibles à cet effet. Cette sensibilité mérite toutefois une analyse plus approfondie. Néanmoins, la compréhension de cette phénoménologie cinématique des poudres a permis d'expliquer la limitation du rendement de projection à basse pression et de montrer la nécessité de travailler à des pressions plus élevées pour permettre une croissance optimale du revêtement. La métallisation du PEEK à haute pression a donc pu être entreprise avec les conditions opératoires qui évite la détérioration du substrat. Les paramètres de projection ont été ensuite ajustés pour passer d'un rendement de 70% à un seuil maximal de 91%. L'ajustement des paramètres consiste à réduire les phénomènes d'érosion ou de délaminage. Un manque de vitesse favorise l'érosion et une vitesse trop importante provoque un écaillage dès lors que l'adhésion du revêtement est constituée d'une couche interfaciale de cohésion médiocre (8MPa). Suivant les meilleures conditions d'élaboration, des taux de porosité inférieurs à $0,27 \pm 0,179\%$ et d'oxydes de $2,21 \pm 1,150\%$ ont été obtenus. Les mesures de conductivité électrique ont montré des valeurs relativement bonnes (62,3% IACS). Si l'obtention d'un rendement supérieur à 90% est dorénavant possible avec une projection à froid à haute pression, la problématique de l'adhérence interfaciale reste néanmoins un facteur limitant qui conduit à de nouvelles perspectives d'amélioration de la métallisation de substrats organiques.

Abstract (in English):

This thesis work deals with the cold spray metallization of polymer substrates by aiming at an optimal deposition efficiency using experimental analysis combined with numerical simulation. Experimental observations of the powder jet using an ombroscopic analysis have revealed a generic behavior consisting of a uniform confined zone at the immediate exit of the nozzle followed by a dispersed zone. The supersonic flow at the nozzle exit being essentially axial, the powders are entrained to form a uniform jet. Beyond a certain distance, a dispersion appears. This distance is very important because it characterizes the behavior of the powders. It can alter the conditions for the elaboration of coatings since a deviation of the powder trajectory can lead to oblique collisions on the substrate surface and reduce the normal component of the collision speed. It has been clearly observed that this critical distance is influenced by the combination of powder density and diameter (ρpD_p) although there is no generalizable trend when extending the study over a large

variance of $ppDp$. A CFD simulation study has provided a better understanding of the phenomenological behaviour of the fluid/powder flow. At the nozzle outlet, the shearing of the surrounding air by the supersonic jet creates self-sustaining vortices that generate an oscillation of the local properties of the fluid. This turbulence is repetitive and produces instability in the upper and lower parts of the flow. The drag force exerted by the fluid does not cause the radial deviation of the powder trajectory. From a phenomenological point of view, it is the consideration of a Magnus effect that allows to reproduce qualitatively and also quantitatively the experimental dispersion. The simulated diameter of the powder jet corresponds relatively well to the experimental diameter and thus corroborates the role of the Magnus effect. Powders of fine sizes are less sensitive to this effect. However, this sensitivity deserves further analysis. Nevertheless, the understanding of this powder kinematic phenomenology has helped to explain the limitation of the spray yield at low pressure and to show the necessity to work at higher pressures to allow an optimal growth of the coating. The metallization of PEEK at high pressure could therefore be undertaken with operating conditions that avoid substrate deterioration. The spraying parameters were then adjusted from an efficiency of 70% to a maximum threshold of 91%. The adjustment of the parameters consists in reducing the phenomena of erosion or delamination. A lack of speed favours erosion and too high a speed causes spalling when the coating adhesion is made up of an interfacial layer of poor cohesion (8MPa). According to the best processing conditions, porosity rates of less than $0.27 \pm 0.179\%$ and oxides of $2.21 \pm 1.150\%$ were obtained. Electrical conductivity measurements showed relatively good values (62.3% IACS). If the achievement of an efficiency higher than 90% is now possible with cold spraying at high pressure, the problem of interfacial adhesion remains nevertheless a limiting factor that leads to new perspectives for improving the metallization of organic substrates.