

Plasmonic microcapsules for local strain sensing in heterogeneous media

Karl Vincent ALVAREZ ^a, Laurent CORTÉ ^b, and Rémi DREYFUS ^c

^a Chimie Moléculaire, Macromoléculaire, Matériaux (C3M), ESPCI Paris – PSL, Paris 75005, France

^b Centre des Matériaux, Mines ParisTech – PSL, Versailles 78000, France

^c Institut Interdisciplinaire d'Innovation Technologique (3IT), Université de Sherbrooke, Sherbrooke J1K 2R1, Canada

Probing local, microscale strains is highly instructive for the mechanical characterization of soft heterogeneous materials like biological tissues and complex fluids. In recent works, hollow microcapsules (MCs) made from the hierarchical assembly of plasmonic gold nanoparticles (AuNPs) have shown potential as local strain sensors.^{1,2} The deformation-sensitive response of these MCs comes from visible color changes when the distance between AuNPs on the capsule crust are modulated with mechanical stimuli. However, the application of such strain microsensors to heterogeneous materials is hindered by the scattering of visible light. In this study, we propose to modify MCs and enhance their optical sensing capabilities by incorporating fluorophores whose absorption-emission spectra are to be altered by the presence of the AuNP shell. In such objects, a complex opto-mechanical coupling between the fluorescence and plasmonic effects is expected that has thus far not been studied. For that, we first modify the synthesis of the MCs and include a soft elastomeric core to both adjust their mechanical properties and introduce a fluorophore (Fig 1A). We show that changing the volume ratio between the components of the core and the crust affects the packing of the AuNPs and their optical properties (Fig 1B). In a second step, we then graft a fluorophore within the elastomeric core. We currently investigate how the fluorescence behavior changes under the application of mechanical strains.

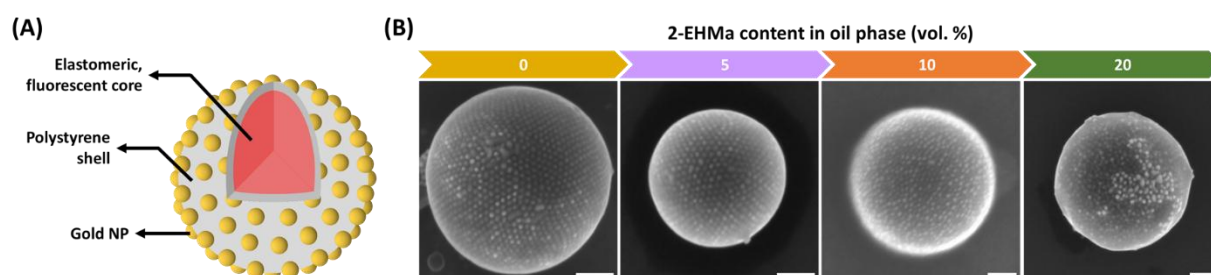


Fig. 1. Schematic illustration of a plasmonic MC (A). SEM micrographs of Au capsules formed with formulations of varying 2-EHMa (elastomer precursor) content (B). Scale bars: 100 nm

References :

1. Burel, Céline. A. S. *et al.* Plasmonic-Based Mechanochromic Microcapsules as Strain Sensors. *Small* **13**, 1701925 (2017).
2. Kim, J.-H. *et al.* Polymer-Grafted, Gold Nanoparticle-Based Nano-Capsules as Reversible Colorimetric Tensile Strain Sensors. *Small* **19**, 2300361 (2023).

DELLORO Francesco, LEBBAR Inass

ABSTRACT Séminaire :

TITRE : Vers un modèle numérique multi-échelle du Cold Spray

Le procédé Cold Spray suscite un intérêt croissant dans l'industrie, notamment pour des applications de fabrication additive et de réparation sur des pièces métalliques, sans les contraintes thermiques liées à la fusion. Ce procédé repose sur la projection à grande vitesse de particules métalliques solides, qui adhèrent au substrat par plastification à l'impact.

Si de nombreux travaux de modélisation se sont penchés sur le Cold Spray, l'essentiel des modèles macroscopiques disponibles aujourd'hui sont purement géométriques : ils permettent de prédire la forme globale d'un dépôt, en fonction de la trajectoire de la buse, mais ne tiennent pas compte de la porosité, ni des champs thermomécaniques. Cette limitation devient critique lorsque l'on cherche à modéliser des dépôts sur des pièces de géométrie complexe ou à optimiser les propriétés fonctionnelles du matériau déposé.

Nous nous proposons donc, de développer un modèle macroscopique du procédé *Cold Spray*, par une approche multi-échelle qui permettra de prédire non seulement le dépôt de matière, mais aussi les champs thermomécaniques et la formation de porosité. Pour ce faire, la démarche repose sur trois étapes. La première consiste à caractériser le comportement mécanique des particules de la poudre à travers des essais de micro-compression (régime statique) et d'impact dynamique de particules individuelles, afin d'ajuster les paramètres de la loi de comportement de Johnson-Cook. La deuxième étape vise à simuler par éléments finis l'impact successif de plusieurs particules sur un même substrat, pour étudier la formation d'un volume représentatif du dépôt et suivre la formation de porosité et l'évolution des champs thermomécaniques. Enfin, ces résultats alimenteront un modèle macroscopique simplifié, capable de prédire la géométrie du dépôt et ses propriétés locales.

Composite à matrice acier renforcé de particules de TiC par fabrication additive DEDp et L-PBF

Samuel El Haddaoui¹, Christophe Colin², Zehoua Hamouche¹, Sylvain Dépinoy², Patrice Peyre¹

¹ Laboratoire PIMM, Arts et Métiers, CNRS, CNAM, Paris 75013, France

² MINES Paris, Université PSL, MAT - Centre des Matériaux, 91003, Evry, France

Les composites à matrice métallique (CMM) présentent de bonnes propriétés mécaniques, de stabilité thermique ainsi que de résistance à l'usure. Ces matériaux sont actuellement employés pour la fabrication de revêtements durs pour disques de freins, d'outils de coupe, d'arbres de transmission ainsi que d'engrenages. Les procédés de mise en forme actuels à partir de poudres (moulage par injection, procédé d'infiltration, frittage en phase liquide ou par pressage isostatique à chaud et dépôt par pulvérisation) posent des limites concernant la complexité géométrique des pièces réalisables car l'ensemble de ces procédés demandent un outillage spécifique [1].

La fabrication additive (FA) par fusion de poudres composites permet, quant à elle, de réaliser des géométries complexes. Deux procédés de FA s'imposent comme de bons candidats : la fusion laser sur lit de poudre L-PBF (pour la fabrication de pièces complexes) et la fusion de poudre projetée (DEDp) (pour la réparation par rechargement local ou la réalisation de matériaux à gradient de composition ou de dureté). Cependant, des travaux récents ont soulevé plusieurs difficultés lors de la mise en œuvre de matériaux par fabrication additive : 1) répartition hétérogène des renforts, 2) améliorer le compromis entre résistance mécanique et ductilité, 3) mauvaise cohésion à l'interface entre les renforts et la matrice [2].

Ces travaux de thèse visent en partie à apporter des solutions à ces problématiques dans le cas des procédés L-PBF et DEDp. Une comparaison entre ces deux procédés a alors été effectuée. Un acier à cémentation 16NCD13 a été choisi comme matrice, au vu de précédents travaux montrant un durcissement important sur la dernière couche projetée par DEDp [3],[4]. La poudre 16NCD13 de morphologie sphérique a été réalisée par atomisation au gaz. La poudre aciculaire de TiC de taille micrométrique provient d'un broyage pour le DEDp (15 - 30 μm) alors que celle retenue pour le L-PBF est de taille nanométrique (35 - 55 nm). Les poudres composites pour les deux procédés ont été élaborées avec un même taux de renforts de 5 % vol. soit 3,2 % pds. permettant une augmentation significative de la dureté pour l'application visée soit la cémentation profonde. Les particules nanométriques de TiC ont été incrustées à la surface des particules sphériques de 16NCD13 (Figure 1b), grâce à un mélangeur à pale Cyclomix, permettant d'obtenir une répartition homogène de renfort dans la matrice pour le L-PBF. Pour le DEDp, un simple mélange peu énergétique de deux poudres, l'une atomisée (16NCD13) et l'autre broyée (TiC) de taille équivalente a été réalisé au Turbula (Figure 1a). Les poudres composites en vol et celles constituant le lit de poudre ont été caractérisées via des méthodes adaptées à chacun des procédés (nappe laser pour le DEDp et essai rhéologique pour le L-PBF). Puis l'aptitude à leur mise en œuvre par FA a été étudiée via des études « monocordons » puis des constructions 3D. Les défauts de FA et l'état microstructurale ont été identifiés sur des constructions 3D.

Les premiers résultats (Figure 2) montrent une dureté importante (~600 HV) dans l'ensemble du volume de la pièce pour le L-PBF et uniquement à la surface supérieure de la pièce pour le DEDp qui présente alors un gradient de dureté entre 200 et 600 HV. *In fine*, des propriétés de résistance à l'usure et de traction ont été évaluées.

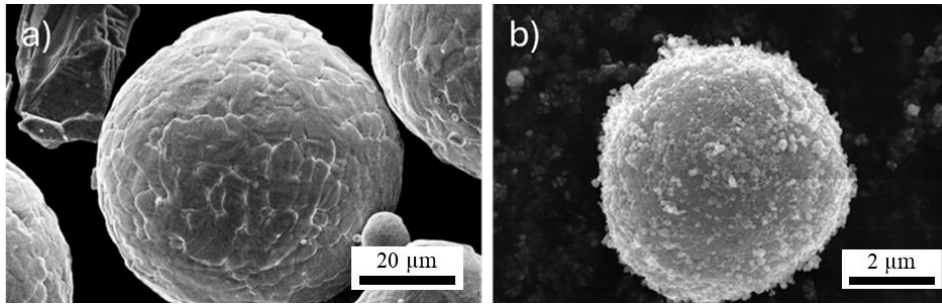


Figure 1 : Micrographies MEB de poudres composites: a) mélange de 2 poudres de taille équivalente entre TiC (aciculaire) et acier (sphérique) pour le DEDp, b) particule d'acier sphérique avec des nanoparticules de TiC « greffées » à la surface en plusieurs couches pour le L-PBF.

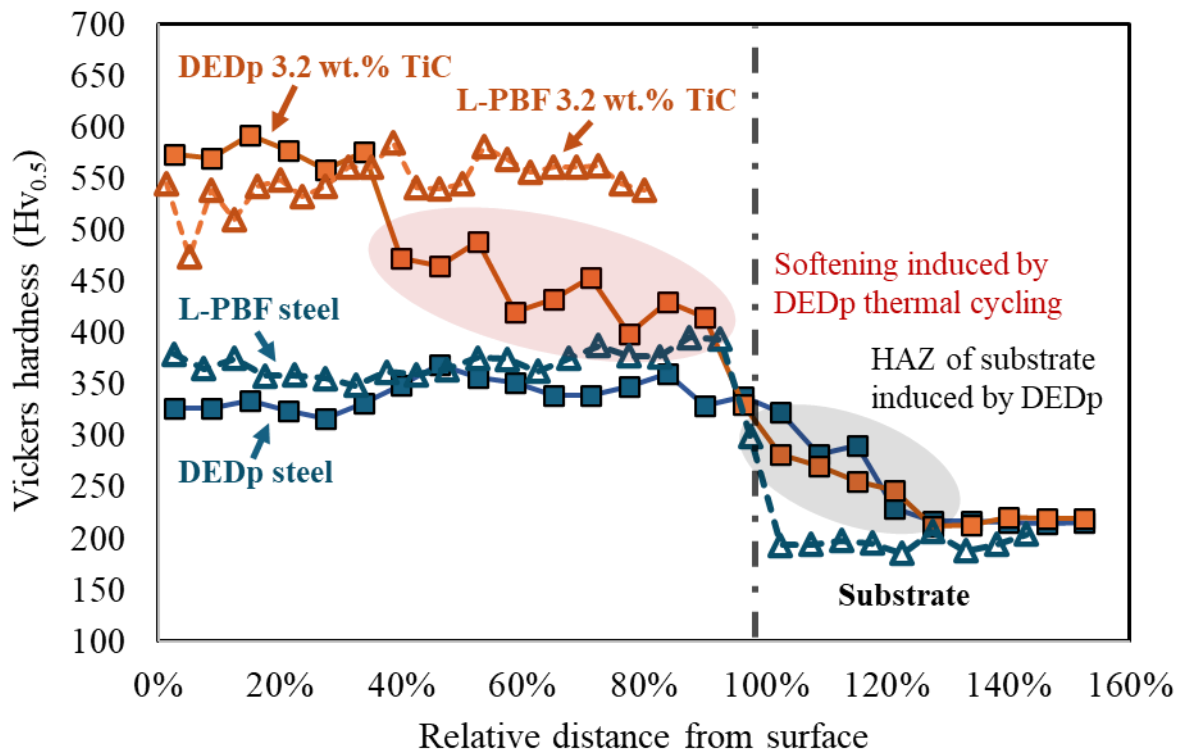


Figure 2 : Profils de dureté Vickers depuis le sommet de la pièce (0 %) jusqu'au substrat recuit en 16NCD13 (>100 %) pour une hauteur de fabrication de 4 mm (composite vs acier, et DEDp vs L-PBF).

[1] Sai Chen, Shuangjie Chu, Bo Mao «Iron-Based Metal Matrix Composite: A Critical Review on the Microstructural Design, Fabrication Processes, and Mechanical Properties» Acta Metallurgica Sinica (English Letters) (2025) 38:1–44 <https://doi.org/10.1007/s40195-024-01758-1>

[2] Yongjian Fang, Min-Kyeom Kim, Yali Zhang, Ziyang Duan, Quan Yuan, Jonghwan Suhr «Particulate-reinforced iron-based metal matrix composites fabricated by selective laser melting: A systematic review Journal of Manufacturing Processes» 74 (2022) 592–639 633 <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.12.018>

[3] Nicolas Richardeau, Christophe Colin, Karine Vieilleigne 'Fabrication et caractérisation de matériaux avancés (Nicomic C263 et 16NCD13/TiC) mis en œuvre par projection laser pour l'industrie aéronautique' internship report 2010.

[4] D. Novichenko, L. Thivillon, Ph. Bertrand, I. Smurov 'Carbide-reinforced metal matrix composite by direct metal deposition' *Physics Procedia*.5 (2010), 369-377
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1875389210005845>

Influence des paramètres du procédé « High-Speed-Laser-Cladding » sur les caractéristiques métallurgiques de nouveaux revêtements pour disques de freins

Justine LEQUIN-SOUCHON^{1,2}, Anne-Françoise GOURGUES-LORENZON¹, Christophe COLIN¹

¹ : Centre des Matériaux, MINES Paris, Université PSL, CNRS UMR 7633, Versailles, France

² : RENAULT, Centre Technique Chassis, Le Mans, France

Le transport routier constitue la principale source de pollution de l'air en milieu urbain. À partir de 2027, la norme Euro 7 imposera pour la première fois une limitation des émissions de particules issues du freinage, avec un seuil fixé à 7 mg/km pour les PM10 (particules de taille inférieure à 10 µm), contre plus de 20 mg/km actuellement, représentant un défi majeur pour l'industrie automobile.

Dans ce contexte, l'amélioration des performances des disques de frein passe par l'application d'un revêtement dur capable de résister à des sollicitations thermo-mécaniques élevées. Les composites à matrice métallique renforcée par des particules céramiques présentent un fort intérêt en raison de leur dureté élevée et de leur stabilité thermique. Leur intégration par laser cladding (LC), procédé reposant sur la fusion localisée sous faisceau laser à large spot, permet d'obtenir des revêtements épais et denses à forte adhérence métallurgique avec le disque de frein en fonte lamellaire. De nombreux travaux ont été menés sur le procédé laser-cladding mais rarement dans des conditions extrêmes de puissance et de vitesse laser (HSLC) dans le cas d'une application en très grande série associée à des critères de qualité stricts et exigeants et une très forte productivité.

Afin d'étudier l'influence des paramètres du procédé LC sur le revêtement, quatre paramètres opératoires ont été sélectionnés : la puissance laser P_L , la vitesse linéaire v_l du laser, le débit massique D_m de poudre et l'écart vecteur e_v entre deux traits laser juxtaposés.

Une approche expérimentale basée sur un modèle phénoménologique 1D a permis d'analyser l'effet des paramètres de premier ordre (P_L , v_l , D_m) sur la géométrie et les dimensions du monocordon et de son bain associé. Cette étude a également permis d'identifier les limitations du procédé liées à l'équipement et d'établir une classification des cordons en différentes typologies microstructurales, chacune associée à un degré spécifique de dissolution des carbures de la poudre initiale. Des observations au microscope électronique à balayage (MEB) complétées avec des analyses par spectroscopie à rayons X à dispersion d'énergie (EDS) et des mesures de micro-dureté ont permis une caractérisation fine de chaque typologie.

Des défauts métallurgiques liés au procédé, au disque et à l'élaboration de la poudre ainsi que des phénomènes de dissymétrie et d'hétérogénéité des cordons ont été mis en évidence et corrélés aux interactions laser-poudre en vol.

Les relations établies entre les paramètres opératoires et les critères de sortie (dimensionnels, morphologiques, énergétiques et économiques) apportent une compréhension approfondie du procédé en vue de son optimisation sur une fenêtre plus large de paramètres que celle établie par Renault.

Par la suite, l'étude sera étendue à des revêtements complets de disques nécessitant la prise en compte de l'écart-vecteur afin d'optimiser le taux de recouvrement et l'énergie déposée par le laser. Il sera *in-fine* possible d'évaluer l'impact des différentes microstructures sur les émissions de particules et la résistance au choc thermique.