

Développement de jauges de déformation imprimées pour application aéronautique à haute température

Development of printed strain gauges for high-temperature aeronautical application

Myriam Bouzeggaoui^{1,2}, Valentin Gaubert¹ et Jinkai Yuan²

1 : Pôle DST, S3AR
Safran Tech

Rue des Jeunes Bois - Châteaufort - 78114 Magny Les Hameaux
e-mail : myriam.bouzeggaoui@safrangroup.com et valentin.gaubert@safrangroup.com

2 : Pôle MHP, LCMCP

UMR 7574, Sorbonne Université
Tour 44-43 / Et.4, 4 Place Jussieu 75005 Paris
e-mail : myriam.bouzeggaoui@sorbonne-universite.fr et jinkai.yuan@@sorbonne-universite.fr

Résumé

Certains capteurs utilisés en aéronautique permettent de détecter des déformations dans des zones critiques des moteurs d'avion pouvant atteindre des températures très élevées. Des capteurs conventionnels peuvent être intégrés, mais ils ne peuvent pas supporter les températures de fonctionnement extrêmement élevées et ne sont pas entièrement compatibles avec les surfaces courbes des composants du moteur. Pour réduire les coûts de maintenance tout en améliorant les performances des moteurs d'avion, cette thèse CIFRE vise à développer de nouvelles formulations d'encre fonctionnelles thermiquement stables et résistantes à l'oxydation pour l'impression de jauges de contrainte directement sur des composants aéronautiques 3D situés dans des zones critiques du moteur d'avion. Ces nouveaux capteurs permettront de surveiller en temps réel la façon dont les composants du moteur réagissent aux charges et pourront donc favoriser une évaluation de la sécurité efficacement afin d'assurer une maintenance à temps des composants. Fondamentalement, les mécanismes de stabilité thermique des composants des capteurs à des températures extrêmement élevées seront étudiés. Ce projet de thèse s'appuie sur la collaboration entre Safran Tech de Magny-les-Hameaux et le Laboratoire de Chimie de la Matière Condensée de Sorbonne Université.

Abstract

Some sensors used in the aerospace industry can detect deformation in critical areas of aircraft engines that can reach very high temperatures. Traditional sensors can be integrated, but they cannot suffer extremely high operating temperatures and are not fully compatible with the curved surfaces of engine components. To reduce maintenance costs while improving aircraft engine performance, this CIFRE thesis aims to develop new formulations of thermally stable and oxidation-resistant functional inks for printing strain gauges directly onto 3D aeronautical components located in critical areas of the aircraft engine. These new sensors will help to monitor in real-time how engine components react to mechanical stress, and can therefore help to assess safety effectively to ensure that components are maintained in time. Fundamentally, the mechanisms of thermal stability of sensor components at extremely high temperatures will be investigated. This thesis project is based on the collaboration between Safran Tech at Magny-les-Hameaux and the Laboratoire de Chimie de la Matière Condensée at Sorbonne University.

Mots Clés : Capteur de déformation ; Techniques d'impression ; Encres fonctionnelles ; Nanomatériaux

Keywords: Strain sensor; Printing techniques; Functional inks; Nanomaterials

1. Introduction

1.1 Contexte

Une collaboration est née entre Safran Tech et le Laboratoire de Chimie de la Matière Condensée de Paris (LCMCP) pour répondre à un besoin de détection de déformation sur des pièces moteurs à

forme complexe dans un environnement extrême à des températures avoisinant 1600°C. En effet, les capteurs utilisés actuellement sont des capteurs métalliques qui perdent leur sensibilité à haute température car ils se dégradent. [1] L'utilisation de capteurs à couche mince peut être envisagée pour épouser des formes incurvées, mais même pour des capteurs métalliques comme celui à base de PdCr développé par la NASA GRC, leur stabilité thermique peut être remise en cause. Le capteur avec PdCr a prouvé une utilisation jusqu'à 1100°C mais avec une résistance qui varie en température avec un Coefficient de Température-Résistance de 135 ppm/°C. [2] On peut donc considérer des films à couche mince à base de céramiques dérivées de polymères (PDC, *Polymer-Derived Ceramic*). En solution initiale de polymères, il est facile de la mettre en forme sur des structures non planes et de pyrolyser ensuite pour obtenir la céramique souhaitée présentant des propriétés semi-conductrices, piézoélectriques et de résistance à haute-température et à l'oxydation. [3]

1.2 Objectif

L'objectif de la collaboration sur trois ans est de développer des encres conductrices et des encres protectrices pour pouvoir imprimer par jet d'aérosol des jauges de déformation sur des substrats, résistantes aux hautes températures et à l'oxydation. Il faut donc mener des caractérisations rhéologiques des encres pour les adapter à la technique de jet d'aérosol, caractériser l'adhérence des différentes couches avec le substrat pour assurer l'intégrité du capteur à son support, et évaluer les performances du capteur conçu à température ambiante dans un premier temps, puis à haute température.

2. Méthodologie

2.1 Concept du capteur

L'idée est d'imprimer sur un substrat d'alumine un film protecteur sur lequel la couche conductrice pourra être imprimée. La couche conductrice pourra ensuite être recouverte du même film protecteur et sera liée à des fils métalliques par une soudure résistante à haute température. (Fig. 1)

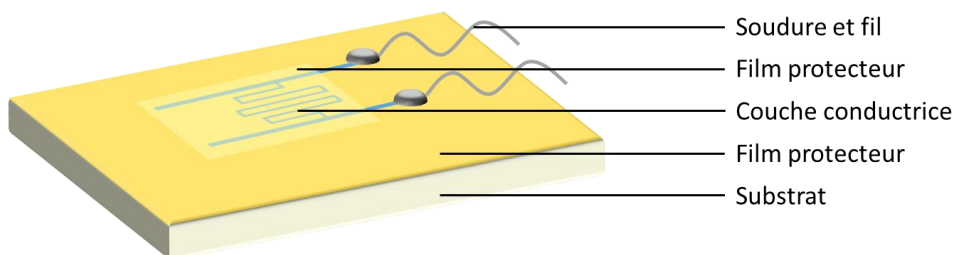


Fig. 1 Schéma de conception du capteur de déformation

Les encres conductrices à tester peuvent être de nature métallique ou composite semi-conducteur. Le composite en question sera une matrice céramique chargée dans ce cas-là sera pour améliorer la conductivité de la couche conductrice.

Le film protecteur sera nécessairement en composite à matrice céramique car certaines céramiques peuvent être réfractaires, et donc apporter une protection à la couche conductrice contre les hautes températures et l'oxydation.

Pour s'assurer d'avoir une adhérence idéale entre les différentes couches et éviter des craquelures lors du frittage, le choix des matériaux se portera sur ceux dont le coefficient d'expansion thermique

sera le plus faible et qui ont une température de fusion élevée pour assurer l'application à haute température.

2.2 Travail à réaliser pendant la 1^{ère} année

Le travail dans un premier temps consiste à choisir les matériaux pour formuler les encres en milieu aqueux. S'ensuit l'étape de formulation puis celle de caractérisations rhéologiques et physico-chimiques des encres. Ensuite, ces encres seront testées avec une technique d'impression jet d'encre piézoélectrique au préalable pour s'assurer de leur faculté à adhérer le substrat. Les propriétés rhéologiques des encres seront ensuite réadaptées pour la technique de jet d'aérosol car les viscosités pour le jet d'encre piézoélectrique et le jet d'aérosol sont différentes. [4]

3. Résultats attendus

Nous prévoyons d'avoir des mesures de densité, de viscosité, de tension superficielle et d'adhérence avec le substrat pour les encres. L'étude de la morphologie de surfaces des premiers capteurs obtenus pourra se faire grâce aux images MEB. Des mesures de résistances électriques et des calculs de facteur de jauge seront aussi réalisés pour déterminer les performances des capteurs conçus. Ces résultats non exhaustifs seront matière à être présentés dans le poster.

4. Conclusion – premiers jalons

Nous venons de commencer à travailler sur le sujet, donc il n'y a pas de résultats concrets pour l'instant. Les résultats attendus seront présentés pour la session poster. Ces résultats vont nous permettre de continuer le projet : après la formulation et la caractérisation des encres, nous pourrions évaluer la stabilité thermique de notre système et déterminer des mécanismes de résistance à l'oxydation.

Références

- [1] Qian, X., Xu, L., Su, L., Tang, L., Ouyang, S., Zhou, X., Wu, M., Wu, C., & Wang, L. (2024). Printing highly sensitive strain gauges with polymer-derived ceramics and In₂O₃ composites for high-temperature applications. *Surfaces And Interfaces*, 55, 105324. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2024.105324>
- [2] Wrbanek, J.D., Fralick, G.C., Gonzalez, J.M., & Laster, K.L. (2008). Thin Film Ceramic Strain Sensor Development for High Temperature Environments.
- [3] Yang, M., Ma, C., Hu, Y., Wang, K., Zhao, R., Liang, Y., Han, D., Wang, H., Zhang, R., & Shao, G. (2024). A Strain- Temperature Integrated Polymer- Derived SiCN Ceramic High Temperature Sensor with Wide- Range and Ultra- Short Response Time. *Advanced Functional Materials*, 34(33). <https://doi.org/10.1002/adfm.202400400>
- [4] Rao, C. H., Avinash, K., Varaprasad, B. K. S. V. L., & Goel, S. (2022). A Review on Printed Electronics with Digital 3D Printing: Fabrication Techniques, Materials, Challenges and Future Opportunities. *Journal Of Electronic Materials*, 51(6), 2747-2765. <https://doi.org/10.1007/s11664-022-09579-7>