

Caractérisation expérimentale du comportement élasto-plastique de films de cuivre utilisés dans les circuits imprimés à haute valeur ajoutée

G. Girard^a, M. Martiny^a, S. Mercier^a, F. Lechleiter^b

a. Université de Lorraine, CNRS, Arts et Métiers ParisTech, LEM3, F-57000 Metz, France

b. CIMULEC, ZI Les Jonquières, 57365 Ennery, France

Résumé :

On s'intéresse dans cet article au comportement élasto-plastique de films de cuivre, notamment sous chargement cyclique. Dans le but de réaliser des simulations prédictives sur des circuits imprimés en fonctionnement, il est nécessaire de connaître avec précision le comportement mécanique du cuivre qui porte l'information électrique. Lors de chargements thermiques, le cuivre est soumis à des chargements alternés en traction-compression, conduisant à de la fatigue oligocyclique. Après un certain nombre de cycles, la rupture du cuivre peut survenir. Un montage expérimental a été mis en place afin d'étudier le comportement des films de cuivre en fatigue. Du fait de la faible épaisseur des films de cuivre (environ 17 μm), il a été nécessaire d'utiliser un substrat de faible rigidité permettant d'entraîner le cuivre en traction-compression. Cette méthode nécessite en revanche une analyse inverse d'exploitation des mesures.

Abstract :

In this article, the elastoplastic and fatigue behavior of copper films used in printed circuit boards is assessed. In order to perform predictive simulations on printed circuit boards during service, it is necessary to know precisely the mechanical behavior of copper, which is the carrier of the electrical information. During cyclic thermal loadings, the copper undergoes alternate tensile-compressive loadings, generating low cycle fatigue. It is therefore necessary to identify the observed kinematic hardening. After a certain number of loading cycles, the copper may break. An experimental setup has been created to study the fatigue behavior of copper films. Since the studied copper film is thin (around 17 μm thick), it has been necessary to use a compliant substrate to induce tension-compression on the copper film. This method requires a reverse analysis to extract the copper behavior from the measurements.

Mots clefs : Cuivre, plasticité cyclique, circuit imprimé

1 Introduction

On s'intéresse dans cette étude aux circuits imprimés multicouches à applications aéronautiques et spatiales. Ces circuits sont constitués d'un empilement de couches isolantes et de couches conductrices

qui communiquent entre elles à travers des structures appelées trous traversants. Les circuits imprimés subissent des chargements thermiques importants, entraînant l'apparition de contraintes thermiques du fait des différences de comportement en expansion thermique des matériaux en présence.

Face à la tendance à la miniaturisation et à des besoins croissants de traitement de données, les fabricants sont poussés à la limite de leur savoir-faire et un recours à la simulation numérique devient nécessaire. Pour cela, il est nécessaire de connaître les comportements mécaniques et en expansion thermique des matériaux en présence. Pour les substrats composites, la difficulté principale est de déterminer leur comportement mécanique orthotrope, et notamment dans la direction hors-plan (Girard et al. [1]). Afin d'être capable de juger de la fiabilité d'un circuit imprimé, il est nécessaire de connaître le comportement du cuivre en plasticité cyclique, ce qui fera le sujet du présent travail.

Plusieurs articles [2, 3, 4, 5, 6, 7] ont étudié le sujet de la fiabilité des trous traversants en utilisant la simulation numérique. La plupart des auteurs [3, 4, 5, 6] ont pour cela étudié le comportement en fatigue du cuivre en soumettant les trous traversants à des cycles thermiques tout en vérifiant la continuité du contact électrique. Fellner et al. [6] ont utilisé le modèle de Chaboche pour représenter le comportement du cuivre dans leurs simulations. Watanabe et al. [7] proposent une éprouvette de fatigue comportant du cuivre électrodéposé sur une éprouvette en époxy, qui permet donc des mesures en fatigue plus fiables.

On trouve beaucoup d'études traitant de la fatigue de films de cuivre : Kraft et al. [8], Ono et al. [9], Hommel et al. [10]. Tous utilisent un substrat pour appliquer le chargement en traction-compression sur le cuivre. Ces études se concentrent généralement sur la fatigue à grand nombre de cycles et non sur la fatigue oligocyclique observée dans les circuits imprimés.

Peu d'études s'intéressent au comportement cyclique de films de cuivre en plasticité. Le comportement des matériaux métalliques en plasticité cyclique est généralement décrite par la combinaison de deux types d'écrouissage : isotrope et cinématique, voir Armstrong et Frederick [11] ou Lemaitre et Chaboche [12, 13] et Bari et Hassan [14] pour la comparaison de plusieurs modèles d'écrouissage.

Mahmoudi et al. [15] utilisent un algorithme génétique multi-objectifs pour l'identification des paramètres du modèle de Lemaitre-Chaboche. Rezaiee-Pajand et Sinaie [16] comparent la représentation du comportement en utilisant différents nombres de backstresses. Plus le nombre de variables utilisé est grand et mieux le comportement est décrit, évidemment, mais on pourra se limiter à trois backstresses pour une bonne description.

Dans ce travail, nous allons présenter la réponse du cuivre en chargement cyclique en traction-compression à l'aide d'une éprouvette composite : substrat souple/cuivre. Nous verrons donc dans un premier temps comment il est possible d'appliquer ce chargement à l'aide d'un substrat souple. Puis dans un second temps, nous présenterons la méthode expérimentale développée pour définir le nombre de cycles à rupture des films de cuivre.

2 Étude du cuivre en chargements alternés

2.1 Mesures expérimentales

Le cuivre étudié ici est un cuivre commercial, laminé recuit, d'environ 17 μm d'épaisseur, fréquemment utilisé pour les circuits souples. Afin de lui appliquer des chargements de traction-compression, un substrat souple en polyimide est utilisé. Lors d'une traction appliquée sur l'ensemble, le cuivre plastifie

tandis que le substrat reste élastique. Lors de la décharge, le substrat tendra à récupérer sa déformation élastique et entraînera le cuivre en compression.

Le stratifié comprenant le substrat recouvert de cuivre sur chaque face est disponible commercialement, dans des configurations comprenant des épaisseurs de substrat et de cuivre différentes. Une première étude a donc été nécessaire afin de sélectionner les épaisseurs relatives optimales de substrat et de cuivre permettant d'observer le comportement plastique du cuivre sur la réponse de l'ensemble, en gardant suffisamment de substrat pour l'entraîner en compression.

Le comportement élastique du substrat a été identifié, ainsi que sa limite élastique. La force est mesurée par une cellule de force de 1 kN et les déformations sont mesurées par corrélation d'images numériques, afin d'éviter tout contact avec les éprouvettes.

Avec la même méthode de mesures, les cycles de chargement sont ensuite appliqués à l'éprouvette de substrat + cuivre. L'essai est piloté à vitesse de déplacement de traverse constante, avec des limites en force. Deux essais à amplitudes de chargement différentes sont présentés sur la Figure 1.

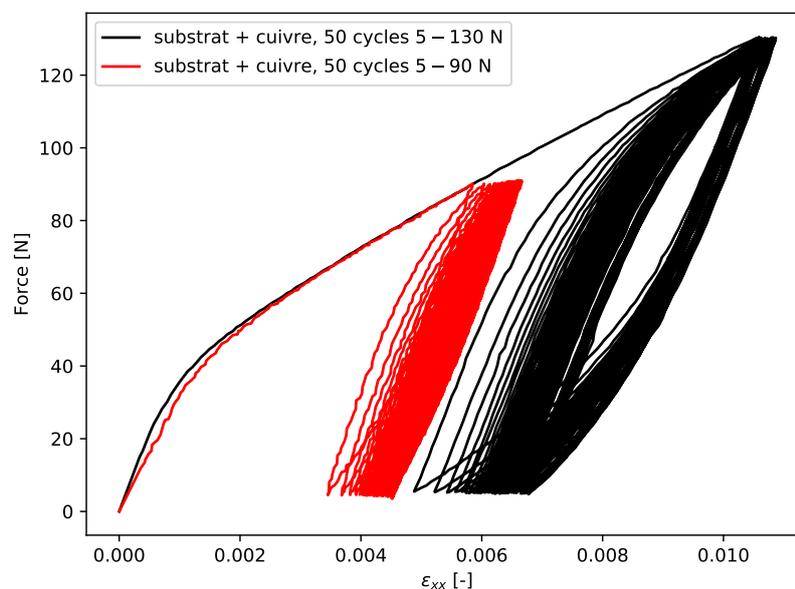


FIGURE 1 – Cycles de charge-décharge sur l'ensemble substrat + cuivre à deux amplitudes différentes.

2.2 Identification du comportement élasto-plastique

Le modèle de Lemaitre-Chaboche avec trois backstresses été choisi pour représenter le comportement plastique du cuivre, permettant de représenter le comportement cyclique observé. L'éprouvette substrat/cuivre est modélisée dans le logiciel d'éléments finis Abaqus. Le substrat est isotrope élastique. Le comportement du cuivre, supposé isotrope, est élastoplastique. Le modèle (avec trois backstresses) comporte donc 11 paramètres qui sont identifiés par une méthode d'optimisation décrite ci-après.

Lors de la simulation numérique, le chargement expérimental est appliqué à la structure simulée (par exemple des charges-décharges entre 5 et 130 N) et la déformation simulée est comparée à celle mesurée expérimentalement. Une fonction coût f_{cost} (1) est utilisée pour calculer la différence entre expérience et simulation. Cette fonction coût est minimisée en utilisant l'algorithme de Nelder-Mead, modifié de

façon à ne pas utiliser de valeurs négatives pour les paramètres.

$$f_{cost} = \frac{1}{N} \sum iN (\varepsilon_{exp}^i - \varepsilon_{sim}^i)^2 \quad (1)$$

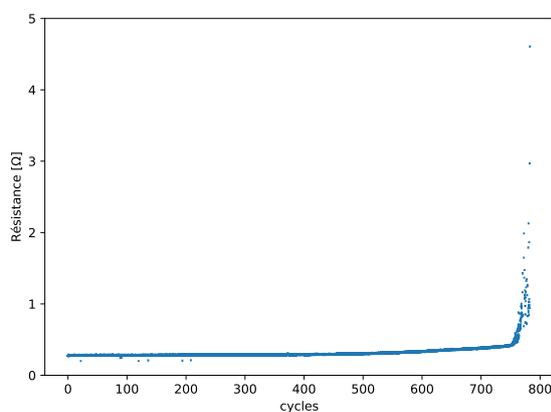
La valeur initiale des paramètres est tirée du travail de Salahouelhadj et al. [5]. En premier lieu, seulement les quelques premiers cycles sont simulés et comparés à l'expérience pour trouver rapidement un jeu de paramètre proche de la solution. Puis, tous les cycles expérimentaux sont simulés pour identifier le comportement plus précisément.

3 Étude de la fatigue oligocyclique du cuivre

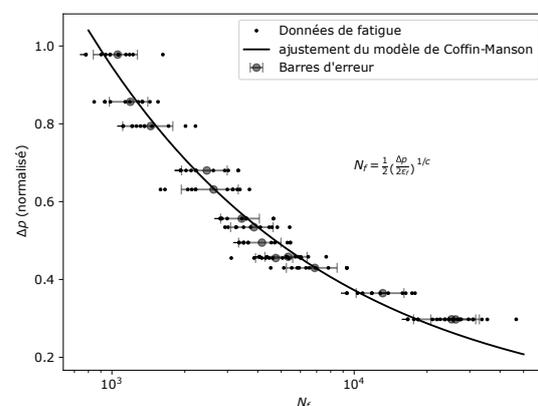
Dans une deuxième partie du travail, on s'est intéressé à la fatigue oligocyclique d'un cuivre laminé recuit du commerce sous chargement alterné.

La même méthode que dans la section précédente est utilisée afin d'appliquer un chargement de traction-compression sur le cuivre : le cuivre est présent sous forme de pistes sur un substrat souple qui permet de l'entraîner en compression. La rupture du cuivre est suivie par mesure de la résistance électrique au cours de l'essai. L'augmentation de cette dernière permet de détecter la rupture (Figure 2a).

Un milliohmètre est utilisé pour mesurer la résistance électrique et connecté à l'éprouvette pour réaliser la mesure quatre points. Le pont de Kelvin du milliohmètre permet de mesurer la faible résistance de l'éprouvette sans tenir compte de celle des fils de mesure. Un design d'éprouvette particulier a été développé spécialement pour ce type d'essais et la résistance peut être enregistrée directement via une voie d'entrée sur la machine de traction. On trouvera la présentation du montage dans [17].



(a) Variation de la résistance électrique au cours de l'essai. L'augmentation brutale définit la rupture d'une piste de cuivre.



(b) Résultats de fatigue normalisés. Le modèle de Coffin-Manson a été ajusté sur les mesures.

Un chargement cyclique entre deux limites en force est appliqué. La limite inférieure est de 10 N pour tous les essais et la limite supérieure est ajustée. La déformation est aussi mesurée en temps réel par un système de détection de points (ProViSys).

La résistance est monitorée en temps réel. Lorsque la résistance augmente sensiblement (l'augmentation est généralement brutale), l'essai est arrêté et un nombre de cycles à rupture lui est associé (Figure 2a).

Grâce à quelques dizaines d'essais à des amplitudes de sollicitation différentes, une gamme suffisamment importante d'amplitudes de déformation peut être étudiée. Dans le domaine de fatigue oligocyclique,

la relation de Coffin-Manson permet alors de relier l'amplitude de déformation plastique au nombre de cycles à rupture.

4 Conclusions

Une méthode expérimentale permettant de solliciter un film mince en traction-compression est décrite et la méthodologie inverse d'identification du comportement élasto-plastique du cuivre est présentée dans ce travail. Ensuite, le comportement est utilisé afin d'analyser les résultats des essais de fatigue oligocyclique. Ces essais ont nécessité la mise au point d'un montage expérimental original, décrit dans la deuxième partie de cet article, [17].

Les travaux présentés ici complètent ceux réalisés précédemment sur les substrats composites [1] et permettent d'alimenter des simulations de circuits imprimés en chargements thermiques cycliques. Ces simulations deviennent de plus en plus nécessaires pour la conception de structures soumises à des contraintes environnementales sévères. Les méthodes décrites pourront être appliquées à différents types de cuivre et à différentes températures pour alimenter les modèles avec plus de précisions.

5 Remerciements

Les auteurs remercient le support de la région Grand Est via la bourse de jeune chercheur de G. Girard. Les auteurs du LEM3 et de CIMULEC remercient le soutien de l'ANR via le programme Labcom ANR-14-LAB7-0003-01 et la création du labcom LEMCI. Une partie des travaux ont été réalisés lors de la thèse de G. Girard, bourse CNES/ Thales Alenia Space avec le support de CIMULEC. Les auteurs remercient particulièrement S. Dareys (CNES) et D. Nevo (TAS).

Références

- [1] G. Girard, M. Jrad, S. Bahi, M. Martiny, S. Mercier, L. Bodin, D. Nevo, S. Dareys, Experimental and numerical characterization of thin woven composites used in printed circuit boards for high frequency applications, *Composite Structures* 193 (2018) 140 – 153.
- [2] K. Weinberg, W. Müller, A strategy for damage assessment of thermally stressed copper vias in microelectronic printed circuit boards, *Microelectronics Reliability* 48 (1) (2008) 68 – 82.
- [3] S. Huang, K. Yung, B. Sun, A finite element model and experimental analysis of PTH reliability in rigid-flex printed circuits using the taguchi method, *International Journal of Fatigue* 40 (2012) 84–96.
- [4] F. Su, R. Mao, J. Xiong, K. Zhou, Z. Zhang, J. Shao, C. Xie, On thermo-mechanical reliability of plated-through-hole (PTH), *Microelectronics Reliability* 52 (2012) 1189–1196.
- [5] A. Salahouelhadj, M. Martiny, S. Mercier, L. Bodin, D. Manteigas, B. Stephan, Reliability of thermally stressed rigid-flex printed circuit boards for high density interconnect applications, *Microelectronics Reliability* 54 (1) (2014) 204 – 213.
- [6] K. Fellner, T. Antretter, P. F. Fuchs, Q. Toa, Numerical simulation of the electrical performance of printed circuit boards under cyclic thermal loads, *Microelectronics Reliability* 62 (2016) 148–155.
- [7] K. Watanabe, Y. Kariya, N. Yajima, K. Obinata, Y. Hiroshima, S. Kikuchi, A. Matsui, H. Shimizu, Low-cycle fatigue testing and thermal fatigue life prediction of electroplated copper thin film for through hole via, *Microelectronics Reliability* 82 (2018) 20 – 27.

- [8] O. Kraft, R. Schwaiger, P. Wellner, Fatigue in thin films : lifetime and damage formation, *Materials Science and Engineering : A* 319-321 (2001) 919 – 923.
- [9] Y. Ono, S. Morito, Investigation into early fatigue damage in electrodeposited copper, *International Journal of Fatigue* 54 (2013) 7–16.
- [10] M. Hommel, O. Kraft, Deformation behavior of thin copper films on deformable substrates, *Acta Materialia* 49 (2001) 3935–3947.
- [11] C. Frederick, P. Armstrong, A mathematical representation of the multiaxial bauschinger effect, *Materials at High Temperatures* 24 (1) (2007) 1–26.
- [12] J. Chaboche, Time-independant constitutive theories for cyclic plasticity, *International Journal of Plasticity* 2 (1986) 149–188.
- [13] J. Chaboche, On some modifications of kinematic hardening to improve the description of ratcheting effects, *International Journal of Plasticity* 7 (1991) 661–678.
- [14] S. Bari, T. Hassan, An advancement in cyclic plasticity modeling for multiaxial ratcheting simulation, *International Journal of Plasticity* 18 (7) (2002) 873 – 894.
- [15] A. Mahmoudi, S. Pezeshki-Najafabadi, H. Badnava, Parameter determination of chaboche kinematic hardening model using a multi objective genetic algorithm, *Computational Materials Science* 14 (2011) 1114–1122.
- [16] M. Rezaiee-Pajand, S. Sinaie, On the calibration of the chaboche hardening model and a modified hardening rule for uniaxial ratcheting prediction, *International Journal of Solids and Structures* 46 (2009) 3009–3017.
- [17] G. Girard, Caractérisation et modélisation thermomécaniques de matériaux et de structures circuits imprimés complexes destinés aux applications spatiales radiofréquences et micro-ondes, Ph.D. thesis, Université de Lorraine (2018).