



**HAL**  
open science

## Matériau architecturé cuivre-Invar-cuivre produit par colaminage : évolution de la microstructure au cours de la fabrication

Hiba Fekiri, Yves Bienvenu, Vladimir A. Esin, Vincent Maurel, Alain Köster, David Guinet, Bertrand Pierre

### ► To cite this version:

Hiba Fekiri, Yves Bienvenu, Vladimir A. Esin, Vincent Maurel, Alain Köster, et al.. Matériau architecturé cuivre-Invar-cuivre produit par colaminage : évolution de la microstructure au cours de la fabrication. Journées annuelles SF2M, SF2M (Société Française de Métallurgie et des Matériaux), Oct 2017, Lyon, France. 2 p. hal-01631395

**HAL Id: hal-01631395**

**<https://minesparis-psl.hal.science/hal-01631395>**

Submitted on 9 Nov 2017

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## Matériau architecturé cuivre-Invar-cuivre produit par colaminage *Evolution de la microstructure au cours de la fabrication*

Hiba Fekiri<sup>a</sup>, Yves Bienvenu<sup>a</sup>, Vladimir A. Esin<sup>a</sup>, Vincent Maurel<sup>a</sup>, Alain Köster<sup>a</sup>,  
David Guinet<sup>b</sup> et Bertrand Pierre<sup>b</sup>

<sup>a</sup> MINES ParisTech, PSL Research University, Centre des Matériaux (CNRS UMR 7633) BP 87, Evry cedex 91003, France

<sup>b</sup> TG Griset, 3 Rue du Grand Pré, 60870 Villers-Saint-Paul, France

### Résumé

Associer trois couches, deux externes en métal bon conducteur (Cu peu allié) et une interne en métal à faible coefficient de dilatation (FeNi36 ou invar) permet un certain degré d'optimisation entre conductibilité, résistance mécanique et dilatation. Une amélioration substantielle est obtenue avec l'introduction d'une percolation entre les deux couches externes. Les applications envisagées sont principalement dans le domaine du packaging électronique pour répondre aux besoins en termes de tenue en cyclage thermique. Ce document présente une manière de réaliser des architectures compatibles avec les exigences de l'application et aussi celles du recyclage. Des présentations aux JA 2013 et des publications ont été consacrées aux applications et au compromis de propriétés liées à une architecture tricouche 3D [1].

### Introduction

Le colaminage (à froid et à chaud) est amplement utilisé pour des soudages sans fusion de métaux pour des composants avec une architecture 2D (direction de laminage, épaisseur). Le passage à 3D peut être réalisé par une succession de colaminages et forgeages mais le seul colaminage ouvre aussi la possibilité d'une architecture 3D en introduisant la percolation de couches externes d'un tricouche par la déformation plastique dans le sens de l'épaisseur du métal de ces couches à travers des ouvertures dans la couche interne. La qualité des architectures dépend de la qualité du soudage des couches externes dans les ponts thermiques et du remplissage de ces cavités dans la couche interne.

### Matériaux et aspects expérimentaux

Le développement de modules électroniques avec des semi-conducteurs à large gap (SiC/Gan sur Si) fonctionnant à haut niveau de puissance par unité de surface ( $200\text{kW/cm}^2$ ) et à haute fréquence, amène la nécessité d'évacuer le flux élevé de chaleur ( $200\text{W/cm}^2$ ). Une série d'études a permis de proposer des architectures 3D dont la plus complexe est illustrée sur la figure 1, avec un tricouche flanqué de deux bicouches Cu/Cu permettant de plier les ailes pour réaliser les connexions de puissance. Cette architecture minimise la masse d'invar et facilite le recyclage. Pour l'application substrat de composant électronique, le tricouche de base est Cuivre/invar/cuivre. Chaque couche a une épaisseur de l'ordre du mm et le colaminé final est aussi d'une épaisseur comprise entre 1 et 1,5 mm. Les ouvertures dans

la couche d'invar sont réalisées soit par des découpes laser, soit par poinçonnage (ellipses de dimensions  $3 \times 1$  mm). Le pourcentage surfacique de cavité de la couche interne est de l'ordre de 20%. Les laminoirs utilisés (sans lubrifiant) ont des diamètres de 400 mm chez le partenaire industriel et de 200mm au plus chez le partenaire académique. La vitesse est inférieure à 10 m/min. Le colaminage s'effectue en général en deux passes, une passe avec un taux de réduction d'épaisseur de l'ordre de 60% pour souder et une passe de finition pour terminer le remplissage et le soudage Cu/Cu des ponts thermiques et réaliser au plus près l'épaisseur finale et la dureté souhaitée, les deux passes pouvant être séparées par un revenu de relaxation des contraintes ou recristallisation de Cu. La modélisation (analytique et numérique) a été mise en œuvre pour concevoir une architecture pour viser le compromis souhaité par les utilisateurs finaux (industrie automobile, aviation et industries électriques); la modélisation du remplissage des cavités est jugée encore trop complexe pour une approche numérique de la déformation. Pour cette raison, l'interprétation du remplissage des cavités de la couche interne et du soudage proposée ici repose sur des mesures et observations de la microstructure à différentes échelles du mm au micromètre, métallographie optique, électronique à balayage, EBSD pour la mise en évidence des tailles et morphologie, textures de grains. Des moyens de contrôle non destructif (microscopie acoustique ou tomographie des rayons X) ont été validés pour l'optimisation du processus industriel, le plan expérimental portant sur les taux de réduction. Les mesures des propriétés physiques, électriques ou mécaniques sont réalisées par les partenaires académiques

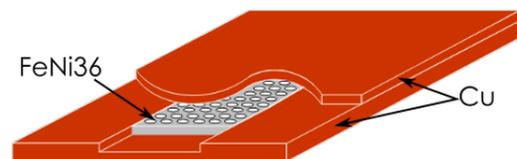


Figure 1. Architecture la plus évoluée du composite i-TBC avec un tricouche central et deux bicouches Cu/Cu

### Résultats et discussions

Le remplissage des ponts thermiques du tricouche Cu/FeNi36/Cu pose un problème sérieux puisque le volume de cuivre impliqué dans le remplissage connaît un taux de réduction d'épaisseur réel inférieur à celui du reste

du cuivre et que la pénétration des cavités du fait de leur largeur initiale faible nécessite de fortes pressions de laminage. Ces cavités s'ouvrent progressivement au cours du laminage et même au-delà de l'ouverture prévue du fait de la plastification de l'invar facilitée localement par la géométrie (concentration de contrainte de traction au niveau des extrémités du grand axe de l'ellipse ou pôles). De ce fait, le remplissage et le soudage ne sont pas optimisés en fin de première passe au niveau des points triples Cu/Cu/invar

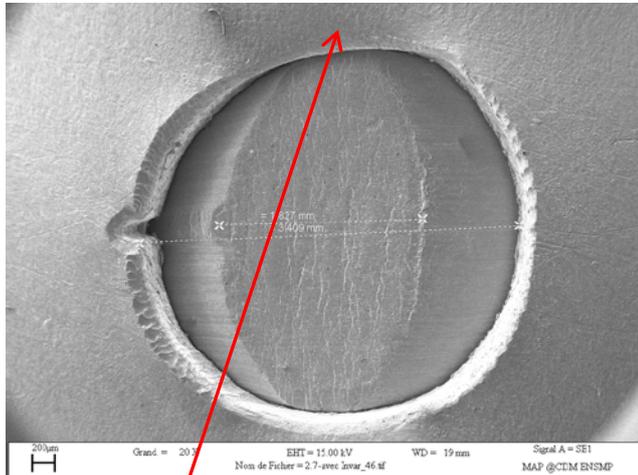


Figure 2 Illustration (MEB - électrons secondaires) du remplissage d'une cavité de la couche interne en invar par le cuivre – Essai de colaminage interrompu - Noter l'amincissement de l'invar aux deux pôles et son épaissement aux deux extrémités équatoriales, ainsi que l'extrusion du cuivre.

La figure 2 montre le mode de remplissage du cuivre avec une partie centrale du pont thermique Cu écroui de façon nominale pour un laminé alors que les flancs du pont thermique sont fortement écrouis par l'extrusion du cuivre à travers l'ouverture des cavités. La figure 3 montre une microstructure du cuivre très hétérogène dans les ponts thermiques, avec des grains allongés au centre du pont et des grains équiaxes fins (<1 µm) au voisinage des interfaces cuivre-Invar, l'étude de l'état d'écrouissage de ses grains (Fig.3) avec le critère GOS (Grain Orientations Spread) révèle un état recristallisé avec une désorientation moyenne < 2°. La formation de ces grains ultra-fins après la première passe de colaminage à froid, est comparée à la microstructure obtenue par les procédés aux grandes déformations (SPD) [2], ce qui dénote le fort niveau de déformation du cuivre à la périphérie des ouvertures de cavité d'invar.

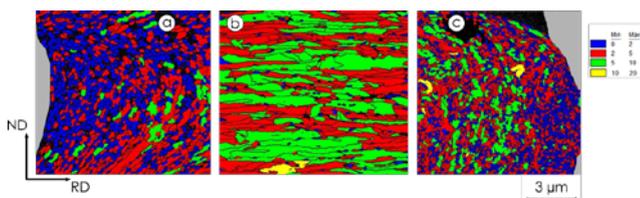


Figure 3. Analyse EBSD de l'état de l'écrouissage du cuivre (GOS) : a) second point triple, b) centre du pont, c) premier point triple Cu-Cu-invar en gris

Les caractérisations réalisées dans les ponts thermiques après la deuxième passe de laminage révèlent une

amélioration de la qualité d'adhérence des interfaces. La figure 4 montre le résultat d'une analyse EBSD réalisée au centre du pont thermique, elle présente une microstructure continue du cuivre à travers l'interface, ce qui suggère que la deuxième passe de laminage permet de réaliser un soudage à froid des interfaces cuivre-cuivre au centre des ponts thermiques, ce dernier est difficilement attribué au mécanisme de soudage conventionnel (fragmentation, extrusion et soudage) [3], sa réalisation résulte de la rugosité des interfaces héritée de l'étape de préparation combinée à l'élévation de température locale due à la vitesse de laminage élevée (10 m/min) permettant la diffusion atomique et ainsi la création d'une microstructure continue.

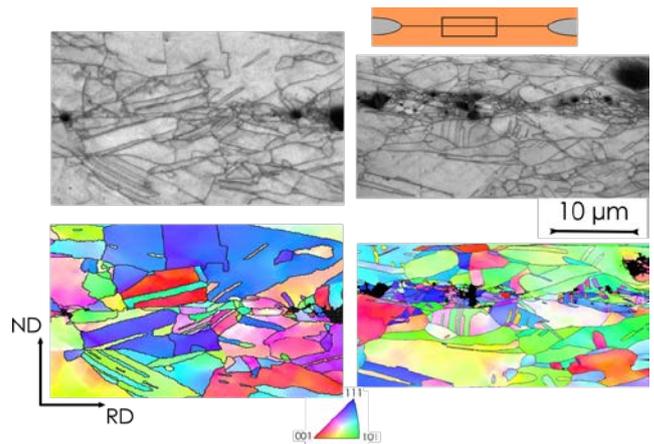


Figure 4. Microstructure du cuivre au centre des ponts thermique après la deuxième passe de laminage.

## Références

- [1] A. Kaabi, Y. Bienvenu, D. Rycckelynck, L. Prévond, et B. Pierre, « Architected bimetallic laminates by roll bonding: bonding mechanisms and applications », *Mater. Sci. Technol.*, vol. 30, n° 7, 2014, 782-790.
- [2] E. I. Teitel', L. S. Metlov, D. V. Gunderov, et A. V. Korznikov, « On the structural and phase transformations in solids induced by severe plastic deformation », *Phys. Met. Metallogr.*, vol. 113, n° 12, 2012, 1162-1168.
- [3] W. Zhang et N. Bay, « Cold welding-theoretical modeling of the weld formation », *Weld. J.- Weld. Res. Suppl.*, vol. 76, n° 10. 1997, 477s.

## Remerciements

Les partenaires du projet PSPC MeGaN et la BPI et ceux du projet FUI Menkar des pôles de compétitivité Mov'eo et Minalogic sont remerciés de leur collaboration, de même que Armines.