

SIMULATION DE BANDES DE CISAILLEMENT SOUS INDENTATION DANS DES REVÊTEMENTS DE NITRURE METALLIQUES

O. Estienne^{1(*)}, A. Lejeune¹, Y. Gaillard¹, S. Giljean², M.-J. Pac², C. Rousselot³, E. Duverger³, C. Bouillet⁴ et F. Richard¹

1 : Université Marie et Louis Pasteur, CNRS, institut FEMTO-ST, F-25000 Besançon, France

2 : Université de Haute-Alsace, LPMT UR 4365, 68093 Mulhouse, France

3 : Université Marie et Louis Pasteur, CNRS, institut FEMTO-ST, F-25200 Montbéliard, France

4 : Université d'Orléans, CNRS, MACLE-CVI, UAR 2590, F-45071 Orléans Cedex 2

(*) olivier.estienne@univ-fcomte.fr

Mots-Clés – endommagement, plasticité, bandes de cisaillement, nanoindentation, éléments finis

RESUME

Les revêtements multicouches sont largement utilisés dans l'industrie depuis la fin des années 1980 comme revêtements performants et protecteurs, en particulier pour les outils de coupe. Pour améliorer leurs propriétés, une solution consiste à déposer des multicouches métal/nitride afin de tirer parti des propriétés du nitride, du métal et des interfaces pour améliorer la ténacité et la dureté. De tels revêtements subissent d'importantes sollicitations au cours de leur utilisation, et il arrive que des phénomènes de délaminage aboutissent à leur rupture. Ces phénomènes peuvent être la résultante de la formation de bandes de cisaillement au cœur du revêtement, soit d'intenses déformations très localisées.

L'essai d'indentation est un essai simple à mettre en œuvre qui permet de reproduire les sollicitations que subissent ces revêtements au cours de leur sollicitation. Nous avons observé expérimentalement sur des coupes transversales amincies par faisceau d'ions focalisés et observé par microscopie électronique à transmission (MET) que des bandes de cisaillement étaient susceptibles de se former dans des revêtements multicouches TiAl/TiAlN sous indentation (Figure 1a).

Les conditions de formation de ces bandes sous indentation sont encore peu discutées dans la littérature. Bigelow et al. [1] ont simulé leur apparition dans un revêtement multicouches Al/SiC en introduisant de l'adoucissement dans une loi de comportement élastoplastique de SiC, c'est à dire une diminution de la contrainte avec la déformation au-delà d'un certain seuil. Introduire de l'endommagement dans la formulation thermodynamique d'une loi de comportement pour simuler l'apparition de bandes de cisaillement semble donc appropriée.

Dans ce travail, la prévision de l'apparition de bandes de cisaillement dans des revêtements multicouches métal/nitride (TiAl/TiAlN) est étudiée dans le cadre de la mécanique des milieux continus et en utilisant la méthode des éléments finis. Une loi de comportement élasto-plastique à l'écrouissage linéaire est utilisée pour modéliser le comportement mécanique de TiAl. Pour TiAlN, deux lois de comportement introduisant de l'endommagement sont testées : une loi d'endommagement fragile de type Mazars [2] [3] et une loi d'endommagement ductile de type Lemaitre [4] [5]. Cette deuxième loi (EVPDr), élasto-viscoplastique endommageable a été développée spécifiquement pour l'étude et intègre une régularisation de l'endommagement pour éviter sa localisation. Elle a été implémentée dans le code éléments finis Ansys via le logiciel MFront. Les propriétés élastoplastiques des deux matériaux ont été déterminées par Giljean et al. [6]. Les premiers résultats pour des matériaux monocouches montrent que les deux lois, Mazars et EVPDr, permettent de simuler des bandes de cisaillement (Figure 1b). De nombreux facteurs, aussi bien géométriques (rayon de pointe, frottement) que matériaux (types de lois et paramètres) exercent une influence sur la morphologie des bandes, laissant à penser que l'introduction de l'endommagement permettra à terme la génération de bandes de cisaillement dans des revêtements multicouches représentatives des observations expérimentales.

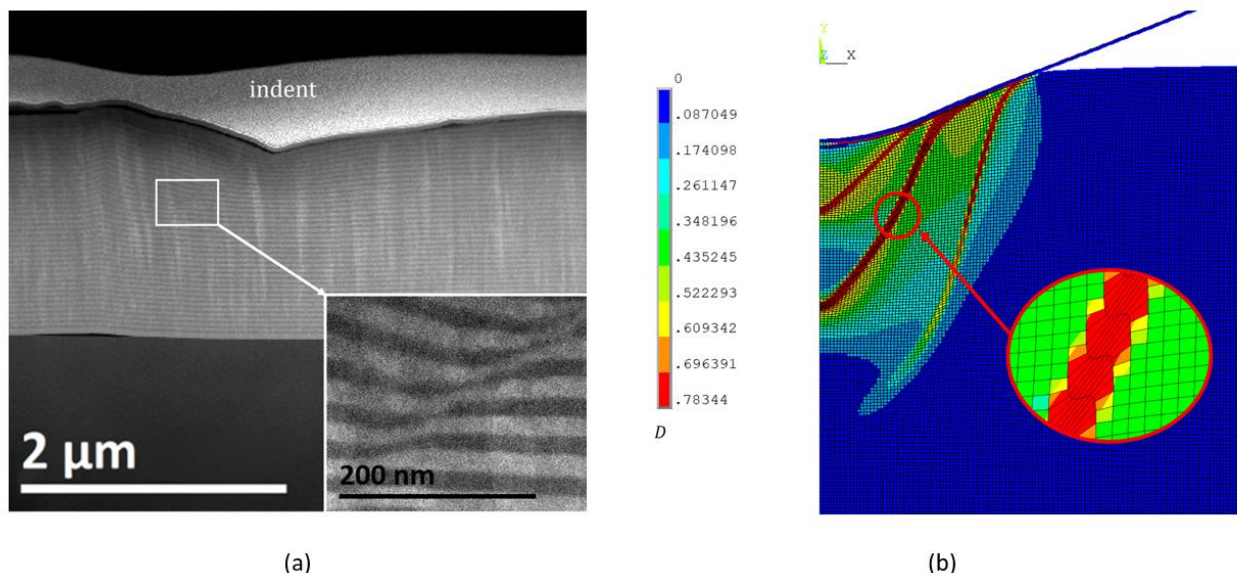


Figure 1– (a) Image TEM d’une bande de cisaillement après indentation Berkovich d’un revêtement multicouche TiAl/TiAlN et (b) Simulation du champ d’endommagement D et déformée du maillage d’un échantillon monocouche TiAlN sous indentation avec une loi de comportement EVPDr

Remerciements

Les auteurs remercient l'agence nationale de la recherche pour son soutien financier (ANR-22-CE08-0008, MULTI-NANO-ULHC ; ANR-10-AIRT-04, RESEM/NANOSTRAT) et la collectivité territoriale « Pays Montbéliard-Agglomération » (contrat 20161016061). Ils remercient également Thomas Helfer du commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives pour son aide dans l'implémentation de la loi de comportement EVPDr dans le code éléments finis Ansys via le logiciel MFront.

Références

- [1] S. Bigelow, Y.-L. Shen, Parametric computational analysis of indentation-induced shear band formation in metal-ceramic multilayer coatings, *Surface and Coatings Technology* 350 (2018) 779–787. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.04.055>.
- [2] J. Mazars, Application de la mécanique de l’endommagement au comportement non linéaire et à la rupture du béton de structure, These, Paris VI, 1984.
- [3] J. Mazars, A description of micro- and macroscale damage of concrete structures, *Engineering Fracture Mechanics* 25 (1986) 729–737. [https://doi.org/10.1016/0013-7944\(86\)90036-6](https://doi.org/10.1016/0013-7944(86)90036-6).
- [4] J. Lemaitre, Théorie mécanique de l’endommagement isotrope appliqué à la fatigue des métaux, Séminaire Matériaux et Structures Sous Chargement Cyclique, Ecole Polytechnique, Palaiseau (1978).
- [5] J. Lemaitre, How to use damage mechanics, *Nuclear Engineering and Design* 80 (1984) 233–245. [https://doi.org/10.1016/0029-5493\(84\)90169-9](https://doi.org/10.1016/0029-5493(84)90169-9).
- [6] S. Giljean, Y. Gaillard, C. Rousselot, C. Bouillet, M. Lenertz, F. Richard, M.-J. Pac, A mechanical TiAl/TiAlN multilayer coating model based on microstructural analysis and nanoindentation, *Acta Materialia* 280 (2024) 120312. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2024.120312>.