

Modélisation numérique de l'endommagement des couches en proche surface : application aux systèmes Ni/NiO et Zr/ZrO₂

L. Li¹, D. Brancherie¹, J. Favergeon¹, J.M. Roelandt¹

¹ Laboratoire Roberval UMR6253, Université de Technologie de Compiègne
BP 20529 60 205 Compiègne Cedex, France
*Tel: 03 44 23 41 31, E-mail: li.li@utc.fr

Résumé — Dans le contexte de la prévision de la tenue des matériaux, nous présentons un modèle numérique permettant de décrire les scénarios de rupture des couches d'oxyde (la fissuration traversante périodique dans la couche d'oxyde et le décollement de la couche) en utilisant une approche à discontinuité forte couplée à des éléments d'interface. Les paramètres du modèle sont identifiés par la corrélation de la « distance interfissure moyenne » entre les essais expérimentaux et les calculs numériques.

Mots clés — modèle à discontinuités fortes, éléments d'interface, endommagement, analyse probabiliste.

1 Contexte

Le contexte général de l'étude est la modélisation du phénomène de rupture générée dans les systèmes métal/oxyde sollicités par les chargements mécaniques. La présence d'une couche de surface, qu'elle soit naturelle (oxydation à haute température, film passif en corrosion aqueuse), ou déposée (revêtement) permet de séparer un métal de son environnement externe, et donc contribue à le protéger des phénomènes de corrosion. Dès lors que cette couche est endommagée, son rôle protecteur disparaît et la corrosion de l'alliage métallique s'accélère. Par ailleurs, les phénomènes d'endommagement des couches en proche surface sont très fortement liés aux conditions d'élaboration et aux sollicitations environnementales, thermiques et mécaniques. Selon les conditions subies par le matériau, différents modes de rupture peuvent apparaître. En particulier, l'apparition de fissures traversant la couche (et éventuellement le métal) suivie de la décohésion de l'interface substrat/couche peut mener au décollement de celle-ci.

Nous étudions, en particulier la fissuration générée dans le système Ni/NiO et Zr/ZrO₂ par les sollicitations mécaniques. L'étude de l'endommagement des couches d'oxyde de Nickel et Zirconium présente un intérêt majeur dans le cadre de la tenue des matériaux respectivement de l'aéronautique et du nucléaire.

2 Présentation brève du travail

Nous nous proposons de modéliser chacun des phénomènes de rupture : fissuration traversante et décohésion par des approches spécifiques basées sur la méthode des éléments finis. La prise en compte de la propagation d'endommagement par la méthode des éléments finis classiques se heurte à plusieurs difficultés dont la dépendance des résultats à la taille des éléments et l'automatisation de la propagation des défauts. Pour s'affranchir de ce problème, nous avons construit un modèle numérique basé sur la méthode à discontinuités fortes [1][2]. La décohésion des couches d'oxyde avec le substrat étant représentée par un modèle d'interface [3].

Tous ces phénomènes d'endommagement sont très largement influencés par la présence de défauts initiaux dont la distribution dans le matériau est aléatoire. Pour rendre compte de cet aspect, les contraintes limites à rupture sont distribuées de manière aléatoire dans les structures étudiées.

Le modèle développé s'appuie sur une analyse expérimentale des phénomènes de rupture de la couche d'oxyde. Cette analyse porte sur l'observation de l'évolution des phénomènes de rupture générés dans les systèmes métal/oxyde en fonction du chargement mécanique global de traction appliquée. Ces observations sont menées à l'aide d'un microscope électronique à balayage. Elles ont notamment per-

mis de déterminer la distance interfissure moyenne de la fissuration périodique dans la couche d'oxyde. Les Figures 1 et 2 présentent respectivement l'observation expérimentale et la simulation numérique de l'endommagement de la couche d'oxyde du système Zr/ZrO₂.

Pour assurer une bonne corrélation entre les essais et les calculs numériques, nous avons effectué une analyse de sensibilité des paramètres qui peuvent éventuellement influencer la distance interfissure, comme par exemple, la contrainte limite à rupture de la couche d'oxyde, la contrainte résiduelle dans le système, la contrainte limite à rupture de l'interface métal/oxyde, l'énergie de fissuration, le comportement du substrat métallique (élastique ou élasto-plastique), etc [4]. Ceci nous a permis d'identifier les paramètres et de valider notre approche.

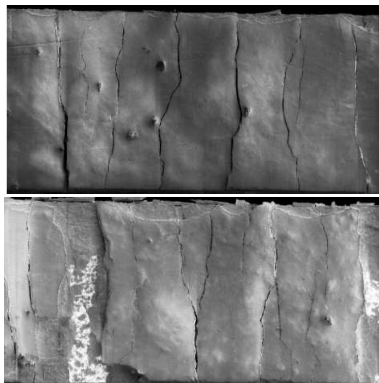


FIG. 1 – Morphologie de la couche d'oxyde du Zr/ZrO₂ par le microscope électronique à balayage (Vue de dessus) : fissures traversantes dans la couche d'oxyde et le décollement de la couche d'oxyde

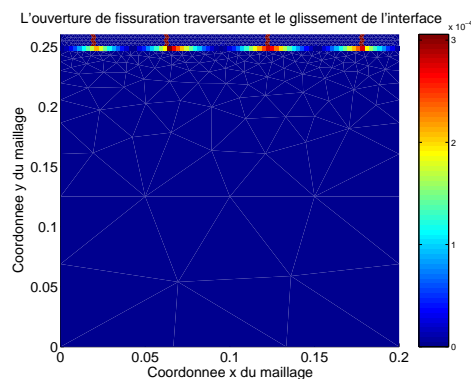


FIG. 2 – Simulation numérique de l'ouverture des fissures transversantes et le glissement de l'interface métal/oxyde dans le système Zr/ZrO₂ (Vue de coupe)

3 Conclusion

Nous avons développé une approche mécanique et numérique destinée à la simulation de l'endommagement des systèmes métal/oxyde. Par la corrélation entre les essais et les calculs numériques, nous avons identifié les paramètres du modèle qui ne sont pas disponibles dans la littérature : la contrainte limite à rupture de l'interface métal/oxyde, ainsi que l'énergie de fissuration des fissures traversant la couche d'oxyde.

Références

- [1] D. Brancherie. *Modèles continus et discrets pour les problèmes de localisation et de rupture fragile et/ou ductile*. n°2003/17, LMT-Cachan, 2003.
- [2] D. Brancherie and A. Ibrahimbegovic. Novel anisotropic continuum-discrete damage model capable of representing localized failure of massive structures. *Engineering Computations*, 26(1-2) :100–127, 2009.
- [3] G. Alfano and M. A. Crisfield. Finite element interface models for the delamination analysis of laminated composites : mechanical and computational issues. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 50 :1701–1736, 2001.
- [4] L. Li, D. Brancherie, J. Favergeon, and J. M. Roelandt. Numerical approach for the description of different fracture modes for zr/zro2 system - deterministic and probabilistic aspects. *Surface and Coatings Technology*, In Press, 2010.