



HAL
open science

Effet de la microstructure sur la propagation des fissures de fretting

Henry Proudhon, Stéphanie Basseville, Lingtao Sun, Georges Cailletaud

► **To cite this version:**

Henry Proudhon, Stéphanie Basseville, Lingtao Sun, Georges Cailletaud. Effet de la microstructure sur la propagation des fissures de fretting. 9e colloque national en calcul des structures, May 2009, Giens, France. pp.167-172. hal-00399550

HAL Id: hal-00399550

<https://hal.science/hal-00399550>

Submitted on 26 Oct 2018

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.

Effet de la microstructure sur la propagation des fissures de fretting

H. Proudhon¹, S. Basseville², L. Sun¹, G. Cailletaud¹

¹ MINES ParisTech, Centre des Matériaux, CNRS UMR 7633,
BP 87 91003 Evry Cedex, France
{lingtao.sun,henry.proudhon,georges.cailletaud}@mines-paristech.fr

² Laboratoire des Systèmes d'Ingénierie de Versailles,
45 avenue des Etats Unis, 78000 Versailles, France
stephanie.basseville@uvsq.fr

Résumé — Le fretting est un endommagement insidieux qui peut prendre la forme de petites fissures s'amorçant en bordure de contact et se propageant sous la surface. Ces fissures peuvent grandement affecter les propriétés de services de pièces en abaissant la limite de fatigue, il est donc très important de comprendre et prédire leur développement. Dans ce travail, la méthode des éléments finis est utilisée pour prédire la croissance de fissures de fretting en lien avec leur trajet de fissuration. L'effet du mode mixte imposé par le contact ainsi que celui de la microstructure du matériau sont étudiés par simulation.

Mots clés — fretting, propagation de fissure, éléments finis, microstructure.

1 Introduction

Dans les assemblages industriels, les contacts de pièces en service sont le lieu de dégradations particulières liées au phénomène de fretting. Les conditions de glissement partiel, induites par de fortes pressions de contact et de faibles amplitudes de déplacement, favorisent l'apparition et la propagation de fissures. Ces dernières années, de nombreuses recherches expérimentales ont été conduites pour caractériser l'amorçage des fissures mais relativement peu s'attachent à étudier les mécanismes de leur propagation. Les observations expérimentales sont difficiles car destructives mais on sait déjà que la vitesse et le trajet de propagation répondent à la fois aux champs de contraintes multiaxiaux engendrés par le contact, de la fermeture de fissure et de l'orientation des grains rencontrés par la fissure [1, 2].

Dans cette étude, on propose de prendre en compte la présence d'une fissure dans un modèle éléments finis d'un essai de fretting et d'étudier sa propagation au sein de la (micro-)structure du matériau. L'idée est de se rapprocher autant que possible d'un essai de fretting réel, et d'étudier d'une part l'influence des champs de contraintes sur la propagation prédite par la mécanique linéaire de la rupture et dans un deuxième temps celle de la prise en compte explicite de la microstructure du matériau. Notons qu'une première tentative d'introduction de la fissure par des méthodes alternatives, de type *level set*, a été récemment publiée [3].

2 Méthodes

Les conditions de fretting étudiées correspondent à des essais réalisés au Laboratoire LTDS de l'École Centrale de Lyon et déjà décrits en détail par ailleurs [4]. On étudie un contact de deux alliages d'aluminium entre un cylindre de série 7000 et un plan de série 2000. Les conditions de contact sont une pression de Hertz $p_0 = 2P/\pi a = 325$ MPa (a est la demi-largeur de contact) et un déplacement relatif $\delta = 20$ μm . Celles-ci induisent un régime de glissement partiel où la zone centrale de contact reste collée et le glissement se produit uniquement sur les bords du contact. C'est dans ces zones de glissement que se développent de forts gradients de cisaillement qui vont être à l'origine de l'amorçage des fissures. Une fois ces fissures amorcées (autour de 50 000 cycles dans ces conditions), elles vont se propager à l'intérieur du matériau. L'étude expérimentale montre qu'après une propagation rapide sur quelques centaines de microns, les fissures ralentissent pour s'arrêter à une profondeur voisine de 500 μm . Cette profondeur est sujette à une grande variabilité principalement due à l'effet de la microstructure du matériau (la taille de grain est supérieure à 100 microns).

Les simulations sont réalisées en utilisant le code de calcul éléments finis Z-SeT/ZéBuLoN développé au Centre des Matériaux et à l'Onera. Le phénomène de fretting entre le cylindre et le plan est modélisé en imposant tout d'abord un déplacement selon u_2 sur le bord supérieur du cylindre correspondant à une pression P puis des cycles de déplacements $\pm\delta$ selon u_1 en maintenant la pression de contact constante, cf figure 1.

Malgré le fort état de contraintes multiaxiales sous le contact, les conditions de fretting étudiées induisent une propagation en plasticité confinée ce qui autorise l'utilisation de la mécanique linéaire de la rupture et simplifie le problème. L'idée est alors de conduire une série de calculs élastiques pour, au cours de chaque étape, déterminer les facteurs d'intensité des contraintes à la pointe de la fissure. Pour cela on calcule le taux de restitution de l'énergie G par la méthode de Parks ainsi que le rapport $q = u_t/u_n$ en pointe de fissure. On a

$$G = \frac{K_I^2}{E'} + \frac{K_{II}^2}{E'}$$

avec $E' = E/(1 - \nu^2)$ en déformations planes, et $q = \frac{u_t}{u_n} = \frac{K_{II}}{K_I}$ ce qui permet de déterminer séparément K_I et K_{II} .

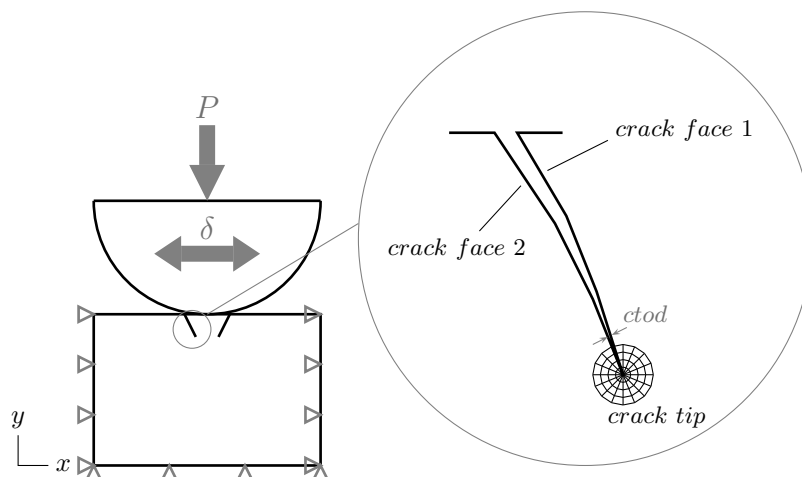


Figure 1 – Schéma général du modèle étudié : Cylindre/Plan en condition de fretting wear ; les fissures sont introduites explicitement dans le maillage.

Enfin, une estimation de la durée de vie est conduite en liant les facteurs d'intensité de contraintes calculés à la loi de Paris du matériau fissuré ($C = 6.53e^{-8}$ mm/cycle, $m = 3.387$). Dans ce modèle

simplifié on considère que seul K_I participe à la propagation alors que K_{II} peut uniquement influencer la direction de propagation (cf. § 3.2). On fait également l'hypothèse d'Elber qui suppose $\Delta K = K_{max}$ (pas de fermeture de fissure).

3 Calculs avec un matériau homogène isotrope

L'étude des champs de contraintes en pointe de fissure avec un matériau homogène est intéressante en soi. On s'attache dans un premier temps à décrire le comportement d'une fissure droite dont on contrôle l'angle qu'elle fait avec la surface. Dans un deuxième temps, l'angle des fissures de fretting est automatiquement déterminé par un critère de bifurcation à chaque étape du calcul. Le calcul des facteurs d'intensité des contraintes permet d'estimer la durée de vie à partir de la loi de Paris du matériau.

3.1 Cas d'une fissure droite

Le cas d'une fissure se propageant en ligne droite est le plus simple. La série de calculs est réalisée en modifiant simplement la longueur de fissure à chaque étape du calcul. Le point d'amorçage est fixé à $x_0 = 0.96a$ conformément aux observations expérimentales. L'idée est ici de déterminer si le mode mixte a une influence ou pas, les quelques études sur le sujet proposant souvent de négliger K_{II} dans le cas d'une fissure perpendiculaire à la surface. Les isocontraintes de von Mises pour une fissure droite soit perpendiculaire à la surface soit inclinée d'un angle de 30° de celle-ci sont présentées sur la figure 2. Elles font apparaître que dans le premier cas, celle-ci reste majoritairement en mode I alors qu'au contraire, pour la fissure orientée à 30° le mode II va rapidement dominer. Cela se traduit sur les valeurs d'ouverture de la pointe de fissure qui est toujours supérieure pour le cas d'une fissure perpendiculaire à la surface. Les valeurs des facteurs d'intensité des contraintes reflètent cet effet (cf. figure 3).

On observe donc que l'angle de propagation aura un effet très important : (i) si la fissure est perpendiculaire à la surface, l'approximation de négliger K_{II} semble justifiable mais K_I reste à des valeurs très élevées, en outre cela ne correspond pas à la majorité des observations expérimentales ; (ii) si la fissure est orientée à environ 30° , le mode I disparaît assez rapidement autour de $500 \mu\text{m}$ ce qui peut conduire à l'arrêt de fissuration. On observe également que dans le cas de la fissure orientée à 30° , celle-ci reste fermée deux fois plus longtemps pendant le cycle de fretting, ce qui s'apparente à de la fermeture RICC *roughness induce crack closure* [5].

3.2 Angle de propagation déterminé par un critère de bifurcation

En réalité, les fissures de fretting ne se propagent pas en ligne droite et l'angle de propagation dépend de nombreux paramètres comme le champ de contrainte et l'ouverture de la fissure au voisinage de la pointe, ainsi que l'orientation des grains traversés par la fissure. Il ne s'agit pas ici de faire la revue des multiples critères de bifurcations, nous ferons usage du critère MTS (*maximum tangential stress*) proposé par Erdogan et Sih en 1963 [6] :

$$\theta_i = \arccos \left(\frac{3K_{II}^2 + \sqrt{K_I^2 + 8K_I^2 K_{II}^2}}{K_I^2 + 9K_{II}^2} \right)$$

Le résultat de ces calculs est présenté sur la figure 4 pour une fissure initiale orientée à 45° (majoritairement observé expérimentalement) et avec une longueur incrémentale de $50 \mu\text{m}$. Les isocontraintes montrent clairement une évolution en mode mixte et une réorientation de l'angle vers une valeur proche de 30° . Ceci est à mettre en regard avec les observations expérimentales

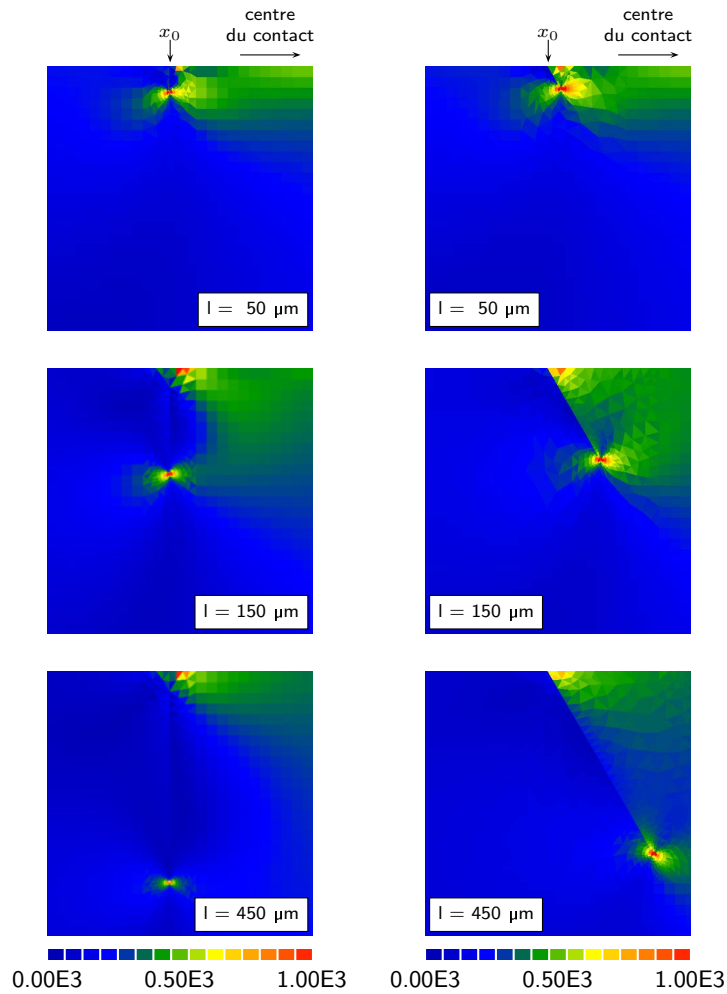


Figure 2 – Isocontraintes de von Mises pour trois longueurs de fissures différentes : 50, 150 et 450 μm ; cas d’une fissure perpendiculaire à la surface à gauche et inclinée d’un angle de 30° à droite.

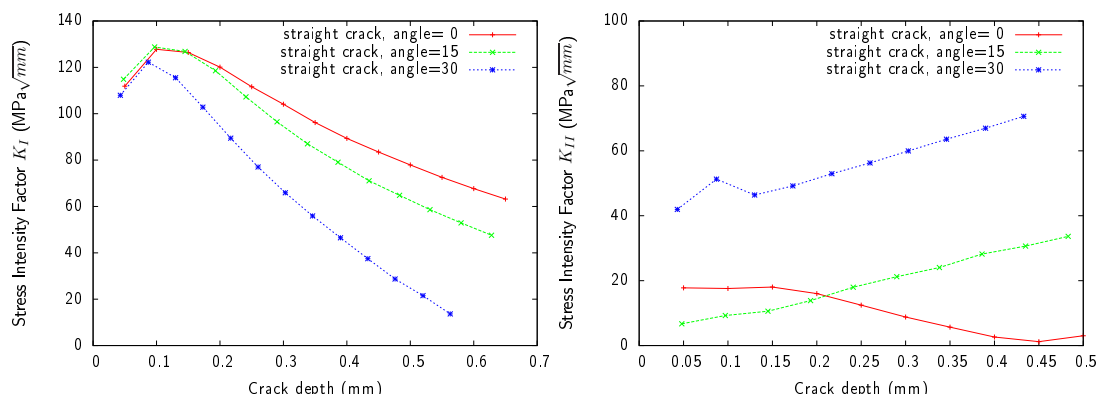


Figure 3 – Facteurs d’intensité des contraintes K_I et K_{II} en fonction de la profondeur de fissure.

par polissage ou par tomographie ou l’angle de propagation dans ces conditions se situe autour de 25°. Ce critère semble donc pertinent pour décrire l’influence du champ de contrainte dû au chargement macroscopique. Malgré tout, ce genre d’approche ne permet nullement de prendre en compte les aspects de variabilité qui peuvent être introduits par des échelles plus fines comme par

la rugosité ou la cristallographie des grains du matériau.

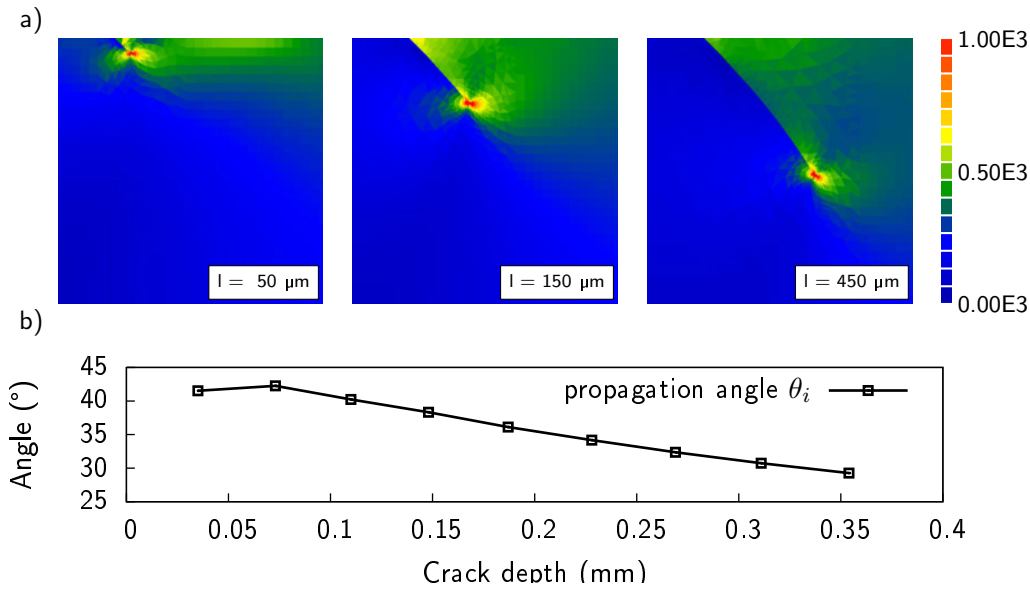


Figure 4 – Cas où l’angle de propagation est déterminé par le critère MTS : a) isocontraintes de von Mises pour un fissure de longueur 50, 150 et 450 μm ; b) évolution de l’angle avec la profondeur de fissure.

4 Propagation au sein de la microstructure

Il est aujourd’hui relativement aisé de produire des microstructures synthétiques à des fins calculatoires par tessellation de type Voronoi ou autres. Ceci est utilisé par exemple pour les calculs d’homogénéisation depuis quelques années. Malgré tout, les études de fissuration prenant en compte la microstructure restent à ce jour peu nombreuses, ou se limitent au monocristal [7]. Le fait est que ce genre d’étude concentre un grand nombre de difficultés tant du point de vue de la topologie du maillage que de la description de la plasticité et du temps de calcul. Nous nous plaçons donc ici dans le cas simple bidimensionnel et élastique. La zone de contact est représentée par un agrégat polycristallin et le matériau est décrit localement par son orientation et un comportement d’élasticité cubique.

Une comparaison des contraintes développées sous la surface et au voisinage de la pointe de fissure est visible sur la figure 5. Le calcul a été réalisé en introduisant une fissure de 100 microns dans un maillage polycristallin d’environ 250 cellules de Voronoi. Chaque grain est attribué une orientation cristalline déterminée aléatoirement. Le comportement du matériau est représentatif d’un alliage de titane monophasé β à symétrie cubique avec un facteur d’anisotropie élastique $a = 2C_{44}/(C_{11} - C_{12})$ voisin de 2,2. Pour le comportement du matériau isotrope, on utilise un module correspondant à la moyenne des bornes de Voigt et Reuss ($E = 107$ GPa avec $\nu = 0.29$).

La prise en compte de l’échelle de la microstructure modifie considérablement la répartition des contraintes sous le contact et au voisinage de la pointe de la fissure. Plus quantitativement, on peut comparer le taux de restitution de l’énergie dans les deux cas ce qui donne une valeur supérieure de 30% pour le cas du polycristal (avec ce jeu d’orientations). Il apparaît donc très important de ne pas négliger cette échelle et plus généralement de la prendre en compte dans l’analyse de la propagation de petites fissures comme dans le domaine du fretting.

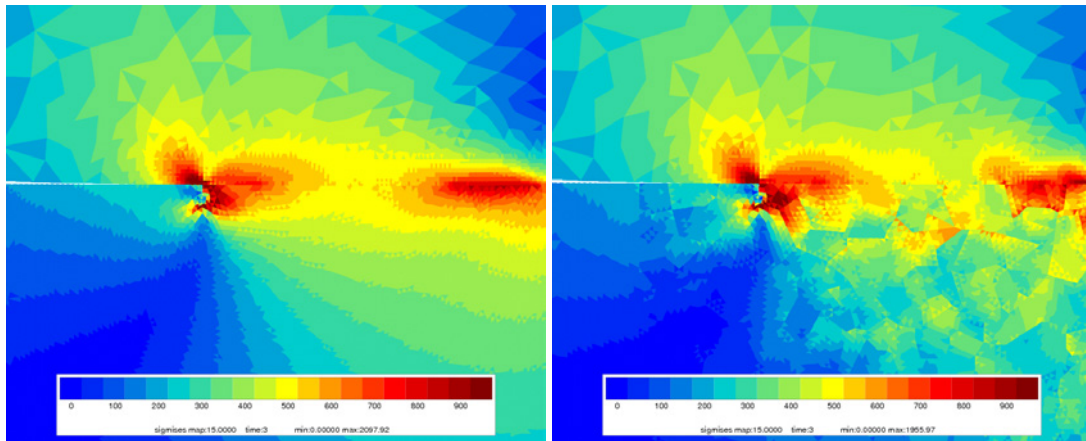


Figure 5 – Comparaison des isocontraintes de von Mises liées au chargement de fretting (P, δ) dans le cas d'un matériau homogène (à gauche) et d'un matériau polycristallin (à droite) contenant une fissure de 100 microns.

5 Conclusion

Les fissures de fretting se propagent sous le contact dans un champ de contrainte multiaxial. Ce travail a montré que la méthode des éléments finis couplée à la mécanique linéaire de la rupture peut constituer une première approche pour décrire la propagation de ces fissures jusqu'à l'arrêt de propagation. L'influence de l'angle de propagation est capitale car il conditionne le mode de propagation dominant (mode I ou mode mixte). Dans un deuxième temps, les premiers calculs de fissures de fretting prenant en compte explicitement une microstructure polycristalline sont présentés. La comparaison avec un matériau homogène isotrope montre des différences très significatives du taux de restitution de l'énergie ce qui confirme l'intérêt de ce type d'approche multi-échelles à poursuivre dans le futur.

Références

- [1] Dana R. Swalla and Richard W. Neu. Fretting damage assessment of titanium alloys using orientation imaging microscopy. *Tribology International*, 39(10) :1016–1027, 2006.
- [2] H. Proudhon, J.-Y. Buffière, and S. Fouvry. Three dimensional study of a fretting crack using synchrotron X-ray microtomography. *Engineering Fracture Mechanics*, 74(5) :782–793, 2007.
- [3] E. Giner, N. Sukumar, F.D. Denia, and F.J. Fuenmayor. Extended finite element method for fretting fatigue crack propagation. *International Journal of Solids and Structures*, 45(22–23) :5675–5687, 2008.
- [4] S. Munoz, H. Proudhon, J. Dominguez, and S. Fouvry. Prediction of crack extension under fretting wear loading conditions. *International Journal of Fatigue*, 12(12) :1769–1779, 2006.
- [5] N. Kamp, M. R. Parry, K. D. Singh, and I. Sinclair. Analytical and finite element modelling of roughness induced crack closure. *Acta Materialia*, 52(2) :343–353, 2004.
- [6] F. Erdogan and G.C. Sih. On the crack extension in plates under plane loading and transverse shear. *J. Basic Engng.*, 85 :519–527, 1963.
- [7] S. Flouriot, S. Forest, and L. Remy. Strain localization phenomena under cyclic loading : Application to fatigue of single crystals. *Computational Materials Science*, 26(SUPPL.) :61–70, 2003.