

Influence de la plasticité sur la mesure de longueur de fissure par différence de potentiel dans un champ de contrainte non homogène

A. Lambourg^{ac}, G. Henaff^a, Y. Nadot^a, S. Pierret^b, S. Gourdin^c

a. Institut PPRIME, CNRS, Université de Poitiers, ISAE ENSMA, UPR3346, Téléport 2, 1 avenue Clément Ader, BP 40109, 86961 FUTUROSCOPE CHASSENEUIL Cedex, France ;

aurelien.lambourg@ensma.fr / gilbert.henaff@ensma.fr / yves.nadot@ensma.fr /

b. Safran Aircraft Engines, Etablissement de Villaroche, 77550 Moissy Cramayel, France

stephane.pierret@safrangroup.com

c. Safran Tech, Etablissement de Paris-Saclay, 78772 Magny-les-Hameaux, France

aurelien.lambourg@safrangroup.com / stephane.gourdin@safrangroup.com

Résumé

La technique de différence de potentiel est largement utilisée pour la mesure de fissure de fatigue. Une hypothèse communément admise est que la variation de conductivité due à la plasticité n'a pas d'influence sur la courbe de calibration potentiel-profondeur d'une fissure. Ce travail vise à analyser de manière critique ce postulat en déterminant le domaine de sollicitation dans lequel une variation de conductivité doit être prise en compte pour l'établissement des courbes de calibration de pièces dans le cas de forts gradients de contraintes.

Mots clés : Différence de potentiel ; Conductivité ; Entaille ; Fatigue ; Plasticité

1. Introduction

Notre objectif final est de prédire la propagation d'une fissure de fatigue, amorcée à partir d'une anomalie de surface, dans un champ de contrainte complexe et avec une plasticité localisée dans le ligament. Le travail présenté ici a pour objet le suivi de l'évolution de ce type de fissures par mesure de potentiel. En effet, dans la littérature, de nombreux aspects du suivi de fissuration par mesure de potentiel sont abordés. Toutefois une hypothèse est souvent faite : la variation de la conductivité est faible dans l'éprouvette et n'impacte pas ou très peu la courbe de calibration, reliant potentiel et longueur de fissure. Cependant, estimer cet effet semble primordial lors de la mesure de fissure par potentiel dans le cas de pièces à gradient de contrainte et à plasticité localisé. L'objectif de ce travail est de vérifier cette hypothèse dans le cas d'une éprouvette entaillée lorsque la conductivité est affectée par la plasticité.

2. Influence d'une entaille sur les courbes de calibration

2.1 Suivi de fissure

Plusieurs méthodes sont possibles afin de mesurer la profondeur des fissures. Dans beaucoup d'études, la méthode privilégiée est optique [1] car celle-ci est rapide et facile à mettre en œuvre. Le suivi optique nécessite cependant un accès visuel direct sur l'éprouvette. Dans notre cas d'étude, le suivi optique est impossible car l'éprouvette se trouve dans un four sans fenêtre mais également car la propagation de la fissure se produit en profondeur. Nous couplerons donc deux autres méthodes de suivi de fissure, à savoir les marquages thermiques et le suivi par potentiel. La première technique consiste à former une couche d'oxyde visible à différents stades de la propagation en maintenant l'éprouvette à une charge nulle pendant une durée suffisante en température (cf. figure 1).

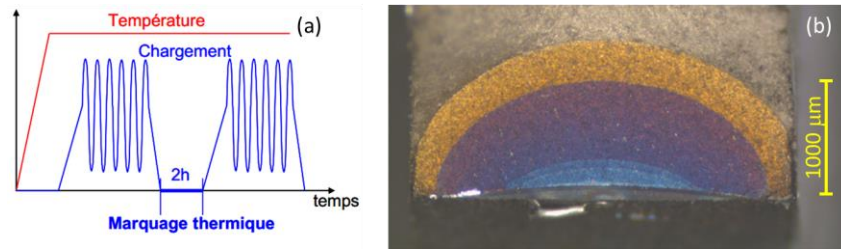


Figure 1. : Schéma du principe (a) et exemple (b) d'un marquage thermique

La seconde est la mesure de la différence de potentiel. Cette méthode consiste à faire passer un courant continu dans l'éprouvette et à mesurer le potentiel électrique à l'aide de sondes, disposées de part et d'autre de la fissure. Ainsi, lorsque la fissure propage, la résistance électrique entre les sondes augmente, ce qui induit alors une augmentation du potentiel mesuré. Cependant, comme seule la mesure de potentiel est réalisée, il est nécessaire par la suite de relier cette valeur à la longueur réelle de fissure. Pour cela, des courbes de calibration visant à établir, de manière continue, une relation précise entre la mesure de potentiel et la profondeur de fissure sont créées.

2.2 Courbes de calibration

Les courbes de calibration peuvent être obtenues de différentes façons. Le premier facteur d'influence est la géométrie de la pièce. Par exemple, les courbes de calibration peuvent être obtenues en utilisant un bain électrolytique en utilisant des parois isolantes pour simuler la fissure [2], [3] ou encore en taillant des feuilles d'aluminium ou de graphite [4] [5]. Nous avons choisi ici de coupler simulation électrique 3D par éléments finis et marquages thermiques. Ces marquages sont utilisés dans le but de relier une longueur de fissure à une valeur de potentiel mais permettent également de lever le doute sur la morphologie du front de fissure (semi-circulaire, semi-elliptique ou autre). En ce qui concerne la calibration numérique, cette dernière facilite en outre les études paramétriques d'influence sur la courbe de calibration. Il est ainsi aisé de modifier la position ou la dimension des sondes, la forme du front de fissure ou encore la valeur de la conductivité du matériau [6]. Afin de s'affranchir de la dépendance aux propriétés électriques du matériau et de la valeur du courant introduit dans l'éprouvette, la mesure de potentiel V est normée par une mesure de référence V_0 , mesurée en début d'essai [7].

Dans le cas de l'Inconel 718DA, les travaux de Doremus ont montré que la mesure de potentiel variait lors d'un simple essai en traction (cf. figure 2) [6]. Cette variation est linéaire et faible dans le domaine élastique mais augmente fortement dans le domaine plastique. Comme dit précédemment, grâce à la mesure de potentiel de référence, la mesure de la longueur de fissure n'est pas influencée par cette variation si la conductivité reste homogène dans le matériau.

A l'aide d'essais de traction charge/décharge à température ambiante et à 550°C, nous avons pu constater que la mesure de potentiel variait linéairement avec la déformation totale (cf. figure 3)

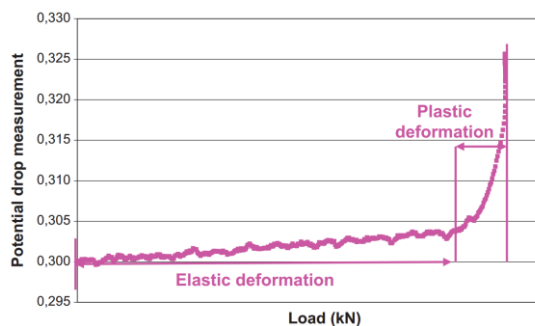


Figure 2. : Influence de la plasticité sur la mesure de différence de potentiel à température ambiante de l'Inconel 718DA [6]

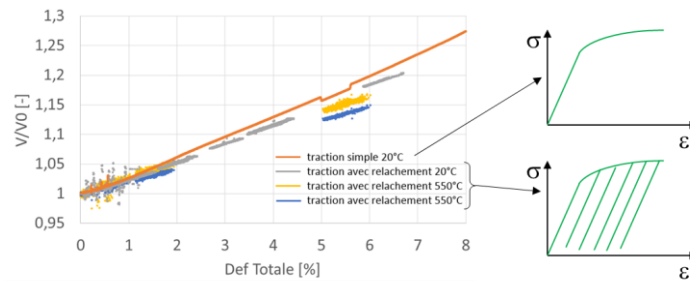


Figure 3. : Influence de la déformation totale sur la mesure de différence de potentiel

2.3 Conséquences des variations de propriétés électriques

Une campagne expérimentale a été conduite afin d'obtenir les courbes de calibration sur des éprouvettes entaillées, présentées sur la figure 4a ($r_{\text{entaille}} = 4\text{ mm}$, $p_{\text{entaille}} = 1\text{ mm}$). Afin d'obtenir la fissure qui amorce et propage sur le plan de propagation souhaité, une anomalie de surface géométrique a été introduite par polissage progressif au fond de l'entaille. Le négatif de la géométrie d'une anomalie réelle est présenté en figure 4b. Huit essais de fatigue à $R_\sigma = 0,05$ ont été conduits à trois niveaux de contraintes maximales différents. Les trois niveaux ont été sélectionnés de la manière suivante : le premier, σ_3 , a pour objectif de plastifier sur la totalité du ligament, le second σ_1 , est déterminé de sorte que la totalité du ligament reste macroscopiquement dans le domaine élastique et le troisième, σ_2 , constitue un cas intermédiaire où une plastification sur les 500 premiers microns se produit. Un facteur 6 est observé sur la durée de vie entre l'application de la contrainte la plus forte et la plus faible ($\sigma_3 > \sigma_2 > \sigma_1$).

Réduire la distance entre les sondes de mesure affine la sensibilité de la courbe de calibration [6]. Ainsi, au plus fort niveau de contrainte, les sondes ont été rapprochées dans le but d'améliorer la détection de l'amorçage de la fissure. Cependant, avec des distances entre les sondes différentes, les essais deviennent délicats à comparer. Les résultats expérimentaux de ces mesures de potentiel ne seront donc pas présentés ici. Les courbes profondeurs/potentiels des autres essais sont présentées en figure 4c.

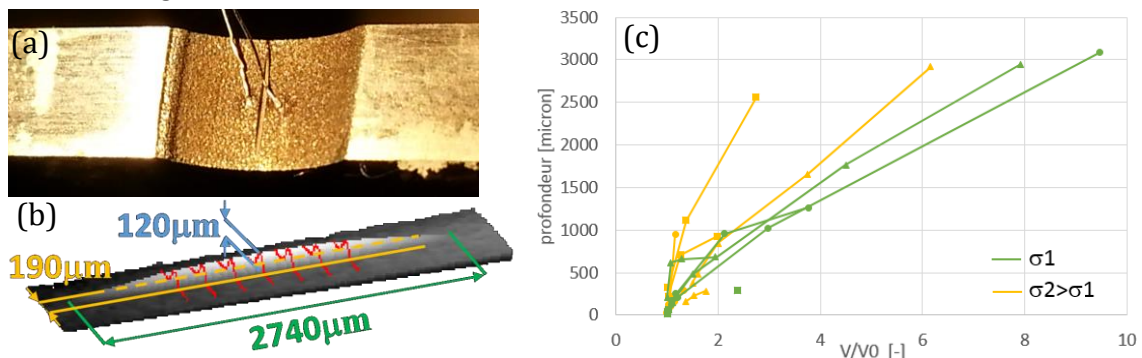


Figure 4. : Éprouvette entaillée : (a) avant essai et avec fils de potentiel et anomalie de surface, (b) un négatif d'une géométrie mesurée et (c) courbe de calibration

Cette campagne a fourni, grâce aux marquages thermiques, des données sur la forme des fronts de fissure en fonction de la profondeur de la fissure. Nous remarquons sur la figure 4c que globalement, pour les fissures longues supérieures à 500 µm, à V/V_0 équivalent, plus la contrainte est élevée, plus la profondeur est grande. Deux hypothèses sont possibles : soit la plasticité due à l'entaille influence la courbe de calibration, soit il s'agit de l'incertitude de la distance entre les sondes qui influence la mesure de potentiel dans le même sens.

Nous pouvons alors simuler numériquement la courbe de calibration à l'aide d'un script python et de calculs par éléments finis. La résolution du problème mécanique est menée par le solveur

ABAQUS, qui simule le champ mécanique. Les déformations totales sont ensuite introduites aux nœuds du maillage du modèle électrique, dans le but de faire varier les propriétés électriques du modèle. Le script introduit alors dans ce modèle, avec champ électrique variable, une fissure et résout le calcul pour obtenir la différence de potentiel aux points de mesure. Le script modifie ensuite la position de la fissure et refait la simulation. Nous obtenons alors la courbe de calibration présentée en figure 5. Nous constatons que les courbes de calibration obtenues pour les trois niveaux de contraintes sont superposées. Ainsi pour un rapport V/V_0 donné, la non prise en compte de la variation des propriétés électriques ne crée une différence que de l'ordre du dixième de pourcent sur la mesure de la profondeur de fissure, ce qui est négligeable.

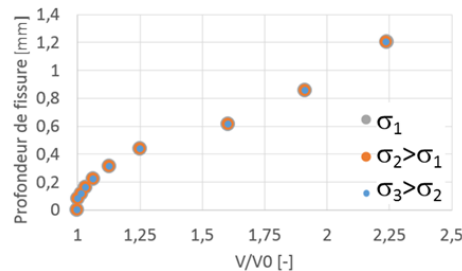


Figure 5. : Simulation des courbes de calibration pour les trois contraintes testées

3. Conclusion

Cette étude montre qu'avec des entailles d'un rayon de 4 mm et une profondeur de 1 mm, et pour des niveaux de contrainte engendrant une plastification dans le plan de propagation de la fissure, la modification des propriétés électriques associée à la plasticité impacte très peu la courbe de calibration. Cette conclusion se limite à ces contraintes, donnant des durées de vie de quelques milliers de cycles. Des essais de fatigue pour des chargements plus importants ou des gradients de contrainte plus sévères seront simulés pour évaluer à nouveau cette hypothèse et conduits si l'impact semble avéré.

Références

- [1] MR. Hill, DH. Stuart. Direct current potential difference correlation for open-hole, single-crack coupons. Engineering Fracture Mechanics (2012)
- [2] C. P. You, J. F. Knott. Electrolytic tank simulation of the potential drop technique for crack length determinations. International Journal of Fracture 1983;23: R139-R141
- [3] G. Baudin, H. Policella. Nouvelle méthode de mesure électrique de longueur de fissure. La recherche aérospatiale 1978; p195-203.
- [4] G. H. Aronson, R. O. Ritchie. Optimization of the electrical potential technique for crack growth monitoring in compact test pieces using finite element analysis. Journal of Testing and Evaluation 1979; p208-214
- [5] M. A. Hicks, A. C. Pickard. A comparison of theoretical and experimental methods of calibrating the electrical potential drop technique for crack length determination. International Journal of Fracture 1982; p91-101
- [6] L. Doremus, Y. Nadot, G. Henaff, C. Mary, S. Pierret ,Calibration of the potential drop method for monitoring small crack growth from surface anomalies crack front marking technique and finite element simulations, Int J Fatigue, 70 (2015), pp. 178–185
- [7] L. Gandossi, S.A. Summers, N.G. Taylor, R.C. Hurst, B.J. Hulm, J.D. Parker. The potential drop method for monitoring crack growth in real components subjected to combined fatigue and creep conditions: application of FE techniques for deriving calibration curves. International Journal of Pressure Vessels and Piping(2001), 881-891