

Prédiction de la durée de vie résiduelle en fatigue des structures fissurées après réparation

HAO WU^a, ABDELLATIF IMAD^a, NOUREDDINE BENSEDDIQ^a,
JAIME TUPIASSÚ PINHO DE CASTRO^b, MARCO ANTONIO MEGGIOLARO^b

^aLaboratoire de Mécanique de Lille (CNRS UMR 8107), Université de Lille1,
Ecole Polytech'Lille, France

^bDépartement Ingénierie Mécanique, PUC-Rio, Brésil

Résumé

La méthode du trou est une technique simple souvent utilisée pour la réparation des composants mécaniques fissurés contribuant ainsi à l'extension de leur durée de vie. Dans ce cas, la durée de vie résiduelle en fatigue peut être modélisée en se basant sur le nombre de cycles nécessaire pour réamorcer la fissure. Celle-ci dépend essentiellement de la taille de la fissure, du diamètre du trou et des propriétés mécaniques du matériau. Pour prédire cette durée de vie, des techniques classiques de type « ϵ -N» sont utilisées en tenant compte du concept de la fissure courte. Cette méthode a permis de prédire correctement la durée de vie résiduelle d'une fissure de fatigue après perçage de trous de rayons 1, 2.5 et 3 mm, dans le cas d'un alliage d'aluminium 6082 T6.

Mots clés: prédiction durée de vie résiduelle, réparation de fissure, méthode « ϵ -N», fissure courte.

1 Introduction

La méthode du trou est une technique fréquente de réparation qui permet de prolonger la durée de vie des matériaux fissurés en fatigue [1-2]. En général, l'augmentation du diamètre du trou contribue à diminuer la valeur du facteur de concentration de contrainte K_t . Les petits diamètres de trous sont associés au coefficient de sensibilité d'entaille q , qui traduit une diminution de cette concentration de contrainte dans le cas d'un chargement cyclique. Ces effets sont mesurés par le facteur de concentration de contrainte en fatigue K_f , défini par l'équation suivante [3] :

$$K_f = 1 + q(K_t - 1) \quad (1)$$

Cependant, quand une fissure longue est réparée par le perçage d'un trou relativement petit, elle peut être assimilée à une fissure de forme semi-elliptique ayant un K_t élevé, associé à un grand gradient de contrainte/déformation autour du fond d'entaille. En conséquence, le coefficient de sensibilité d'entaille q ne peut pas être déterminé par la méthode classique de Peterson [4].

Dans le présent travail, un modèle modifié est proposé afin de prédire la durée de vie résiduelle en fatigue en tenant compte de ce phénomène.

2 Etude expérimentale

Pour mesurer le retard associé au réamorçage d'une fissure de fatigue après perçage d'un trou centré au fond de fissure, une série d'expériences a été effectuée sur des éprouvettes SENT(voir la figure 1). L'épaisseur $B = 8$ mm et la largeur $W = 80$ mm.

Le matériau utilisé est un alliage d'aluminium 6082 T6. Les éprouvettes ont été coupées suivant la direction transversale. Les essais de fatigue ont été effectués sous une charge constante ΔP avec un rapport $R = P_{\min} / P_{\max} = 0.6$. Ce rapport R élevé a été choisi pour éviter le phénomène de fermeture de fissure au cours de la propagation.

Les rayons des trous, de 1, 2.5 et 3 mm, ont été soigneusement centrés et percés aux fonds des fissures. La charge appliquée ΔP est la même avant et après le perçage des trous.

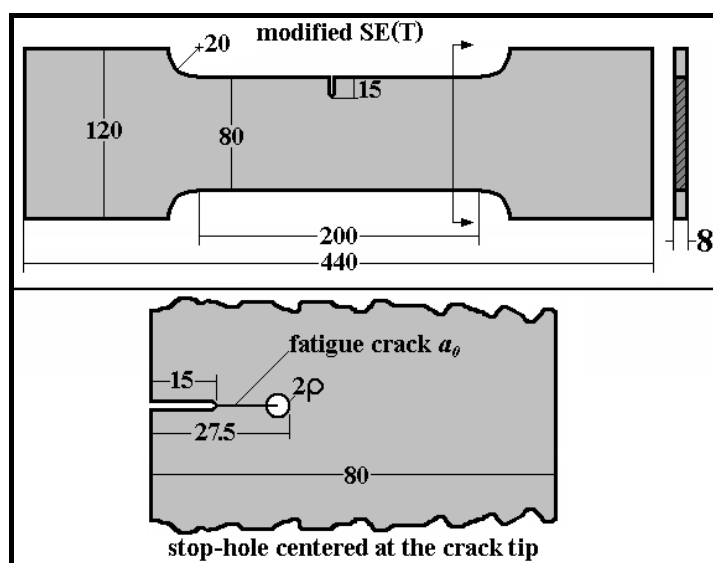


Figure 1: Eprouvette SENT modifiée.

3 Modélisation de la prédiction de la durée de vie résiduelle

3.1 Bases du modèle « ε - N »

Les durées de vie de réamorçage de fissure au fond du trou peuvent être modélisées par la méthode de déformation locale « ε - N », en utilisant :

- (i) les propriétés cycliques de l'alliage d'Aluminium 6082 T6 sont : $H' = 443$ MPa, $h' = 0.064$, $\sigma'_f = 485$ MPa, $b = -0.0695$, $\varepsilon'_f = 0.733$, $c = -0.827$. σ'_f , b , ε'_f et c sont les paramètres de Coffin-Manson, H' et h' sont respectivement le coefficient et l'exposant de la courbe cyclique de contrainte-déformation.
- (ii) Le modèle permettant la détermination du nombre de cycles est celui Smith-Watson-Topper [2] qui est donné par la formule suivante :

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\sigma'_f{}^2}{E\sigma_{max}} (2N)^{2b} + \frac{\sigma'_f \varepsilon'_f}{\sigma_{max}} (2N)^{b+c} \quad (2)$$

- (iii) l'histoire de la contrainte nominale
- (iv) le facteur de concentration de contrainte K_t des entailles après perçage d'un trou au fond de fissure peut être estimé par Inglis [2,5], ce qui donne pour des rayons de trou = 1, 2.5 ou 3 mm, respectivement les valeurs suivantes :

$$K_t \cong 1 + 2\sqrt{a/\rho} = 11.49, 7.63 \text{ ou } 7.06 \quad (3)$$

Les modèles classiques « ε - N » supposent que le comportement en fatigue peut être décrit par une courbe cyclique unique du type Ramberg-Osgood ($\sigma\varepsilon$), dont les paramètres H' et h' peuvent également être employés pour décrire les courbes de la boucle d'hystérésis ($\Delta\sigma, \Delta\varepsilon$).

Tous les calculs de la durée de vie de fatigue ont été effectués en utilisant le logiciel ViDa [5], pour les deux plus grands rayons du trou, les prévisions reproduisent bien le nombre de cycles mesurés avant le réamorçage de fissure en fatigue. Mais les prévisions obtenues par les mêmes méthodes pour le plus petit trou ($\rho = 1.0\text{mm}$) sous-estiment le nombre de cycles réels.

3.2 Modèle analytique de la sensibilité d'entaille

Les fissures longues se propagent avec la condition de $\Delta\sigma$ et R constants, quand ΔK est supérieur au seuil de propagation $\Delta K_{th}(R)$ on a :

$$\Delta K = \Delta \sigma \sqrt{\pi a} f(a/w)$$

Les fissures courtes ($a \cong 0$) se propagent d'une manière intrinsèquement différente, car $\Delta K(a \rightarrow 0, R) > \Delta K_{th}(R) \Rightarrow \Delta \sigma \rightarrow \infty$, ce qui n'a pas de sens physique, car il existe une contrainte $\Delta \sigma > 2S_L(R)$ pouvant initier et propager une fissure de fatigue où $S_L(R)$ est la limite de fatigue du matériau.

En supposant une taille caractéristique de fissure courte a_0 , on peut calculer la valeur de ΔK_I en fonction de la taille réelle de la fissure a [6] :

$$\Delta K_I = \Delta \sigma \sqrt{\pi(a + a_0)} \quad \text{avec} \quad a_0 = \frac{1}{\pi} \left(\frac{\Delta K_0}{f(a/w) \times \Delta S_0} \right)^2 \quad (4)$$

Où $\Delta S_0 = 2S_L(0)$ pour $R = 0$, le seuil de propagation sous le chargement cyclique $\Delta K_0 = \Delta K_{th}(0)$.

Ces équations prévoient qu'une microfissure ne peut pas propager si $a \ll a_0$, $\Delta K_I = \Delta K_0 \Rightarrow \Delta \sigma \rightarrow \Delta S_0$. Dans ce cas, le facteur géométrique $f(a/w)$ doit inclure l'effet de concentration de contrainte dû à la présence d'entaille. Pour cela, il est proposé de séparer $f(a/w)$ en deux termes: $f(a/w) = \eta \cdot \varphi(a)$, où $\varphi(a)$ mesure l'effet du gradient de contrainte de l'entaille, avec $\varphi(a \rightarrow 0) \rightarrow K_t$, alors que η est un facteur de correction représentant l'effet de la surface libre. Ce qui nous donne l'expression suivante:

$$\Delta K_I = \eta \times \varphi(a) \times \Delta \sigma_n \sqrt{\pi(a + a_0)} \quad \text{où} \quad a_0 = \frac{1}{\pi} \left(\frac{\Delta K_0}{\eta \times \Delta S_0} \right)^2 \quad (5)$$

En utilisant la définition traditionnelle $\Delta K = f(a/w) \cdot \Delta \sigma \sqrt{\pi a}$, une manière alternative de modéliser l'effet de la fissure courte, suppose que le seuil de propagation en fatigue dépend de la taille de la fissure, $\Delta K_{th}(a, R = 0) = \Delta K_{th}(a)$, ce qui conduit à la formulation suivante :

$$\frac{\Delta K_{th}(a)}{\Delta K_0} = \frac{\Delta \sigma \sqrt{\pi a} \times f(a/w)}{\Delta \sigma \sqrt{\pi(a + a_0)} \times f(a/w)} = \sqrt{\frac{a}{a + a_0}} \Rightarrow \Delta K_{th}(a) = \frac{\Delta K_0}{\sqrt{1 + (a_0/a)}} \quad (6)$$

Cependant, l'expression (6) peut être généralisée en introduisant un paramètre ajustable γ [7], qui peut se réécrire sous la forme suivante :

$$\Delta K_{th}(a) = \Delta K_0 \left[1 + (a_0/a)^{\gamma/2} \right]^{-1/\gamma} \quad (7)$$

Pour une plaque (infinie) chargée en mode I, quand une fissure s'initie à partir d'un trou circulaire de rayon ρ , l'amplitude du facteur d'intensité de contrainte est donnée par l'expression suivante [8] :

$$\Delta K_I = \eta \times \varphi(a/\rho) \times \Delta \sigma \sqrt{\pi a} = 1.1215 \times \varphi(a/\rho) \times \Delta \sigma \sqrt{\pi a} \quad (8)$$

où $\varphi(a/\rho) \equiv \varphi(x)$ est donné par :

$$\varphi(x) = \left(1 + \frac{0.2}{(1+x)} + \frac{0.3}{(1+x)^6} \right) \times \left(2 - 2.354 \frac{x}{1+x} + 1.206 \left(\frac{x}{1+x} \right)^2 - 0.221 \left(\frac{x}{1+x} \right)^3 \right) \quad (9)$$

Une fissure peut se propager à partir d'un trou quand :

$$\Delta K_I = \eta \times \varphi(a/\rho) \times \Delta \sigma \sqrt{\pi a} > \Delta K_{th} = \Delta K_0 \times \left[1 + (a_0/a)^{\gamma/2} \right]^{-1/\gamma} \quad (10)$$

Le critère de propagation pour ces fissures de fatigue peut alors être défini par [9] :

$$\varphi\left(\frac{a}{\rho}\right) > \frac{\left(\frac{\Delta K_0}{\Delta S_0 \sqrt{\rho}}\right) \times \left(\frac{\Delta S_0}{\Delta \sigma}\right)}{\left[\left(\eta \sqrt{\frac{\pi a}{\rho}}\right)^\gamma + \left(\frac{\Delta K_0}{\Delta S_0 \sqrt{\rho}}\right)^\gamma\right]^{1/\gamma}} \equiv g\left(\frac{a}{\rho}, \frac{\Delta S_0}{\Delta \sigma}, \frac{\Delta K_0}{\Delta S_0 \sqrt{\rho}}, \gamma\right) \quad (11)$$

En conséquence, $K_f = \Delta S_0 / \Delta \sigma$ peut être calculé à partir de la limite de fatigue ΔS_0 , du seuil de propagation de fissure ΔK_0 et de la géométrie d'éprouvette fissurée par les formulations suivantes [5]:

$$\begin{cases} \varphi(a/\rho) = g(a/\rho, \Delta S_0/\Delta \sigma, \Delta K_0/\Delta S_0 \sqrt{\rho}, \gamma) \\ \frac{\partial}{\partial a} \varphi(a/\rho) = \frac{\partial}{\partial a} g(a/\rho, \Delta S_0/\Delta \sigma, \Delta K_0/\Delta S_0 \sqrt{\rho}, \gamma) \end{cases} \quad (12)$$

Si une fissure se propage à partir d'une entaille semi-elliptique d'axes b et c , avec a et b dans la même direction perpendiculaire à la contrainte nominale $\Delta \sigma$, le facteur d'intensité de contrainte est donné par l'expression suivante [5]:

$$\Delta K_I = \eta \times F(a/b, c/b) \times \Delta \sigma \sqrt{\pi a} \quad (13)$$

où $\eta = 1.1215$ est le facteur de correction et $F(a/b, c/b)$ est le facteur géométrique associé à la concentration de contrainte d'entaille, qui peut être calculé en fonction du paramètre adimensionnel $s = a/(a + b)$ et de K_t , par la formule suivante [8]:

$$K_t = \left(1 + 2 \frac{b}{c}\right) \times \left[1 + \frac{0.1215}{(1 + c/b)^{2.5}}\right] \quad (14)$$

4 Résultats et discussions

Le modèle amélioré pour prédire la durée de vie résiduelle, d'une éprouvette SENT fissurée et après un perçage de trous, a été validé dans le cas suivant: (i) une entaille semi-elliptique avec $b = 27.5 \text{ mm}$ et $\rho = c^2/b = 1, 2.5$ et 3 mm (ii) les propriétés mécaniques d'un alliage Al 6082 T6.

Les figures 2, 3 et 4 présentent l'évolution de l'amplitude du facteur d'intensité de contrainte en fonction du nombre de cycles en utilisant le modèle amélioré, avec $q \cong 1$ pour deux rayons du trou $\rho = 3.0$ et $\rho = 2.5 \text{ mm}$ et $K_f = 7.0$ et 7.2 . Pour un rayon plus petit $\rho = 1 \text{ mm}$, K_t est estimé à $\cong 11.5$ et $K_f = 8.3$. Le seuil de propagation et la limite de la fatigue d'Al 6082 T6 sont estimés à $\Delta K_0 = 4.8 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ et $\Delta S_0 = 110 \text{ MPa}$, avec $\gamma = 6$. Globalement, les résultats obtenus montrent que le modèle amélioré permet de prédire de la durée de vie résiduelle des éprouvettes fissurées ayant été réparée par un perçage d'un trou.

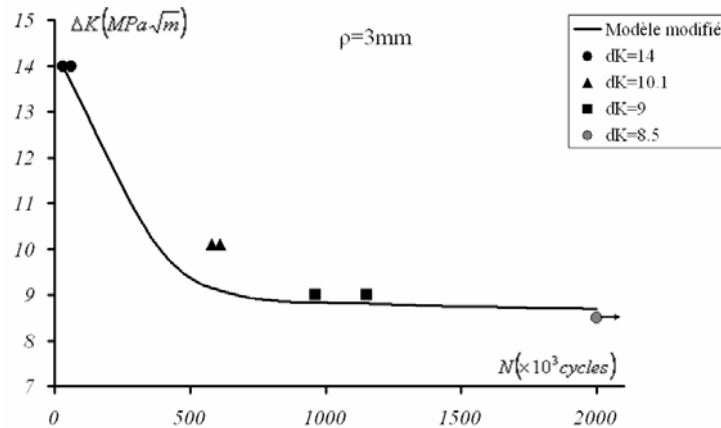


Figure 2: Comparaison calcul analytique (K_f au lieu du K_t) et valeurs expérimentales du nombre de cycles nécessaires au réamorçage de la fissure pour un rayon du trou $\rho = 3.0 \text{ mm}$

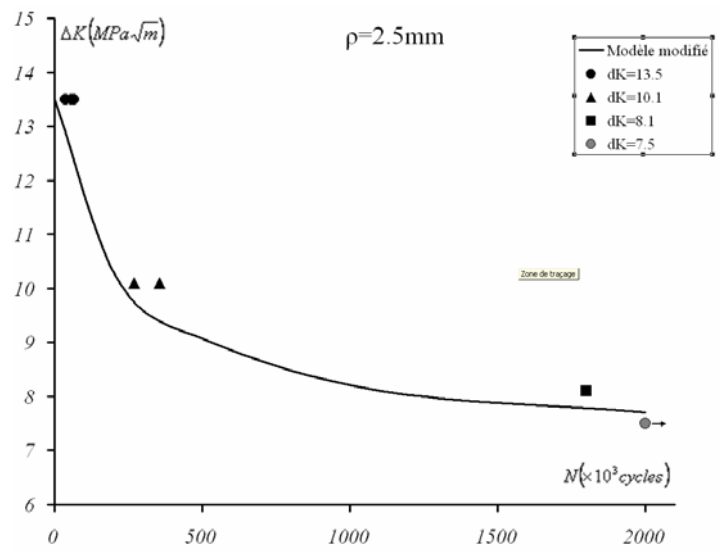


Figure 3: Comparaison calcul analytique (K_f (au lieu du K_t)) et valeurs expérimentales du nombre de cycles nécessaires au réamorçage de la fissure pour un rayon du trou $\rho = 2.5$ mm

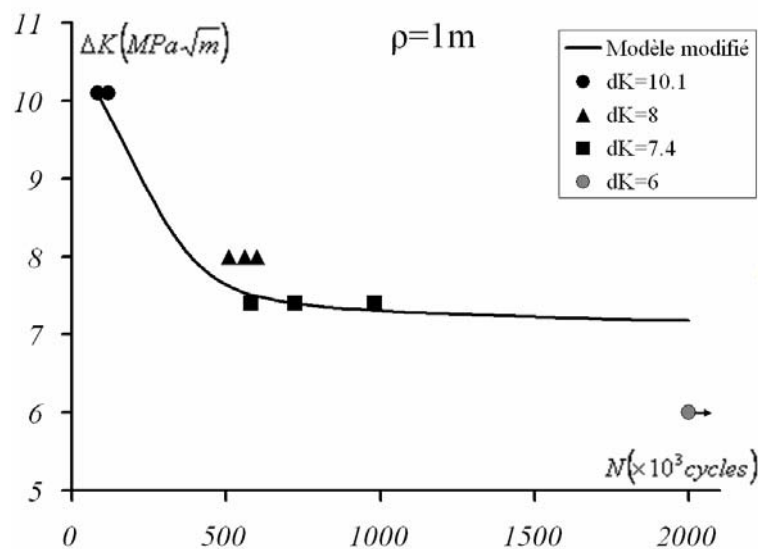


Figure 4: Comparaison calcul analytique (K_f (au lieu du K_t)) et valeurs expérimentales du nombre de cycles nécessaires au réamorçage de la fissure pour un rayon du trou $\rho = 1.0$ mm.

5 Conclusion

Les techniques classiques « ε - N » ont été employées avec des propriétés mécaniques du matériau correctement estimées. Les résultats obtenus, par la méthode « ε - N », ont permis de prédire correctement les durées de vie de réamorçage mesurées suite à une réparation de fissure par la méthode du trou, et particulièrement dans le cas des grands rayons du trou ($\rho = 1, 2.5$ et 3 mm), en utilisant le facteur de concentration de contrainte de fatigue K_f au lieu du facteur de concentration de contrainte K_t . Cependant, le coefficient de sensibilité d'entaille q , pour estimer K_f , doit être calculé de manière appropriée en considérant l'effet de la géométrie semi-elliptique d'entaille.

Référence

- [1] Ghfiri R, Amrouche A, Imad A, Mesmacque G. Fatigue life estimation after crack repair in 6005 AT-6 aluminium alloy using the cold expansion hole technique. *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* 2000;23:911
- [2] Hao Wu, Abdelatif Imad, Nouredine.Benseddiq, Jaime Tupiassú Pinho de Castro, Marco Antonio Meggiolaro. On the prediction of the residual fatigue life of cracked structures repaired by the stop-hole method. Submitted to *Int. J. Fatigue*, 2009.
- [3] SHIGLEY, J.E.; MISCHKE, C.R.; BUDYNAS, R.G. *Mechanical Engineering Design*, 7th ed., McGraw-Hill 2004.
- [4] MEGGIOLARO, M.A.; MIRANDA, A.C.O.; CASTRO, J.T.P. Short crack threshold estimates to predict notch sensitivity factors in fatigue. *Int. J. Fatigue Volume 29, Issues 9-11.* p.2022-2031, 2007.
- [5] Miranda ACO, Meggiolaro MA, Castro JTP, Martha LF, Bittencourt TN. Fatigue crack propagation under complex loading in arbitrary 2D geometries. In: *ASTM STP 1411*, vol. 4; 2002. p.120-46.
- [6] EL HADDAD, M.H.; TOPPER, T.H.; SMITH, K.N. Prediction of non-propagating cracks. *Eng. Fract. Mech.* v11, p.573-84, 1979.
- [7] BAZANT, Z.P. Scaling of quasi brittle fracture: asymptotic analysis. *Int. J. Fracture* v.83(1), p.19-40, 1997.
- [8] TADA, H.; PARIS, P.C.; IRWIN, G.R. *The stress analysis of cracks handbook*. Del Research; 1985.
- [9] MEGGIOLARO, M.A.; CASTRO, J.T.P. Evaluation of the errors induced by high nominal stresses in the classical ϵN method, in Blom,AF ed. *Fatigue* 2002(2), p.1451-1458, EMAS 2002.