

Modélisation du comportement en fatigue et prédiction de la durée de vie d'un composant mécanique

M.A. Dhifallah^a, C. Labergère^b, K. Saanouni^c, H. Badreddine^d

a. Université de Technologie de Troyes, ICD/LASMIS UMR-CNRS 6281, 12 rue Marie Curie CS 42060 Troyes Cedex, France ; mohamed.ali.dhifallah@utt.fr

Résumé

Ce travail a pour but de présenter un modèle de comportement elasto-plastique couplé à l'endommagement de fatigue. Dans ce modèle, différentes fonctions sont utilisées afin d'assurer un couplage fort entre les phénomènes physique pris en compte et l'endommagement de fatigue. Les aspects théoriques ainsi que les aspects numériques sont présentés et une attention particulière est portée à l'algorithme utilisé pour la prédiction de la durée de vie. Ce modèle a été utilisé pour déterminer la durée de vie en fatigue d'une éprouvette cylindrique en acier 316L.

Mots clés : Modèle de comportement; endommagement de fatigue; saut de cycles

1. Introduction

Pour les métaux, un grand nombre de critères de fatigue, permettant la prédiction de la tenue en service des composants mécaniques, est proposé. Ces critères peuvent être classés sous quatre catégories : (i) approches basées sur les invariants des contraintes, (ii) approches intégrales, (iii) approches basées sur les énergies et (iv) une dernière catégorie de critères basés sur les plans critiques.

Dans ce travail, toute une méthodologie numérique pour la prédiction de la durée de vie en fatigue des composants mécaniques soumis à des trajets de chargements plus au moins complexes est proposée. Différentes fonctions sont utilisées pour assurer le couplage fort de l'endommagement avec les différents phénomènes physiques pris en compte. Il est admis que les micros défauts peuvent totalement ou partiellement se refermer durant la phase compressive du chargement [1, 2, 3]. Ce phénomène appelé effet quasi-unilatéral est pris en considération dans le présent modèle.

De point de vue numérique, le présent modèle est implémenté dans ABAQUS® et utilisé pour la prédiction des durées de vie sous chargements cycliques. Cette prédiction est trop lente et couteuse, et pour réduire ce temps de calcul, un algorithme spécifique est utilisé.

Les aspects théoriques et numériques de ce travail ainsi que les résultats d'une simulation d'un essai de fatigue d'une éprouvette cylindrique en acier 316L seront présentés et discutés.

2. Modèle elasto plastique couplé à l'endommagement de fatigue

2.1 Aspects théoriques

Le modèle présenté a été développé dans le cadre de la thermodynamique des processus irréversibles avec des variables d'état internes [1, 3] en se basant sur une approche macroscopique

phénoménologique. Un ensemble de variables d'état a été introduit dans cette modélisation afin de décrire les phénomènes physiques influençant le comportement en fatigue du matériau. Les relations 1 à 3 définissant les variables d'états effectives (tenseur des contraintes, tenseur des écrouissages cinématique et variable d'écrouissage isotrope) sont définies sur la configuration fictive saine en se basant sur l'hypothèse d'équivalence en énergie totale [3].

$$\underline{\tilde{\sigma}} = \frac{\underline{\sigma}}{g_{ed}(d)} \quad \underline{\tilde{\varepsilon}}^e = g_{ed}(d) \cdot \underline{\varepsilon}^e \quad (1)$$

$$\underline{\tilde{X}}^i = \frac{\underline{X}^i}{g_{cin}(d)} \quad \underline{\tilde{\alpha}}^i = g_{cin}(d) \cdot \underline{\alpha}^i \quad (2)$$

$$\tilde{R} = \frac{R}{g_{iso}(d)} \quad \tilde{r} = g_{iso}(d)r \quad (3)$$

avec $g_{ed}(d) = g_{cin}(d) = \sqrt{1-d}$ et $g_{iso}(d) = \sqrt{1-d^{\gamma_r}}$ sont les fonctions de couplage utilisées pour introduire l'effet de l'endommagement sur les autres phénomènes physiques.

Dans le modèle décrit, l'effet de fermeture des micros défauts est pris en compte [1, 2, 4]. Pour cet effet, le tenseur des déformations et par conséquent le tenseur des contraintes ont été décomposés en partie sphérique et partie déviateur (voir équations 4 et 5). L'effet quasi-unilatéral est introduit uniquement dans la partie sphérique via la fonction $g_{eh}(d)$ (voir équation 6 et 7), et à travers de laquelle, on peut assurer la continuité de la contrainte lors du passage de la partie positive à la partie négative du trajet de chargement.

$$\underline{\tilde{\varepsilon}}_e = g_{ed}(d) \underline{\varepsilon}^{ed} + g_{eh}(d) \varepsilon_h \underline{1} \quad \text{avec} \quad \varepsilon_h = \frac{1}{3} tr(\underline{\varepsilon}^e) \quad (4)$$

$$\underline{\tilde{\sigma}} = \frac{\underline{\sigma}^d}{g_{ed}(d)} + \frac{\sigma_h}{g_{ed}(d)} \underline{1} \quad \text{avec} \quad \sigma_h = \frac{1}{3} tr(\underline{\sigma}) \quad (5)$$

$$g_{eh}(d) = \sqrt{1 - h(\varepsilon_h) d^{\gamma_e}} \quad (6)$$

$$h(\varepsilon_h) = \begin{cases} 1 & \text{si } \varepsilon_h > 0 \\ h_c & \text{si } \varepsilon_h < \Delta \varepsilon_h \\ \frac{1+h_c}{2} + \frac{1-h_c}{2} \cos\left(\pi \frac{\varepsilon_h}{\Delta \varepsilon_h}\right) & \text{sinon} \end{cases} \quad (7)$$

Dans les équations précédentes, γ_e contrôle le couplage entre l'endommagement de fatigue et la partie sphérique du tenseur des déformations élastiques tandis que γ_r contrôle le couplage entre l'endommagement de fatigue et l'écrouissage isotrope. $\underline{\sigma}^d$ et $\underline{\varepsilon}^{ed}$ sont respectivement les parties déviateurs des tenseurs des contraintes et des déformations élastiques respectivement. $\Delta \varepsilon_h$ est un paramètre contrôlant la transition entre les phases positives et négatives du trajet de chargement. Les tableaux 1 et 2 résument les relations d'état et les équations d'évolution associées, obtenues en utilisant les potentiels d'état et des dissipations définis dans [5].

$$\underline{\sigma} = 2G_e(1-d)\underline{\varepsilon}^{ed} + K_e(1-h(\varepsilon_h)d^{\gamma_e})tr(\underline{\varepsilon}^e)\underline{1} \quad (8)$$

$$\underline{X}^i = \frac{2}{3}(1-d)C_i\underline{\alpha}^i \quad (9)$$

$$R = (1-d^{\gamma_r})Q(p)r \quad \text{where} \quad Q(p) = Qe^{-\theta p} \quad (10)$$

$$Y = Y_e^+ + Y_e^- + h(\varepsilon_h)\left(\sum_{i=1}^n Y_{cin}^i + Y_{iso}\right) \quad (11)$$

$$Y_e^+ = G_e \langle \underline{\varepsilon}^{ed} \rangle_+ : \langle \underline{\varepsilon}^{ed} \rangle_+ + \frac{K_e}{2} \gamma_e h(\varepsilon_h) d^{\gamma_e-1} \langle tr(\underline{\varepsilon}^e) \rangle_+ \quad (12)$$

$$Y_e^- = G_e \langle \underline{\varepsilon}^{ed} \rangle_- : \langle \underline{\varepsilon}^{ed} \rangle_- + \frac{K_e}{2} \gamma_e h(\varepsilon_h) d^{\gamma_e-1} \langle tr(\underline{\varepsilon}^e) \rangle_- \quad (13)$$

$$Y_{cin}^i = \frac{1}{3} C_i \underline{\alpha}^i : \underline{\alpha}^i \quad (14)$$

$$Y_{iso} = \frac{1}{2} \gamma_r d^{\gamma_r-1} Q(p) r^2 \quad (15)$$

Table 1. Relations d'état du modèle elasto-plastique couplé à l'endommagement de fatigue

$$\dot{\underline{\varepsilon}}_p = \dot{\lambda} \underline{n} \quad \text{avec} \quad \underline{n} = \frac{3}{2} \frac{1}{\sqrt{1-d}} \frac{\underline{\sigma}^d - \sum_{i=1}^n \underline{X}^i}{\left\| \underline{\sigma}^d - \sum_{i=1}^n \underline{X}^i \right\|} \quad (16)$$

$$\dot{\underline{\alpha}}^i = \dot{\lambda} (\underline{n} - a_i \underline{\alpha}^i) \quad (17)$$

$$\dot{r} = \dot{\lambda} \left(\frac{1}{\sqrt{1-d^{\gamma_r}}} - br \right) \quad (18)$$

$$\dot{d} = \frac{\dot{\lambda}}{(1-d)^\beta} \left\langle \frac{Y}{S} \right\rangle^s \langle p - p^* \rangle^\gamma \quad (19)$$

$$f = \frac{\left\| \underline{\sigma}^d - \sum_{i=1}^n \underline{X}^i \right\|}{\sqrt{1-d}} - \frac{R}{\sqrt{1-d^{\gamma_r}}} - \sigma_y = 0 \quad (20)$$

Table 2. Relations d'évolution du modèle elasto-plastique couplé à l'endommagement

Dans les tableaux précédents, K_e et G_e sont respectivement les modules de compression hydrostatique et celui de cisaillement. C_i et a_i sont respectivement le module et le paramètre de non linéarité du i ème écrouissage cinématique. Q et b sont respectivement le module et le paramètre de non linéarité de l'écrouissage isotrope, θ est un paramètre matériau. S , s , β et γ gouvernent l'évolution de l'endommagement cyclique. La surface de charge dans ce cas isotrope est décrite par le critère f (Equation 20) dans lequel la norme de von Mises est utilisée.

La force thermodynamique associée à l'endommagement de fatigue a été décomposée en quatre parties afin de pouvoir désactiver partiellement ou totalement l'endommagement durant la phase négative du trajet de chargement ainsi que de pouvoir distinguer la contribution des écrouissages dans l'évolution de l'endommagement. Pour la description de l'évolution de l'endommagement, le critère proposé dans [1] a été utilisé. Dans l'expression de ce critère, p est la déformation plastique cumulée, p^* est un seuil de plasticité et la

forme dans laquelle est écrite $\dot{\gamma}$ prend en compte la triaxialité de la contrainte et par conséquent il peut être appliqué à des trajets de chargement complexes.

2.2 Aspects numériques

De point de vue numérique, les équations constitutives du modèle ont été discrétisées dans le temps par la θ -méthode en combinaison avec la méthode asymptotique qui a été utilisée pour les écrouissages. Une fois la discrétisation est faite, l'algorithme de prédiction élastique/ correction plastique a été utilisé pour l'intégration du modèle avant de l'implémenter dans ABAQUS®.

L'approche proposée dans ce travail permet de prédire l'évolution de l'endommagement de fatigue tout au long de la durée de vie du composant mécanique étudié. Cette prédiction est trop lente et coûteuse en terme de temps de calcul. Pour éviter ce long temps d'attente des résultats, un algorithme spécifique appelé algorithme de saut de cycles a été utilisé. L'idée générale de cet algorithme est de calculer n cycles successifs (n est généralement de l'ordre de 4 cycles) avant d'effectuer un saut de ΔN cycles. Le Saut ΔN est automatiquement et les champs mécaniques sont transférés en utilisant le développement en série de Taylor.

3. Conclusions

Ce travail propose une méthodologie 3D pour la prédiction de la durée de vie en fatigue des composants mécaniques obtenue par grandes déformations. L'usage de différentes fonctions de couplage a permis de distinguer l'effet de chaque phénomène physique sur le comportement en fatigue de la structure étudiée.

Ce modèle a été implémenté dans ABAQUS® via la routine UMAT et il a été validé sur un RVE puis par la simulation d'un test de fatigue effectué sur une éprouvette cylindrique en acier 316L avec usage de l'algorithme de saut de cycles qui a permis de minimiser le temps de calcul d'une façon significative.

Remerciements

Les auteurs remercient le Ministère de l'Education Nationale, de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche pour le soutien financier.

Références

- [1] J. Lemaitre, J.L. Chaboche, *Mécanique des Matériaux Solides*, Dunod, 1985
- [2] J. Lemaitre, R. Desmorat, *Engineering damage mechanics*, Springer, 2005
- [3] K. Saaanouni, *Damage mechanics in metal forming: advanced modeling and numerical simulation*, ISTE, London, UK and John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA, 2012
- [4] J. Ladeveze, J. Lemaitre, *Damage effective stress in quasi-unilateral conditions*, IUTAM Conference, Lyngby, 1984
- [5] C. Labergere, *Prediction of low cycle fatigue life using cycles jumping integration scheme*, ICDM 2, 2015