

Modélisation de l'endommagement de fluage-fatigue d'un alliage de nickel pour récepteur solaire

H. Morch^a, L. Duchêne^b, A-M. Habraken^c

a. Université de Liège, helene.morch@uliege.be

b. Université de Liège, l.duchene@uliege.be

c. Université de Liège, anne.habraken@uliege.be

Mots clés : fluage-fatigue ; alliage de nickel ; endommagement ; Haynes 230

Résumé

Un modèle élasto-visco-plastique basé sur le modèle de Chaboche [1] a été implémenté afin de modéliser le comportement de tubes en alliage de nickel utilisés dans les centrales solaires à tour. Pour pouvoir estimer la durée de vie des tubes, un modèle d'endommagement basé sur les travaux de Lemaitre [2] a également été intégré au code. Ce modèle comprend deux types d'endommagement qui sont cumulés : l'endommagement de fluage, dont l'évolution suit le modèle de Kachanov, et l'endommagement de fatigue dont l'évolution suit le modèle d'endommagement unifié de Lemaitre. Le modèle a été vérifié à partir de données expérimentales issues de la littérature [3].

1. Introduction

Dans le domaine des énergies renouvelables, les centrales solaires thermodynamiques sont des systèmes très prometteurs. Le fonctionnement de ces centrales repose en grande partie sur le récepteur solaire, constitué de tubes d'alliage de nickel 230 à l'intérieur desquels circule un fluide caloporteur. Les tubes des récepteurs solaires sont soumis à un chargement cyclique à haute température comprenant de longues périodes de maintien sous contrainte.

Pour étudier le comportement de ces tubes, un modèle de type Chaboche [1] a été implémenté dans le code éléments finis Lagamine [4] de l'Université de Liège. Afin d'estimer la durée de vie des tubes soumis au chargement thermomécanique de fluage-fatigue, un modèle d'endommagement basé sur les travaux de Lemaitre et Chaboche [2] a été couplé au modèle de comportement. Ce modèle permet de considérer d'une part un endommagement de fatigue et d'autre part un endommagement de fluage qui influent l'un sur l'autre.

2. Description du modèle

Le modèle constitutif permet de modéliser différents aspects du comportement du matériau tels que l'érouissage isotrope, l'érouissage cinématique, la restauration statique, ou encore l'érouissage cyclique [5].

Pour modéliser l'endommagement du matériau, on utilise le concept de variable d'endommagement de Lemaitre [2]. L'endommagement est représenté par une variable D dont la valeur évolue de 0 à 1. En pratique, on limite la valeur de l'endommagement à l'endommagement critique $D_{crit} = 0.3$ correspondant à l'initiation de la fissuration pour un métal. L'endommagement total D est calculé

comme la somme de l'endommagement de fatigue D_f et de l'endommagement de fluage D_c . La séparation des deux types d'endommagement vise à refléter les différents types de rupture observés lors d'essais de fluage ou de fatigue [3] : en fatigue, la fissuration se propage selon un mode transgranulaire, tandis qu'en fluage, on observe une propagation intergranulaire.

L'évolution de la variable d'endommagement de fatigue suit le modèle unifié de Lemaitre (Eq. (1)). Elle dépend de deux paramètres matériau S_f et s_f , de la vitesse de déformation plastique équivalente \dot{p} et du taux de restitution de densité d'énergie élastique Y fonction de la contrainte σ :

$$D_f = \left(\frac{Y(\sigma)}{S_f} \right)^{s_f} \dot{p} \quad (1)$$

L'expression du taux de restitution de densité d'énergie élastique Y permet de prendre en compte l'effet de refermeture des micro-défauts en appliquant un facteur $h = 0.2$ lorsque le matériau est soumis à de la compression (Eq. (2)).

$$Y(\sigma) = \frac{\langle \sigma \rangle^2}{2E(1-D)^2} + \frac{h\langle -\sigma \rangle^2}{2E(1-hD)^2} \quad (2)$$

Avec $\langle x \rangle = \begin{cases} x & \text{si } x \geq 0 \\ 0 & \text{si } x < 0 \end{cases}$

L'évolution de la variable d'endommagement de fluage est calculée selon la loi de Kachanov (Eq. (3)). Cette loi fait intervenir 3 paramètres matériau : S_c , s_c et k .

$$D_c = \left(\frac{Y(\sigma^d)}{S_c} \right)^{s_c} \frac{1}{(1-D_c)^k} \quad (3)$$

Pour l'endommagement de fluage, on utilise le concept de contrainte différée σ^d [6] dans l'expression de Y . Le calcul de cette contrainte différée revient à appliquer un filtre passe-bas à la contrainte, c'est-à-dire supprimer les composantes de la contrainte dont la fréquence est élevée (Eq. (4)). Le paramètre $1/\tau$ correspond à la fréquence au-delà de laquelle les effets du fluage peuvent être négligés. En particulier, pour un essai de fatigue pur au cours duquel la fréquence de chargement est élevée, on aura $\sigma^d \approx 0$ et donc $D_c \approx 0$.

$$\frac{d\sigma^d}{dt} = \frac{\sigma - \sigma^d}{\tau} \quad (4)$$

L'endommagement de fluage et l'endommagement de fatigue sont couplés au travers du taux de restitution d'énergie élastique Y (Eq. (2)) qui est calculé à partir de l'endommagement total D .

3. Vérification du modèle

Afin de s'assurer que le modèle permet bien de représenter le comportement de l'alliage 230, on cherche à vérifier que les résultats fournis par le modèle sont similaires aux résultats expérimentaux. Pour cela, on dispose de données expérimentales sur l'alliage 230 à 850°C issues de la littérature [7].

3.1 Identification des paramètres

Les paramètres du modèle de comportement ont été identifiés manuellement suivant la procédure

détaillée dans [8]. Ces paramètres ont ensuite été affinés en utilisant le code Optim de l’Université de Liège basé sur l’algorithme de Levenberg-Marquardt.

Pour identifier les paramètres du modèle d’endommagement de fatigue, on peut obtenir une expression simplifiée du nombre de cycles à rupture N_R (Eq. (5)) à partir de l’Eq. (1), où $\Delta\varepsilon^{vp}$ est l’amplitude de déformation plastique et σ_m la valeur stabilisée de l’amplitude de contrainte.

$$N_R \approx \frac{D_{crit}}{\Delta\varepsilon^{vp}} * \frac{1}{\left(\frac{\sigma_m^2}{2ES_f}\right)^{s_f} + \left(\frac{h\sigma_m^2}{2ES_f}\right)^{s_f}} \quad (5)$$

On procède de façon similaire pour l’endommagement de fluage. L’expression du temps à rupture pour un essai de fluage est donnée par l’Eq. (6) :

$$t_R = t_D + \left(\frac{2ES_c}{\sigma^2}\right)^{s_c} \int_0^{D_{crit}} (1 - D_c)^{k+2s_c} dD \quad (6)$$

On considère que l’endommagement de fluage n’est activé qu’après un temps $t_D \approx \tau$. Ce temps correspond au démarrage du fluage secondaire.

Les résultats de l’identification des paramètres d’endommagement sont illustrés à la Figure 1.

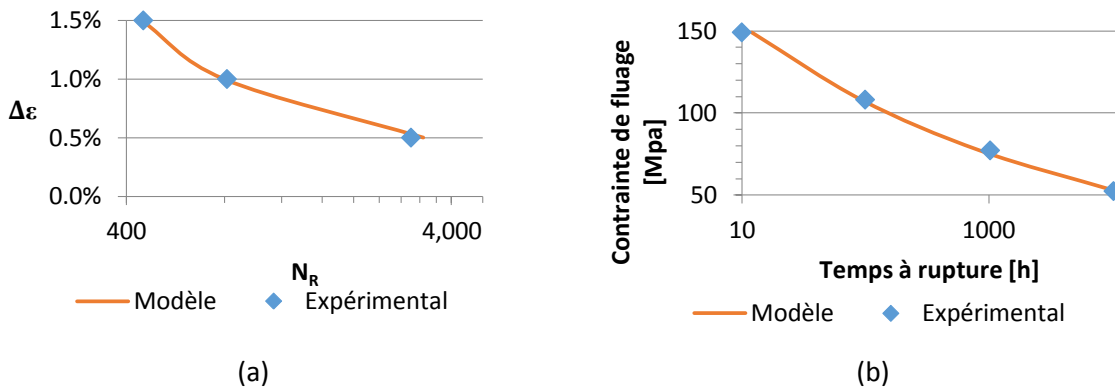


Figure 1 – (a) Identification des paramètres d’endommagement de fatigue ; (b) identification des paramètres d’endommagement de fluage.

3.2 Résultats

Les paramètres du modèle d’endommagement ont été identifiés à partir d’essais de fluage et d’essais de fatigue distincts. Afin de vérifier la validité du modèle pour un chargement combiné de fluage-fatigue, de tels essais ont été modélisés à l’aide du code éléments finis Lagamine [4].

On dispose des durées de vie du matériau pour trois essais de fluage-fatigue à $\Delta\varepsilon = 1\%$ avec des temps de maintien $t_H = 3$ min ; 10 min ; 30 min en traction [7].

Les 3 essais de fluage-fatigue ainsi que l’essai de fatigue à $\Delta\varepsilon = 1\%$ ont été simulés avec le modèle de Lemaitre-Chaboche présenté au paragraphe 2. Les durées de vie obtenues avec le modèle sont comparées aux données expérimentales ainsi qu’à la durée de vie obtenue en utilisant la méthode de sommation linéaire des endommagements (règle de Miner) sur la Figure 2.

Le modèle de Lemaitre et Chaboche donne de bons résultats pour les 4 essais, avec une erreur maximale de 19% pour l’essai avec temps de maintien de 10 minutes. Ces résultats sont nettement meilleurs que ceux obtenus avec la sommation linéaire des endommagements qui donne une erreur allant de 50% à 60% sur les 3 essais avec temps de maintien.

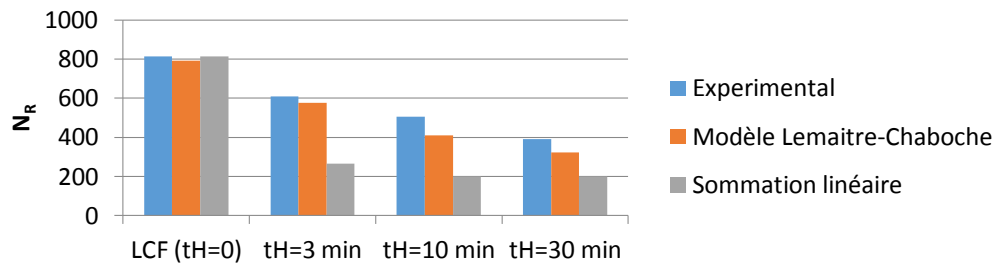


Figure 2 - Durée de vie obtenue pour différents essais

4. Conclusion

Afin de pouvoir étudier le comportement et la durabilité de tubes d'alliage de nickel, un modèle basé sur les travaux de Lemaitre et Chaboche a été implémenté dans le code éléments finis Lagamine de l'Université de Liège. Les paramètres pour ce modèle ont été identifiés à 850°C afin de vérifier la bonne prédiction de la durée de vie sur des essais de fluage-fatigue. Le modèle donne des résultats satisfaisants, en particulier par rapport à la méthode de sommation linéaire des endommagements.

Remerciements

Les auteurs remercient Cockerill Maintenance & Ingénierie (CMI) et la Région wallonne pour leur support financier. Les auteurs remercient également le pôle MecaTech. A. M. Habraken remercie le Fond de la Recherche Scientifique belge FRS-FNRS.

Références

- [1] J. L. Chaboche, "A review of some plasticity and viscoplasticity constitutive theories," *Int. J. Plast.*, vol. 24, no. 10, pp. 1642–1693, 2008.
- [2] J. Lemaitre, J. L. Chaboche, A. Benallal, and R. Desmorat, *Mécanique Des Matériaux Solides*, Dunod. Paris, 2009.
- [3] X. Chen, Z. Yang, M. A. Sokolov, D. L. Erdman, K. Mo, and J. F. Stubbins, "Low cycle fatigue and creep-fatigue behavior of Ni-based alloy 230 at 850°C," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 563, pp. 152–162, 2013.
- [4] "Lagamine code, http://www.uee.ulg.ac.be/cms/c_2383455/en/lagamine."
- [5] R. Ahmed, P. R. Barrett, and T. Hassan, "Unified viscoplasticity modeling for isothermal low-cycle fatigue and fatigue-creep stress-strain responses of Haynes 230," *Int. J. Solids Struct.*, vol. 88–89, pp. 131–145, 2016.
- [6] F. Gallerneau and J. L. Chaboche, "Fatigue Life Prediction of Single Crystals for Turbine Blade Applications," *Int. J. Damage Mech.*, vol. 8, no. 4, pp. 404–427, 1999.
- [7] X. Chen, "High Temperature Creep-Fatigue Behavior of Alloy 617 and Alloy 230," University of Illinois at Urbana-Champaign, 2012.
- [8] H. Morch, L. Duchene, and A. M. Habraken, "Identification method of an advanced constitutive law for nickel-based alloy Haynes 230 used in solar receivers," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1063, no. 1, 2018.