

Détermination rapide des propriétés en fatigue des matériaux - utilisation de la DRX résolue en temps pour l'estimation de l'évolution de l'endommagement lors d'essais de fatigue ultrasonique

V. JACQUEMAIN^a, N. RANC^a, T. ORS^a, V. MICHEL^a, V. FAVIER^a, O. CASTELNAU^a, D. THIAUDIERE^b, C. MOCUTA^b

a. PIMM, Arts et Métiers ParisTech, CNRS UMR 8006, contact : vincent.jacquemain@ensam.eu

b. DiffAbs, Synchrotron Soleil, Gif-sur-Yvette, France

Résumé :

Le dimensionnement en fatigue des structures nécessite aujourd'hui de s'intéresser au domaine des très grands nombres de cycles pouvant aller au-delà du milliard. Les machines de fatigue ultrasonique permettent de caractériser le comportement mécanique en fatigue à très grand nombre de cycles des matériaux avec des durées d'essai raisonnables. Cependant, déterminer efficacement les propriétés des matériaux métalliques au-delà de 10^9 cycles à l'aide d'essais de fatigue ultrasonique reste long. Pour procéder à cette caractérisation du domaine se trouvant au-delà du milliard, dans une durée réduite, une approche basée sur l'analyse de l'énergie dissipée et de l'énergie stockée en fatigue lors d'essais interrompus est ici développée.

Abstract :

Fatigue dimensionning of structures needs today to pay attention to the very high cycle fatigue domain which can go beyond one billion of cycles. Ultrasonic fatigue machines allow to characterize materials mechanical behavior in very high cycle fatigue in short test durations. Determining effectively the properties of metallic materials above 10^9 cycles in fatigue using ultrasonic fatigue loadings remains long. To proceed to this characterization of the domain beyond gigacyclic fatigue, in a limited duration, an approach based on the analysis of the dissipated energy and the stored energy evolution in fatigue during interrupted fatigue loadings has been developed.

Mots clefs : DRX résolue en temps, fatigue ultrasonique, mesure de contraintes, énergie stockée

1 Introduction

Les mécanismes d'endommagement en fatigue sont expliqués par l'irréversibilité du glissement cyclique [1] qui conduit à une évolution de la densité de dislocation et à la formation de structures de dislocations.

A l'échelle macroscopique, l'apparition de ces mécanismes induit une modification de l'énergie stockée dans le matériau. Cette grandeur est donc intéressante à mesurer pendant un essai interrompu pour caractériser le niveau d'endommagement en fatigue du matériau. L'objectif est d'extrapoler des données issues d'essais courts pour prévoir la durée de vie en fatigue à long terme des matériaux (figure 1).

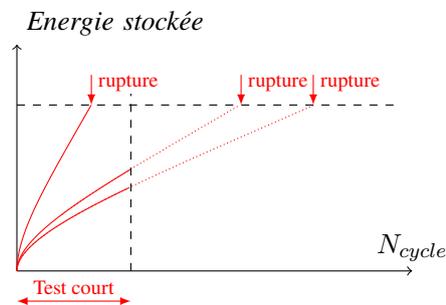


FIGURE 1 – Modèle de prédiction de la durée de vie en fatigue à partir de mesures d'énergie stockée lors de tests courts

Pour estimer l'énergie stockée pendant un cycle, deux mesures indépendantes sont alors nécessaires : l'estimation de l'énergie dissipée par mesure thermographique ainsi que le travail mécanique apporté pendant un cycle. Un bilan énergétique permet ensuite de quantifier l'énergie stockée dans le matériau pendant un cycle. Lorsqu'une température stable est atteinte lors d'une sollicitation cyclique, l'équilibre énergétique du matériau à l'échelle macroscopique nous permet d'établir la relation suivante :

$$E_{st} = W_{meca} - D_{int}, \quad (1)$$

où E_{st} est l'énergie stockée pendant un cycle, D_{int} l'énergie dissipée et W_{meca} le travail fourni pendant un cycle de chargement. L'estimation du travail mécanique au cours d'un cycle est réalisée à l'aide de l'expression suivante :

$$W_{meca} = \int_{cycle} \sigma \dot{\epsilon} dt, \quad (2)$$

avec σ la contrainte macroscopique dans l'échantillon testé, et $\dot{\epsilon}$ la vitesse de déformation.

Caractériser le domaine au-delà de la fatigue à très grands nombres de cycles requiert de solliciter les échantillons à de faibles amplitudes de contraintes $\Delta\sigma/2$. Cela induira un auto-échauffement ΔT donc une énergie dissipée D_{int} faible donc difficile à mesurer. Pour observer des variations plus importantes, il faut augmenter la fréquence de sollicitation en utilisant une machine de fatigue ultrasonique (20kHz) [2]. Une période de cycle très faible est alors observée (50 μs). Pour estimer le travail fourni, il est nécessaire de mesurer pendant un cycle la déformation avec des jauges et la contrainte par diffraction des rayons X résolue en temps, avec une résolution temporelle de l'ordre de 1 μs .

2 Dispositif expérimental

Une éprouvette plate d'acier dual-phase composé de ferrite et de martensite, est sollicité en fatigue à l'aide d'une machine de fatigue ultrasonique à une fréquence de 20 kHz.

Estimation du travail mécanique apporté : Le travail mécanique apporté est calculé à l'aide de l'équation 2 à partir de l'estimation de la déformation totale et de la contrainte au centre de l'éprouvette. La déformation totale est mesurée à l'aide de jauges de déformation placées au centre de l'éprouvette.

La contrainte est estimée par diffraction des rayons X. Un rayonnement X issu du synchrotron SOLEIL (ligne DiffAbs) vient éclairer l'échantillon et une partie des anneaux de diffraction sont observés avec un détecteur 2D. La figure 2 présente le dispositif expérimental utilisé lors des essais. Pour d'obtenir des clichés de diffraction, une méthode stroboscopique est utilisée afin d'accumuler un temps d'intégration de 100 000 μ s (0.1 s) [3]. Un rayonnement très intense tel que celui d'un synchrotron est nécessaire pour obtenir des clichés de diffraction avec un rapport signal/bruit suffisant.

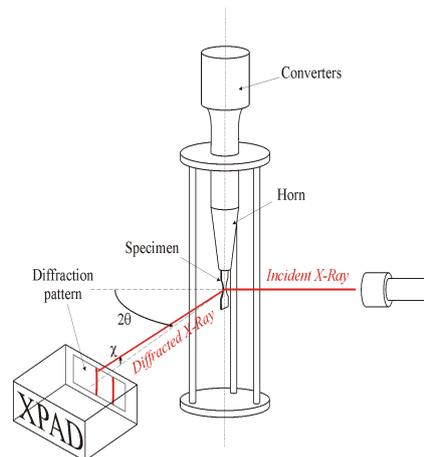


FIGURE 2 – Dispositif expérimental des essais de fatigue ultrasonique (source [3])

Estimation de l'énergie dissipée : L'estimation de l'énergie dissipée est obtenue à partir de la mesure de l'auto-échauffement. Une caméra thermique est utilisée pour mesurer la température de l'échantillon au cours de l'essai. En utilisant un modèle de conduction de la chaleur 0D (pertes par conduction linéaires et caractérisées par un temps caractéristique des pertes) il est possible d'évaluer l'énergie dissipée pendant un cycle avec l'équation suivante :

$$D_{int} = \frac{\vartheta_s \rho C}{f \tau}, \quad (3)$$

où τ est le temps caractéristique des pertes, ϑ_s la variation de température après stabilisation, ρ la masse volumique, f la fréquence de sollicitation et C la capacité calorifique du matériau.

3 Résultats et analyse

La figure 3 montre l'évolution de la contrainte et de la déformation totale mesurées pendant un essai cyclique de l'acier dual-phase et met en évidence que les techniques expérimentales utilisées permettent bien de reconstruire l'évolution cyclique de la contrainte et de la déformation.

Sur la figure 3, il est possible de mesurer une amplitude de contrainte $\sigma_0 = 180.4$ MPa et une amplitude de déformation $\varepsilon_0 = 5.10^{-4}$. Il est également possible d'estimer le déphasage φ entre la contrainte et la déformation totale. Dans le cas de l'acier dual-phase, le décalage temporel entre la contrainte et la déformation totale est égal à 100 ns. Si l'on considère une évolution sinusoïdale de la contrainte et de la déformation, l'expression du travail mécanique de l'équation 2 s'écrit alors :

$$W_{meca} = -\pi \sigma_0 \varepsilon_0 \sin \varphi. \quad (4)$$

Dans le cas de l'acier dual-phase sollicité à 180MPa , on trouve un travail mécanique apporté de l'ordre de 3.55kJ/m^3 .

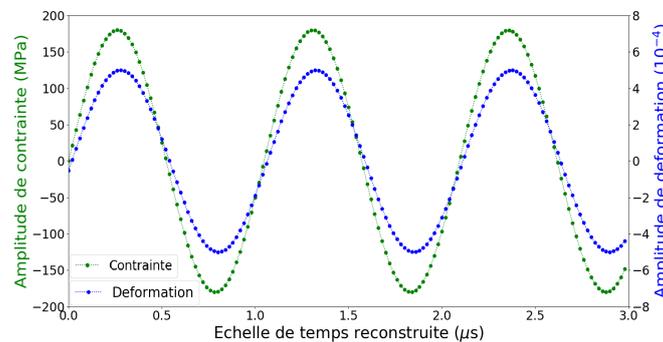


FIGURE 3 – Signaux de contraintes et de déformation reconstruits - Acier dual-phase sollicité à 180MPa

Les figures 4a et 4b montrent d'une part l'évolution de la température lors d'un essai de fatigue à une amplitude de contrainte de 180MPa et une courbe de refroidissement en fin d'essai quand la sollicitation est arrêtée.

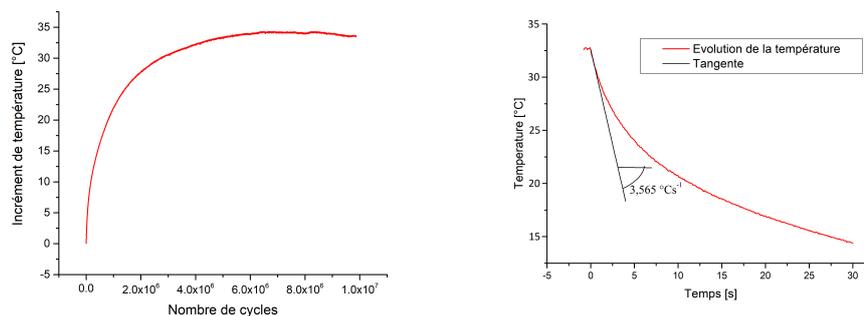


FIGURE 4 – a) Courbe d'auto-échauffement de l'acier (Sollicitation de 180MPa) - b) Méthode d'obtention du temps caractéristique des pertes

La courbe 4a permet d'estimer la variation de température stabilisée en fin d'essai $\vartheta_s = 33\text{°C}$. La pente au moment de l'arrêt de la machine permet de quantifier le temps caractéristique de pertes $\tau = 9,5\text{s}$. L'énergie dissipée peut alors être estimée à partir de l'équation 3. Dans le cas de l'acier dual-phase sollicité avec une amplitude de contrainte de 180MPa , on obtient $D_{int} = 0.63\text{kJ/m}^3$

Références

- [1] H. Mughrabi, Cyclic slip irreversibilities and the evolution of fatigue damage, Metall. Mater. Trans. A, 40(6) :1257–1279,2009.
- [2] C. Bathias and P.C. Paris, *Gigacyclique Fatigue in Mechanical Practice*, Marcel Dekker, New York, 2005.
- [3] T. Ors, N. Ranc, M. Pelerin, V. Michel, V. Favier, O. Castelnaud, C. Mocuta and D. Thiaudiere, *Microsecond time-resolved X-ray diffraction for the investigation of fatigue behavior during ultrasonic fatigue loading* A Journal of the International Union of Crystallography, To be published, 2019