

Prédiction de la zone de transformation de phase autour de la pointe de fissure d'un alliage à mémoire de forme au comportement dissymétrique en traction/compression.

C. LEXCELLENT^a, R. LAYDI^a, V. TAILLEBOT^a, P. MALÉCOT^a

a. Institut FEMTO-ST, Département de Mécanique Appliquée (DMARC), 24 rue de l'Épitaphe, 25000 BESANCON

Résumé :

Une nouvelle zone de transformation de phase autour de la pointe de fissure est proposée pour des alliages à mémoire de forme. La présente analyse intègre la dissymétrie entre la traction et la compression dans le calcul de la surface critère. Les modes I, II, et III ont été calculés. Des essais de rupture en mode I ont été réalisés sur du Nickel-Titane avec une attention particulière portée à l'évolution du champ de température autour de la pointe de fissure.

Abstract :

A new phase transformation zone around the crack tip is proposed for shape memory alloys. The present analysis integrates the asymmetry between tension and compression in its yield criterion. Modes I, II and III are predicted. Mode I fracture tests are performed with a particular attention devoted on temperature field evolution around the crack tip.

Mots clefs : Mécanique de la rupture, alliages à mémoire de forme, transformation de phase.

1 Introduction et théorie

Les alliages à mémoire de forme sont des candidats potentiels comme éléments de structures hybrides, d'actionneurs, d'outils médicaux ou dans l'aéronautique. C'est leur déformation récupérable importante (de l'ordre de 8% pour les NiTi) associée à une transformation de phase entre l'austénite A et la martensite M qui est utilisée. Ainsi, il devient intéressant d'étudier le comportement à la rupture de ces matériaux. La mécanique élastique linéaire de la rupture permet de connaître le champ de contraintes autour de la pointe de fissure, lequel dépend évidemment du mode de chargement.

En théorie, le champ de contraintes est infini en pointe de fissure. Cependant, comme pour les matériaux élastiques usuels qui plastifient en pointe de fissure, les alliages à mémoire de forme accommodent les sollicitations mécaniques extérieures par un changement de phase. Sur une plaque initialement à l'état austénitique, le chargement mécanique induit la création d'une zone de transformation de phase ($A \rightarrow M$) en pointe de fissure. Dans ce cas, la région en pointe de fissure est gouvernée par le champ de contraintes associé au comportement pseudoélastique de l'alliage à mémoire de forme.

Dans une publication très récente, Freed et Banks-Sill [1] effectuent une revue des travaux expérimentaux et théoriques sur la rupture des alliages à mémoire de forme. Ils citent Robertson et Ritchie [2] à propos du comportement à la rupture de tubes en NiTi. Des modèles classiques du comportement des alliages à mémoire de forme tels que ceux de Panoskaltis et al [3] ont été utilisés. Ces derniers voient la surface de transformation de phase comme une surface de Huber-Von Mises. Dans le but de déterminer la forme géométrique de cette surface, nous utilisons notre propre modèle [4,5] où intervient la distinction entre la traction et la compression. Comme de nombreuses approches, ce modèle utilise seulement une variable interne, à savoir la fraction volumique de martensite z telle que $0 \leq z \leq 1$. La forme générale de l'équation de la surface de transformation de phase s'écrit :

$$F(\underline{\sigma}, T) = \bar{\sigma} f(y_\sigma) - \sigma_c(T) = 0 \quad (1)$$

où

$$\bar{\sigma} = \left(\frac{3}{2} \text{dev} \underline{\sigma} : \text{dev} \underline{\sigma} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

$$y_\sigma = \frac{27 \det(\text{dev}(\underline{\sigma}))}{\bar{\sigma}^3}, \quad (3)$$

et f est une fonction de « correction » permettant de prendre en compte la dissymétrie entre la traction et la compression.

Bouvet et al. [6] ont choisi l'expression suivante :

$$f(y_\sigma) = \cos \left(\frac{\cos^{-1}(1 - a(1 - y_\sigma))}{3} \right) \quad (4)$$

avec

$$\sigma_c(T) = \begin{cases} b(T - M_S^\circ) & A \rightarrow M & \text{initiation de la transformation } (z = 0) \\ b(T - M_F^\circ) & A \rightarrow M & \text{fin de la transformation } (z = 1) \\ b(T - A_S^\circ) & M \rightarrow A & \text{début de réversion } (z = 1) \\ b(T - A_F^\circ) & M \rightarrow A & \text{fin de réversion } (z = 0) \end{cases} \quad (5)$$

Quelque soit le mode de rupture choisi, $I = 1, 2$ ou 3 , le tenseur des contraintes $\underline{\sigma}_M(r, \theta)$ obtenu par la théorie élastique linéaire de la rupture s'écrit :

$$\underline{\sigma}_M(r, \theta) = \chi_I(r) q_I(\theta) \quad (6)$$

où r et θ sont les coordonnées polaires avec la pointe de fissure pour origine et

$$\chi_I(r) = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} > 0 \quad (7)$$

A partir des expressions classiques de $q_I(\theta)$ (plaque infinie avec fissure de longueur $2b$ centrée suivant \vec{x}), les expressions de $\bar{\sigma}$ et y_σ peuvent être calculées.

Tout d'abord $\underline{S}_\sigma (= \text{dev} \underline{\sigma}_I)$ s'écrit :

$$\underline{S}_\sigma = \chi_I(r) \underline{S}_{q_I}(\theta) \quad (8)$$

et l'invariant de Lode est indépendant de r .

$$y_\sigma(\theta) = \frac{6k}{|\underline{S}_{q_I}(\theta)|^3} \det(\underline{S}_{q_I}(\theta)) \quad (9)$$

avec $k = \sqrt{\frac{3}{2}}$, et $\underline{\sigma}_I = k \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} |\underline{S}_{q_I}(\theta)|$ (10)

L'équation de la surface frontière s'écrit alors :

$$r_I(\theta) = \frac{1}{4\pi} \left(\frac{K_I}{\sigma_c} \right)^2 \left(3 |\underline{S}_{q_I}(\theta)|^2 \right) f^2(y_\sigma) \quad (11)$$

On peut aussi écrire un $r_{L(\theta)}$ sans dimension sous la forme :

$$r_{IL} = \frac{K_I(\theta)}{L_{I\text{AMF}}} = R_I(\theta) f^2(y_\sigma) \quad (12)$$

avec
$$R_I(\theta) = 3 \left| \underline{S}_{-qI}(\theta) \right|^2 \quad (13)$$

et
$$L_{I\text{AMF}} = \frac{1}{4\pi} \left(\frac{K_I}{\sigma_c} \right)^2 \quad (14)$$

Dans le cas standard, les trois modes sont examinés, à savoir le mode d'ouverture 1, le mode de cisaillement 2 et le mode 3 de déchirement (tearing mode). Chaque fois, deux cas séparés sont présentés : le cas en contraintes planes et le cas en déformations planes avec $\nu = 1/3$. La figure 1 donne l'évolution de $r_1(\theta)$ en contraintes planes et la figure 2, celle de $r_1(\theta)$ en déformations planes. Il est à noter que l'effet du paramètre a (c'est à dire la dissymétrie entre la traction et la compression) est bien plus décisif en contraintes planes qu'en déformations planes [7].

Les figure 3 et 4 montrent l'évolution de $r_2(\theta)$ respectivement en contraintes planes et en déformations planes.

Le mode 3 se réduit à des cercles concentriques suivant la valeur de a puisque dans ce cas $y_\sigma = 0$.

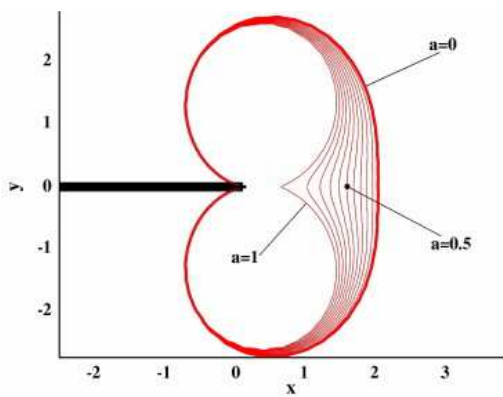


Figure 1 : Mode 1, influence du paramètre a sur la surface de transformation de phase en contraintes planes.

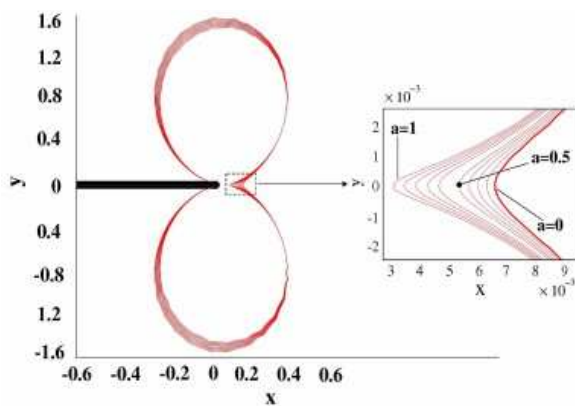


Figure 2 : Mode 1, influence du paramètre a sur la surface de transformation de phase en déformations planes.

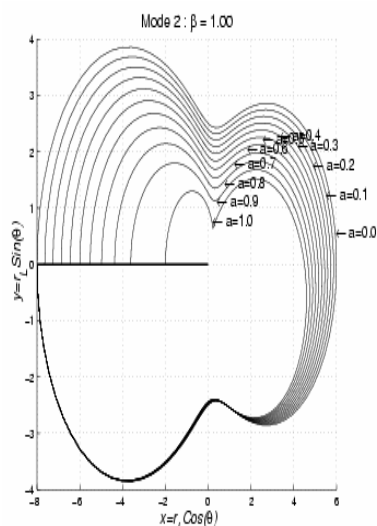


Figure 3 : Mode 2, influence du paramètre a sur la surface de transformation de phase en contraintes planes.

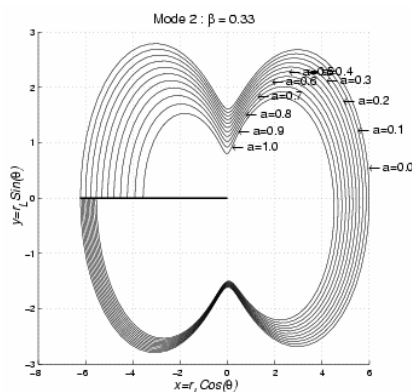


Figure 4 : Mode 2, influence du paramètre a sur la surface de transformation de phase en déformations planes.

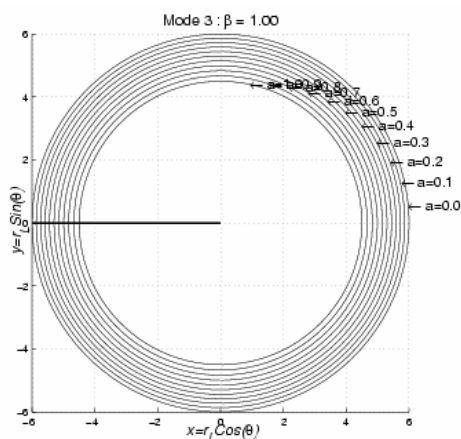


Figure 5 : Mode 3, surface de transformation de phase en contraintes planes.

Par ailleurs, des essais de traction en mode 1 ont été effectués sur une éprouvette en NiTi à l'état austénitique ($A_s = 10^\circ\text{C}$). La figure 6 montre le champ de température avant la rupture de l'échantillon.

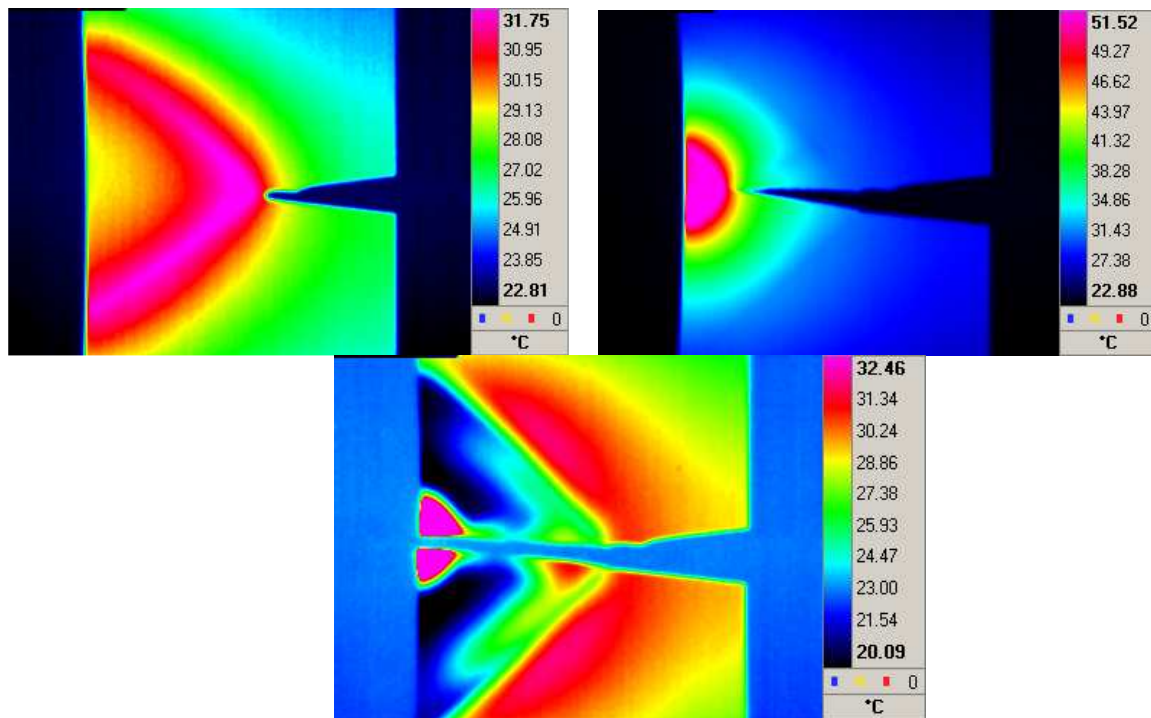


Figure 6 : Champ de température avant la rupture

2 Conclusions

Ce travail constitue une introduction dans le monde de la mécanique de la rupture des matériaux à transformation de phase tels que les alliages à mémoire de forme. Le calcul du mode mixte (1+2, par exemple) ne pose pas de problème. L'accent va être mis sur l'aspect expérimental et en particulier la mesure du champ de déformation autour de la pointe de fissure en corrélation avec l'évolution de la température associée à la transformation de phase.

References

- [1] Freed Y., Banks-Sill L., *J. Mech. Phys. Solids*, 55, 2157, 2007.
- [2] Robertson S.W., Ritchie R.O., *Biomaterial*, 28, 700, 2007.
- [3] Panoskaltis V.P., Bahuguna S., Soldatos S., *Int. J. Non-Linear Mech.*, 39, 709, 2004.
- [4] Raniecki B., Lexcellent C., *Eur. J. Mech. A/Solids*, 17, 185, 1998.
- [5] Bouvet C., Calloch S., Lexcellent C., *Eur. J. Mech. Solids*, 61, 23, 2001.
- [6] Bouvet C., Calloch S., Lexcellent C., *Eur. J. Eng. Mater. Technol.*, 124, 665, 2002.
- [7] Lexcellent C., Thiebaud F., *Scripta Mat.*, 59, 321, 2008.