

Prévision du comportement mécanique et de la durée de vie des aciers austénitiques inoxydables soumis à la fatigue-fluage

Lieu : CEA Saclay (91), Service de Recherches Métallurgiques Appliquées.

Contexte :

Le premier prototype des réacteurs nucléaires du futur est appelé à fonctionner dans une dizaine d'années. Ces réacteurs sont conçus pour fonctionner à haute température et avec un caloporteur sodium. Les aciers austénitiques inoxydables utilisés dans les composants des circuits fonctionneront à haute température et subiront des chargements cycliques incluant des temps de maintien (cycles de montée/descente en puissance avec un maintien de l'ordre d'un mois) [1].

Les matériaux subissent des chargements et déchargement rapides entre lesquels s'intercalent ces long temps de maintien caractérisés par des vitesses de déformation très lentes (fluage, relaxation). Les phases de chargement / déchargement induisent un durcissement cyclique notable de ces aciers à haute température (500°-600°C). Ce durcissement s'explique par la formation de microstructures de dislocations (cellules...) [2,3]. Au contraire, les longs temps de maintien produisent un adoucissement (annihilation de dislocations, montée par diffusion de lacunes à haute température...) [4,5,6]. Le comportement mécanique s'avère donc difficile à prédire et à extrapoler (évolution des contraintes cycle après cycle, relaxation au cours d'un maintien...). Il dépend de la déformation cyclique, du temps de maintien et de la température. Ces composants seront donc soumis à deux mécanismes d'endommagement qui, couplés, peuvent s'avérer particulièrement dangereux (fatigue avec des fissures transgranulaires de surface et fluage avec des cavités au niveau des joints de grains dans le volume) [7,8]. Ces conditions sont connues comme pouvant être particulièrement néfastes [1], et ce d'autant plus que les essais en laboratoire ne permettent pas explorer l'effet de temps de maintien (qui se répètent cycliquement) aussi longs que nécessaire car le parc de machines n'est pas suffisant. Le domaine des faibles déformations cyclique est aussi difficilement accessible en laboratoire alors que ce domaine de sollicitations est caractéristique des conditions en service en réacteur. Les codes de dimensionnement et modèles mécaniques macroscopiques ne rendent pas compte des synergies entre l'ensemble de ces mécanismes et ne permettent donc pas de proposer des extrapolations fiables. L'objectif de la thèse est d'introduire ces mécanismes physiques dans des modélisations mécaniques du comportement et de l'endommagement et de les valider aux échelles macroscopique et microscopique, afin de proposer des prédictions au long terme plus fiables.

Objectifs :

La modélisation polycristalline prend en compte à la fois les interactions entre grains et les mécanismes à l'échelle des grains (durcissement cyclique, adoucissement par annihilation de dislocations et diffusion de lacunes) [9,10]. Elle permet donc d'aborder des problématiques aussi complexes que celle de la fatigue-fluage et sera appliquée afin de prédire le comportement mécanique en fonction de la déformation appliquée, du temps de maintien et de la température. La modélisation sera fondée sur les observations en Microscopie Electronique en Transmission effectuées au SRMA ou publiées dans la littérature [1,2,6]. Les

prédictions à l'échelle macroscopique et à l'échelle du grain seront comparées aux résultats d'essais et à d'autres observations.

La prédiction de durée de vie sera fondée sur la prise en compte des deux mécanismes d'endommagement. Les lois d'endommagement propres à la fatigue et au fluage seront identifiées. Puis nous considérerons une fissure (de fatigue) initiée en surface interagissant avec un milieu endommagé (par fluage). La loi de comportement inclut la viscoplasticité et intègre une variable d'endommagement (de fluage). L'évaluation de la vitesse de propagation en fatigue-fluage se fait grâce à des calculs par éléments finis (Cast3M) en utilisant le calcul du CTOD (Crack Tip Opening Displacement) [11]. Les calculs permettent d'évaluer l'endommagement en pointe de fissure. Cette dernière progresse chaque fois que l'endommagement critique de fluage est atteint dans un élément. L'influence de la fatigue provient de l'existence de petites fissures de surface caractéristiques de la fatigue pure et du comportement viscoplastique qui est influencé par la fatigue. Les calculs s'effectuent tout d'abord sur des maillages fixes puis en utilisant une technique de relâchement de nœuds ou un modèle de zone cohésive. Les durées de vie prédites sont comparées aux durées de vie mesurées lors d'essais particulièrement longs. A une échelle plus fine, les zones endommagées simulées et observées par microscopie électronique à balayage au voisinage des points de fissures sont aussi comparées.

Encadrant : M. Sauzay (sauzay@cea.fr; 01-69-08-35-67), CEA-Saclay, Habilité à Diriger des Recherches (et collègues du SRMA impliqués dans les essais mécaniques et les observations microstructurales)

Détails pratiques : salaire de 1500^E/mois net, navette pour se rendre à Saclay.

- [1] M. Sauzay, M. Mottot, L. Allais, M. Noblecourt, I. Monnet, J. Périnet. Creep-fatigue of an AISI stainless steel at 550°C. *J. of Nuclear Engineering and Design*, 232, 219-236, 2004
- [2] M. Gerland, P. Violan. *Mater. Sci. Eng.* 84, 23-33, 1986
- [3] M. Sauzay, Modelling of intragranular backstresses due to deformation dislocation microstructures. *Int. Journal of Plasticity*, 24, 727-745, 2008
- [4] A. A. Tavassoli. Dislocation concepts applied to fatigue properties of austenitic stainless steel including time-dependent modes. *Phil. Mag. A* 54, 521-538, 1986
- [5] M. Sauzay, B. Fournier, M. Mottot, A. Pineau, C. Caës. Cyclic softening of martensitic steels at high-temperature. Experiments and physically based modelling. *Mat. Sci. Engineering A*, 483-484, 410-414, 2008
- [6] S. Catalao, X. Feugas, Ph. Pilvin, M.-Th. Cabrillat. Dipole heights in cyclically deformed polycrystalline AISI 316L stainless steel. *Mat. Sci. Engineering A*, 400-401, 349-352, 2005
- [7] R. Hales. A quantitative metallographic assessment of structural degradation of type 316 stainless steel during creep-fatigue. *Fat. Eng. Mat. Struct.*, 3, 339-356, 1980
- [8] C. Levillant, J. Grattier, M. Mottot, A. Pineau, 1988. Creep and Creep-Fatigue Intergranular Damage in Austenitic Stainless Steels: discussion of the Creep-Dominated Regime. Solomon, H. D., Halford G. R., Kaisand, L. R., Leis, B. N., éditeurs, *Low Cycle Fatigue*, ASTM STP 942, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 414-437.
- [9] G. Cailletaud G, Doquet V, Pineau A, 1991. Cyclic multiaxial behaviour of an austenitic stainless steel: microstructural observations and micromechanical modelling. Kussmaul K, McDiarmid D, Socie D, éditeurs. *Fatigue under biaxial and multiaxial loading*. Mechanical Engineering Publications, London, p. 131.
- [10] E. Ferrié, M. Sauzay. Simulation of the cyclic response of 316L single crystals and polycrystal using three dimensional elastic-plastic crystalline finite element computations. *Mat. Sci. Forum*, 567-568, 97-100, 2008
- [11] P. Hutar, M. Sauzay. *European Conference on Fracture Mechanics*, 2006