



# Séminaire du 02 Décembre 2021



Endommagement et rupture

# Crack deviation in thick rolled plates of 2050-T8 Aluminum Alloy

Abderrahman Guelzim<sup>1,2</sup>, Alain Köster<sup>1</sup>, Vincent Maurel<sup>1</sup>, Vincent Chiaruttini<sup>2</sup>, Érembert Nizery<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Centre des Matériaux, MINES ParisTech, Paris Sciences & Lettres University,*

<sup>2</sup>*Department of Materials and Structures, ONERA, Paris-Saclay University*

<sup>3</sup>*C-TEC, Constellium Technology Center*

*Key words : Fatigue, Crack deviation, Aluminum, Digital Image Correlation*

**Abstract** Increasing demand for limiting environmental impact pushes the need to improve the property to density ratio. This point is crucial for a wide range of industrial applications of aeronautical Al-alloys, especially for aircraft structures. Recent advances have led to the use of Al-Cu-Li alloys, such as Constellium's Airware alloy 2050-T8, for which the addition of 1% of lithium reduces the density while increasing both strength and damage tolerance properties compared with incumbent products.

The studied material is a 128 mm plate obtained by hot rolling, inducing microstructural anisotropy associated to elongated grains in the rolling direction [1]. This study aims to investigate the fatigue behavior of this material. As a consequence of the hot rolling process, the mechanical behavior is observed to be slightly orthotropic considering yield stress, with lower elongation in intermediate directions in planes containing the short transverse direction (L-S and T-S planes). Fatigue crack propagation in some directions, for example L-S, is characterized by crack deviation, where the crack deviates towards the rolling direction. These phenomena have been highlighted in 2xxx and 7xxx aluminum alloys series, under uniaxial (mode I) [2] and polymodal (mode I+II) [3] loadings, and in stiffened structures closer to in-service conditions [4].

To further characterize fatigue crack propagation, tests are performed on CT and CCT specimens. Coupons are machined in different orientations in order to analyze the crack growth rate anisotropy. The effect of the loading parameters, maximum force and T-stress, on crack path and crack growth rate is explored on both geometries. The size and shape of the plastic zone at the crack tip have been measured by digital image correlation.

## REFERENCES

- [1] Nizery E., *Amorçage et propagation de fissures de fatigue dans les alliages d'aluminium 2050-T8 et 7050-T7451*, PhD thesis, 2015.
- [2] van der Veen S.O., Dijkers H.P.A, Alderliesten R.C., *Anisotropic fatigue crack growth in high-strength aluminum*, 57th AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, 2016.
- [3] Joyce M.R., Sinclair I., Starink M.J., *Assessment of mixed mode loading on macroscopic fatigue crack paths in thick section Al-Cu-Li alloy plate*. Materials and Design 93, page 379–387, 2016.
- [4] Nizery E., Ehrström J-C., Delgrange G., Wusyk B., *A specimen to evaluate susceptibility of aluminium alloys to L-S crack deviation*. ICAF, Structural Integrity in the Age of Additive Manufacturing, 2019.

# Etude de la résistance à la propagation de fissure dans des tubes minces en aciers nano-renforcés ODS

*Boualem RAIS<sup>1</sup>, Jaques Besson<sup>1</sup>*

*<sup>1</sup>MINES ParisTech – PSL Research University, Centre des matériaux, Evry, France*

## **Abstract :**

Les aciers renforcés par dispersion d'oxydes (Aciers ODS), sont des candidats potentiels pour le gainage combustible des réacteurs de 4<sup>ème</sup> génération. Cependant, ils présentent une résistance limitée à la propagation de fissure. Pour dimensionner les composant de gainage et garantir leur bon comportement, il est impératif de caractériser la ténacité de ces matériaux. Des essais de ténacité ont déjà été réalisés au CEA sur des aciers ferritiques et martensitiques ODS mais sur des éprouvettes prélevées sur produits semi-finis (barres cylindriques pleines de 21 mm de diamètre). Sur ces barres sont prélevées des éprouvettes CT et les essais réalisés dessus sont normés. La géométrie finale des gaines combustibles (tubes de 10,73 mm de diamètre externe et de 0,5 mm d'épaisseur de paroi) est obtenue par laminage à froid induisant ainsi une modification irréversible de la microstructure du matériau, surtout pour les tubes en acier ferritique ODS, d'où l'intérêt de les caractériser dans leur géométrie finale. Après avoir caractériser le comportement mécanique en traction des gaines et établi la loi de comportement élastoplastique de notre matériau. Un dialogue expérience-simulation par éléments finis a permis, in-fine, de proposer un essai de ténacité sur tubes de géométrie gaine et la méthode de dépouillement associée.

# Effet du soudage sur la fissuration en relaxation de l'acier austénitique inoxydable 316L(N)

Baptiste Py-Renaudie<sup>\*1,2</sup>, Vladimir A. Esin<sup>2</sup>, Diogo Gonçalves<sup>1</sup>, Serge Pascal<sup>1</sup>, Thilo F. Morgeneyer<sup>2</sup>,  
<sup>1</sup> Service d'Etudes Mécaniques et Thermiques (SEMT), CEA, Université Paris-Saclay, Gif-Sur-Yvette, France  
<sup>2</sup> MINES ParisTech, PSL University, Centre des Matériaux - (CNRS UMR 7633), Evry, France

Les gradients de température élevés résultants du soudage induisent l'apparition de contraintes résiduelles, de déformations plastiques ainsi que la précipitation de phases indésirables aux joints de grains dans la zone affectée thermiquement (ZAT) dans les aciers austénitiques inoxydables [1]. Lorsqu'elles sont exposées à des températures élevées (supérieures à 500 °C), la relaxation de ces contraintes résiduelles peut endommager les joints de grains à proximité des précipités, entraînant à terme une fracture intergranulaire [2]. L'étude de la fissuration par relaxation de contrainte (FeR) dans des conditions de laboratoire a déjà été réalisée dans des travaux antérieurs en introduisant des contraintes résiduelles de traction via la compression d'échantillons de type CT [2,3]. Des matériaux laminés à froid avaient été utilisés afin de reproduire les propriétés mécaniques observées dans la ZAT. Il a été montré que la FeR ne pouvait être observée dans les aciers 316L(N) que pour un seuil de contraintes résiduelles supérieur à 740 MPa [2]. Cependant, ces études n'ont pas tenu compte des hétérogénéités métallurgiques et mécaniques réelles observées dans les pièces soudées.

Les travaux de cette thèse visent donc à évaluer l'effet de ces hétérogénéités sur la FeR dans les aciers 316L(N) en comparant l'endommagement dans les états soudé et non soudé. Une procédure expérimentale a été établie pour provoquer le phénomène de FeR, en utilisant des échantillons similaires à des éprouvettes de type CT. Celles-ci sont d'abord laminées à froid (état non soudé) ou bien soudées, suivi d'une compression à température ambiante pour l'introduction de contraintes résiduelles. Les conditions de compression sont soigneusement choisies à l'aide de calculs par éléments finis, afin d'assurer que le seuil de contraintes nécessaire à la FeR soit bien atteint. Des essais de relaxation de contraintes sont ensuite réalisés à 575°C et 600°C pendant 580 h et 1470 h.

Après relaxation des contraintes, la microstructure et l'endommagement potentiel des joints de grains sont analysés au microscope électronique à balayage (MEB). L'endommagement dans les échantillons non soudés apparaît sous forme de cavités similaires au fluage sur les précipités de  $M_{23}C_6$  aux joints de grains. Les observations ont montré que des temps de relaxation plus longs entraînent une augmentation du nombre et taille des cavités, avec 600 °C étant la température la plus néfaste. Dans les échantillons soudés sans compression mécanique, très peu de cavités ont été observées après relaxation des contraintes. Dans les échantillons soudés avec compression mécanique, beaucoup plus de cavités ont été trouvées dans la zone fondue (ZF), dans la zone affectée thermiquement à gros grains (ZATGG) et dans le reste du matériau. Les cavités dans la zone fondue sont réparties de manière homogène à travers les grains, localisées en majorité sur les phases fragiles résultantes de la décomposition de la ferrite vermiculaire. Dans la ZATGG, les cavités sont fortement localisées sur quelques joints de grains austénitiques. Cette localisation d'endommagement se traduit par un risque important d'interconnexion des cavités, et donc d'initiation de fissures pour des temps de relaxation plus longs ou des niveaux de contraintes hauts. Les cavités dans le reste du matériau sont également localisées sur les joints de grains d'austénite mais en nombre par joint beaucoup plus faible.

La haute sensibilité de la ZATGG à la FeR est usuellement expliquée dans la littérature par un niveau de contraintes résiduelles, déformation plastiques et de précipitation plus important que dans les deux autres régions. Les résultats de cette étude montrent que même pour des conditions initiales comparables, la fissuration intergranulaire dans la ZATGG est plus importante. Ceci notamment car la large taille de grain de la ZATGG qui réduit le nombre de joints de grains potentiellement favorables à la nucléation de cavités et résulte en une localisation forte de l'endommagement.

Compte tenu des paramètres de soudage choisis pour cette thèse, les analyses montrent que les contraintes et déformations résiduelles introduites lors d'une seule passe de soudage sont insuffisants pour provoquer la FeR pour des temps de relaxation courts. Les résultats ont également montré la faisabilité de l'étude de FeR sur des éprouvettes CT soudées, mais surtout l'impact significatif de la microstructure sur l'initiation de l'endommagement.

[1] B. Weiss and R. Stickler: *Metall. Mater. Trans. B*, 1972, v. 3, p. 851–66.

[2] H. Pommier, E.P. Busso, T.F. Morgeneyer, A. Pineau: *Acta Mater.*, 2016, v. 103, p. 893–908.

[3] M. Turski, P.J. Bouchard, A. Steuwer, P.J. Withers: *Acta Mater.*, 2008, v. 56, p. 3598–612.

# **Influence of radiation damage on the fracture toughness of aluminum alloys - computational methods on the AA6061-T6**

**Mohamed Shokeir**<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université Paris Saclay, CEA, DES, Service d'Etude des Matériaux Irradiés, 91191, Gif-sur-Yvette, France

## **ABSTRACT**

Due to their good corrosion resistance, good mechanical properties at intermediate temperatures, and neutron transparency, aluminum alloys are often used to fabricate components in Nuclear Research Reactors (NRR). The strengthening of the AA6061 is obtained by the precipitation hardening during the heat treatment process: T6. Needle shaped metastable nano-precipitates  $\beta''$  hinder the slip of dislocation lines and thus, triple the yield strength [1]. The main published experimental studies dealing with the irradiation effects on the AA6061-T6 are issued from the American NRR named HFIR [2]. Experimental results show that yield and ultimate strengths increase due to radiation hardening but on the other hand, ductility drops [3]. Therefore, fracture toughness is expected to drop, causing a major issue for the components design of NRR. Previous studies show that the ductile fracture process of an AA6061-T6 is described by the void nucleation on micrometric intergranular Mg<sub>2</sub>Si precipitates and iron rich intermetallics, followed by growth and void coalescence [4]. Currently, no numerical simulations were able to reproduce the crack initiation and propagation observed experimentally in an irradiated AA6061-T6 using a Gurson-Tvergaard–Needleman (GTN) model based on the local approach to fracture. Finite elements simulations in this paper will aid the comprehension of the ductility drop by radiation in an AA6061-T6 and its effect on the fracture toughness.

Material's plastic behavior was assumed to obey a Voce exponential law of which the parameters were identified by an isotropic hardening phenomenological law. Yield, ultimate strengths and uniform elongation, collected from 110 tensile tests in the literature [3], [5], [6] and existing database, were exploited to fit a law varying as a function of the fluence. A GTN damage model was used to simulate the crack propagation. Parameters of this model were identified during previous research and then refined in this work [4], [7]. Microstructure analyses were carried on the heat-treated AA6061-T6 to observe the volume fraction of initial voids (broken or detached Mg<sub>2</sub>Si). Critical volume fraction of voids was identified by 3D image analyses of reconstructed volumes at the center of interrupted tensile-notched samples

conducted by an X-ray computed tomography. Particular attention has been paid to improve the modelling of the nucleation phase.

In addition to the literature's experimental data, notch tensile tests are performed and simulated to study the influence of stress triaxiality on the robustness of the damage model. Tensile specimens with and without notches (low and intermediate levels of stress triaxiality respectively) were simulated in 2D axisymmetric conditions; whereas Compact tension (CT) specimens (highest levels of stress triaxiality) were tested in 3D.

Hence, a physically based damage model is developed to predict the fracture toughness of AA6061-T6 as function of the neutron fluence and spectrum.

Corresponding author: Mohamed Shokeir

- [1] C. Flament, « Etude des évolutions microstructurales sous irradiation de l'alliage d'aluminium 6061-T6 », Thèse, Université Grenoble Alpes, 2015.
- [2] K. Farrell, « Performance of Aluminum in Research Reactors », in *Comprehensive Nuclear Materials*, 2012.
- [3] K. Farrell et R. T. King, « Tensile properties of neutron-irradiated 6061 aluminum alloy in annealed and precipitation-hardened conditions », *Eff. Radiat. Struct. Mater. ASTM STP 683*, p. 440-449, 1978.
- [4] Y. Shen, « Tensile and fracture behavior of AA6061-T6 aluminum alloys : micromechanical approach », Thèse, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2012.
- [5] J. Weeks, C. Czajkowski, et K. Farrell, « Effects of high thermal neutron fluences on type 6061 aluminum », *Eff. Radiat. Mater. 16th Int. Symp. ASTM STP 1175 Am. Soc. Test. Mater. Phila. USA*, 1992.
- [6] J. Alexander, « The effects of irradiation on the mechanical properties of 6061-T651 Aluminium base metal and weldments ». 1993.
- [7] T. Petit, « Comprehension and modeling of toughness tests with pop-in : application to 6061-T6 aluminum and effect of neutron irradiation », Theses, Thesis, MINES Paristech, 2018.

# Étude expérimentale et modélisation de la relation entre conditions de traitement thermique, microstructure et ténacité d'aciers faiblement alliés trempés revenus

*Jean-Baptiste Delattre<sup>1,2</sup>, Anne-francoise GOURGUES<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> *MINES ParisTech – PSL Research University, Centre des matériaux, Evry, France*

<sup>2</sup> *LC2M – CEA Saclay*

## **Résumé :**

Les composants du circuit primaire des réacteurs à eau pressurisée sont faits de pièces forgées épaisses. Le traitement thermique final (Traitement thermique de qualité) de ces pièces permet d'obtenir une microstructure bainitique revenue qui présente un bon équilibre entre résistance et ténacité. Cependant, l'épaisseur importante de ces composants conduit, après la trempe, à un large éventail de microstructures au sein de la pièce. Les propriétés mécaniques, et plus particulièrement la résilience, varient donc localement. Or les normes de sûreté actuelles exigent que les propriétés mécaniques soient conformes aux spécifications en tout point de la pièce. Il faut ainsi développer une connaissance approfondie du lien entre microstructure et propriétés à rupture et il n'existe pourtant pas d'étude systématique de ce lien pour un matériau unique. Pour répondre à ce problème, on présente ici l'impact de la vitesse de trempe sur les propriétés en traction et la transition ductile-fragile d'un acier de cuve. Cette étude est accompagnée d'observations fractographiques afin d'appréhender les mécanismes d'amorçage en début de transition entre les différentes microstructures.



## Conception d'un essai de fatigue thermomécanique biaxiale en condition de gradient

Nicolas LEOST<sup>1,2</sup>, Alain KÖSTER<sup>1</sup>, Djamel MISSOUM-BENZIANE<sup>1</sup>, Laurent CAMERIANO<sup>2</sup>, Francois COMTE<sup>2</sup>, Arnaud LONGUET<sup>2</sup>, Brice LE PANNERER<sup>2</sup>, Vincent MAUREL<sup>1</sup>

<sup>1</sup> MINES ParisTech, PSL University, MAT - Centre des Matériaux, CNRS UMR 7633, BP 87 91003 Evry, France

<sup>2</sup> Safran Aircraft Engines Villaroche, Rond-Point René Ravaut, 77550 Moissy-Cramayel, France

Les chambres de combustion des moteurs aéronautiques subissent des chargements thermomécaniques à fort gradient spatial et pour des variations temporelles rapides. En vue d'améliorer la durabilité et les intervalles de maintenance de leurs chambres, Safran Aircraft Engines mène des études d'amélioration de prédiction de leur durée de vie à l'amorçage.

Dans ce cadre, un essai représentatif des sollicitations thermomécaniques des chambres a été développé. Certains points critiques des chambres sont des zones soumises à des chargements hors-phase où la compression à haute température risque d'induire le flambage de tôles minces. Pour pallier à cette difficulté nous avons mis au point une procédure d'essai utilisant une machine de fatigue biaxial coplanaire, pour laquelle une éprouvette en croix percée en son centre et un inducteur à spires concentriques permettent d'obtenir à la fois un contrôle de charge et un gradient de température en conditions anisothermes.

Afin de qualifier les conditions de sollicitations locales, des mesures de champs de température par thermographie infrarouge et des mesures de champ de déplacement par stéréocorrélation d'images ont été utilisées. Les champs de déplacement ont pu être obtenus sur la gamme de température grâce à des techniques de mouchetis originales [1]. Ainsi, la détection d'amorçage de fissures est améliorée par l'analyse des sauts de déplacements repérés sur des résultats de corrélation d'images [2]. Une étude de quantification des fissures amorcées durant l'essai a ensuite été menée par segmentation d'images à l'aide d'un plug-in de machine learning inclus dans le logiciel ImageJ [3][4].

Enfin, l'essai de fatigue thermomécanique biaxiale a été simulé d'une part par un calcul thermique 3D transitoire puis par un calcul thermomécanique 3D élasto-viscoplastique avec le code de calcul par éléments finis Zset. Cette dernière étape permet de valider le comportement utilisé et d'élaborer des critères d'amorçage de fissure en fonction des gradients appliqués.

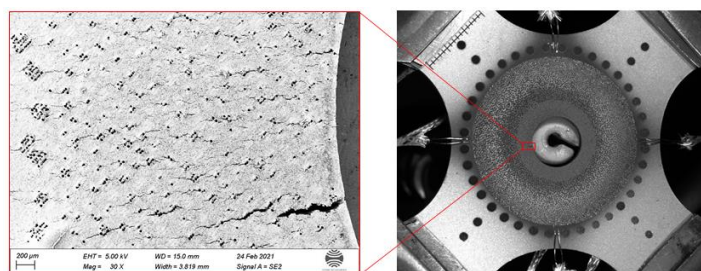


Figure 1 - Multi-amorçage d'une éprouvette cruciforme après 200 cycles d'un essai de fatigue thermomécanique biaxiale

### Bibliographie

[1] N. Guillermin, A. Köster. Rapport interne SHE – Armines, Centre des Matériaux des MINES ParisTech, février 2021.

[2] H. Sapardanis. *Fissuration à l'interface d'un revêtement plasma céramique et d'un substrat métallique sous sollicitations dynamique et quasi-statique multiaxiales*. Thèse de doctorat, MINES ParisTech, Paris Sciences et Lettres, 2016.

[3] I. Arganda-Carreras, V. Kaynig, C. Rueden, et al. Trainable weka segmentation : a machine learning tool for microscopy pixel classification. *Bioinformatics*, 33(15) :2424–2426, 2017.

[4] H. Chaieb. *Study of a near-eutectic Zinc-Aluminum coating deposited on steel by hot-dip galvanization: microstructural aspects, crystallographic texture and deformation and damage mechanisms*. Séminaire Thermomécanique des Matériaux du Centre des Matériaux des MINES ParisTech, 26 février 2021.

## **Oxydation et sensibilité à la CSC d'un acier inoxydable 316L en milieu primaire des REP : effet des transitoires oxygénés**

Thalita De Paula <sup>1,2</sup>, Marc Maisonneuve <sup>1,2</sup>, Cécilie Duhamel <sup>2</sup>, Catherine Guerre <sup>1</sup>, Jérôme Crepin <sup>2</sup>, Ian De Curières <sup>3</sup>, Frédéric Datcharry <sup>1</sup>

1 – DES - Service de la Corrosion et du Comportement des Matériaux dans leur Environnement (SCCME), CEA Saclay, Université Paris-Saclay, F-91191, Gif-sur-Yvette, France

2 - MINES ParisTech, PSL, MAT-Centre des matériaux, CNRS UMR 7633, 63-65 Rue Henri Auguste Desbruères, BP 87, 91003 Évry, France

3 - IRSN, Pôle sûreté nucléaire, 31 Avenue de la division Leclerc, BP 17, 92262 Fontenay-aux-Roses Cedex, France

Le retour d'expérience sur les réacteurs à eau sous pression (REP) fait état de cas de corrosion sous contrainte (CSC), notamment intergranulaire, sur des composants en acier inoxydable austénitique écroui du circuit primaire de ces réacteurs. Dans les conditions nominales de fonctionnement, le milieu primaire des REP est hydrogéné et désaéré. Cependant, il existe des phases de fonctionnement du réacteur durant lesquelles de l'oxygène est injecté dans le milieu primaire. De précédentes études ont montré que l'oxydation et la sensibilité à la CSC de l'acier 316L écroui exposé dans des conditions primaires sont très différentes en présence d'oxygène dissous [1-4].

Dans des conditions nominales, la couche d'oxyde interne est riche en Cr et des pénétrations d'oxyde sont observées au niveau des joints de grains. Au contraire, les couches d'oxyde formées en conditions aérées et avec transitoires oxygénés (alternance entre milieu nominal et aéré) sont dépourvues de Cr, à l'exception d'un film très mince à l'interface métal-oxyde. Des pénétrations intergranulaires ne sont observées que lors des essais avec transitoires oxygénées.

A l'issue d'essais de traction lente réalisés dans les mêmes conditions, il a été observé que la sensibilité à l'amorçage de fissures de CSC est plus importante en conditions nominales qu'en présence d'oxygène (conditions aérées et transitoire), ce qui est en désaccord avec le retour d'expérience et la littérature [4]. Afin de confirmer et compléter ces résultats, des essais supplémentaires d'oxydation et de CSC sont réalisés en conditions transitoires, en modifiant la paramétrie (durée des cycles, fréquence, nature de la pré-oxydation, etc.). Pour comprendre l'effet du chargement mécanique, la sensibilité à la CSC est évaluée à l'aide d'essais à vitesse de déplacement imposée (traction lente) et d'essais à déformation imposée (éprouvettes U-bends). Pour toutes les conditions testées, les éprouvettes sont caractérisées par MEB et MET, en se concentrant sur l'oxydation et la fissuration intergranulaires. La quantification du réseau de fissuration (sites d'amorçage de la CSC, densité, longueur et profondeur des fissures) est réalisée à la fois sur les éprouvettes de traction lente et les U-bends.

[1] Maisonneuve, M. Effet de transitoires oxygénés sur l'oxydation et la corrosion sous contrainte d'un acier inoxydable 316L écroui en milieu primaire des réacteurs à eau sous pression, Université Mines ParisTech, 2020.

[2] Herbst, M. et al. SCC of austenitic stainless steels under off-normal water chemistry and surface conditions - Part II: Off-normal chemistry, long-term oxygen condition and oxygen

transients. 18th International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems – Water Reactors, Portland, États-Unis, 2017.

[3] Huin, N. et al. SCC of austenitic stainless steels under off-normal water chemistry and surface conditions - Part I: Surface conditions and baseline tests in nominal PWR primary environment. 18th International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems – Water Reactors, Portland, États-Unis, 2017.

[4] Ilevbare, G. O. et al. SCC of Stainless steels under PWR service conditions. International Symposium Fontevraud 7, Avignon, France, 2010.



Vous pouvez nous contacter :

- Par courrier postal :

Centre des Matériaux Pierre-Marie Fourt  
Mines ParisTech  
CNRS UMR 7633, BP 87 91003 Evry, France

- Par téléphone : +33 (0)1 60 76 30 00
- Par fax : +33 (0)1 60 76 31 50
- Par courrier électronique : [semteam@mat.mines-paristech.fr](mailto:semteam@mat.mines-paristech.fr)
- Site web : <http://www.mat.mines-paristech.fr>

**Equipe séminaire :**

Daniel IRMER  
Paul BEGUIN  
Wajih JBARA