



Séminaire du 08 avril 2022



Ténacité et Fissuration

Effect of chemical heterogeneities (segregations) on fracture toughness of low alloy ferritic steel used for large forged components in the nuclear industry

A. Christal^{1,2}, A. Parrot², P. Todeschini², A-F. Gourgues¹, J. Besson¹

¹Mines Paris, PSL University, Centre des Matériaux, UMR CNRS 7633, France

²EDF R&D, département MMC, France

arthur.christal@minesparis.psl.eu

Segregations

Fracture mechanisms

Fracture toughness

Low alloy ferritic steels used for large forged components in nuclear power plants might contain chemical heterogeneities called segregations. Segregations are formed during the solidification process of the metal cast into large ingots. They remain in the material despite forging and numerous heat treatments, thus leading to microstructural heterogeneities in the final component at different scales. This study aims at evaluating the effect of chemical and microstructural heterogeneities at the mesoscopic scale on the fracture toughness and at identifying their impact on the fracture mechanisms at low temperatures (close to the expected T_0 value of the Master Curves).

Characterizations of segregations using image analysis, micro-hardness testing, and electron probe microanalysis (EPMA) showed that meso-segregated regions appeared disk-shaped with an average thickness of 250 μm .

Using reduced-size compact tension specimens (mini-CT), fatigue pre-cracks were located both randomly and intentionally inside meso-segregated regions to help crack initiation happening inside the heterogeneities. The fracture toughness was then correlated to the local fracture mechanisms.

It was shown that the predominant fracture mechanism in segregated zones, even at the crack initiation site, was transgranular cleavage and *not* intergranular cracking, resulting in a wide range of fracture toughness values. Small intergranular cracks ($< 20 \mu\text{m}$ in size) were systematically found near crack initiation sites (distance $< 100 \mu\text{m}$) but were not at the origin of the specimens fracture.

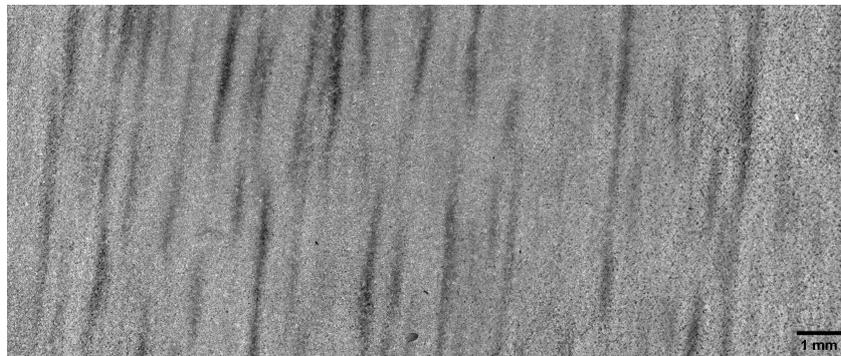


Figure 1 – overview of a segregated specimen etched using an iron chloride solution (FeCl_3) that reveals the presence of meso-segregated regions (darker regions)

Développement d'un modèle local de Corrosion Sous Contrainte intergranulaire des alliages de nickel exposés aux zones confinées du circuit secondaire des réacteurs à eau sous pression

Présentateur : Pierre MESTRE-RINN

Encadrement : Cécilie DUHAMEL, Thierry COUVANT (EDF), Romain VERLET (EDF)

Abstract :

La corrosion sous contrainte (CSC) est un phénomène se traduisant par la fissuration d'un matériau sous l'effet conjoint de sa microstructure, d'un environnement corrosif et d'un état de contrainte. Des fissures de CSC ont été détectées sur des tubes de générateur de vapeur (GV) d'un réacteur nucléaire à eau sous pression pour la première fois en France en 1986, au contact du milieu secondaire, circuit où l'eau sous forme de vapeur fait tourner les turbines.

La CSC secondaire peut se produire dans de nombreuses conditions physico-chimiques (pH, potentiel) et la présence de certaines espèces peut faire apparaître la CSC, l'accélérer ou la réduire. Différents modèles ont été produits, notamment chez EDF, mais ces modèles empiriques sont devenus inadaptés et sont peu flexibles.

L'objectif de la thèse est de proposer un modèle phénoménologique basé sur des paramètres physico-chimiques, qui s'appuie sur un modèle de CSC développé du côté primaire des réacteurs à eau sous pression (REP). Ce modèle simulera l'intégralité du scénario de fissuration (incubation par l'oxydation intergranulaire, amorçage d'une fissure et propagation de la fissure). Le travail se concentrera tout d'abord sur les phases d'incubation et d'amorçage avec l'identification de paramètres pertinents côté secondaire des REP.

Les premiers essais réalisés ont visé à montrer la pertinence d'un modèle basé sur des paramètres physiques, en étudiant l'oxydation intergranulaire et la CSC dans des milieux de compositions différentes avec les mêmes pH, potentiels Red/Ox et conductivités. Ensuite les paramètres physiques seront modifiés. La limite d'un modèle basé sur des paramètres physiques sera également évaluée, notamment par des essais avec ou sans la présence d'espèces connues pour avoir un effet intrinsèque sur l'oxydation et la fissuration des aciers inoxydables et alliages base nickel (chlorures, plomb).

Le modèle produit prendra en compte les paramètres physico-chimiques du milieu, mais également des paramètres matériaux, tels que la couverture en carbures de chrome intergranulaires ou le taux de chrome local dans le joint de grain, mais aussi le niveau de contrainte local responsable de la fissuration intergranulaire.

Effect of specimen size and thickness on ductile crack growth of a high toughness 316L steel

S. Cheng^{1,2}, J. Garnier¹, B. Marini and J. Besson²

¹CEA Saclay, DES / ISAS / DMN / SRMA / LC2M Bâtiment 455, Pièce 113A
Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives 91191 Gif-Sur-Yvette Cedex,
sihan.cheng@cea.fr

² Centre des Matériaux, MINES ParisTech, Paris PSL, CNR UMR 7633

Fracture toughness

Ductile fracture

Size effect

Abstract: Crack growth resistance is a key mechanical property to assess structural integrity. ASTM E1820 and ISO 12135 are the two testing standards used to determine $J - \Delta a$ curves. There are minor differences between these two standards, but they both require the specimens to be large enough to consider the resulting toughness as valid. Determining the valid plane strain crack growth resistance of very tough materials requires large specimens. In practice, smaller specimens must often be used because the material is scarce (e.g., irradiated materials) or only available with a specific shape (e.g., plates). The question then arises of obtaining valid $J - \Delta a$ curves from tests on small or miniaturized specimens.

This study investigates the ductile fracture behaviour of an austenitic stainless steel 316L(N). Its elastoplastic behavior at high strains is determined using various axisymmetric specimens (see fig. 1a). Edge tracking is used to monitor diameter variations. Homothetic compact tension specimens (CT50 to CT4) and CT specimens with various thicknesses (CT12.5 with thickness=12.5,10,7.5,5 mm) were tested using the elastic unloading compliance method to determine the J-R curves. Metallographic and fractographic observations were systematically carried out. These experimental data were used to parametrize a Gurson-Tvergaard-Needleman damage model for ductile failure. Tests on CT specimens, including the unloading steps, are simulated (fig.1b), to check the testing procedure. J values can then be derived from the simulation results applying the procedure of the standards (see fig. 1c). Using the parametrized GTN model, very large specimens satisfying the validity criterion of the standards can be simulated to derive valid $J - \Delta a$ resistance curves.

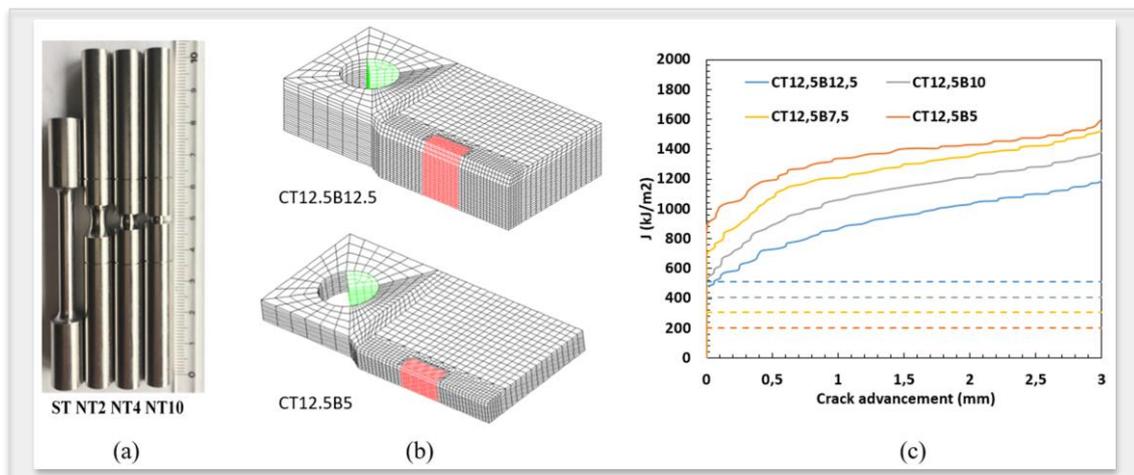


Figure 1 – (a) Tension specimens; (b) Models de CT (c) J-R curves for CT12.5 with different thickness

Ténacité des gaines combustibles en Zircaloy-4 en cas de fissuration différée par hydruration (DHC)

Pierrick FRANCOIS^{a, c}, Tom PETIT^a, Quentin AUZOUX^b, David LE BOULCH^a, Kais AMMAR^c, Jacques BESSON^c

^a Université Paris-Saclay, CEA, Service d'Etude des Matériaux Irradiés, 91191, Gif-sur-Yvette France

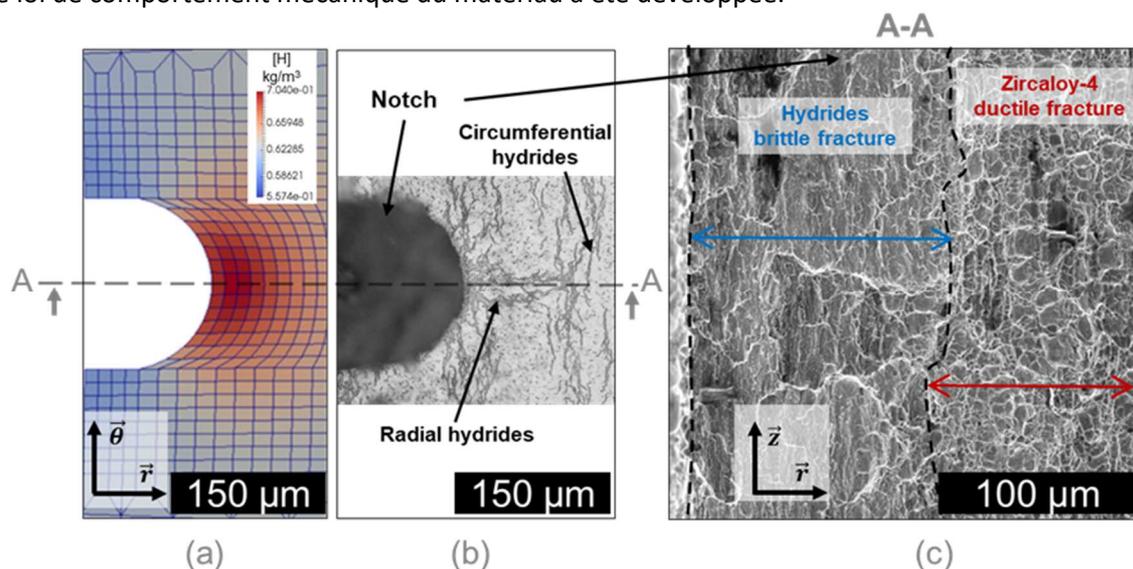
^b Université Paris-Saclay, CEA, Service de la Corrosion et du Comportement des Matériaux dans leur Environnement, 91191, Gif-sur-Yvette France

^c MINES ParisTech, PSL Research University, Centre des Matériaux, CNRS UMR 7633

La fissuration différée par hydruration (DHC pour Delayed Hydride Cracking en anglais) est un phénomène de fragilisation par l'hydrogène des alliages de zirconium. Il est étudié dans le cadre de l'entreposage à sec des gaines combustibles en Zircaloy-4 et M5_{FRAMATOME}. Evaluer le risque d'apparition de ce phénomène revient à déterminer la ténacité du matériau sous DHC notée K_{IH} .

Sous l'effet du gradient de contrainte, l'hydrogène en solution solide présent dans le métal peut diffuser vers une potentielle fissure préexistante ; quand la teneur en hydrogène locale dépasse la limite de solubilité en précipitation du matériau, il précipite sous forme d'hydrures. La zone hydrurée croît au cours du temps, et une rupture fragile locale peut se produire si K_{IH} est atteint pour une taille critique de la zone hydrurée. La fissure se propage alors à une vitesse constante v_{DHC} , puis de manière instable et ductile lorsque la valeur du facteur d'intensité des contraintes atteint la ténacité du métal (K_{IC}).

Afin de proposer un modèle de fissuration quantitatif basé sur l'expérimentation, permettant d'évaluer la valeur de K_{IH} et de v_{DHC} en fonction de l'historique thermomécanique et de l'irradiation, des études expérimentale et numérique sont réalisées simultanément. Une nouvelle géométrie d'éprouvette (« C-ring entaillée ») a été conçue, permettant de créer une zone favorable pour la diffusion et la précipitation de l'hydrogène sous l'effet d'un gradient de contrainte : une entaille est usinée sur la paroi interne du « C » pour déclencher une propagation contrôlée de la fissure, tout en limitant les frottements entre le montage et l'éprouvette. L'influence de la température, de la teneur en hydrogène, du chargement mécanique, et de la durée est étudiée. Les essais, ainsi que les analyses métallographiques et fractographiques post-mortem, démontrent qu'une fissuration lente et quasi-fragile intervient (suivie par une propagation instable et ductile), ce qui prouve que le dispositif permet de reproduire la DHC. Un modèle numérique couplant la diffusion sous contrainte de l'hydrogène à une loi de comportement mécanique du matériau a été développée.



(a) Simulation par éléments finis de la diffusion sous contrainte de l'hydrogène ; (b) Observation au microscope optique des hydrures ($K < K_{IH}$) ; (c) Fractographie après rupture en DHC.