

La plasticité cristalline au service de la compréhension de la corrosion sous contrainte

T. Couvant, P. Roy (EDF / R&D / MMC), J.-M. Proix, N. Sellenet (EDF / R&D / AMA), G. Nicolas (EDF / R&D / SINETICS)

Contexte

La corrosion sous contrainte (CSC) affecte les alliages à base de nickel des circuits primaire et secondaire des réacteurs à eau sous pression (REP) depuis plus de 20 ans, et plus récemment les aciers inoxydables austénitiques écrouis exposés au milieu primaire. La CSC peut également être assistée par l'irradiation et conduire à la fissuration des structures internes des réacteurs (vis cloison-renfort). Ainsi, l'impact de la CSC est majeur : cette dégradation peut aboutir à la fuite du circuit primaire ou secondaire et remettre en cause la sûreté de l'installation. La quantification et la compréhension des mécanismes impliqués sont donc des enjeux essentiels, compte-tenu des coûts de contrôle et de remplacement des composants affectés.

Phénoméno- logie de la corrosion sous contrainte

La CSC est un couplage complexe et extrêmement localisé entre sollicitation mécanique, oxydation et microstructure qui affecte les interfaces présentes dans le matériau telles que les joints de grains ou les plans de déformation plastique. En conséquence, la fissuration peut être intergranulaire (fig. 1) et se propager suivant les joints de grains, ou transgranulaire et se propager au travers des

grains. Physiquement, l'oxyde pénètre dans le métal et le fragilise. Cette pénétration est favorisée par la déformation plastique et la rupture de l'oxyde est promue par la concentration des contraintes dans le polycristal. La CSC n'apparaît généralement qu'après un temps d'incubation très long, pouvant atteindre plusieurs dizaines de milliers d'heures, même au laboratoire. L'incubation est suivie d'une phase d'amorçage où de multiples fissures peu profondes (inférieures à 100 μm typiquement) se propagent très lentement ($< 10^{-3} \mu\text{m.h}^{-1}$).

La coalescence des amorces et les contraintes en pointe de fissure peuvent finalement conduire à une accélération importante de la fissuration (facteur 10) : les fissures peuvent devenir millimétriques. Les points-clés de la CSC sont donc le temps d'amorçage des fissures et la cinétique de fissuration rapide. Ces deux grandeurs sont quantifiées expérimentalement en fonction des paramètres les plus influents : température et pH du milieu, microstructure, écrouissage et contrainte appliquée. Cependant, les modèles empiriques de prévision du temps d'amorçage et de la cinétique de propagation manquent de robustesse : ils ne considèrent ni l'histoire électrochimique du milieu corrosif ni l'histoire thermomécanique du matériau exposé. Afin de progresser dans la prévision de la fissuration, il est nécessaire de rendre plus physiques les modèles empiriques actuels. Il est donc indispensable de mieux comprendre le couplage physique à l'origine de la CSC.

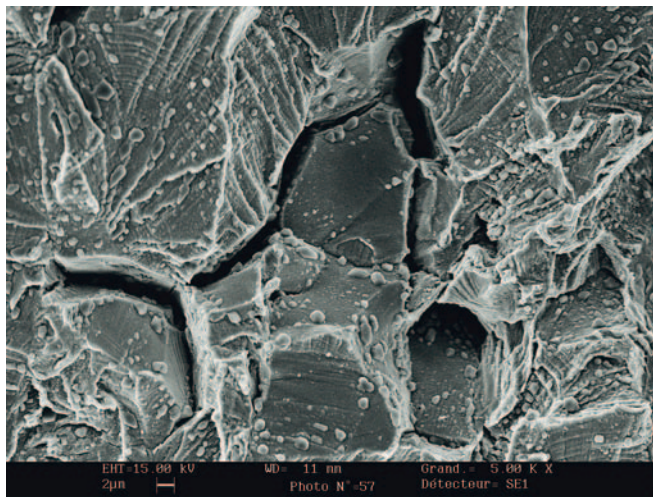


Figure 1 : Fissuration intergranulaire de corrosion sous contrainte.

La plasticité cristalline au service de la compréhension de la corrosion sous contrainte

T. Couvant, P. Roy (EDF / R&D / MMC), J.-M. Proix, N. Sellenet (EDF / R&D / AMA), G. Nicolas (EDF / R&D / SINETICS)

Objectifs

L'objectif principal est de développer une simulation permettant de valider les modèles de fissuration fondés sur l'observation. A plus court terme, l'objectif est d'intégrer aux modèles empiriques opérationnels les résultats des simulations en progression.

Démarche

La plasticité cristalline a été choisie afin de mieux apprécier les concentrations de contraintes dans le polycristal où peuvent éventuellement se propager des fissures intergranulaires. Les agrégats polycristallins 3D contiennent 172 grains (6906 nœuds, 35709 éléments, fig. 2) ou 21 grains (835 nœuds, 3885 éléments) pour le maillage d'étude.

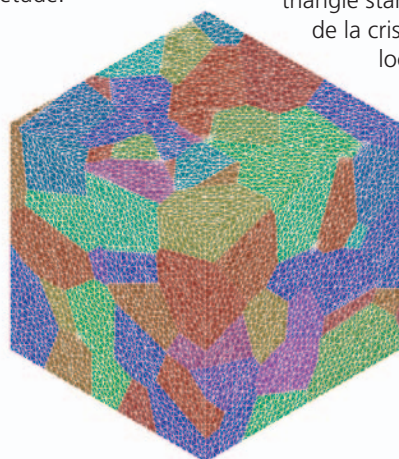


Figure 2 : Maillage d'agrégat polycristallin à 172 grains.

Des éléments joints sont générés automatiquement aux joints de grains, puis les jonctions triples sont maillées.

Une distribution aléatoire d'orientations cristallines est associée aux grains de l'agrégat. La loi de comportement élastoviscoplastique avec écrouissages isotrope et cinématique a été identifiée par l'ENSM. Le comportement des éléments joints est identifié à partir d'un couplage entre calculs éléments finis et essais expérimentaux. Les agrégats sont sollicités suivant des trajets complexes de déformation. Des procédures de post-traitement ont été spécialement développées afin d'analyser les résultats en fonction de la microstructure locale : proximité à la surface et aux joints de grains, projection des champs dans le triangle standard (en fonction de la cristallographie locale).

Résultats

Les calculs sans fissuration ont permis de quantifier le niveau de concentration des contraintes vu par les joints de grains en fonction du trajet de chargement suivi. Ainsi, les contraintes sont d'autant plus concentrées aux joints des grains que le matériau est chargé (fig. 3). De plus, pour un niveau de contrainte appliquée donné, la concentration des contraintes aux joints est nettement plus forte lorsque le trajet de chargement mécanique est complexe.

Ces premiers résultats peuvent être utilisés pour améliorer les modèles empiriques actuels.

Enfin, les premières simulations de fissuration intergranulaire ont été réalisées. Elles ont permis de démontrer la faisabilité du développement d'un outil pertinent de validation des mécanismes d'interactions localisées entre microstructure, mécanique et oxydation.

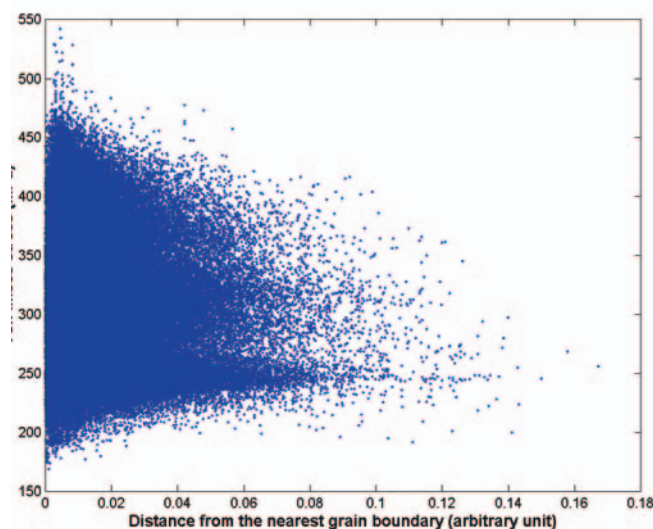


Figure 3 : Distribution des contraintes en fonction de la distance au joint de grains le plus proche.