Titre : Simulation de la propagation de fissure de fatigue sous hydrogène en milieu hétérogène

Présentée par : Augustin PERRIER-MICHON
Directeurs de thèse : Damien HALM, Azdine NAIT-ALI et Yann CHARLES

Résumé :
L'utilisation de l'hydrogène comme vecteur énergétique soulève des défis techniques notamment concernant son stockage et son transport. L'exposition des matériaux métalliques à l'hydrogène gazeux peut modifier leur comportement, entrainant une accélération de la propagation des fissures de fatigue et une réduction de la durée de vie des structures. Les interactions entre l'hydrogène et le matériau résultent de mécanismes couplés de diffusion, de plasticité et d'endommagement, dont la compréhension nécessite une approche à l'échelle mésoscopique du polycristal. L'objectif de cette thèse est de développer un modèle couplé de propagation de fissure de fatigue assistée par l'hydrogène gazeux à l'échelle de l'agrégat métallique polycristallin. Un modèle à gradient d'endommagement, couplé à une loi de diffusion de l'hydrogène, à une loi de plasticité cristalline et intégrant les effets de cumul de dommage, est formulé dans un cadre thermodynamique rigoureux. L'effet de l'hydrogène sur le comportement mécanique prend en compte les principaux mécanismes physiques proposés dans la littérature. Le mécanisme de décohésion induite par l'hydrogène (HEDE) est représenté par une dégradation des propriétés à rupture. Par ailleurs, un cadre unifié est proposé pour décrire l'influence de l'hydrogène sur la plasticité cristalline en tenant compte des effets de durcissement et d'adoucissement. Cette modélisation permet de représenter, au sein d'un même modèle, les mécanismes de plasticité localisée assistée par l'hydrogène (HELP) et d'épinglage des dislocations. Les simulations réalisées sur des agrégats polycristallins cherchent à reproduire notamment l'influence de la fréquence de chargement et de la pression d'hydrogène sur la vitesse de propagation des fissures observée expérimentalement.

Mots clés : Fragilisation par l'hydrogène, Fatigue, Modèle couplé, Gradient d'endommagement, Plasticité cristalline, Méthode des éléments finis

Abstract :
The use of hydrogen as an energy carrier raises significant technical challenges, particularly regarding its storage and transportation. Exposure of metallic materials to gaseous hydrogen modify their mechanical behavior, enhancing a fatigue crack growth and a reduction in the service life of engineering structures. These hydrogen-material interactions involve coupled diffusion, crystal plasticity, and damage mechanisms, whose understanding requires a mesoscale description at the polycrystalline aggregate level. The objective of this thesis is to develop a coupled model for hydrogen-enhanced fatigue crack growth at the scale of metallic polycrystalline aggregates. A gradient damage model, coupled with hydrogen diffusion and crystal plasticity incorporating fatigue damage accumulation, is formulated within a rigorous thermodynamic framework. The effect of hydrogen on the mechanical response is modeled by incorporating the main mechanisms proposed in the literature. The Hydrogen-Enhanced DEcohesion (HEDE) mechanism is represented through the degradation of fracture properties. In addition, a unified framework is proposed to describe the influence of hydrogen on crystal plasticity by accounting for the competing effects of hardening and softening. This formulation captures, within a single model, both the Hydrogen-Enhanced Localized Plasticity (HELP) mechanism and hydrogen-induced dislocation pinning. Simulations performed on polycrystalline aggregates aim to reproduce the experimentally observed influence of loading frequency and hydrogen pressure on fatigue crack growth rates.

Keywords : Hydrogen embrittlement, Fatigue, Coupled model, Gradient damage, Crystal plasticity, Finite element method