

Simulation de la fissuration à chaud : introduction des éléments cohésifs et perspectives d'application

J.-M. Carpreau, J. Angles, Q. Chen (EDF / R&D / MRI)

Introduction

L'objectif de cette contribution est de présenter un nouveau modèle thermomécanique local qui permet de prédire le risque de fissuration à chaud. Ce modèle est basé sur un critère énergétique (loi cohésive). En effet, des travaux sur un critère en déformation critique ont montré que celui-ci n'était pas suffisamment discriminant.

Mécanisme de fissuration à chaud et modélisation

La fissuration à chaud apparaît pendant le soudage à la température de solidification du bain de fusion. Lors de cette phase, du liquide enrichi en éléments à bas point de fusion subsiste entre les dendrites (figure 1). En fin de solidification (fraction solide élevée), les contraintes de retrait peuvent être suffisantes pour ouvrir les espaces inter-dendritiques non encore totalement solidifiés et créer des vides que la phase liquide ne peut pas combler. Cette sensibilité va se poursuivre jusqu'à ce que les ponts de

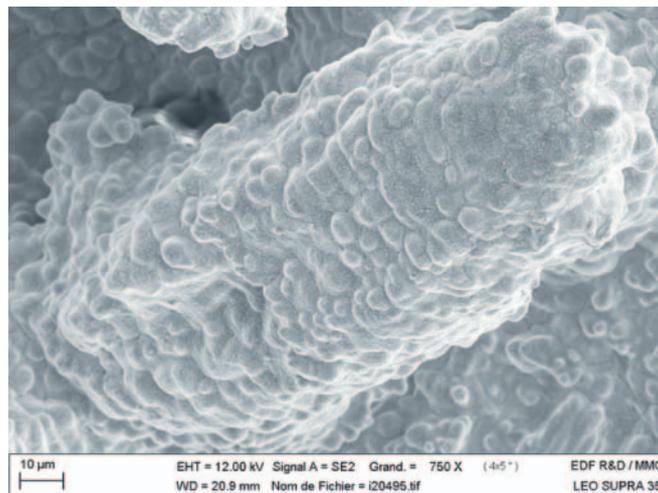


Figure 1 : Dendrites primaires dans la zone de propagation de la fissure.

matière entre les dendrites soient suffisamment forts pour adapter les contraintes (température de coalescence). La sensibilité à la fissuration à chaud est très souvent modélisée à travers un critère en déformation. Celui-ci est la différence entre la déformation calculée dans l'intervalle de solidification et une valeur de référence $\epsilon_{critique}$.

La valeur de la déformation critique de référence est fonction de la composition chimique et de la vitesse de déformation.

La valeur critique du critère en déformation est déterminée par simulation thermomécanique en exploitant des essais avec des éprouvettes fissurées et non fissurées. Pour analyser ces essais, le procédé de soudage n'est pas modélisé.

Le chargement thermique équivalent au procédé est identifié par méthode inverse à l'aide de mesures de température. La loi de comportement utilisée est une loi élasto-viscoplastique à un coefficient d'érouissage cinématique et isotrope.

Pour la zone pâteuse, une loi de Norton-Hoff est utilisée. Les calculs thermomécaniques en zone de transition pâteuse négligent les effets de la vitesse d'écoulement du fluide et les retraits de solidification.

La zone sensible de la zone pâteuse où la ductilité chute est de faible extension (de l'ordre de 100 µm) et la durée pendant laquelle le matériau est sensible est de l'ordre de 100 ms (figure 2). La zone en amont du bain est une zone en légère traction, ensuite le matériau passe à un état de compression où la valeur de la contrainte peut atteindre 280 MPa. La contrainte est nulle pour des températures supérieures au point de fusion. En fin de solidification, la contrainte transversale repasse en traction dans une zone pâteuse ce qui peut donner lieu à la fissuration.

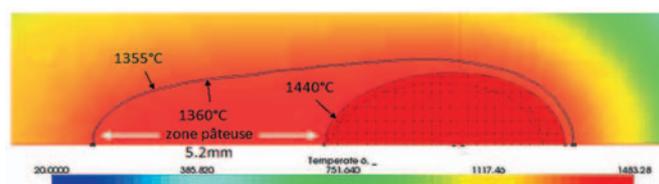


Figure 2 : Représentation de la zone pâteuse.

Simulation de la fissuration à chaud : introduction des éléments cohésifs et perspectives d'application

J.-M. Carpreau, J. Angles, Q. Chen (EDF / R&D / MRI)

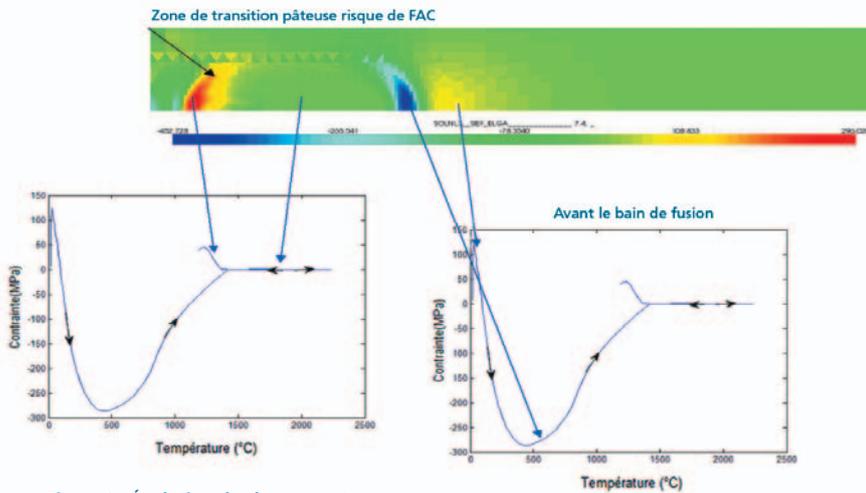


Figure 3 : Évolution du chargement.

Lorsque le matériau est complètement solidifié, la contrainte de traction va continuer d'augmenter très rapidement mais le risque de fissuration est moindre puisque la structure coalescée présente déjà une résistance mécanique (figure 3). L'analyse des résultats (figure 4) montre que pour une déformation inférieure à 1.5%, le risque de fissuration est écarté alors que pour une déformation supérieure à 3% le risque est avéré. Entre ces deux valeurs le critère n'est pas suffisamment discriminant.

Introduction des éléments cohésifs

Il est raisonnable de penser qu'un modèle intégrant un endommagement au-delà d'une valeur critique (régime dissipatif) puisse mieux traduire la rupture des ponts dendritique et / ou l'ouverture du film liquide à l'origine des mécanismes de fissuration à chaud. Les paramètres de la loi cohésive sont la contrainte à la rupture (σ_c) et la densité d'énergie de surface critique (G_c).

De plus, l'énergie de surface n'est pas dérivable en $\delta = 0$. Il faut donc introduire une valeur d'ouverture seuil k_0 en dessous de laquelle l'élément se comporte de manière élastique. Cette régularisation est réalisée par la pénalisation d'adhérence. Dans nos simulations, nous avons utilisé une pente de décharge linéaire. L'évolution de la fissuration est évaluée par l'énergie à dissiper ($E_0 = \frac{\sigma_c}{2}(\delta - k)$). L'augmentation de la contrainte critique avec la température traduit l'augmentation de cohérence du réseau. L'augmentation de k traduit la rupture des ponts entre les dendrites et l'apparition de micro-vides lors de la fissuration.

Les paramètres de loi sont établis à l'aide d'un essai présentant la transition entre un état endommagé et fissuré. La variation de la contrainte critique avec la température est donnée dans le tableau ci-contre :

T°C	20	500	1000	1350	1355	1360	1400	1500
σ_c	1000	300	100	23	22.5	22	22	22

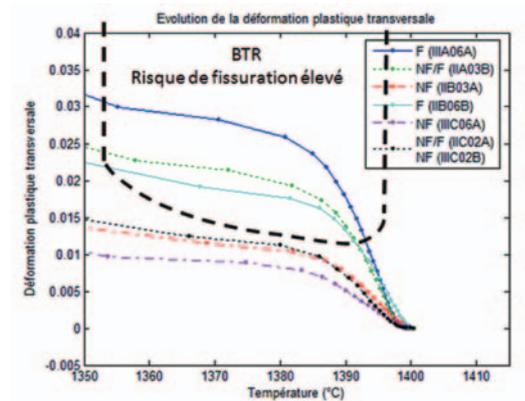


Figure 4 : Représentation du domaine "BTR" identifié.

De plus, nous faisons l'hypothèse que l'ouverture critique δ_c est une constante. Cette valeur ne doit pas être trop élevée car dans ce cas nous sommes en présence de dendrites dans le fluide sans possibilité d'endommagement. La valeur de l'ouverture critique a été choisie à 40 μm car elle représente un bon compromis entre un calcul qui converge et une valeur représentative d'espace interdendritique.

A titre d'exemple la loi cohésive à 1400°C a pour paramètre $k_0 = 10^{-5}$, $\sigma_c = 22 \text{ Mpa}$

$$\delta = \frac{2G_c}{\sigma_c} = 0,04\text{mm}$$

Avec ces paramètres, l'utilisation de la loi cohésive (déterminée par ajustement sur un essai) a permis de retrouver une bonne séparation entre les éprouvettes fissurées et non fissurées. Des essais de traction en zone de transition pâteuse sont en cours afin de donner un sens physique à la loi cohésive.