

# Sur la caractérisation de la ténacité exceptionnelle des alliages à haute entropie à base de métaux de transition

Antoine Hilhorst<sup>a</sup>, Thomas Pardoen<sup>a</sup>, Pascal J. Jacques<sup>a</sup>

<sup>a</sup> UCLouvain, Institute of Mechanics, Materials and Civil Engineering (iMMC), IMAP, Place Sainte-Barbe 2, 1348, Louvain-la-Neuve, Belgique

## Résumé

Les alliages à haute entropie (AHE) suscitent un grand intérêt dans la communauté scientifique. En particulier les AHE basés sur l'alliage de Cantor possèdent des valeurs de ténacité excellentes et de très bonnes propriétés mécaniques à température cryogéniques. Pourtant, peu de résultats ont été publiés caractérisant la ténacité de ces alliages. La méthode du travail essentiel de rupture est employée ici pour mesurer la ténacité en contraintes planes de deux AHE, CrMnFeCoNi et CrCoNi.

## Introduction

Les alliages à haute entropie sont issus d'une nouvelle approche de conception d'alliage. Contrairement aux alliages conventionnels, les AHE ne possèdent pas d'élément majoritaire mais plusieurs éléments en grande concentration. Les AHE à base d'éléments métalliques de transition suscitent un grand intérêt dus à leurs propriétés mécaniques exceptionnelles<sup>[1, 2]</sup>. En particulier, les alliages à base de chrome, manganèse, fer, cobalt, et nickel, dits alliages de Cantor, sont extrêmement tenaces tout en étant résistants et ductiles. De plus, lorsque la température diminue, les propriétés mécaniques s'améliorent, dont la ténacité, ce qui est un comportement hors du commun<sup>[1, 2]</sup>. Néanmoins, la ténacité des alliages de Cantor n'a pour l'instant été mesurée qu'en déformations planes. La méthode du travail essentiel de rupture est proposée ici afin de caractériser la ténacité des AHE en contraintes planes.

## Méthodologie

La méthode du travail essentiel de rupture a été développée par Cotterell et Reddel en 1977<sup>[3]</sup>. Cette méthode se base sur l'idée que le travail nécessaire à la rupture ductile peut être séparée en deux contributions : le travail dans la zone d'élaboration de la rupture en tête de fissure, appelé le travail essentiel  $W_e$ , et le travail dans la zone de plasticité diffuse, appelé le travail non-essentiel  $W_p$ . En choisissant judicieusement la géométrie des éprouvettes utilisées telle que la zone de rupture entre en plasticité avant propagation de la fissure et telle que la plasticité se confine autour de la zone de rupture,  $W_p$  sera proportionnel à la zone plastique diffuse lors de l'initiation de la rupture et  $W_e$  sera proportionnel à la surface de rupture. Ceci permet d'écrire l'équation suivante :

$$W_f = W_e + W_p = w_e \cdot S + w_p \cdot V \cdot \beta$$

Avec  $W_f$  le travail total effectué pour rompre l'échantillon,  $S$  la surface de rupture,  $V$  le volume plastique,  $\beta$  un paramètre dépendant de la géométrie de l'échantillon.

La méthode du travail essentiel de rupture consiste en pratique à effectuer une série d'essais de traction sur des éprouvettes doublement entaillées (DENT) avec différentes tailles de ligament. En extrapolant les mesures obtenues pour une taille de ligament nulle, le paramètre  $w_e$ , caractérisant le travail d'élaboration de la rupture, directement lié à la ténacité du matériau, est extrait<sup>[4]</sup>.

La méthode du travail essentiel de rupture a été appliquée sur l'alliage de Cantor, CrMnFeCoNi, l'alliage ternaire CrCoNi, ainsi qu'un acier inoxydable 316L pour des épaisseurs de tôle de 1 et 1,5 mm. Les valeurs obtenues ont ensuite été comparées avec des résultats de la littérature.

Afin de compléter les essais DENT, des essais de traction simple ont été effectués. Ces échantillons ont été caractérisés par microscopie électronique, dont diffraction des électrons rétrodiffusés (EBSD), à balayage et en transmission, ainsi que par tomographie, afin de mieux comprendre les mécanismes de plasticité et d'endommagement des AHE.

Les AHE ont été élaborés dans un four à induction à partir de matière pure (>99,9%) puis mis en œuvre par laminage à chaud et à froid, et recuit à 800°C pendant 2 heures. L'acier 316L a été fourni par Aperam et possède une taille de grain comparable aux AHE testés.

## Résultats expérimentaux

La composition des alliages CrMnFeCoNi et CrCoNi, mesurées par ICP, sont donnés dans le tableau I. La taille moyenne des grains des trois matériaux étudiés est de 7, 8 et 10  $\mu\text{m}$  pour l'alliage CrCoNi, l'AHE CrMnFeCoNi, et l'acier 316L respectivement. Aucune texture fortement marquée n'est observée pour ces alliages.

Tableau I. Composition des AHE étudiés

| (at.%)     | Cr   | Mn   | Fe   | Co   | Ni   |
|------------|------|------|------|------|------|
| CrMnFeCoNi | 19.9 | 20.1 | 20.1 | 19.9 | 20.0 |
| CrCoNi     | 34.0 | /    | /    | 32.1 | 33.9 |

Une courbe contrainte-déformation représentative pour chaque matériau sur une éprouvette de traction classique est donnée en figure 1. L'alliage CrCoNi possède un plus grande limite d'élasticité et une meilleure capacité d'écrouissage que l'alliage de Cantor tout en gardant une déformation uniforme similaire. L'acier inoxydable 316L a une limite d'élasticité comparable à l'alliage de Cantor mais une elongation uniforme supérieure.

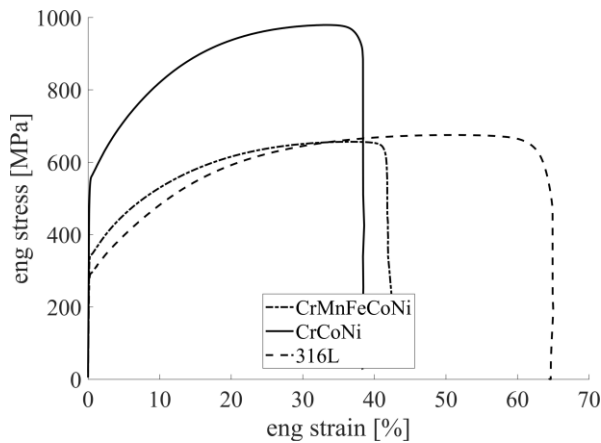


Figure 1 Stress-strain curves of the investigated alloys of dog-bone-shaped tensile specimens

Des valeurs du travail essentiel de rupture pour différentes familles d'aciers sont présentées en figure 2. L'acier TWIP ainsi que l'acier 316L possèdent les meilleurs  $w_e$  des aciers présentés ici.

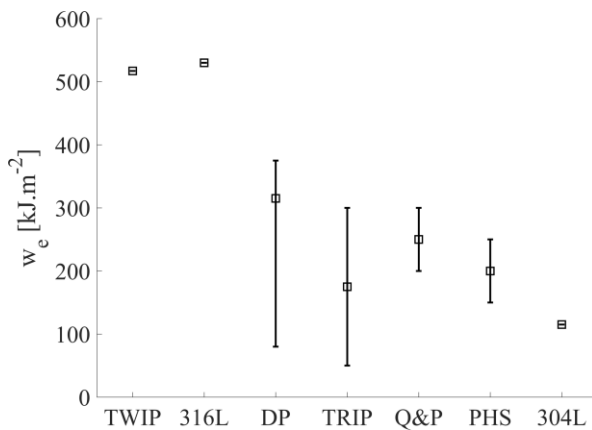


Figure 2 Essential work of fracture values for steels with a plate thickness of 1.5 mm published in the literature<sup>[5-7]</sup>

## Références

- [1] Gludovatz, Bernd, et al. "A fracture-resistant high-entropy alloy for cryogenic applications." *Science* 345.6201 (2014): 1153-1158.
- [2] Gludovatz, Bernd, et al. "Exceptional damage-tolerance of a medium-entropy alloy CrCoNi at cryogenic temperatures." *Nature communications* 7 (2016): 10602.
- [3] Cotterell, B., and J. K. Reddel. "The essential work of plane stress ductile fracture." *International journal of fracture* 13.3 (1977): 267-277.
- [4] Pardoen, Thomas, et al. "Mode I fracture of sheet metal." *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 52.2 (2004): 423-452.
- [5] Bensaada, R., et al. "Ductile Fracture Study of Stainless Steel AISI 304L Thin Sheets Using the EWF Method and Cohesive Zone Modeling." *Journal of Failure Analysis and Prevention* 18.5 (2018): 1181-1190.
- [6] Golling, Stefan, et al. "Investigation on the influence of loading-rate on fracture toughness of AHSS grades." *Materials Science and Engineering: A* 726 (2018): 332-341.
- [7] Lacroix, G., Thomas Pardoen, and Pascal J. Jacques. "The fracture toughness of TRIP-assisted multiphase steels." *Acta Materialia* 56.15 (2008): 3900-3913.