



CENTRE DES MATERIAUX  
P.M.FOURT



# **S** *ÉMINAIRE du 28 Avril 2017*

**Transition ductile-fragile : aciers à haute résistance pour l'automobile et alliages de zirconium en environnement extrême.**



# Résistance à la rupture des aciers inoxydables martensitiques développés pour les applications de structure automobile

J.-D. Mithieux, G. Badinier, B. Petit, P.-O. Santacreu, J.-B. Moreau

*APERAM Research Center, BP. 15, 62330 Isbergues, France*

La demande récurrente en termes d'allègement et de renforcement de la sécurité passive des véhicules automobiles pousse les constructeurs à utiliser, pour les pièces de structure, des alliages présentant des combinaisons optimales entre résistance mécanique, aptitude à la mise en forme et résistance à la fissuration. Parmi les nuances en développement, les aciers martensitiques pour emboutissage à chaud offrent une solution extrêmement performante pour réaliser des pièces de forme possédant des résistances mécaniques comprises entre 1000 MPa et 2000 MPa.

L'exposé présentera la famille des aciers inoxydables martensitiques développés par APERAM pour les applications automobiles. La mise au point de telles nuances demande à connaître les propriétés qui participeront à la résistance du véhicule au crash et de manière plus générale aux sollicitations rencontrées en service. L'exposé insistera sur les différentes formes de résistance à la rupture et sur les caractéristiques métallurgiques qui contrôlent la performance d'une nuance donnée :

- Ténacité à basse température (résister à la transition ductile-fragile)
- Aptitude au pliage à la température ambiante (considérée comme un indicateur de la capacité à absorber l'énergie dans certaines situations de crash)
- Aptitude à l'assemblage, en particulier, tenue des points soudés (il en existe des milliers dans une structure automobile, qui ne peuvent être individuellement pris en compte lors d'un calcul de crash)
- Tenue en fatigue, pour les pièces soumises à des sollicitations cycliques plus ou moins sévères.

**Mots clés** : aciers inoxydables martensitiques, déformation, rupture, fatigue, soudage

# Effet de la microstructure sur la rupture par clivage d'aciers inoxydables martensitiques emboutissables à chaud pour application automobile

H. Godin<sup>a,b</sup>, G. Badinier<sup>b1</sup>, J.-D. Mithieux<sup>b</sup>, A.-F. Gourgues-Lorenzon<sup>a</sup>

<sup>a</sup>MINES ParisTech, PSL Research University, MAT- Centre des matériaux, CNRS UMR 7633, BP 87  
91003 Evry, France

<sup>b</sup>APERAM Research Center, BP. 15, 62330 Isbergues, France

Les aciers emboutissables à chaud sont largement utilisés pour alléger les pièces de structure automobile car ils présentent une excellente combinaison entre aptitude à la mise en forme, résistance mécanique et ductilité. De nouvelles nuances d'aciers inoxydables martensitiques emboutissables à chaud ont été développées pour cette application. Leur microstructure, contenant de la ferrite résiduelle et des carbures est plus complexe que celle des aciers au carbone correspondants. Le lien entre la microstructure et la résistance au clivage de ces aciers n'est pas encore très bien compris [1-2]. Pour certaines compositions chimiques testées au cours du développement, la vitesse de trempe après l'emboutissage à chaud affecte très fortement la ductilité à basse température, les mécanismes de rupture et la résilience. Dans ces cas particuliers, la température de transition ductile-fragile peut varier de plus de 100°C selon la vitesse de trempe. Des ajustements de la composition chimique ont été effectués pour créer la nuance MaX1.2HY qui présente de bien meilleures propriétés mécaniques.

Ce projet a pour but d'améliorer la compréhension des liens entre la composition chimique, les conditions du cycle thermique simulant la mise en forme à chaud, la microstructure et la sensibilité de ces aciers à la rupture par clivage. Des essais de résilience ont tout d'abord été réalisés pour différentes compositions chimiques et vitesses de refroidissement pour caractériser la transition ductile-fragile et les mécanismes de rupture fragile. De plus, une méthodologie a été développée pour identifier un critère quantitatif de rupture à partir d'essais de traction sur éprouvettes lisses et entaillées à différentes températures, en suivant une approche de type Ritchie-Knott-Rice [3].

Une analyse de l'endommagement et des mécanismes de rupture, ainsi qu'une analyse mécanique des essais par la méthode des éléments finis permettent l'estimation des contraintes critiques d'amorçage de la rupture fragile instable. Ce critère de rupture sera relié aux paramètres microstructuraux afin d'améliorer la conception de ces nouvelles nuances d'aciers inoxydables.

**Mots clés :** microstructure, critère de rupture fragile, aciers inoxydables martensitiques

## Références :

- [1] G.R. Odette, G.E. Lucas, R. Maiti, and J.W. Sheckherd, "The micromechanical mechanisms of cleavage fracture in martensitic stainless steels", *Journal of Nuclear Materials*, 122 & 123 (1984) 442-447
- [2] K. Srivatsa, P. Srinivas, G. Balachandran, V. Balasubramanian, "Improvement of impact toughness by modified hot working and heat treatment in 13%Cr martensitic stainless steel", *Materials Science & Engineering A* 677 (2016) 240-251
- [3] R.O. Ritchie, J.F. Knott, J.R. Rice, "On the relationship between critical tensile stress and fracture and toughness in mild steel," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 21 (1973) 395-410

---

<sup>1</sup> Maintenant à Areva

# Microstructure, déformation plastique et transition ductile-fragile d'un acier austéno-ferritique à basse densité pour application automobile

Q. Tonizzo<sup>a,b</sup>, M. Mazière<sup>a</sup>, A. Perlade<sup>b</sup>, I. Zuazo<sup>b</sup>, A.-F. Gourgues-Lorenzon<sup>a</sup>

<sup>a</sup>MINES ParisTech, PSL Research University, MAT- Centre des matériaux, CNRS UMR 7633, BP 87, 91003 Evry cedex, France

<sup>b</sup>R&D Automotive Products, ArcelorMittal Maizières, Voie Romaine, BP30320, 57283 Maizières-lès-Metz, France

Les aciers à teneur moyenne en manganèse et alliés à l'aluminium présentent une excellente combinaison de densité, de résistance et de ductilité adaptée aux applications pour automobiles. Les relations microstructure-propriétés sont cependant peu détaillées dans la littérature ouverte, dans le cas des aciers à très haute résistance possédant une microstructure bimodale, comprenant des gros grains de ferrite et des zones dites « duplex » combinant ferrite  $\alpha$  et austénite  $\gamma$  [1]. L'objectif des travaux présentés est d'explorer le lien entre cette microstructure particulière et son comportement mécanique en traction uniaxiale et en résilience par choc Charpy, à la température ambiante et aux températures plus basses.

Le matériau est étudié sous la forme d'une tôle fine (épaisseur 1,2 mm) laminée et recuite, pour deux températures de recuit différentes. Les caractéristiques microstructurales (taille, fraction et composition chimique des phases à l'échelle de la microsonde de Castaing) sont identiques pour les deux températures de recuit.

Les propriétés en traction à la température ambiante sont identiques pour les deux recuits (résistance en traction supérieure à 700 MPa, allongement à rupture supérieur à 25%) mais celles à -50°C dépendent fortement du recuit. La capacité d'érouissage plus élevée, associée à une limite d'élasticité et à une ductilité moins élevées pour un des recuits, a été attribuée à une moindre stabilité de l'austénite face à la transformation martensitique sous sollicitation mécanique. Une tendance au délaminage est notée quel que soit le recuit.

La résilience Charpy dépend du recuit à la fois pour l'énergie au plateau ductile et pour la température de transition globale (écart de 30°C entre les deux recuits). L'observation des surfaces de rupture montre que l'unique transition en énergie absorbée repose sur deux transitions distinctes de mode de rupture, plus brutales mais à des températures différentes : une transition entre rupture ductile à grandes cupules et clivage pour les gros grains de ferrite et une transition entre rupture interfaciale et rupture ductile à fines cupules pour les zones duplex à grains fins. Les températures caractéristiques de ces deux transitions varient chacune avec les conditions de recuit.

**Mots clés :** aciers à haute résistance, clivage, rupture interfaciale, austénite, ferrite, transition ductile-fragile

## Références :

[1] C.H. Seo, K.H. Kwon, K. Choi, et al. Deformation behavior of ferrite-austenite duplex lightweight Fe-Mn-Al-C steel, *Scr. Mater.* 2012;66:519-522.

# Comportement à rupture d'un alliage de zirconium après un cycle thermo-mécano-chimique sévère : effets de l'oxydation et de la prise d'hydrogène sur l'évolution microstructurale et les mécanismes de rupture

R. Thieurmel<sup>a,b</sup>, E. Pouillier<sup>b</sup>, A. Parrot<sup>b</sup>, A.-F. Gourgues-Lorenzon<sup>a</sup>, J. Besson<sup>a</sup>

<sup>a</sup>MINES ParisTech, PSL Research University, MAT- Centre des matériaux, CNRS UMR 7633, BP 87  
91003 Evry, France

<sup>b</sup>EDF Lab Les Renardières – Ecuelles, 77818 Moret-sur-Loing, France

Cette thèse s'inscrit dans le contexte des études sur le comportement des matériaux de gainage combustible en condition d'Accident de Perte de Réfrigérant Primaire (APRP) des réacteurs nucléaires français. Les scénarios hypothétiques d'APRP induisent des changements sévères de l'environnement thermomécanique des crayons combustibles. L'évolution de ces conditions de pression, de température et de l'état du fluide réfrigérant entraîne l'oxydation, l'hydruration et des chargements mécaniques additionnels, qui dans certains cas conduisent à la diminution du potentiel ductile des gainages combustibles [1] [2].

L'objectif de la thèse est d'enrichir la compréhension de l'interaction entre les différents phénomènes mis en jeu afin d'identifier un modèle scientifiquement éprouvé capable de prédire la tenue du matériau de gainage face à la trempe intervenant en fin de transitoire APRP. Ce travail expérimental s'appuie sur des essais reproduisant les conditions APRP, réalisés à l'aide d'un dispositif innovant développé pour EDF R&D.

Lors de telles conditions, une compétition entre deux mécanismes de rupture est observée. Le premier est dû à une réduction locale de l'épaisseur, couplée à une forte oxydation de la gaine qui réduit la section portante du cœur ductile. Le second mécanisme est associé à l'effet fragilisant de la prise d'hydrogène. Les évolutions microstructurales associées à ces mécanismes de fragilisation, mises en évidence par différentes méthodes de caractérisation, sont présentées.

**Mots clés :** microstructure, APRP, Zircaloy-4, hydruration secondaire.

## Références :

[1] F. NAGASE and al, 2005, "Behavior of Pre-hydrated Zircaloy-4 Cladding under Simulated LOCA Conditions," *Journal of nuclear science and technology*, vol. 42, no. 2, p. 209–218.

[2] J.-C. BRACHET and al, 2017, "Study of secondary hydriding at high temperature in zirconium based nuclear fuel cladding tubes by coupling information from neutron radiography/tomography, electron probe micro analysis, micro elastic recoil detection analysis and laser induced breakdown spectroscopy microprobe," *Journal of Nuclear Materials*, vol. 488, p. 267–286.





Vous pouvez nous contacter:

par courrier postal:

**Centre des Matériaux**  
Mines ParisTech  
CNRS UMR 7633  
63-65 Rue Henry Desbriueres, BP 87  
F-91003 Evry cedex, FRANCE

par téléphone : +33 1 60 76 30 00  
par fax : +33 1 60 76 31 50  
par courrier électronique : [semteam@mat.ensmp.fr](mailto:semteam@mat.ensmp.fr)  
Site web : <http://www.mat.ensmp.fr>

Equipe séminaire :

Nicolas CLICHE  
Laurane FINET  
Maxime PELERIN  
Frank TIOGUEM-TEAGHO