



CENTRE DES MATERIAUX
P.M.FOURT



S *ÉMINAIRE du 18 Mars 2016*

**Comportements microstructural et mécanique des
gaines de combustible pour les réacteurs de
génération IV : des aciers au composite.**



GAINAGE COMBUSTIBLE DES REACTEURS RAPIDES : AUGMENTER LES PERFORMANCES GRACE A L'INNOVATION DANS LES MATERIAUX

Marion LE FLEM¹ (ou Laurent CHAFFRON²)

¹CEA, DEN, DIR, F-91191 Gif-sur-Yvette, France

marion.leflem@cea.fr

²CEA, DEN, SRMA, LTMEX, F-91191 Gif-sur-Yvette, France

laurent.chaffron@cea.fr

Repousser les limites des matériaux pour les rendre plus résistants au gonflement sous irradiation, plus robustes mécaniquement ou encore plus stables en température est un enjeu majeur de la R&D sur le gainage combustible. Pour les réacteurs rapides refroidis au sodium, et en particulier Phénix, les optimisations métallurgiques ont ainsi permis d'augmenter progressivement le taux de combustion depuis l'utilisation de gaines en aciers de type 316 (~50 dpa), jusqu'aux gaines en acier 15/15Ti de spécification AIM1 qui seront mises en œuvre dans le prochain démonstrateur ASTRID (~100 dpa sur la gaine). Au-delà, et dans un objectif de réacteurs commerciaux (filiale), des aciers austénitiques avancés et des aciers renforcés par dispersions d'oxyde (ODS) seront capables de supporter des doses supérieures à 150 dpa tout en étant plus résistants à la déformation par fluage. Enfin, les matériaux céramiques, comme les composites SiC/SiC, offrent la possibilité d'atteindre des températures dépassant 1000°C sans diminution de la tenue mécanique.

Les études menées actuellement aux CEA (souvent dans le cadre de collaborations nationales voire internationales) sur l'AIM1, les ODS et les SiC/SiC illustrent à quel point la compréhension des mécanismes intimes régissant le comportement des matériaux est nécessaire pour lever les verrous technologiques et aboutir à une solution industrielle.

ETUDE DES MECANISMES DE RUPTURE A HAUTE TEMPERATURE D'ACIERS RENFORCES PAR DISPERSION DE NANO-OXYDES (ODS)

Hubert SALMON-LEGAGNEUR ^{1,2}, Anne-Françoise GOURGUES-LORENZON ²,

Éric ANDRIEU ³, Sébastien VINCENT ¹, Jérôme GARNIER ¹

¹ CEA Saclay, DEN, DANS, DMN, SRMA, 91191 Gif-sur-Yvette cedex, France

² MINES ParisTech, PSL Research University, Centre des Matériaux, UMR CNRS 7633, BP87, 91003 Evry cedex, France

³ CIRIMAT, ENSIACET, 4 allée Emile Monso, BP44362, 31030 Toulouse, France_

hubert.salmon-legagneur@mines-paristech.fr

Du fait de leur matrice ferritique et de leur forte densité de nano-renforts, les aciers ODS présentent une très bonne résistance au gonflement sous irradiation. La présence des nano-précipités permet également d'augmenter la résistance mécanique de ces alliages, notamment en fluage [1]. Ils sont ainsi de bons candidats pour le gainage combustible dans les réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium.

Ces aciers, élaborés par métallurgie des poudres (cobroyage de poudres puis consolidation par filage à haute température) présentent une taille de grains très fine (submicrométrique) induisant un risque d'endommagement intergranulaire. Plusieurs études ont ainsi montré des faciès de rupture intergranulaire après des essais à haute température, notamment en fluage. Cependant, l'oxydation des surfaces empêche l'étude approfondie des mécanismes de rupture. La ruine des éprouvettes semble généralement causée par la propagation stable d'une fissure amorcée en surface latérale. L'environnement chimique de l'essai pourrait donc avoir un effet sur les propriétés mesurées. Une méthodologie, basée sur l'utilisation d'éprouvettes entaillées simple et double entaille, a été développée et a été utilisée afin de révéler, pour la première fois, des zones endommagées à haute température n'ayant pas été en contact avec l'environnement extérieur.

Les essais de fluage ont montré une forte tendance de ces matériaux à la propagation stable de fissures. Les conditions de propagation de ces fissures ont été étudiées par des essais sous air sur éprouvettes pré-fissurées. D'autre part, une méthodologie reposant sur la fissuration en relaxation a été développée afin de réaliser des essais en four, sous environnement contrôlé.

[1] A. Alamo *et al.*, *Journal of Nuclear Materials* 329-333 A, pp. 333-337, (2004) .

EVOLUTIONS MICROSTRUCTURALES D'UN ACIER INOXYDABLE AUSTENITIQUE STABILISE AU TITANE AU COURS DE TRAITEMENTS THERMIQUES

Lucie MATEUS FREIRE^{1,2}, Emma PIOZIN¹, Arnaud COURCELLE¹, Anne-Françoise GOURGUES²

¹ CEA, DEN-DANS, DMN, SEMI, LCMI, 91191 Gif-sur-Yvette Cedex, France

² MINES ParisTech, PSL Research University, Centre des Matériaux, UMR CNRS 7633, BP87, 91003 Evry cedex, France
lucie.mateus-freire@mines-paristech.fr

Cette étude s'inscrit dans le cadre de la conception d'ASTRID (Advanced Sodium Technological Reactor for Industrial Demonstration), qui est un prototype de réacteur à neutrons rapides envisagé pour la future génération (génération IV). L'AIM1 (Austenitic Improved Material #1) est un acier inoxydable austénitique stabilisé au titane et écroui à froid qui a été choisi comme premier matériau de gainage des éléments combustibles d'ASTRID. La gaine constitue la première barrière de confinement des produits de fission, elle doit ainsi pouvoir supporter des conditions d'irradiation et de température sévères. En situations accidentelles, telles que la perte de réfrigérant primaire, la température pourrait atteindre jusqu'à 950°C en moins d'une minute. Or, dans la gamme de température 650-1000°C, le comportement en fluage de l'AIM1, irradié ou non, est mal connu. En effet, ce matériau, instable de par son écrouissage, est sujet, à haute température, à une compétition entre des phénomènes durcissants (précipitation) et à des phénomènes adoucissants (restauration / recristallisation).

Après étude de la microstructure initiale (écrouie) de cet acier, l'évolution microstructurale de l'AIM1 au cours de recuits a été caractérisée pour des températures allant de 650°C à 1000°C. Cette approche permet de rendre compte des phénomènes à l'échelle microscopique, mis en jeu lors de vieillissements thermiques (sans contrainte appliquée) par comparaison avec l'état de réception. Des analyses en microscopie électronique sur lames minces et sur répliques extractives ont permis de caractériser l'état de précipitation des échantillons traités thermiquement. L'évolution des phénomènes de recristallisation a pu être mise en évidence à l'aide du MEB/EBSD.

Par ailleurs, un protocole expérimental d'essais de fluage sous vide du Centre des Matériaux a été établi. Les premiers résultats sur tubes à 850°C et 1000°C montrent une forte dépendance des temps à rupture envers la température et la contrainte appliquées. Les fractographies ont montré un mode de rupture ductile du matériau. Les microstructures des zones vieilles sous contrainte ont également été expertisées et comparées avec les échantillons recuits à des températures et temps de maintien similaires.

INFLUENCE DE LA SURFACE DES FIBRES SiC SUR LE COMPORTEMENT MECANIQUE DES COMPOSITES SiC/SiC

Clémentine FELLAH ¹, James BRAUN ¹, Cédric SAUDER ¹, Marie-Hélène BERGER ²,
Sylvie POISSONNET ³

¹ CEA, DEN, SRMA, LTMEX, F-91191 Gif-sur-Yvette, France,

² MINES ParisTech, PSL Research University, MAT - Centre des matériaux, CNRS UMR 7633, BP 87
91003 Evry, France,

³ CEA, DEN, SRMP, F-91191 Gif-sur-Yvette, France

clementine.fellah@cea.fr

Les composites SiC/SiC à interphase pyrocarbone (PyC) (figure 1) sont des candidats prometteurs en tant que matériau de gainage du combustible des réacteurs à neutrons rapides, constituant une alternative aux alliages métalliques. Leur comportement sous irradiation neutronique et leur caractère réfractaire sont de sérieux atouts en milieu irradiant. Néanmoins, les fibres et la matrice en carbure de silicium (SiC) sont, individuellement, des céramiques fragiles. L'intégrité des structures ne peut donc être assurée que si le composite acquiert une tolérance aux déformations. Cette tolérance n'est possible que grâce à la présence d'une interphase, assurant le rôle de déviateur de fissures.

La capacité des composites SiC/SiC à résister à l'endommagement est dictée par le couplage fibre/matrice (F/M). L'intensité de ce couplage peut être influencée par de nombreux paramètres, tels que la rugosité et la physicochimie de surface du renfort [1]. Les travaux faisant l'objet de cette présentation ont mis en évidence une couche de carbone en surface des fibres par microscopie électronique en transmission à haute résolution (METHR) et via des analyses physicochimiques de surface. L'impact de cette couche de carbone sur le couplage F/M a été appréhendé par l'observation des mécanismes locaux d'endommagement. La décohésion fibre/matrice a pu être étudiée en analysant par METHR les régions interfaciales des composites SiC_f/SiC_m ayant subi un essai push-out. A terme, la détermination des dissimilarités entre les différentes fibres SiC et la compréhension de l'origine de cette couche permettrait de mieux connaître les mécanismes locaux d'interaction. Il serait alors possible d'optimiser le comportement mécanique des composites, SiC/SiC quel que soit le renfort fibreux utilisé, ce qui serait une avancée majeure pour ce type de matériaux.

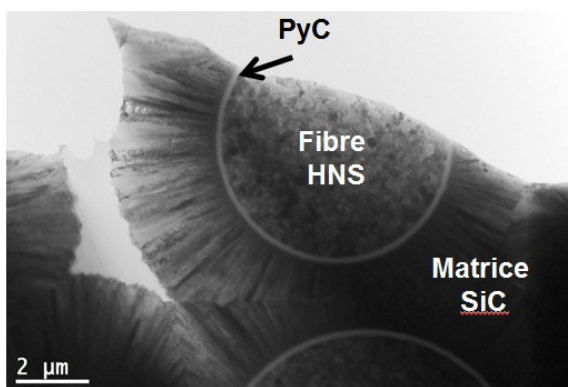


Figure 1 : Cliché TEM d'un composite SiC/SiC

[1] E. Buet, Influence des caractéristiques de surface des fibres de type Hi-Nicalon S et Tyranno SA3 sur le comportement mécanique des composites SiC/SiC, PHD Thesis, Université de Haute-Alsace, 2012



Vous pouvez nous contacter:

par courrier postal:

Centre des Matériaux
Mines ParisTech
CNRS UMR 7633
10 Rue Henry Desbrières, 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
Site web : <http://www.mat.ensmp.fr>

Equipe séminaire :

Louise BRIEZ
Margaux BUNEL
Raphaël CUSSET
Hélène GODIN