



S *ÉMINAIRE du 11 Avril 2014*

Matériaux pour le nucléaire : optimisation microstructurale et endommagement intergranulaire



Réacteur de génération IV: réacteur au sodium

Problématique « matériaux de structure »

Sophie Dubiez-Le Goff

AREVA NP, Lyon

sophie.dubiez-legoff@areva.com

Sodium Fast Reactor (SFR) is considered in France as the most mature technology of the different Generation IV systems. In this context, the CEA is involved in a substantial effort on the ASTRID (Advanced Sodium Technological Reactor for Industrial Demonstration) pre-conceptual design mainly in cooperation with EDF, as experienced Sodium-cooled Fast Reactor (SFR) operator, and AREVA, as experienced SFR Nuclear Island and components engineering company.

In that frame, materials selection for the major components is a particular key point managed within a French Research and Development program launched by CEA, EDF and AREVA. Moreover previous SFRs were designed for 30 or 40 years lifetime. It is specified for ASTRID to have accurate data available for 40 years lifetimes before commissioning and to demonstrate during the reactor operation the possibility to reach 60 years of lifetime. The presentation aims at identifying the materials items significantly affected by an extended lifetime up to 60 years: properties evolution and damages worsening.

IMPACT DE L'APPLICATION D'UN TRAITEMENT THERMOMECHANIQUE DE TYPE « AUSTENIFORMAGE » SUR LA MICROSTRUCTURE ET LES PROPRIETES MECANIQUES D'UN ACIER A 9%CR

Emma Piozin ^a, Jean-Christophe Brachet ^a, Sébastien Vincent ^a, Anne-Françoise Gourgues-Lorenzon ^b

^aCEA, DEN/DANS/DMN/SRMA, Bât. 453, 91191 Gif-sur-Yvette Cedex

^bCentre des Matériaux des Matériaux, Mines Paristech, CNRS UMR 7633, BP87, 91003 Evry Cedex, France

emma.piozin@mines-paristech.fr ou emma.piozin@cea.fr

Le Grade 91 est un acier martensitique revenu à 9%Cr principalement employé dans les centrales thermiques conventionnelles et en pétrochimie. Depuis quelques années, il est également envisagé comme matériau de plusieurs composants des réacteurs nucléaires du futur¹. Afin d'améliorer ses propriétés mécaniques à haute température (~500-650°C), l'une des solutions envisagées est d'appliquer un traitement thermomécanique de type « austéniformage »² constitué d'une austénitisation, d'un laminage en phase austénitique métastable, d'un refroidissement jusqu'à la température ambiante puis d'un revenu, figure 1.

L'étape de laminage de la phase « mère » austénitique influence la microstructure et les propriétés mécaniques finales de l'acier de Grade 91. Cette influence est caractérisée finement et systématiquement par des observations microstructurales à différentes échelles en s'intéressant aux ex-grains d'austénite, aux blocs et lattes de martensite (MEB-EBSD, MET) et à l'état de précipitation. Nous avons aussi mis en oeuvre la diffraction des neutrons pour tenter d'estimer l'évolution de la densité de dislocations au cours du revenu. Enfin des essais mécaniques systématiques (dureté, traction, résilience, fluage) ont été menés sur différents états métallurgiques afin d'approfondir la compréhension du lien microstructure/résistance élastique à la température ambiante dans un premier temps (figure 2) puis vis-à-vis des propriétés à chaud. Les paramètres microstructuraux dominants susceptibles d'induire une amélioration significative des propriétés mécaniques à haute température de cet acier, tout en préservant autant que possible la ductilité et la ténacité du matériau, notamment à basse température, seront illustrés.

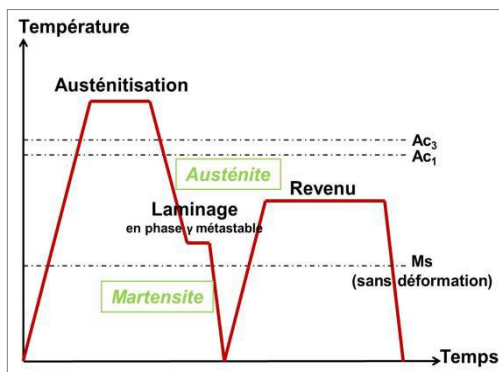


Figure 1. Présentation du traitement thermomécanique de type " austéniformage "

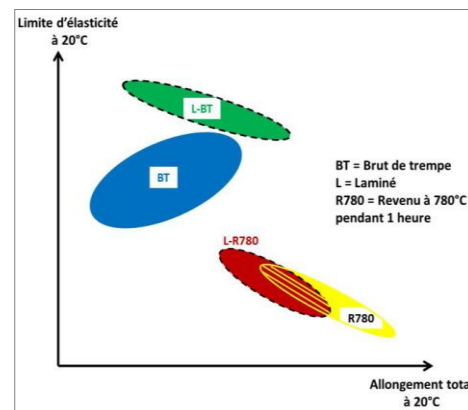


Figure 2. Limite d'élasticité en fonction de l'allongement total à 20°C pour les états non laminé et laminé brut de trempe et revenu à 780 C

¹ T. Jayakumar, M.D. Mathew, K. Laha, *High Temperature Materials for Nuclear Fast Fission and Fusion Reactors And Advanced Fossil Power Plants*, Procedia Engineering, vol. 55, p. 259-270, 2013.

² Hollner, S., Fournier, B., Le Pendu, J., Cozzika, T., Tournié, I., Brachet, J.-C., Pineau, A., *High-temperature mechanical properties improvement on modified 9Cr-1Mo martensitic steel trough thermomechanical treatments*, Journal of Nuclear Materials, vol. 405, p. 101-108, 2010.

ÉTUDE DES MICRO-MECANISMES RESPONSABLES DE LA FISSURATION PAR RELAXATION A CHAUD DES ACIERS INOXYDABLES AUSTENITIQUES

Harry Pommier ^a, Esteban P. Busso ^{a,b}, Thilo F. Morgeneyer ^a, Sophie Dubiez-Le Goff ^c et André Pineau ^a

^a Centre des Matériaux des Matériaux, Mines Paristech, CNRS UMR 7633, BP87, 91003 Evry, France

^b ONERA - National Aerospace Research Centre, 91123 Palaiseau

^c AREVA NP, 69006 Lyon

harry.pommier@mines-paristech.fr

Les zones affectées par la chaleur (ZAT) proches des cordons de soudures des aciers inoxydables austénitiques peuvent présenter des fissures intergranulaires lorsqu'elles sont réchauffées entre 500 et 700°C pendant des traitements thermiques ou en service.

Une procédure expérimentale proposée dans la littérature, spécialement conçue pour reproduire ce phénomène, est adaptée ici pour l'étude de deux aciers AISI 316L. Elle consiste à introduire un fort champ de contraintes résiduelles de traction dans une zone proche du fond d'entaille d'une éprouvette de type CT, préalablement pré-déformée à température ambiante d'environ 20%. Après maintien en température de ces éprouvettes sans aucun chargement extérieur à des températures proches de 550°C pendant 6 mois, des microcavités intergranulaires ont été observées et étudiées par MEB (SE et EBSD) et tomographie-X locale.

Une nouvelle loi de comportement viscoplastique est proposée pour décrire le comportement mécanique du matériau dans ces conditions. Cette loi décrite en grandes déformations prend en compte l'évolution de la microstructure (densité des dislocations, espace entre macles) ainsi que l'écroutissage cinématique du matériau à l'aide de variables internes. Elle est calibrée en comparaison avec des essais monotones, cycliques et de relaxation entre 20 et 600°C et est ensuite utilisée pour prédire l'introduction des contraintes résiduelles à température ambiante dans les éprouvettes CT et leur relaxation ultérieure à 550-600°C. Une bonne corrélation entre la distribution de la plus grande contrainte principale résiduelle prédite numériquement et celle de l'endommagement expérimental est observée.

Parallèlement à la prédiction de l'évolution des champs des contraintes résiduelles constituant la force motrice principale de l'endommagement intergranulaire, la dégradation de la tenue mécanique des joints des grains due à la ségrégation des impuretés comme le phosphore a été étudiée. Pour cela, une loi existante décrivant la cinétique de ségrégation du P vers les joints des grains a été utilisée pour prédire la concentration intergranulaire critique lorsque l'endommagement intergranulaire est détecté expérimentalement. Ces résultats ont conduit à l'élaboration d'un nouvel alliage avec une teneur de P tel que la fragilisation des joints des grains par ségrégation de P est évitée.

A STUDY OF THE VACANCY SINK EFFICIENCY OF GRAIN BOUNDARIES USING A COUPLED CONTINUUM DIFFUSION-DEFORMATION-PHASE FIELD FRAMEWORK

Aurelien Villani ^a, Esteban P. Busso ^a, Samuel Forest ^a, and Benoit Appolaire ^b

^aCentre des Matériaux, Mines Paristech, CNRS UMR 7633, BP87, 91003 Evry Cedex, France

^bONERA, DMSE/CEMN, 29 Ave Div Leclerc, BP 72, 92322 Chatillon, France

aurelien.villani@ensmp.fr

Some of the most deleterious degradation mechanisms in high temperature polycrystalline materials are those caused by the diffusion of point defects (i.e. vacancies or interstitial atoms) through either the crystal lattice or the grain boundary regions, and by their interaction with other lattice defects such as dislocations.

In the present work, the effect of stress on the simultaneous diffusion of vacancies and interstitial atoms is first considered through a thermodynamically consistent formulation, involving diffusion coupled with single crystal plasticity to describe the behavior of each individual grain. The individual flow equations at the slip system level are then enhanced to account explicitly for self-diffusion creep, the driving force being proportional to the gradient of the vacancy flux. The model is then extended to incorporate a phase field type order variable using a suitable non-convex free energy potential to describe the formation of stable vacancy clusters.

The framework is implemented into the finite element method and used to study the evolution of irradiation damage in polycrystalline copper. The evolution of point defects is extended to account for their formation via irradiation cascades and recombination processes, and for the presence of local sinks. Finally, the effect of vacancy and interstitial fluxes on the behavior of a grain boundary is studied. In particular, the way in which the balance of fluxes towards the grain boundary changes during the void formation and disappearance processes is investigated and compared with the experimental observations of Han *et al.* (2012). The sink efficiency of different types of grain boundaries under similar irradiation conditions is also studied numerically and discussed in view of published atomistic (MD) and experimental results.

REFERENCES:

- Ammar K., Appolaire B., Cailletaud G., Feyel F., Forest S., 2009, "Finite Element Formulation of a Phase Field Model Based on the Concept of Generalized Stresses" *Computational Material Sciences*, 45 800-805
- Berdichevsky V., Hazzledine P., Shoykhet B., 1997, "Micromechanics of Diffusional Creep", *International Journal of Engineering Science*, 35 1003-1032
- Han W.Z., Demkowicz M.J., Fu E.G., Wan Y.Q., Misra A., 2012, "Effect of grain boundary character on sink efficiency", *Acta Materialia*, 60 6314-6351
- Suo Z., 2004, "A Continuum Theory that Couples Creep and Diffusion", *Journal of Applied Mechanics-Transactions of the ASME*, 71 646-651



Vous pouvez nous contacter:

par courrier postal:

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

Equipe séminaire :

Florent Coudon (A005)
Vincent Bortolussi (C119)
Alexandre Hermant
Chao Ling (B109)

