



Séminaire du 12 avril 2019



Recristallisation d'alliages austénitiques :
caractérisation expérimentale et
modélisation du rôle du niobium

Présentation des activités métallurgie / mécanique du centre de Valduc

Christophe THIEBAUT^a

^aCEA DAM, Centre de Valduc

Après une présentation du Commissariat à L'Energie Atomique, je donnerai un aperçu assez large de l'activité du centre de Valduc et des possibilités qui peuvent se proposer dans les années à venir.

Après cette introduction, je détaillerai les différentes études menées actuellement de manière générale dans les domaines de la métallurgie et de la mécanique. Ces éléments permettront de donner une vision d'ensemble des moyens disponibles sur le site et ceux qui sont utilisés en collaboration soit dans le cadre de partenariats ou de collaborations. Un certain nombre d'exemples sur des matériaux différents ou avec des gammes de mise en forme seront présentés afin de donner la meilleure idée possible de la gamme des expertises et études qui sont menées à Valduc.

Étude fondamentale de la déformation à chaud de Ni pur avec additions de Nb : rhéologie, microstructure, recristallisation dynamique discontinue

David PIOT^a, Nejoua MATOUGUI^b, Mohamed Lamine FARES^c, Frank MONTHEILLET^a, S. Lee SEMIATIN^d

^a MINES Saint-Étienne, Laboratoire Georges Friedel, UMR CNRS 5307

^b Ecole des mines et métallurgie d'Annaba, Algérie

^c Badji Mokhtar - Annaba University, Algérie

^d Air Force Research Laboratory, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, Etats-Unis

Nous avons caractérisé expérimentalement, par essai de torsion, le comportement mécanique à chaud, notamment la rhéologie et la recristallisation dynamique discontinue (DDRX), d'alliages binaires modèles obtenus par additions étagées de niobium (fraction massique de 0, 0.01, 0.1, 1, 2, 5 et 10 %) dans du nickel de haute pureté de manière à étudier systématiquement les influences de la teneur en Nb dans cette large gamme de composition qui représente un modèle physique de la phase gamma des superalliages. La gamme de température étudiée est typique de la forge à chaud entre 800 et 1000 °C et garantit que tout le niobium est en solution solide. Les vitesses de déformation de 0,03, 0,1 et 0,3 /s couvrent aussi une gamme suffisante et assez représentative des procédés de transformation par déformation plastique à chaud.

Les paramètres rhéologiques majeurs comme l'effet durcissant du niobium, la sensibilité à la vitesse de déformation, l'énergie apparente d'activation... sont ainsi déterminés et discutés.

Avant l'amorçage de la recristallisation dynamique par germination, le bilan entre écrouissage et restauration dynamique a été évalué grâce à une analyse basée sur la loi de Yoshie Laasraoui Jonas et nous avons proposé un modèle empirique qui estime a priori les paramètres de cette loi en fonction des conditions de déformation et de la teneur en niobium. Au régime stationnaire, la contrainte d'écoulement et la taille de grain ont permis d'estimer la loi de germination et la mobilité des joints de grains par l'intermédiaire d'un modèle de DDRX.

Bibliographie en rapport avec l'exposé :

Piot D., Montheillet F. and Semiatin S. L., Materials Science Forum Vols. [638-642 \(2010\)](#) pp 2700-2705

Piot D., Damamme G., and Montheillet F., Materials Science Forum Vols. [706-709 \(2012\)](#) pp 234-239

Matougui N., Piot D., Fares M. L. *et al.*, Mater. Sci. Eng. A [586 \(2013\) 350-357](#)

Montheillet F., Piot D., Matougi N *et al.*, Metall. Mater. Trans. A 45A10 [\(2014\) 4324-4332](#)

Piot D., Smaghe G., Jonas J. J. *et al.*, J. Mater. Sci. [53\(11\) \(2018\) 8554-8566](#)

Modélisation de la recristallisation d'un acier inoxydable austénitique stabilisé au niobium

N. Cliche^{1,2,5}, S. Ringeval², E. Georges³, P. Petit³, J. Bellus³, F. Cortial⁴, J.-L. Heuzé⁵, C. Desrayaud⁶, D. Piot⁶, A.-F. Gourgues-Lorenzon¹

¹Centre des Matériaux, MINES ParisTech, PSL Research University, UMR CNRS 7633, Evry

²Centre de Valduc, Commissariat à l'Energie atomique et aux énergies alternatives, Is-sur-Tille

³Aubert & Duval, Les Ancizes

⁴Naval Group Research, Bourguenais

⁵Direction générale de l'Armement, Ministère des Armées, Paris

⁶MINES Saint-Étienne, Laboratoire Georges Friedel, UMR CNRS 5307

L'acier 316 Nb est un acier inoxydable austénitique stabilisé au niobium. Il est utilisé comme matériau de structure de réservoirs sous pression soumis à de forts chargements thermomécaniques sur des durées importantes. Il importe donc de contrôler finement sa microstructure et notamment de limiter la recristallisation lors des opérations de mise en forme et de traitement thermique afin d'augmenter sa limite d'élasticité.

La recristallisation des aciers austénitiques des séries 304 ou 316 sans addition de niobium a été largement étudiée que ce soit en dynamique (pendant la déformation), en post-dynamique (pendant le refroidissement lent) ou en statique (pendant le traitement thermique d'hypertrempe). Smaggehe [1] a étudié l'effet d'une relativement faible quantité de niobium sur la recristallisation d'un acier de type 304 L. Cependant, peu de travaux ont porté sur la recristallisation d'un acier comportant à la fois du Mo et du Nb (316 Nb). Hermant [2] a étudié la recristallisation du 316 Nb notamment en post-dynamique et en statique. Dans cette présentation, nous présentons des résultats nouveaux de recristallisation dynamique du 316 Nb ainsi que des résultats complémentaires de recristallisation post-dynamique et statique.

Le modèle de Montheillet et al. [3] de recristallisation dynamique discontinue a été implémenté pour le 316 Nb et enrichi pour prendre en compte les évolutions post-dynamiques ainsi que l'effet du niobium. Le modèle permet de bien prendre en compte l'écroutissage et la restauration dynamique du matériau ainsi que le comportement rhéologique asymptotique mais la loi de germination implémentée échoue à prédire la rhéologie transitoire de recristallisation dynamique. Cela semble indiquer que le 316 Nb ne présente pas une recristallisation dynamique complètement discontinue et que d'autres mécanismes (recristallisation continue ou géométrique) sont à explorer.

La partie post-dynamique du modèle de recristallisation permet de modéliser l'évolution de la fraction recristallisée à la suite de la déformation. Pour un refroidissement donné sur une microstructure déformée donnée, on met en évidence une valeur critique de niobium en solution solide au-delà de laquelle le traînage de solutés empêche la microstructure de recristalliser. De même, le coefficient de restauration post-dynamique ou statique influe beaucoup sur la fraction recristallisée finale. Il est cependant difficile de quantifier par de seuls essais de torsion la part relative de la restauration et du traînage de

solutés. Le modèle actuel permet donc de mieux comprendre et d'analyser un certain nombre d'observations expérimentales. Il devrait permettre à terme d'optimiser les gammes de fabrication en quantifiant l'effet des principaux paramètres procédés sur les propriétés finales du matériau.

Bibliographie en rapport avec l'exposé :

[1] G. Smaghe, *Modélisation de la recristallisation lors du forgeage à chaud de l'acier 304L – une approche semi-topologique pour les modèles en champs moyens*, thèse de Doctorat de l'université de Lyon, 2017

[2] A. Hermant et al., *Hot Deformation and Recrystallization Mechanisms in a Coarse-Grained, Niobium Stabilized Austenitic Stainless Steel (316Nb)*, Metallurgical and Materials Transactions A 50(4) (2019), pp. 1625-1642

[3] F. Montheillet et al., *A grain scale approach for modeling steady-state discontinuous dynamic recrystallization*, Acta Materialia, 57 (2009), pp. 1602-1612



Vous pouvez nous contacter :

- Par courrier postal :

Centre des Matériaux Pierre-Marie Fourt
Mines ParisTech
CNRS UMR 7633, BP 87 91003 Evry, France

- Par téléphone : +33 (0)1 60 76 30 00
- Par fax : +33 (0)1 60 76 31 50
- Par courrier électronique : semteam@mat.mines-paristech.fr
- Site web : <http://www.mat.mines-paristech.fr>

Equipe séminaire :

Hugo LAUNAY
Cléa PLOUZE
Mélanie THEVENEAU