Revue de Métallurgie **108**, 33–37 (2011)
© EDP Sciences, 2011
DOI: 10.1051/metal/2010019
www.revue-metallurgie.org

Revue de Métallurgie

Le gonflement des aciers austénitiques

P. Dubuisson

CEA-DEN-DMN, CEA Saclay 91, Saclay, France
e-mail : philippe.dubuisson@cea.fr

Mots-clés :
Aciers austénitiques ; expansion volumique isotrope ; réacteurs à neutrons rapides

Résumé – Les aciers austénitiques sont largement employés dans le cœur des réacteurs nucléaires et sont donc soumis à des flux importants de neutrons, conduisant à de fortes évolutions de leurs propriétés dont une des plus importantes est le gonflement (expansion volumique isotrope). Cette déformation induite par l'irradiation est due à la formation de cavités. Le gonflement est un phénomène à seuil qui dépend des conditions d'irradiation, température et flux mais aussi de l'état métallurgique du matériau et de sa composition chimique. Le changement de matériaux, de l'acier 316 au 15–15 Ti, a permis d'augmenter d'un facteur 3 la durée de vie des assemblages des réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium.

Key words:
Austenitic steels; isotropic volume expansion; fast reactor subassemblies

Abstract – Swelling of austenitic stainless steels. Austenitic stainless steels are widely used in the core of the nuclear reactors and are thus subject to significant neutron flux, leading to strong evolutions of their properties. One of most significant is swelling (isotropic volume expansion). This deformation induced by the irradiation is due to the void formation. Swelling is a threshold phenomenon that depends on the irradiation conditions, temperature and flux, but also on the metallurgical state and its chemical composition. The change of steels, from SA 316 to CW 15–15 Ti, has increased by a factor 3 the lifetime of Sodium Fast Reactor subassemblies.

Reçu le 15 novembre 2010
Accepté le 12 mai 2011

Les aciers austénitiques sont largement employés dans les réacteurs nucléaires, notamment dans le cœur des réacteurs, structures internes des Réacteurs à Eau Pressurisée (REP), cuve, circuits et assemblages combustibles des Réacteurs à Neutrons Rapides à caloporteur Na (RNR Na), Vacuum Vessel d'ITER, ... En plus du vieillissement thermique, certains de ces composants sont soumis à des flux importants de neutrons qui conduisent à de fortes modifications des propriétés microstructurales et mécaniques des aciers austénitiques dont la conséquence la plus visible et la plus importante est le gonflement (expansion volumique isotrope). Dans cette présentation principalement basée sur les résultats obtenus dans les RNR Na [1–7], nous décrivons l'origine du gonflement, ses conséquences sur le comportement macroscopique, l'influence des principaux paramètres irradiation et les études matériaux qui ont permis d'améliorer la résistance au gonflement des aciers austénitiques et d'aboutir aux matériaux actuels.

1 Origine du gonflement – effet des paramètres irradiation

Le gonflement est un phénomène à seuil. Après une période d'incubation, le gonflement évolue linéairement avec la dose (Fig. 1). Ce comportement est la conséquence de la germination et de la croissance de cavités formées par la sursaturation lacunaire créée par l'irradiation. L'évolution du gonflement avec la dose peut donc être caractérisée par 2 paramètres, la dose d'incubation et la vitesse de stationnaire de gonflement.

Le gonflement dépend également des autres paramètres d'irradiation que sont la température, le flux de neutrons et la

https://doi.org/10.1051/metal/2010019 Published online by Cambridge University Press Article publié par EDP Sciences

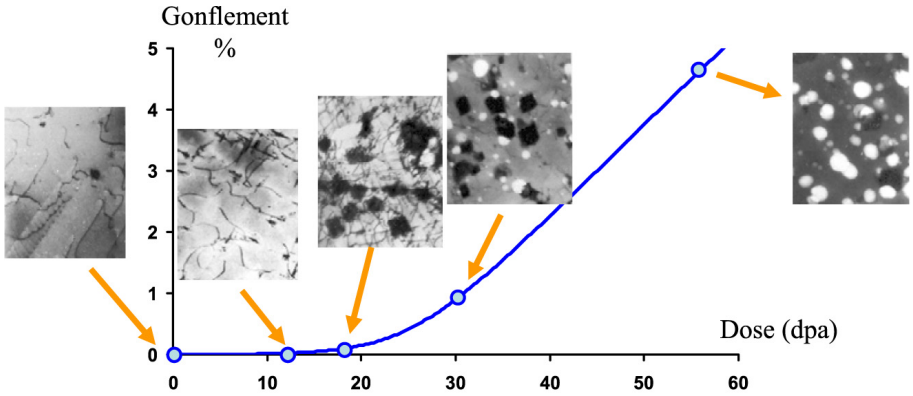


Fig. 1. Gonflement en fonction de la dose – 316 Hyp – 600 °C – Phénix.
Fig. 1. Swelling versus dose – SA 316 – 600 °C – Phenix.

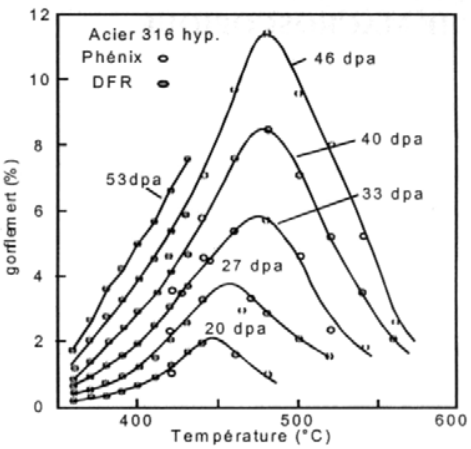


Fig. 2. Gonflement en fonction de la température d'un acier 316 hypertrempé irradié dans Phénix et DFR.
Fig. 2. Swelling in function of temperature of a SA 316 steel irradiated in Phenix and DFR.

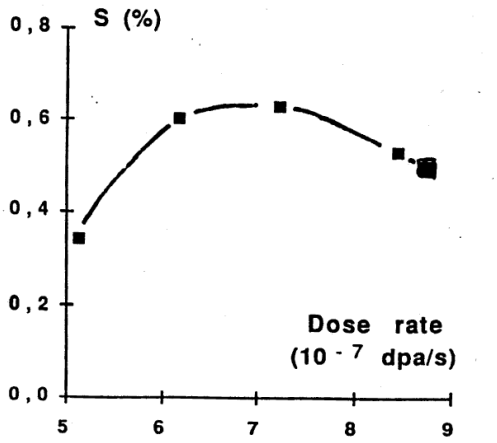


Fig. 3. Gonflement en fonction du flux de défauts d'un acier 316 irradié dans Phénix à 420 °C et 20 dpa.
Fig. 3. Swelling in function of neutron flux of a 316 steel irradiated in Phenix at 420 °C – 20 dpa.

quantité de gaz créé par l'irradiation. Ces évolutions sont illustrées sur la figure 2 pour la température et sur la figure 3 pour le flux. Le gonflement passe par un maximum en température et en flux.

2 Conséquences du gonflement sur les propriétés macroscopiques

Le gonflement conduit à des évolutions dimensionnelles. Les plus marquantes sont l'allongement de la gaine de l'assemblage combustible RNR Na (Fig. 4) et l'augmentation du diamètre des gaines qui limite le temps de séjour en réacteur des assemblages combustibles RNR Na.

Le gonflement, en tant que tel, modifie également les caractéristiques mécaniques des aciers austénitiques irradiés. La ductilité, la résilience et la ténacité diminuent fortement avec le taux de gonflement (Fig. 5). Pour des taux de gonflement de l'ordre de 5–6 %, un nouveau mode de rupture, inhabituel pour les matériaux cfc (cubique faces centrées) apparait, la « Channel Fracture ». La rupture qui est transgranulaire ductile à cupules devient progressivement avec les forts taux de gonflement fragile avec des surfaces planes similaires à celles observées lors d'une rupture par clivage (Fig. 6).

https://doi.org/10.1051/metal/2010019 Published online by Cambridge University Press



Fig. 4. Allongement des gaines dans Phénix.
Fig. 4. Elongation of fuel pin claddings in Phénix.

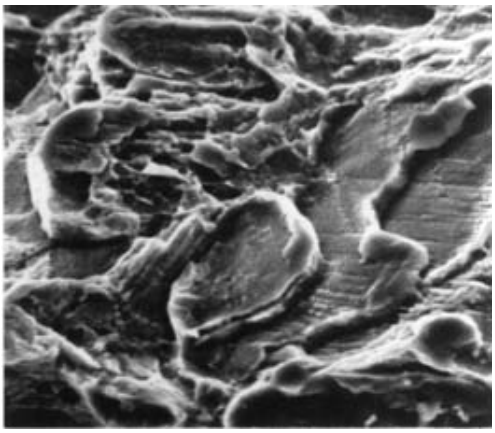


Fig. 6. Faciès de rupture d'un acier 316 Ti irradié dans Phénix – 405 °C – 48 dpa.
Fig. 6. Fractography of a 316 Ti steel irradiated in Phenix – 405 °C – 48 dpa.

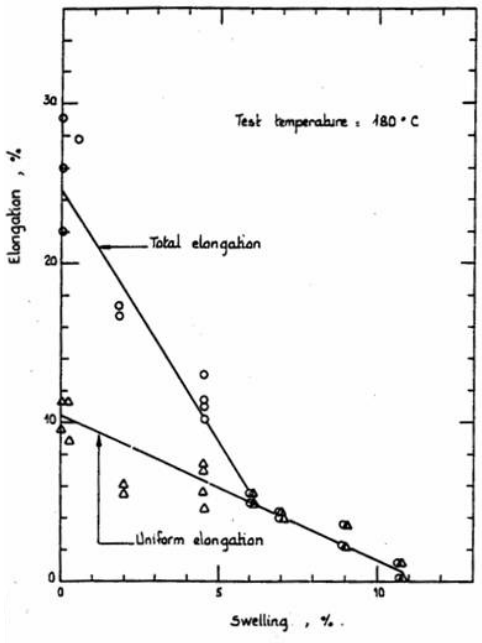


Fig. 5. Allongements répartis et total en traction des aciers 316 Ti irradiés dans Phénix en fonction du gonflement.
Fig. 5. Uniform and total elongation of CW 316 Ti irradiated in Phenix in function of swelling.

3 Amélioration du gonflement – effet des paramètres matériaux

La résistance au gonflement des aciers austénitiques dépend de l'état métallurgique initial et de la composition chimique, plus particulièrement des éléments d'addition en solution solide.

L'écrouissage préalable du matériau permet de réduire voire de supprimer le gonflement. En effet, la présence de nombreuses dislocations dans le matériau permet de limiter la sursaturation lacunaire et donc réduit la formation et la croissance des cavités. Par contre des traitements thermiques préalables sont très défavorables à la résistance au gonflement (Fig. 7). Ces traitements conduisent en fait dans les aciers austénitiques à la précipitation de phases, $M_{23}C_6$, TiC,.. sur les dislocations et aux joints de grains, qui réduisent la teneur en éléments inhibiteurs de gonflement dans la solution solide.

Augmenter la teneur en Ni et diminuer la teneur en Cr permet d'améliorer la résistance au gonflement des aciers austénitiques. Ainsi les aciers 15–15 Ti gonflent moins que les aciers 316 (17Cr-12Ni), tout au moins à l'état écroui (Fig. 7).

Les plupart des études ont été en fait réalisées sur l'effet des éléments d'addition et des impuretés. Elles ont révélé la complexité des phénomènes. De faibles fluctuations de composition chimique en C, Si, Mo, N, P, Ti, ... modifient sensiblement la résistance au gonflement. Les effets observés dépendent de la concentration, de la température d'irradiation et du traitement thermomécanique initial (Fig. 8). Des effets de synergie entre éléments ont été également

https://doi.org/10.1051/metal/2010019 Published online by Cambridge University Press

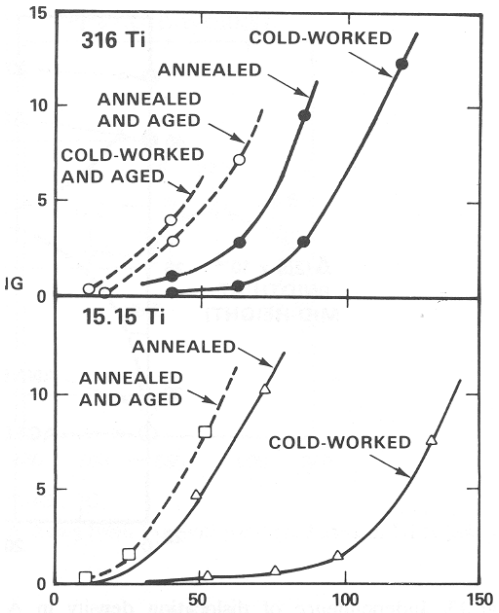


Fig. 7. Influence de l'état métallurgique sur le gonflement d'aciers austénitiques – 500 °C.

Fig. 7. Influence of metallurgical state on swelling of austenitic steels – 500 °C.

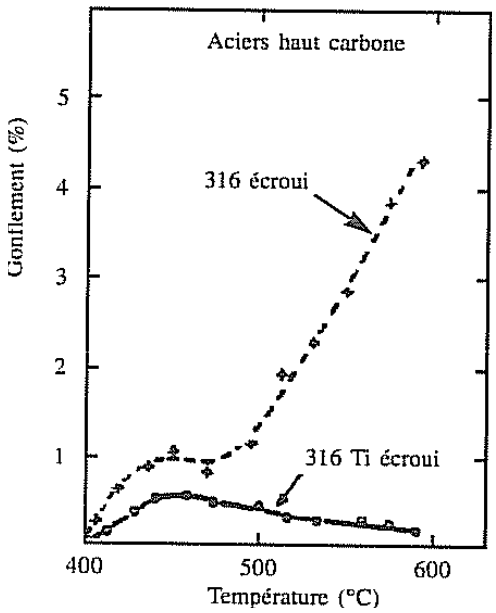


Fig. 8. Effet du titane sur le gonflement d'un acier 316.

Fig. 8. Effect of titanium on the swelling of a 316 steel.

identifiés, Si-Ti ou C-Ti par exemple. Toutefois, il est possible d'expliquer le rôle de ces éléments. Certains éléments comme le carbone, le titane, le silicium, le phosphore, . . . piègent les défauts ponctuels créés par l'irradiation, lacunes et interstitiels, et limitent leurs diffusions. Certains éléments en ségrégant sur les puits d'élimination des défauts ponctuels comme les dislocations permettent de limiter la sursaturation lacunaire et donc le gonflement. Le titane en est le parfait exemple, son rôle sur la résistance au gonflement est principalement important à chaud, là où il stabilise le réseau de dislocations (Fig. 8). D'autres éléments comme le phosphore conduisent à une précipitation fine et homogène qui augmente la densité de puits fixes d'élimination des défauts ponctuels, réduisant ainsi la densité de cavités (Fig. 9).

Au cours de l'irradiation, les éléments ségrégent avec les défauts ponctuels sur les différents puits cavités, dislocations, joints de grains, . . . et conduisent à des phénomènes de ségrégation et de précipitation induite ou accélérée par l'irradiation. Ainsi, le Ti et le Si ségrégent simultanément avec les défauts ponctuels et conduisent à la précipitation de phases G ($Ni_{16}Si_7Ti_6$) associées aux cavités (Fig. 9). La formation de ces phases en réduisant la teneur en solution solide des éléments inhibiteurs de gonflement modifie la résistance au gonflement.

4 Conclusion

Le gonflement est un phénomène à seuil qui dépend fortement des conditions d'irradiation (T, flux et taux de production de gaz), de l'état métallurgique initial et de la composition chimique de l'alliage, notamment de la teneur en éléments d'addition en solution solide.

Le changement de matériaux de l'acier 316 à l'acier 15-15 Ti a permis d'augmenter la durée de vie des assemblages RNR Na d'au moins un facteur 3. Le matériau de gainage des premiers cœurs du futur réacteur prototype RNR Na, ASTRID, sera l'acier 15–15 Ti écroui optimisé, avant de passer à des matériaux ferritiques-martensitiques renforcés par des dispersions d'oxydes (ODS – Oxide Dispersion Strenghtened) qui présentent un gonflement négligeable mais dont le comportement en réacteur n'est pas encore qualifié.

https://doi.org/10.1051/metal/2010019 Published online by Cambridge University Press

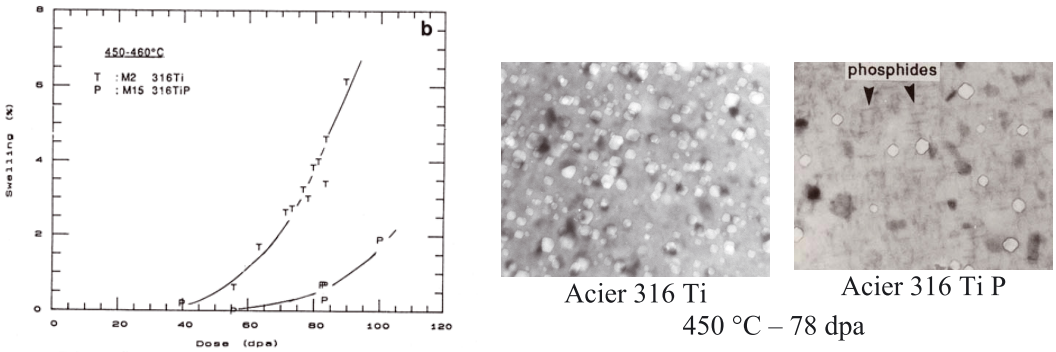


Fig. 9. Effet du phosphore sur le gonflement et la microstructure d'un acier 316 Ti.
Fig. 9. Effect of phosphorus on the swelling and the microstructure of 316 Ti steel.

Références

[1] Effets d'irradiation dans les matériaux, 26e colloque de métallurgie – INSTN, publié par les Annales de Chimie, 1983
[2] V. Levy, J.L. Séran, Matériaux de gainage et de structure du cœur pour réacteurs à neutrons rapides, Chapitre III "Le combustible nucléaire des réacteurs à eau sous pression et des réacteurs à neutrons rapides", edited by H. Bailly, D. Ménessier, C. Prunier, CEA, 1996
[3] Proc. of International Conference, Dimensional stability and mechanical behaviour of irradiated metals and alloys, BNES, Eds, held at Brighton **1-2** (1983) 11-13
[4] Proc. of International Symposiums, Effects of Radiation on Materials, ASTM STP 611, 782, 870, 956, 1046, 1125, 1175, 1325, . . .
[5] Proc. of International Conference, Materials for Nuclear Reactor Core Applications, held at Bristol (UK) BNES, Eds **1** (1987) 27-29
[6] International Conference, The Evolution of Microstructure in Metals During Irradiation, Muskoka (Canada) 28 Sept.– 2 Oct. 1992, *J. Nucl. Mater.* 205, 1993
[7] F.A. Garner, Irradiation performance of cladding and structural steels in Liquid Metal Reactor, Materials Science and Technology – A comprehensive treatment, *Nucl. Mater.*, Part I, edited by B.R.T. Frost, **10A** (1994) 419-523

https://doi.org/10.1051/metal/2010019 Published online by Cambridge University Press