



« Gestions des risques industriels »

NEWS 52 - MAI 2021

Newsletter N°52 : CONDITIONS EXTREMES & RISQUES INDUSTRIELS

Fragilisation à Basse température : l'austénite stable la clef du problème.

a) Présentation des structures métallurgiques et introduction du point Ms

Après une mise en solution à des températures généralement au-dessus de 1000°C et un refroidissement drastique, un acier inoxydable, contenant environ 18% de chrome et plus de 7% nickel, a une structure austénitique (Cf. figure 1) caractérisé par un réseau cristallin cubique à faces centrées (C.F.C.). On peut également trouver quelques pourcents de ferrite pour limiter les risques de fragilisation à chaud lors d'une opération de soudage, technique que l'on utilise pour l'assemblage des membranes dans les méthaniers.

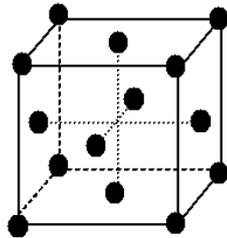
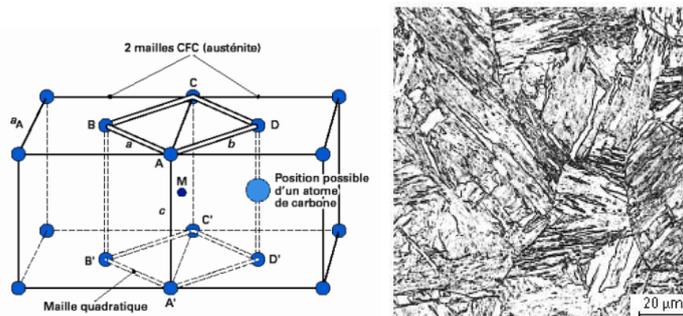


Figure 1 : Réseau C.F.C. de l'austénite et structure métallurgique associée. (Photo Struers)

Comme nous l'avons rappelé dans la NEWS précédente, la tenue à la flexion par choc des alliages ou métaux, cubique à faces centrées, est plus élevée que pour les autres réseaux cristallins du fait de l'absence de transition ductile / fragile pour les basses températures. Par conséquent, lorsqu'on utilise des aciers inoxydables austénitiques pour la fabrication des cuves de méthaniers ou pour d'autres applications basses températures, il est indispensable que la phase austénitique soit stable dans le temps afin de garantir une ductilité suffisante de l'édifice en cas de chocs ou de mise sous contraintes répétées.

Pour éviter la possible transformation de l'austénite γ en martensite α' (Cf. Figure 2), il est nécessaire de travailler sur la stabilité de la structure C.F.C.. Cette phase sera d'autant plus stable qu'elle sera enrichie en éléments d'addition aussi bien en insertion qu'en substitution au sein du réseau. Le retard à la transformation de l'austénite en martensite dépendra dans un premier temps : de la composition chimique de l'acier et de la température de mise en solution. Ces deux critères sont les bases du concept de trempabilité pour l'ensemble des aciers.

Figure 2 : Transformation de l'austénite (γ - CFC) en martensite (α' - QC).



« Gestions des risques industriels »

NEWS 52 - MAI 2021

Il est possible de calculer la température à laquelle l'austénite va se transformer en martensite (point M_s : Martensite starting) en utilisant la formule empirique de Pickering :

$M_s : 502 - 810\%C - 1230\%N - 13\%Mn - 30\%Ni - 12\%Cr - 54\%Cu - 46\%Mo$

On retrouve cette température de transformation sur les diagrammes « Température Refroidissement Continu (T.R.C.) pour chaque acier. Si la température de travail se situe au-dessus du point M_s , la structure restera austénitique.

Cependant, il existe un autre moyen de transformer l'austénite en martensite : en la déformant. Cette structure, qui a emmagasiné un surplus d'énergie mécanique, va pouvoir se transformer en martensite dite d'écroissage (ϵ) de structure hexagonale compacte (Cf. figure 3) pour des températures supérieures à M_s .

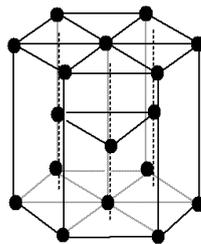


Figure 3 : Structure hexagonale / Martensite d'écroissage.

D'après les travaux d'Angel en 1954 et d'Olson - Cohen en 1975, la formation de la martensite d'écroissage est attribuée à la formation de bandes de glissement. Ces bandes sont caractérisées par une forte concentration de défauts d'empilement, synonyme d'une perturbation très locale des plans atomiques du réseau C.F.C. de l'austénite. La formation de la martensite d'écroissage se manifesterá lorsque qu'une séquence d'empilement atomique associé au réseau hexagonale compact viendra s'insérer dans celui de l'austénite. La transformation de γ (C.F.C.) en ϵ (H.C.) voir en α' (Q.C.) est envisageable si l'énergie de défaut d'empilement est basse (18 à 30 mJ.m^{-2} en fonction de la température de travail et de l'alliage). Dans le cas contraire, il n'est pas envisageable de déstabiliser l'austénite en martensite d'écroissage [PARN 2015].

b) La martensite d'écroissage est-elle préjudiciable à un travail en milieu cryogénique ?

Pour répondre à cette question, il est nécessaire d'étudier les courbes d'essais de traction menés dans différentes configurations (monotone ou cyclique) sur des aciers inoxydables austénitiques (Cf. Figure 4).



« Gestions des risques industriels »

NEWS 52 - MAI 2021

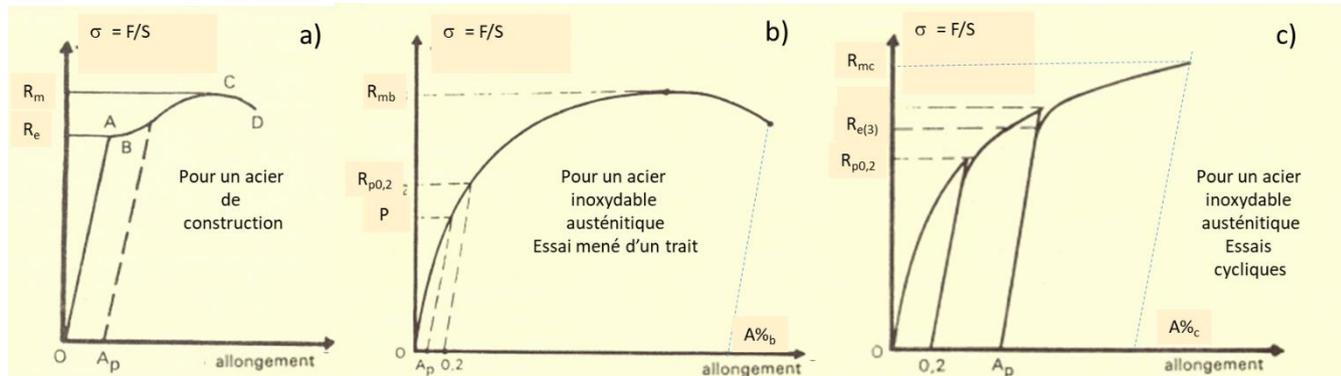


Figure 4 : Particularités des courbes de traction d'un acier inoxydable austénitique.

Avec la courbe de traction (b), on constate qu'elle ne présente aucune discontinuité jusqu'à la charge à la rupture ; contrairement aux aciers ferritiques ou martensitiques, il n'existe pas de partie rectiligne dans le domaine d'élasticité. Autrement dit, toute charge appliquée (P), puis supprimée laisse à l'éprouvette un allongement rémanent (A_p) : la raideur de la structure est donc variable en fonction de la contrainte appliquée.

On peut également constater que le ratio $R_m / R_{p0,2}$ et l'allongement à rupture sont beaucoup plus élevés que les valeurs correspondantes aux aciers de constructions (Cf. figure 4-a).

L'impact de l'écroutissage d'un acier austénitique sur la courbe de traction peut s'observer lorsqu'on pratique des essais cycliques où l'on interrompt l'effort avant la rupture de l'éprouvette (Cf. figure 4-c). Dans cette configuration, on s'aperçoit qu'à partir du deuxième cycle, après que l'austénite ait été déformée plastiquement et transformée en martensite d'écroutissage lors de la première sollicitation, le comportement dans le domaine d'élasticité de l'alliage devient analogue à celui d'un acier ferritique ou martensitique. On peut rencontrer ce type de sollicitation avec un équipement sous pression soumis à une épreuve avant sa mise en service.

L'ensemble des informations ci-dessus, permet de comprendre que l'écroutissage et la formation de la martensite d'écroutissage vont avoir, comme impact, une augmentation importante de la limite d'élasticité, de la charge à la rupture et une diminution de la striction (Z%) et de l'allongement (A%). Moins il y aura d'austénite stable et plus on constatera une fragilisation des produits dont la structure métallurgique se transforme en martensite. Pour réduire ces effets, on recherche des alliages austénitiques avec des coefficients d'écroutissage les plus faibles possible, pour limiter le durcissement de la structure métallurgiques sous efforts répétés (ex : le sloshing dans les cuves des méthaniers).

c) Intérêt d'une austénite stable ?

Une austénite stable limitera le durcissement par écroutissage de l'alliage. Comme nous le montre la figure 5, le pourcentage de martensite formée augmente avec le taux de déformation et atteint une valeur limite en fonction de la température de travail.



« Gestions des risques industriels »

NEWS 52 - MAI 2021

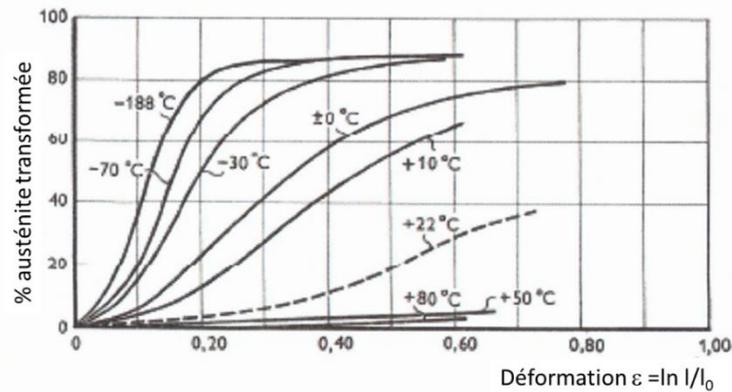


Figure 5 : Evolution de la formation de la martensite en fonction de la température et de la déformation [ANGE 1954].

Ces courbes nous permettent également de comprendre que, pour une déformation donnée, la teneur en martensite d'écroissage augmente avec l'abaissement de la température. On explique ce phénomène du fait que la germination de la martensite (naissance des défauts d'empilement) est facilitée à basse température. Dans le cas où la température augmente, il sera nécessaire d'augmenter le taux de déformation pour transformer une quantité d'austénite similaire. Par conséquent, plus la température de travail est proche de la température M_s et moins il sera nécessaire d'apporter d'énergie mécanique pour transformer l'austénite en martensite d'écroissage.

L'ensemble de ces réflexions sur la stabilité de l'austénite permet d'avoir une idée de la façon dont on procède pour répondre aux problèmes de l'emboutissage profond d'aciers inoxydables austénitiques (Cf. figure 6).



Figure 6 : Rupture différée dans l'acier austénitique 301LN après emboutissage profond d'un godet à fond plat. [BERRA 2007]

Dans le prochain article de la saga des « conditions extrêmes », nous vous proposerons d'aborder les difficultés que rencontrent certains produits lorsqu'ils sont utilisés à hautes températures. Ils nous permettront d'introduire les phénomènes d'adoucissement des caractéristiques mécaniques, les corrosions et oxydations catastrophiques ainsi que les grands principes du fluage en prenant un exemple dans le secteur aéronautique.



« Gestions des risques industriels »

NEWS 52 - MAI 2021

Bibliographie

- [ANGE 1954] T. Angel, « Formation of martensite in austenitic stainless steels », Journal of the iron and steel Institute, 1954.
- [BERRA 2007] M.R. Berrahmoune, « Transformation martensitique et rupture différée dans l'acier austénitique 301LN », Thèse Arts et Métiers ParisTech, 4 juin 2007.
- [PARN 2015] P. Parniana, M. H. Parsa "The Effect of Strain Rate on Ultra-Fine Grained Structure of Cold Drawn 304L Stainless Steel Wires", Procedia Materials Science 11 (2015) 24 – 31