

SOUDABILITÉ DES ACIERS INOXYDABLES FERRITIQUES

Les aciers inoxydables ferritiques sont des alliages fer-chrome (Fe-Cr) qui sont utilisés plutôt pour leurs propriétés anticorrosives que pour leurs propriétés mécaniques (résistance, ductilité ou ténacité). Néanmoins, les propriétés de résistance mécanique sont tout de même intéressantes lorsque l'on s'intéresse mieux à la corrosion sous contraintes pour laquelle les grades ferritiques sont considérés supérieurs à leurs vis-à-vis austénitiques.



Autrefois, les aciers inox ferritiques étaient davantage utilisés dans les constructions non soudées (assemblages rivetés, boulonnés, etc.).

Les premières générations, celles à haute teneur de chrome, étaient supposées être non soudables notamment pour l'assemblage de sections épaisses qui présentaient un risque élevée de fissuration à froid avec une chute drastique de la ductilité à l'issue des opérations de soudage. La soudabilité inférieure de cette génération d'alliage s'explique principalement à la fois par les teneurs élevées en chrome et les difficultés liées à l'obtention d'alliages avec peu d'impuretés. L'avènement du procédé CDA (plus connu sous AOD, Argon Oxygen Decarburization), plus tard dans les années 60, a permis le développement d'alliages Fe-Cr de haute pureté et à très basse teneur en carbone. Depuis lors, l'élaboration de grades raffinés avec des épaisseurs de plus en plus minces a conduit à un gain remarquable en poids et à des structures préservant une bonne intégrité lors du soudage.

Utilisations typiques

Les aciers inoxydables ferritiques sont utilisés dans de nombreux domaines et applications. On les retrouve ainsi dans les éléments et accessoires de cuisine et de salles de bain, les étagères, les toitures et objets d'art, les appareils électroménagers, les garde-fous, les portes métalliques, les ascenseurs, les réservoirs de stockage. Due à leur bonne conductivité thermique et leur faible coefficient de dilatation, ces alliages sont également très utilisés dans la fabrication de cheminée, de pots d'échappement, silencieux et catalyseurs, d'éléments de fixation et de chauffage dans les bains de traitements thermiques, etc.

À comparer aux aciers inox austénitiques, le faible coefficient de dilatation thermique (CTE) du métal fait en sorte que la couche d'oxyde réfractaire formée à

la surface aura une moindre tendance à l'écaillage due à la plus faible différence du CTE entre le métal et la couche d'oxyde. Par ailleurs, il est important de savoir que la température de design est limitée généralement à 400 °C (750 °F) max afin de prévenir le phénomène de fragilisation de la microstructure ferritique qui survient aux températures d'environ 475 °C (750 °F) en se manifestant intensément dans les alliages très riches en chrome.

Classes (générations) d'alliages ferritiques

L'évolution de ces alliages est passée par trois séries ou générations. Ce développement avait comme approche le développement de structures monophasées complètement ferritiques avec une résistance appréciable à la corrosion d'une part, et l'obtention de joints de bonne intégrité à l'état brut de soudage d'autre part. Le développement de ces propriétés a dû se faire avec le recours à :

- L'augmentation graduelle de la teneur en chrome.
- L'addition d'éléments tels que le niobium, le titane et l'aluminium (Nb, Ti et Al) qui ont une grande affinité chimique pour les éléments interstitiels résiduels comme le carbone, l'azote et l'oxygène (C, N et O).
- Le rajout d'autres éléments favorisant la stabilité de la ferrite comme le molybdène ou le silicium (Mo ou Si).

Les alliages ferritiques de la 1^{re} génération comme 430, 434, 436, 442 ou le 446 possèdent en plus de leur chrome élevé, des taux de carbone élevés, 0.12 à 0.20 %. Ce sont des alliages vulnérables à la chute de ductilité et à la résistance à la corrosion à cause de la formation de martensite (structure de trempe) et de précipités intermétalliques dans la phase ferritique à l'état brut de soudage.

La 2^e génération est composée d'alliages à faible carbone issus de la modification de certains grades de la 1^{ère} génération. Ces derniers renferment d'autres éléments formateurs de ferrite dont le titane, le niobium et l'aluminium. L'aluminium aide aussi à renforcer la résistance à l'oxydation en stabilisant la couche d'oxyde de chrome. Parmi ces alliages, on cite le 405, 409, 409Cb, 439, etc. La soudabilité de ces alliages est supérieure à celle des la 1^{re} génération.

La 3^e génération est celle des alliages de la récente génération dits super-ferritiques dont l'élaboration et la mise en forme se heurtent à certaines difficultés dues aux teneurs élevées en chrome. Ils trouvent leurs applications dans les équipements soumis à des conditions de corrosion sévère, tels que les milieux

chlorurés. Les grades 444, 29-4, 29-4-2 sont les plus typiques. Ces derniers sont élaborés avec haute pureté où les traces en éléments interstitiels, le carbone et l'azote en particulier, sont réduits au minimum pour conférer à la structure une certaine ductilité. Parmi les éléments d'alliages, il y a le molybdène qui, en plus de son effet ferritisant, augmente à son tour la résistance à la corrosion localisée.

Microstructure

Comme leur nom l'indique, les aciers ferritiques ont une structure monophasée ferritique stable à toute température. L'élément d'alliage majoritaire qui confère le caractère inoxydable à ces aciers est le chrome alors que la teneur en autres éléments tels que le nickel et le manganèse reste marginale. Les traces en carbone et en azote doivent être réduites autant que possible.

La phase ferrite Delta (δ) se forme à hautes températures à partir du liquide et, une fois cristallisée, elle ne subit plus aucune transformation lors du refroidissement. Une microstructure complètement ferritique n'est donc pas durcissable par traitement thermique ou par trempe. C'est cette absence de transformation de phase qui explique la prédisposition de ces alliages au grossissement des grains lors du chauffage.

Soudabilité

Les différents problèmes inhérents au soudage des aciers inoxydables ferritiques se résument à ce qui suit : susceptibilité à la fissuration à froid, chute de ductilité, fissuration et fragilisation à chaud, détérioration de résistance à la corrosion.

La fissuration à froid et la chute de ductilité :

Elles sont en bonne partie liées à la formation de martensite, une structure dure et fragile, entre les grains ferritiques lors du refroidissement. Le phénomène est fonction de plusieurs facteurs : la chaleur ou les conditions de soudage et le traitement post-soudage (PWHT) et des éléments interstitiels (C, N) présents dans l'alliage. Réduire au maximum de tels éléments revient à améliorer à la fois la résistance à la corrosion intergranulaire et la prévention de la formation de martensite lors du refroidissement.

Quant au facteur stress qui s'exerce sur le joint soudé, on peut considérer que son effet est relativement faible car la structure ferritique possède un faible coefficient de dilatation thermique et à la faible épaisseur du métal, habituellement.

Pour l'hydrogène non dissous, il faut prendre en compte le fait que sa grande diffusivité dans la structure ferritique implique un préchauffage et un post-chauffage après le soudage (PWHT), d'où l'intérêt, si les conditions de service le permettent, d'utiliser parfois des métaux d'apports austénitiques stabilisés au niobium ou au titane pour l'exécution de certains joints critiques requérant une grande ductilité afin de les prémunir des risques de fissuration.

La fissuration à chaud : Elle est surtout influencée par la pureté de l'alliage et la taille des grains de la microstructure. Rappelons que la pureté de l'alliage à trait aux éléments résiduels indésirables soufre, phosphore, carbone, etc. (S, P, C, etc.) qui se concentrent dans le métal liquide au dernier stade de solidification pour former des composés eutectiques à faible point de fusion (un composé eutectique a une composition spécifique et possède le plus bas point de fusion possible pour le mélange de ces ingrédients). Il en découle que la présence de ces composés va servir de source de déchirures à chaud qui vont survenir lors de la contraction de l'alliage pendant le refroidissement. Toutefois, le phénomène est moins critique dans les aciers ferritiques que dans les aciers austénitiques à cause de leur mode de solidification ferritique primaire car la ferrite est moins sensible à l'effet des impuretés du fait qu'elle peut, entre autre, dissoudre jusqu'à 0.14 % de soufre et qu'elle se contracte moins (faible CTE).

L'autre facteur influent consiste en la grande susceptibilité au grossissement des grains ferritiques. Plus la structure est grossière, moins il y a de joints de grains et plus la frontière entre les grains devient longue. La concentration des impuretés résiduelles dans les joints de grains les laisse encore à l'état liquide ou pâteux au dernier stade de solidification. Cela fait en sorte que les grains solides du reste de la microstructure déjà solidifiée peuvent glisser les uns sur les autres à partir de ces plans de faiblesse avant d'entraîner des déchirures internes dans la microstructure. Il en ressort que la surchauffe et le maintien de la structure à hautes températures doit être évité autant que possible. Dans cette logique, il s'ensuit qu'une préchauffe modérée, à 150- 200 °C (300-400 °F), contribue à réduire l'énergie de soudage et aussi le séjour à hautes températures pendant le temps d'arc. De plus, la bonne conductivité thermique des alliages ferritiques contribue à accélérer le refroidissement, à affiner la structure et ainsi à réduire le risque de fragilisation à chaud.

Fragilisation à chaud : les trois principaux modes sont cités ci-après :

Fragilisation à 475 °C :

Ce phénomène est proportionnel au taux de chrome et se produit dans la plage de température 425-550 °C (800-1025 °F). Celui-ci se matérialise par la décomposition de la ferrite Delta en deux phases, l'une plus riche en chrome (α') et l'autre en fer (α). Plus l'alliage est riche en chrome et en éléments ferriférisants (Mo, Nb) comme pour les alliages de la 3ème génération, plus cette réaction va être rapide. Les conséquences de cette réaction consistent essentiellement en une corrosion sélective au niveau de la phase α riche en fer. La prévention de cette fragilisation exige que l'acier soit toujours soumis à des températures de service maximales de l'ordre de 400 °C (750 °F).

Précipitation de phases fragilisantes et corrosion intergranulaire :

Phase Sigma : Comme pour la fragilisation à 475 °C, elle est le produit de transformation de la phase ferritique Delta qui survient lors de longues expositions de l'alliage dans la plage de températures de 590 à 870 °C (1000 à 1600 °F). Cette nouvelle phase, riche en chrome et très fragile, se forme rapidement dans les aciers à haute teneur en chrome et le molybdène

est un élément catalyseur de cette transformation. La présence de cette phase altère à la fois la résistance à la corrosion et la ductilité des joints. Sa mise en solution requiert un post-chauffage à partir de températures supérieures à 870 °C (1575 °F) suivie d'une trempe rapide à l'eau.

Phase Chi : Elle se forme davantage dans les grades alliés au molybdène, principalement ceux de la 3^e génération, tels que le 29-4 (29Cr-4Mo) ou 29-4-2 (29Cr-4Mo-2Ni). Cette phase, stable jusqu'à 900 °C (1650 °F), se forme conjointement avec la phase Sigma.

Fragilisation à hautes températures : Elle est due à la précipitation des intermétalliques (carbures, nitrides) aux joints des grains à des températures généralement de l'ordre de 0.7 Tf (Température de fusion de l'alliage). Les facteurs influents sont les impuretés (C, N, O), la taille de grains et la teneur en chrome. À cet effet, les alliages coulés qui contiennent souvent des taux de carbone élevés ne sont pas recommandés. Aussi, les grades stabilisés au Nb ou Ti ou ceux contenant de l'aluminium, un élément dénitrurant, inhibent à la fois le grossissement de grains et la précipitation intergranulaire. La précipitation intergranulaire fragilise localement les joints de grains et altère la ductilité de la structure. Pour restaurer la ductilité et la résistance à la corrosion de la soudure, il faut procéder à un traitement de mise en solution vers 750-950 °C (1380-1740 °F) suivi d'un refroidissement rapide à l'eau pour l'élimination de ces précipités.

Grossissement des grains :

Les grains d'une structure ferritique peuvent grossir à partir de 1000-1100 °C (1830-2010 °F) du fait que la microstructure ne subit aucune transformation de phase. Le phénomène prend une allure rapide lorsque le métal est à l'état écroui et favorise en même temps la sensibilité à la corrosion intergranulaire (sensibilisation). La taille des grains et la teneur en éléments interstitiels exercent un effet combiné sur la chute de ductilité. Les grades stabilisés au Ti ou Nb opposent par contre une résistance supérieure au grossissement de grains par rapport aux grades non stabilisés.

Procédés de soudage et paramètres influents

Idealement, le joint soudé doit avoir une structure ferritique dépourvue de martensite et de précipités afin d'avoir une bonne ténacité à l'état brut de soudage. Plusieurs considérations inhérentes à la microstructure doivent donc être prises en compte lors du soudage de l'acier inoxydable ferritique.

On souligne d'abord la sensibilité de la phase ferritique aux éléments interstitiels (C, N). Ces éléments diffusent pour modifier localement la composition, ce qui entraîne la formation d'austénite à haute température au niveau du joint et de la zone affectée thermiquement (ZAT). Cette austénite tend, lors du refroidissement, à se transformer en martensite, une structure de trempe dure et fragile, et se localise le long des grains ferritiques de la microstructure.

Ainsi, Le soudage semi-automatique de ces aciers exclut l'usage du gaz carbonique CO₂ et de l'azote (protection du bain de fusion, purge, protection à l'envers). Le gaz utilisé pour le procédé GMAW consiste à un mélange Ar-(1 à 2 %) O₂ qui doit être de haute pureté notamment lorsqu'il est question du soudage d'alliages super ferritiques comme ceux de la 3^e génération. Si le gaz CO₂ se substitue à l'oxygène, son taux ne devra pas dépasser 1 à 3 %. L'oxygène a pour effet de stabiliser l'arc et d'augmenter le mouillage du bain de fusion.

Avec le procédé GTAW, l'utilisation des gaz inertes de haute pureté, soit l'argon pur ou un mélange Ar-30 % He pour l'augmentation de la vitesse de soudage.

Le soudage doit être effectué avec une faible énergie (1 kJ/mm) pour limiter la croissance des grains. De même, le temps de soudage doit aussi être réduit surtout pour le cas des alliages à haute teneur de

chrome et de grande pureté. Pour un temps de séjour égal à haute température, c'est plutôt l'alliage à haut chrome qui est le plus prédisposé à la chute de ténacité. Pour cela, le rôle du préchauffage consiste à limiter le temps de séjour aux températures élevées et à réduire en partie la tendance au grossissement des grains dans la ZAT.

Parmi les procédés questionnable, le SAW ne s'avère pas être approprié pour le soudage de ces grades, surtout pour le cas des faibles épaisseurs.

Métaux d'apport

La série de métaux d'apport ferritiques est très restreinte à comparer à la série austénitique. Les métaux de base sont soudés soit avec des métaux d'apport stabilisés et/ou contenant un taux de carbone très faible afin de minimiser les risques de sensibilisation. L'exemple le plus courant est le soudage du 409 avec ER409Nb ou du 439 avec ER439 (Ti).

Les grades à faible et à moyenne teneur en chrome, 1^{re} et 2^e générations, sont habituellement soudés avec des métaux d'apport plus ou moins équivalent comme ER430, ER430Nb, ER409, ER409Nb ou ER439. Les métaux d'apport austénitiques stabilisés, 347 ou 309Nb, présentent à leur tour l'avantage de former, sous la dilution, une structure de joint « duplex » ayant une ductilité supérieure par rapport aux structures ferritiques. Néanmoins à cause de la résistance limitée à la corrosion sous contrainte des alliages austénitiques dans les milieux chlorurés, ces derniers ne sont pas bien recommandés pour le soudage des alliages de la 3^e génération dits superferritiques. Étant donné que la plupart de ces alliages n'ont pas d'équivalent en métaux d'apport, il convient d'utiliser comme métal d'apport : de petites bandes découpées du même métal de bases ou d'opter pour des alliages de nickel équivalents aux 625, C-276, C-22, 59, etc. et ce, particulièrement si les joints sont épais ou sont sujets à des changements de températures en service. Les alliages de nickel ont une faible conductivité thermique ce qui réduit le transfert de chaleur vers le métal de base et ainsi rétréci l'étendue de la ZAT tout en prévenant le grossissement des grains.

Préchauffage et traitements post soudage PWHT

Le préchauffage et le post-chauffage ne s'avèrent pas toujours nécessaire mais puisque la chaleur conduit au grossissement des grains et ralentit le refroidissement, ce qui peut mener à la précipitation de phases intergranulaires, un préchauffage avec une température interpassage de 150-200 °C (300-400 °F) est recommandé pour les alliages qui peuvent renfermer de la martensite ou ayant une haute teneur en chrome.

Le traitement de post-chauffage risque d'être compromettant pour la résistance à la corrosion des alliages de la 3^e génération riches en chrome et ou contenant du molybdène tels que 29-4, 29-4-2 à cause de leur très grande susceptibilité à la formation de phases fragilisantes comme Sigma et Chi aux températures impliquées par le post-chauffage.

Afin de restaurer la ductilité d'une structure ferritique contenant de la martensite, un revenu post-chauffage effectué directement à partir de la température interpassage à 750-800 °C (1380-1470 °F) max, soit en dessous du point correspondant à la reformation locale de l'austénite dans certaines zones riches en carbone, permet de faire revenir la martensite, de réduire les contraintes résiduelles dû au soudage et d'améliorer la ténacité dans le joint et la ZAT après soudage.

Pour les joints soudés avec des métaux d'apport de nickel, un revenu à 620 °C (1150 °F) peut être suffisant pour faire revenir la martensite et éviter les risques de fissuration à froid. En somme, ce traitement prévient la fissuration à froid, dite par hydrogène.