

FISSURATION À FROID DES SOUDURES

1. PHÉNOMÈNE ET TYPES DE FISSURATION

Du point de vue métallurgique, les fissures qui prennent naissance lors du soudage peuvent être regroupées dans deux catégories à savoir la fissuration à froid et la fissuration à chaud. La différenciation de ce type de fissures revient d'abord à reconnaître leur disposition privilégiée d'une part et à indiquer le moment de leur apparition d'autre part.

La fissuration à chaud ou de solidification ne tarde pas à se manifester, elle apparaît lors du dernier stade de solidification avant que le métal ne soit complètement solidifié. Quant à la fissuration à froid, souvent appelée fissuration par l'hydrogène ou fissuration différée, elle intervient quand la soudure est pratiquement froide. Cette dernière est assez répandue dans les aciers de structures (A36, A516, etc.) et les aciers faiblement alliés (8620, 4130, 4340, etc.). En fait, elle survient quand la température commence à baisser à partir d'environ 190 °C (375 °F) mais le phénomène surgit souvent à la température ambiante, et peut prendre jusqu'à 24 heures après le refroidissement complet de la soudure pour se manifester. C'est pour cette raison que certains codes de contrôle recommandent des délais d'attente de 24 à 48 heures avant de procéder à l'inspection des soudures.

La figure 1 mentionne à titre indicatif les plages de températures propres à chaque forme de fissuration.

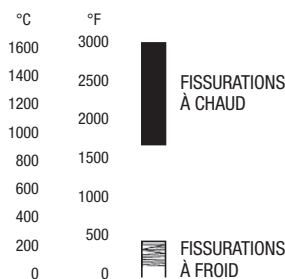


Figure 1 Plages de températures propres à la fissuration à froid et à chaud

2. MÉCANISMES DE FISSURATION À FROID

La fissuration à froid se manifeste préférentiellement dans les régions sensibles à l'effet de trempe à l'issue du soudage, soit au niveau du joint ou de la zone affectée par la chaleur (sous et à côté du cordon). Le phénomène ne peut être déclenché que suite à la coprésence des trois facteurs suivants (voir la figure 2) :

- Structure fragile de trempe (martensite).
- Contraintes de tension (bridage, retrait lors du refroidissement).

- Hydrogène (H₂) diffusé en concentrations suffisantes.

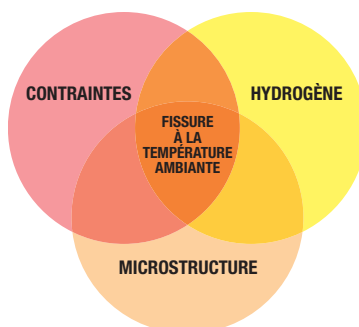


Figure 2 Facteurs de fissuration par l'hydrogène

Il en résulte alors que l'élimination ou la réduction de l'un de ces trois facteurs réduit remarquablement la tendance à la fissuration par l'hydrogène ou à froid.

3. SOURCES D'HYDROGÈNE

La présence d'hydrogène dans le bain de fusion tire son origine de la présence et de la décomposition des composés suivants :

- Humidité dans les gaz de protection, dans l'enrobage (SMAW), dans le flux (SAW), sur le métal de base, etc.
- Traces d'huile, de graisse, de cire, d'oxyde, de rouille, etc.

À défaut de bien préchauffer, la pièce à souder doit au moins être amenée au dessus du point de rosée. Ce point indique l'apparition de la condensation d'eau quand l'air ambiant se refroidit en dessous du point de rosée. La température du point de rosée est variable en fonction de la température de l'air et de l'humidité relative (HR). Le point de rosée augmente avec la température de l'air et l'humidité relative. Voici ci-après un exemple sur la variation du point de rosée sous une humidité relative constante :

- Pour une température de l'air de 10 °C (50 °F) sous une humidité relative de 60 %, le point de rosée est de 2,6 °C (37 °F);
- Pour une température de l'air de 20 °C (70 °F) sous une humidité relative de 60 %, le point de rosée est de 12,1 °C (55 °F);
- Pour une température de l'air de 30 °C (90 °F) sous une humidité relative de 60 %, le point de rosée est de 21,4 °C (70 °F).

Si l'humidité relative est moins importante, le point de rosée sera moins élevé. Par exemple, pour une humidité relative de 50 % et une température de 20 °C, le point de rosée sera de 9,3 °C.

4. COMPORTEMENT DE L'HYDROGÈNE

La figure ci-après (figure 3) montre la diminution drastique de la solubilité de l'hydrogène dans le métal à mesure de la chute de température. En fait, il est à constater que c'est au niveau du dernier stade de refroidissement, soit en dessous de 750 °C, et plus particulièrement en bas de 350 °C, que la structure devient la moins tolérante à la dissolution de l'hydrogène. La vitesse de refroidissement d'une structure dure et contrainte détermine dans une grande mesure la tendance à la fissuration qu'elle peut encourir.

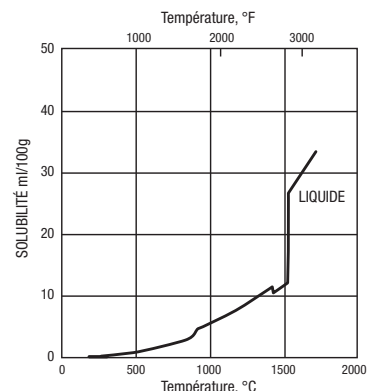


Figure 3 Solubilité de l'hydrogène dans l'acier en fonction de la chute de température

À mesure que la température décroît, le contenu d'hydrogène dissout dans le métal liquide va réagir selon les conditions suivantes :

À l'état liquide : l'hydrogène a une grande solubilité mais une faible diffusivité. À ce stade, une bonne portion d'hydrogène peut s'échapper du bain de fusion avant que la solidification ne débute.

À l'état solide, à chaud (T > 850-900 °C) : l'hydrogène n'ayant pu s'échapper du bain liquide reste dissout dans l'austénite et une certaine partie peut même former des bulles pendant le temps de passage de l'état liquide à l'état solide. L'austénite ainsi formée a la capacité de contenir l'hydrogène sans subir aucun risque de fissuration.

À l'état solide (refroidissement rapide) : le refroidissement rapide transforme cette phase austénitique en une structure de trempe, la martensite. Cette nouvelle structure a une très faible solubilité pour l'hydrogène qui va s'y retrouver dans un état de sur-saturation avant de commencer à diffuser vers la ZAT.

À l'état solide (refroidissement lent) : ce type de refroidissement, dû à la préchauffe par exemple, favorise la formation d'une structure perlitique qui est beaucoup moins sensible à la fissuration.

5. MÉCANISME D'ACTION DE L'HYDROGÈNE SUR LE PROCESSUS DE LA FISSURATION

L'effet de l'hydrogène sur le processus de fissuration s'exerce suivant les étapes décrites ci-après :

- Décomposition de l'humidité dans la colonne d'arc et formation d'ions d'hydrogène (H⁺).
- Dissolution des ions d'hydrogène (H⁺) dans le bain de fusion.
- Accumulation et saturation de l'hydrogène résiduel dans la structure de refroidissement du joint. Cette étape se manifeste généralement davantage à partir des températures inférieures à 190 °C (375 °F). Cette accumulation est accentuée par la vitesse de refroidissement. On parle alors de saturation ou de sur-saturation dépendamment de la vitesse de refroidissement, du type de métal d'apport et de l'épaisseur du joint à souder. L'effet est aussi accentué avec l'usage d'électrodes déposant un acier ferritique ou martensitique.
- L'hydrogène diffuse au travers de la structure refroidie du joint pour atteindre la ZAT car l'hydrogène a un bon

coefficient de diffusivité dans les structures ferritiques ou martensitiques. La susceptibilité à la formation d'une structure fragile de trempe (martensite) aussi bien dans le joint à souder que dans la ZAT dépend des facteurs suivants :

- Type de métal d'apport.
- Nuance de l'acier à souder.
- Dilution.
- Vitesse de refroidissement.

e) L'hydrogène diffusé à l'état atomique se concentre autour des zones de concentration des contraintes (discontinuités dans le métal, pores, inclusions ou tout autre défaut microscopique) avant de se combiner pour former des molécules de gaz (H_2). En effet, ces défauts servent de concentrateur de contraintes et d'amorce de fissures en même temps. La diffusion est fonction du temps et de la concentration de cet élément diffusif. Dépendamment des cas, le phénomène peut même durer plusieurs heures voire 24 heures après refroidissement à la température ambiante.

f) Le gaz d'hydrogène s'accumule jusqu'à une certaine concentration critique avant de faire en sorte d'altérer la force de cohésion interatomique du métal et d'y initier l'ouverture d'une fissure à partir du défaut ou de la microfissure préexistants. L'intensité des contraintes de tension et la forme du défaut déterminent la vitesse à laquelle une fissure se propage dans une structure. La figure 4 schématise l'effet de l'hydrogène au fond d'une fissure dans un métal.

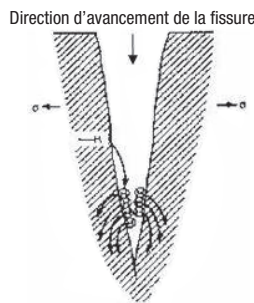


Figure 4 Effet de l'hydrogène au fond de fissure

6. FISSURATION DE LA ZONE FONDUE VERSUS ZAT

Comme ci-haut mentionné, la manifestation de l'effet de l'hydrogène sur la fissuration s'établit fréquemment à partir de 400 °F (200 °C) lors du refroidissement dans les structures de trempe. Ce palier de température correspond à une forte diminution de la diffusivité de l'hydrogène et au début de la transformation austénite-martensite dans beaucoup de nuances d'acier au carbone ou d'acier allié. Aussitôt que cette transformation débute, l'hydrogène qui était déjà dissous dans l'austénite instable commence à diffuser au travers de la nouvelle structure, du joint vers la Zone Affectée Thermiquement (ZAT).

Dans le cas des aciers trempants, les métaux d'apport sont souvent élaborés de façon à contenir moins de carbone que le métal de base pour avoir un indice de Carbone Équivalent (CE) inférieur dans la composition du cordon. La réduction de l'indice de carbone équivalent permet d'améliorer la soudabilité et d'obtenir une structure de trempe moins fissurante dans le cordon, mais la ZAT demeure une zone critique de fissuration à froid. Différentes observations et analyses corroborent cette situation.

On souligne que la réduction de la teneur en carbone peut être compensée en partie par une addition en nickel ou parfois en nickel-azote dans certains métaux d'apport inoxydables martensitiques. Selon cette approche, on remarque que l'électrode d'acier inoxydable martensitique E410NiMo a été développée à partir de la modification de la chimie de la E410 classique, pour fins d'amélioration de la soudabilité et de la ténacité des joints.

De plus, les métaux d'apport spécialisés tels que les électrodes Sodel 333, Sodel 335 ou Sodel 3500 entres autres, sont conçues de façon à contenir de l'austénite à l'état brut de soudage, ce qui élimine généralement la présence d'hydrogène dans la ZAT et réduit les risques de fissuration à froid.

7. DISPOSITION FRÉQUENTE DES FISSURES

Les fissures à froid peuvent apparaître dans la soudure ou la ZAT suivant plusieurs orientations dont les plus communes sont indiquées à la figure 5.

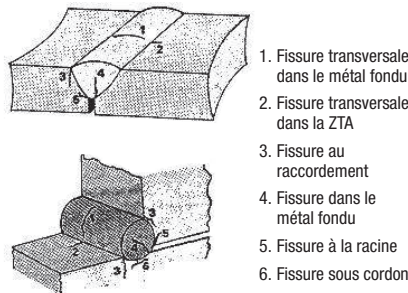


Figure 5. Dispositions fréquentes des fissures à froid dans les soudures droites et d'angle

Un exemple typique de la fissuration à l'hydrogène dans la zone affectée par la chaleur d'un acier au carbone est montré à la figure 6.

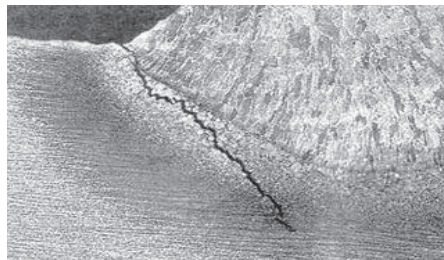


Figure 6 Fissuration induite par l'hydrogène dans la ZAT d'un acier au carbone, ASM, V.11

8. INDICE DE CARBONE ÉQUIVALENT

L'indice de carbone équivalent est un concept qui a été développé pour permettre d'évaluer l'aptitude à la formation d'une structure fragile de trempe lors du soudage des aciers.

Parmi les différentes formules utilisées pour le calcul de l'indice de carbone équivalent, l'Institut International du Soudage (IIW) adopte la formule simplifiée de Dearden-O'Neill qui intègre l'effet équivalent des autres éléments d'alliage (Mn, Cr, Mo, V, Ni, Cu) à celui du carbone. Cette formule s'énonce comme suit : $CE_{IIW} = C + Mn/6 + (Cr+Mo+V)/5 + (Ni+Cu)/15$ où la concentration des éléments est donnée en pourcentage de poids.

En fonction de leur teneur en carbone et de leur carbone équivalent, les aciers peuvent être classés en trois classes ou zones distinctes du point de vue de leur comportement à la fissuration à froid, tel que le montre la figure 7.

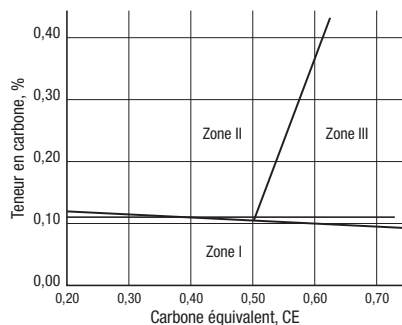


Figure 7 Susceptibilité à la fissuration à froid des aciers

Zone 1 : regroupe les aciers à bas carbone ou faiblement allié dont la teneur en carbone est inférieure ou égale à 0,10%. La structure de trempe n'est pas très dure et, indépendamment de l'indice du carbone équivalent, elle n'est pas prédisposée à la fissuration dans la plupart des cas.

Zone 2 : regroupe la plupart des aciers au carbone avec une teneur en carbone supérieure à 0,10% et les aciers au carbone-manganèse que l'on retrouve, entre autres, dans la fabrication des appareils sous pression, ex. ASTM A516. Les aciers de cette classe ayant un indice CE inférieur à 0,5% présentent une structure qui est considérée comme non sensible à la fissuration à froid. Cependant, à mesure que cet indice croît avec l'augmentation de la teneur en carbone, le risque de fissuration de la ZAT devient probable. Il faut donc s'assurer d'avoir une faible dureté dans la ZAT en procédant à un refroidissement contrôlé d'une part et en utilisant un métal d'apport à bas hydrogène d'autre part.

Zone 3 : comporte les aciers alliés dont la teneur en carbone est supérieure à 0,10% et qui présentent un carbone équivalent élevé. Ceci concerne, entre autres, les aciers de construction trempés et revenus tels que 100QT (CSA G40.21), ASTM A514, T-1, etc. La formation d'une structure de martensite dure est inévitable même à de très basses vitesses de refroidissement. Il s'ensuit alors que le soudage de ces aciers requiert des procédures appropriées qui tiennent principalement compte des paramètres suivants :

- 1- Préchauffe à une température élevée, une énergie de soudage optimale et, éventuellement, un traitement de recuit post-soudage (PWHT) afin de favoriser un refroidissement lent qui entraîne un certain effet d'adoucissement dans la structure de martensite.
- 2- Métal d'apport à bas hydrogène (électrodes basiques) ou électrodes spécialisées.

9. CHOIX DES ÉLECTRODES ET RECOMMANDATIONS

Les électrodes à enrobage basique, désignées par EXXX-15, -16 ou -18, et suivies parfois avec un suffixe HX (ex. X = 2, 4) indiquant un enrobage à bas hydrogène, représentent la seule catégorie d'alliages d'apport pouvant être utilisés pour le soudage des aciers de structure lorsque la moindre possibilité du risque de fissuration ne peut être tolérée. En outre, pour l'intégrité du joint soudé dans les aciers à haute résistance, on stipule que le taux d'hydrogène dans le matériau d'apport doit être le plus bas possible.

À cause de leur grande susceptibilité à la reprise d'humidité, les électrodes à enrobage basique doivent toujours être scellées hermétiquement dans leur emballage jusqu'au moment de leur utilisation. Une fois sorties de leur emballage, ces électrodes doivent être maintenues dans de petits fours de maintien réglés à des températures de 120 à 175 °C (250-350 °F) jusqu'au moment du soudage.

Par contre, si les électrodes restent exposées à l'air pendant plus de 2 à 4 heures, ces dernières devront subir un recuit d'étuvage à 425 °C (800 °F) durant 1 à 2 heures afin d'en extraire toute l'humidité absorbée par leur enrobage hygroscopique.

NB : H2 ou H4 désignent un taux maximum d'hydrogène diffusible de 2 ou de 4 ml/100 g dans le métal fondu.

khemici.badri@sodel.com