

Fissuration à froid et essais de soudabilité

En fonction de la composition chimique de l'acier, de la conception du joint à souder et de la quantité d'hydrogène introduite dans la zone à souder (par l'humidité ambiante par exemple), les soudures peuvent être plus ou moins sensibles à la fissuration à froid. Ce type de fissuration apparaît généralement à température ambiante et dans un délai d'environ 48h après la fin de l'opération de soudage, même en absence d'une sollicitation extérieure. Afin de prévenir du risque de fissuration à froid, un très grand nombre d'essais existe dont certains sont normalisés dans la NF EN ISO 17642 (Partie 2 et Partie 3). Dans cette publication Métalétech, trois des principaux types d'essai de fissuration à froid sont présentés et leur domaine d'application respectif est expliqué.

Généralités

Tout d'abord, il est important de préciser que les essais présentés ci-après ne doivent pas être confondus avec les méthodes de qualification de modes opératoires de soudage (QMOS) référencées dans la NF EN 1090-2. En effet, l'objectif de la QMOS est de qualifier un mode opératoire de soudage (c.à.d. de démontrer que les paramètres choisis sont adaptés pour l'opération de soudage envisagée) qui sera utilisé dans la production par la suite avec un descriptif du mode opératoire déduit de cette QMOS. Cette qualification peut être réalisée à l'aide d'essais (par exemple avec des assemblages soudés de préproduction selon la NF EN ISO 15613) ou sans essais spécifiques (par exemple en utilisant un mode opératoire de soudage standard – voir NF EN ISO 15612). Le choix de la méthode de qualification dépend notamment de la complexité de l'assemblage et de la classe d'exécution (voir NF EN 1090-2 pour plus de détails).

Les essais de soudabilité, quant à eux, sont réalisés dans l'objectif d'étudier la faisabilité d'une opération de soudage en termes de paramètres de soudage, de matériaux de base utilisés (par exemple assemblage de matériaux différents) et de pré-/post-chauffage ainsi qu'en termes d'optimisation de ces paramètres. Les essais de soudabilité peuvent alors être pertinents pour préparer des QMOS dans certaines situations. On peut noter qu'il n'est généralement pas nécessaire de réaliser des essais de soudabilité particuliers quand les plats ou profilés en acier de construction standard (par exemple S235 à S355) sont utilisés et si les épaisseurs n'excèdent pas 70-80 mm environ. En revanche, pour des aciers à haute et très haute limite d'élasticité (par exemple S690), pour des épaisseurs importantes et, dans certaines conditions, pour les aciers inoxydables, les essais de soudabilité peuvent être pertinents afin d'optimiser le mode opératoire et de préparer la QMOS. Trois des principaux essais de soudabilité vis-à-vis de la fissuration à froid sont alors présentés dans la suite. Avant de les présenter, il semble toutefois intéressant de rappeler quelques éléments clés concernant le phénomène de la fissuration à froid.

Fissuration à froid

On peut distinguer trois principaux types de fissuration à froid :

- La fissuration par fragilisation/durcissement du matériau ;
- La fissuration par l'hydrogène ;
- L'arrachement lamellaire.

La fissuration par durcissement est principalement provoquée par la création de martensite en trop grande quantité dans la zone de la soudure et la zone thermiquement affectée. La martensite, étant une phase métallurgique (configuration du réseau cristallin) fragile, réduit localement la ductilité de l'acier.

La sensibilité des aciers de construction vis-à-vis de la formation de la martensite peut être estimée à l'aide de la valeur de carbone équivalent CEV :

$$CEV = C + Mn/6 + (Cr+Mo+V)/5 + (Ni+Cu)/15$$

où :

- C : est le pourcentage de Carbone dans l'alliage
- Mn : est le pourcentage de Manganèse dans l'alliage
- Mo : est le pourcentage de Molybdène dans l'alliage
- V : est le pourcentage de Vanadium dans l'alliage
- Ni : est le pourcentage de Nickel dans l'alliage
- Cu : est le pourcentage de Cuivre dans l'alliage

Généralement, les aciers dont le CEV est inférieur à 0,4 sont peu sensibles à la fragilisation dans des conditions normales (par exemple : peu d'apport d'hydrogène) tandis que les aciers dont le CEV est supérieur à 0,7 sont sensibles à la fragilisation et à la fissuration à froid. En effectuant un des essais présentés ci-après, il est tout de même possible de déterminer des paramètres permettant de souder les aciers avec un CEV important.

Autre que par la création de la martensite, la sensibilité vis-à-vis de la fissuration à froid est influencée par la quantité d'hydrogène dans la zone de soudure. L'hydrogène peut être introduit dans le métal fondu notamment par l'humidité de l'air ambiant, le gaz de protection et le métal d'apport. L'hydrogène est dissous dans le métal fondu. Quand la température du métal diminue, la solubilité de l'hydrogène diminue également. En conséquence, des molécules d'hydrogène se reforment et se diffusent notamment dans des zones de martensite. En raison de l'accumulation des molécules d'hydrogène, la pression augmente considérablement dans le réseau cristallin ce qui provoque la fissuration. Afin de prévenir la fissuration induite par la présence d'hydrogène, il est par exemple possible d'utiliser des matériaux d'apport avec un taux en d'hydrogène contrôlé et suffisamment faible.

Finalement, l'arrachement lamellaire est, sous certaines conditions, provoqué dans la zone thermiquement affectée. En effet, le laminage peut créer des inclusions surfaciques de disulfure de manganèse qui réduisent les propriétés dans le sens de l'épaisseur de l'acier de base. Afin d'éviter l'arrachement lamellaire, il est recommandé de choisir les qualités Z de l'acier selon la NF EN 1993-1-10 (Eurocode 3 Partie 1-10).

On peut noter que les essais de fissuration à froid visent surtout la fissuration par l'hydrogène et la fissuration par fragilisation, qui sont fortement liées l'une à l'autre. Comme évoqué, il existe des possibilités de prévenir de ces deux types de fissuration par des mesures assez simples comme le choix des matériaux d'apport et le pré- et/ou post-chauffage dont la température peut être choisie en fonction du CEV (ou d'autres formules de calcul d'un carbone équivalent). Cependant, pour certains aciers (aciers de construction à très haute limite d'élasticité, certains aciers inoxydables), ces approches simples ne sont pas suffisantes ou conduisent à des conditions de soudage difficiles (par exemple pré- et post-chauffage important). Par conséquent, afin de trouver les paramètres de soudage et de les optimiser, la réalisation d'essais de soudabilité peut être judicieuse. Ces essais sont assez simples et créent des effets de bridage assez réalistes.

Essai auto-bridé Tekken

L'essai auto-bridé Tekken (le nom vient des japonais Tesudo Gijutsu Kenyushi) a été développé dans les années 1960 afin de déterminer la sensibilité vis-à-vis de la fissuration à froid de la zone thermiquement affectée et de la zone de soudure (zone fondue). Cet essai est normalisé dans la norme NF EN ISO 17642-2. Dans la version normalisée, l'essai est effectué avec un chanfrein Y, mais afin de reproduire des conditions comparables à la soudure réelle à fabriquer, d'autres préparations de chanfrein peuvent être utilisées. La Figure 1 montre un échantillon d'essai Tekken avec un chanfrein en double V. Après la mise en place des deux pièces à souder, deux soudures d'ancrage sont réalisées aux extrémités de l'échantillon (voir Figure 2). Ces soudures d'ancrage vont créer le bridage lors de la réalisation de la soudure d'essai. La soudure d'essai mono-passe est ensuite réalisée dans la zone centrale de l'échantillon. En raison du bridage généré par les soudures d'ancrage, des contraintes résiduelles résultant du cycle thermique vont solliciter la soudure d'essai.

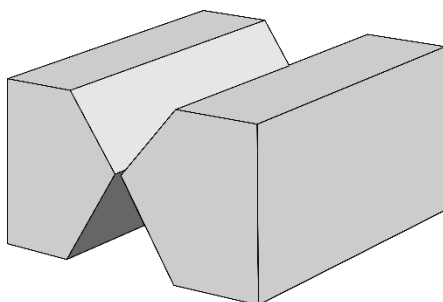


Figure 1 : Echantillon pour un essai Tekken

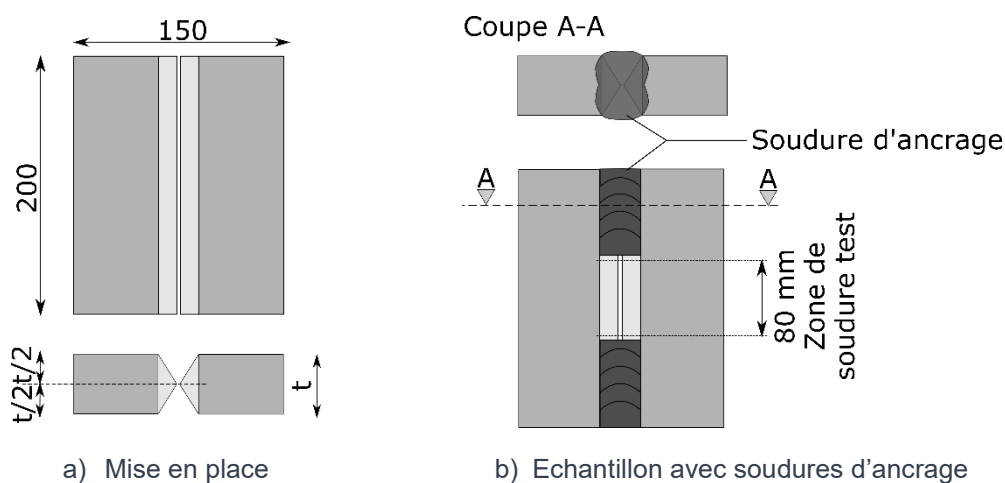


Figure 2 : Vue en plan de l'essai Tekken

La pièce est ensuite stockée pendant au moins 48 heures afin que la fissure puisse se créer. Passé ce délai, un contrôle visuel est réalisé pour déterminer la longueur des fissures en surface éventuelles. En plus, des examens métallographiques sont réalisés en cinq sections le long de la soudure test pour vérifier l'absence de fissures dans la coupe.

L'essai Tekken permet ainsi de tester différentes combinaisons de matériaux d'apport (y compris différents taux d'hydrogène), de conditions de pré- et post-chauffage et éventuellement de préparation de joint afin de déterminer la combinaison optimale permettant d'éviter toute fissuration. L'essai Tekken est notamment utilisé pour les aciers à haute limite d'élasticité et des soudures en bout.

Essai auto-bridé CTS

Contrairement à l'essai Tekken, l'essai CTS (Controlled Thermal Severity) est utilisé pour évaluer la soudabilité dans le cas de soudures d'angle. Cet essai, développé dans les années 50 par Cottrell (ingénieur au Welding Institute), fait également partie des essais auto-bridés. L'essai est réalisé sur une plaque boulonnée sur une deuxième plaque (plaque de support) pour la mise en place. Des soudures d'ancrage sont ensuite mises en place sur les bords non-entaillés de la plaque supérieure (voir Figure 3). L'entaille, de hauteur 1,6 mm et de profondeur 10 mm, est créée afin de générer un champ de contraintes multiaxiales et ainsi d'augmenter la sévérité de l'essai. Les cordons d'angle de la soudure d'essai sont réalisés en une passe. Suite à l'achèvement de la première soudure d'essai, l'extrémité de la plaque de support se trouvant à l'opposé de la soudure est immergée dans un courant d'eau à une profondeur d'environ 60 mm. Quand la soudure a atteint la température ambiante (20°C), l'échantillon peut être retiré du bain et doit être stocké pendant 48 heures au minimum avant de procéder au soudage du deuxième bord. Le second cordon d'angle est ensuite refroidi dans les mêmes conditions que le premier et l'échantillon est à nouveau stocké pendant 48 heures.

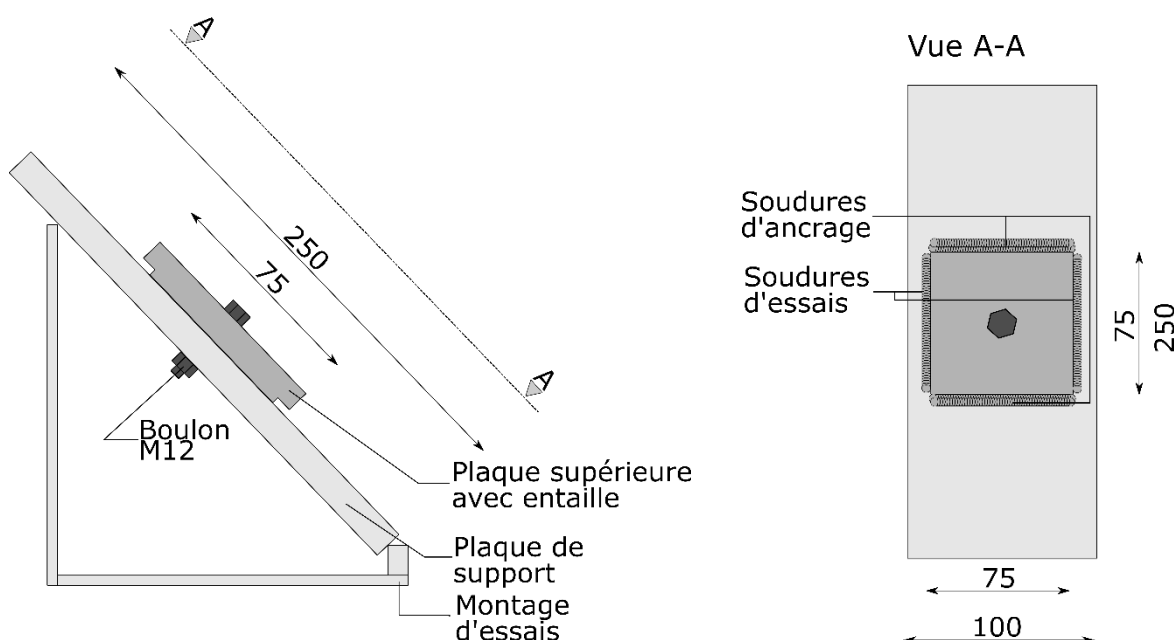


Figure 3 : Essai CTS

À la suite de la période de stockage, l'échantillon est découpé afin de procéder à un examen métallographique pour vérifier l'absence de fissures.

L'essai CTS est notamment utilisé pour les aciers à haute et très haute limite d'élasticité. Il permet de déterminer les paramètres de soudage tels que le métal d'apport (et le taux d'hydrogène) et les conditions de pré- et post-chauffage acceptables pour éviter la fissuration.

Essai sur implant

En dehors des essais auto-bridés, il existe un certain nombre d'essais qui introduisent une sollicitation directe dans la soudure. Cette sollicitation représente les contraintes résiduelles qui sont générées par le cycle thermique lors d'un soudage réel. Généralement, on vise la

limite d'élasticité du matériau. L'essai sur implant, normalisé dans la norme NF EN ISO 17642-3 et développé par Henry Granjon à l'Institut de soudure dans les années 60, représente un exemple d'essai sous chargement extérieur. La Figure 4 et la Figure 5 montrent schématiquement cet essai. L'implant en forme de cylindre possédant une entaille (de forme circulaire ou héliocoïdale) est inséré dans un trou percé dans la plaque de support qui est fabriquée dans le même matériau que l'implant. Généralement, un implant d'un diamètre de 8 mm est utilisé.

L'implant est inséré dans le trou et, après un préchauffage éventuel, le cordon de soudure est déposé en une seule passe sur une longueur de 150 mm en passant sur l'implant. La pénétration de la soudure doit être choisie (en utilisant une énergie de soudage adéquate) afin que l'entaille se situe dans la zone thermiquement affecté.

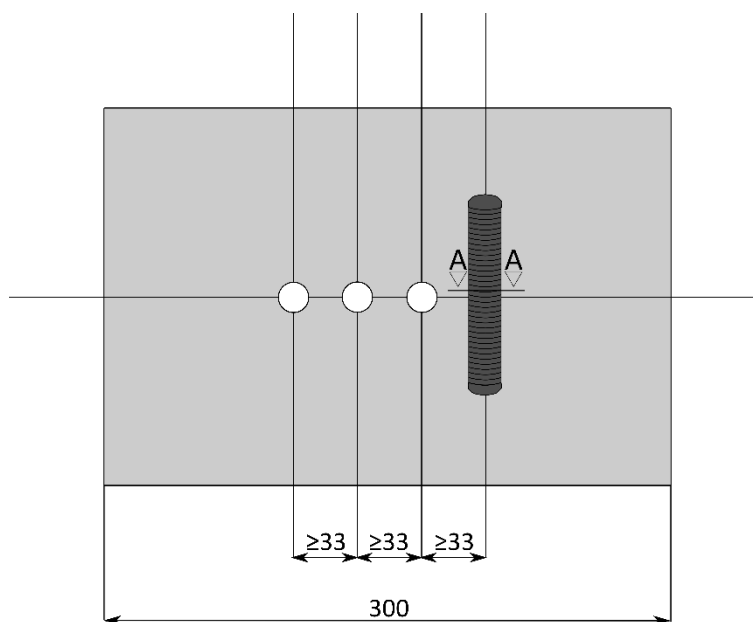


Figure 4 : Essai sur implant – Vue en plan

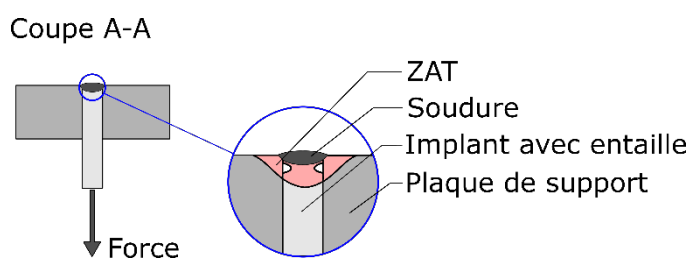


Figure 5 : Essai sur implant - Coupe

Après l'achèvement de l'opération de soudage, l'implant est chargé par une force de traction quand la zone de soudage atteint une température calculée en fonction de la température de préchauffage (voir NF EN ISO 17642-3). La charge est ensuite maintenue pendant 16 heures. Lors de cette phase de chargement, l'implant peut potentiellement se rompre. Si cela n'est pas le cas, des fissures qui se sont potentiellement développées dans la zone de l'entaille peuvent être détectées par un examen métallographique.

Grâce à cet essai, il est possible de déterminer des paramètres de soudage acceptables pour éviter la fissuration pour un niveau donné de contraintes appliquées. Généralement, on peut considérer que les effets de bridage naturel dans les joints à souder génèrent un niveau de contraintes proche de la limite d'élasticité du matériau de base. C'est pourquoi, l'essai

sur implant est souvent utilisé en appliquant une force qui crée une contrainte égale à la limite d'élasticité au niveau de l'entaille.

L'essai sur implant peut être utilisé pour étudier la sensibilité vis-à-vis de la fissuration à froid du matériau de base et le résultat est transposable à une passe racine.

Conclusion

Dans ce document, les origines principales de la fissuration à froid ont été rappelées. Ensuite, nous avons présenté certains des nombreux essais utilisables pour étudier la sensibilité vis-à-vis de la fissuration à froid des matériaux soudés. Il convient tout de même de noter que l'objectif de ce document est de donner les éléments principaux de ces essais. Il convient de se référer aux différentes parties de la norme NF EN ISO 17642 et aux publications pertinentes comme celles publiées par l'International Institute of Welding (iiw) pour obtenir tous les détails nécessaires à la réalisation des essais présentés ici.

Références

NF EN 1090-2 : Exécution des structures en acier et des structures en aluminium – Partie 2 : Exigences techniques pour les structures en acier. AFNOR. Juin 2018.

NF EN ISO 15612 : Descriptif et qualification d'un mode opératoire de soudage pour les matériaux métallique – Qualification par référence à un mode opératoire de soudage standard. AFNOR. Juillet 2018.

NF EN ISO 15613 : Descriptif et qualification d'un mode opératoire de soudage pour les matériaux métalliques – Qualification sur la base d'un assemblage soudé de préproduction. AFNOR. Octobre 2004.

NF EN ISO 17642-1 : Essais destructifs des soudures sur matériaux métalliques – Essais de fissuration à froid des assemblages soudés – Procédés de soudage à l'arc – Partie 1 : Généralités. AFNOR. Juillet 2005.

NF EN ISO 17642-2 : Essais destructifs des soudures sur matériaux métalliques. Essais de fissuration à froid des assemblages soudés – Procédés de soudage à l'arc – Partie 2 : Essais sur éprouvette auto-bridée. AFNOR. Juillet 2005.

NF EN ISO 17642-3 : Essais destructifs des soudures sur matériaux métalliques – Essais de fissuration à froid des assemblages soudés – Procédés de soudage à l'arc – Partie 3 : Essais sur éprouvette soumise à une charge extérieure. AFNOR. Juillet 2005.

T. Kannengiesser, T. Boellinhaus, Cold Cracking Tests – An Overview of Present Technologies and Applications, BAM – Federal Institute for Materials Research and Testing and iiw,