

Fertigungsbedingte Rissbildungen in Schweissnähten

Dieser Beitrag beschränkt sich auf die beiden am meisten auftretenden fertigungsbedingten Rissbildungen, mit welchen sich die Metallbauer auseinandersetzen müssen. Es wird aufgezeigt, wie die Mechanismen ablaufen und welche Massnahmen getroffen werden können, um Schäden zu verhindern, respektive auf ein Minimum zu beschränken.

Text: Artho Marquart MAS ZFH in Schweissttechnologie

Heissrisse und wasserstoffinduzierte Kaltrisse werden unterschieden.

Heissrissbildung

Heissrisse werden über den Temperaturbereich und Zeitpunkt ihrer Entstehung definiert. Im Gegensatz dazu entstehen wasserstoffinduzierte Kaltrisse erst bei verhältnismässig tiefen Temperaturen. Heissrisse entstehen während des Abkühlprozesses, vorwiegend beim Übergang vom flüssigen zum festen Zustand in Verbindung mit niedrigschmelzenden Phasen entlang der Korngrenzen. Es findet somit eine Werkstoffversprödung statt.

Betrachtung der Heissrissbildung

Bestimmte Werkstoffgruppen, wie hochlegierte Stähle und Aluminiumlegierungen, neigen stark zur Bildung von Heissrissen. Meist begründet sich die tiefe Heissrissresistenz in der Gitterstruktur. So weisen Werkstoffgruppen mit kubisch-flächenzentrierter Gitterstruktur (kfz-Gittertyp) eine hohe Neigung zur Heissrissbildung auf. Niedrig legierte oder unlegierte Stähle, wie beispielsweise die Baustähle S235 und S355 mit kubisch-raumzentrierter Gitterstruktur (krz-Gittertyp), haben dagegen eine sehr geringe

Heissrissneigung. Hochlegierte Stähle weisen, in Abhängigkeit ihrer chemischen Zusammensetzung, einen austenitischen (kfz-Gittertyp), einen ferritischen (krz-Gittertyp) oder einen «Mischgittertyp», welcher beispielsweise aus 80% austenitischem und 20% ferritischem Anteil besteht, auf.

Unterschiede der beiden Gittertypen bezüglich Heissrissbildung:

1. Die Löslichkeit von Schwefel und anderen heissrissfördernden Elementen ist bei austenitischen Stählen markant tiefer als bei ferritischen Stählen. Somit bilden sich beim Erstarren des Schweissgutes niedrig schmelzende Phasen, welche zu einer Trennung zwischen den Kristalliten führen.
2. Austenitische Stähle haben eine höhere Wärmeausdehnung bei gleichzeitig geringer Wärmeleitfähigkeit. Die daraus resultierende höhere Schrumpfung fördert die Heissrissanfälligkeit.
3. Austenitische Stähle haben bei hohen Temperaturen eine geringere Duktilität als ferritische Stähle. Dadurch sind die thermisch erzeugten Schweissspannungen höher und die Gefahr der Rissbildung grösser.

Ursachen der Heissrissbildung

Heissrisse sind eine Folge der Werkstoffversprödung, welche durch hohe Temperaturen und den daraus resultierenden flüssigen Phasen entlang der Korngrenzen hervorgerufen werden.

Aufgrund ihres Entstehungsortes werden Heissrisse im Schweissgut «Erstarrungsrisse» genannt. Bei Mehrlagenschweissungen können in der Wärmeeinflusszone - WEZ und im wiedererwärmten Schweissgut Heissrisse entstehen, welche «Aufschmelzrisse» bezeichnet werden.

Heissrissbildung im Schweissgut - Erstarrungsrisse

Bei der Abkühlung des Schweissbades bilden sich während der Kristallisation niedrig schmelzende Restphasen. Die durch die Schrumpfung verursachten Zugspannungen können im Bereich der flüssigen Phasenanteile nicht aufgenommen werden. So entstehen zwischen den Kristalliten Mikrotrennungen, welche zu sogenannten Erstarrungsrisse führen.

Heissrissbildung in der WEZ - Aufschmelzrisse

Beim Schweißen mehrerer Lagen werden die darunterliegende Schweissnaht sowie Teile

LOIS, NORMES ET DIRECTIVES

Formation de fissures opératoires au niveau des soudures

Cet article se limite aux deux types de fissures opératoires les plus courants auxquels les constructeurs métalliques sont confrontés. Il présente les mécanismes à l'œuvre ainsi que les mesures possibles pour éviter, ou tout du moins réduire au minimum, les détériorations.

Il faut tout d'abord distinguer la fissuration à chaud de la fissuration à froid par l'hydrogène.

Fissures à chaud

Les fissures à chaud sont définies par la plage de températures et le moment de leur formation. À l'inverse, les fissures à froid par l'hydrogène se forment à des températures comparativement basses. Les fissures à chaud apparaissent pendant le refroidissement, surtout lors du

passage de l'état liquide à l'état solide, en rapport avec des phases à bas point de fusion le long des joints de grains. La matière est alors fragilisée.

Prise en compte de la fissuration à chaud

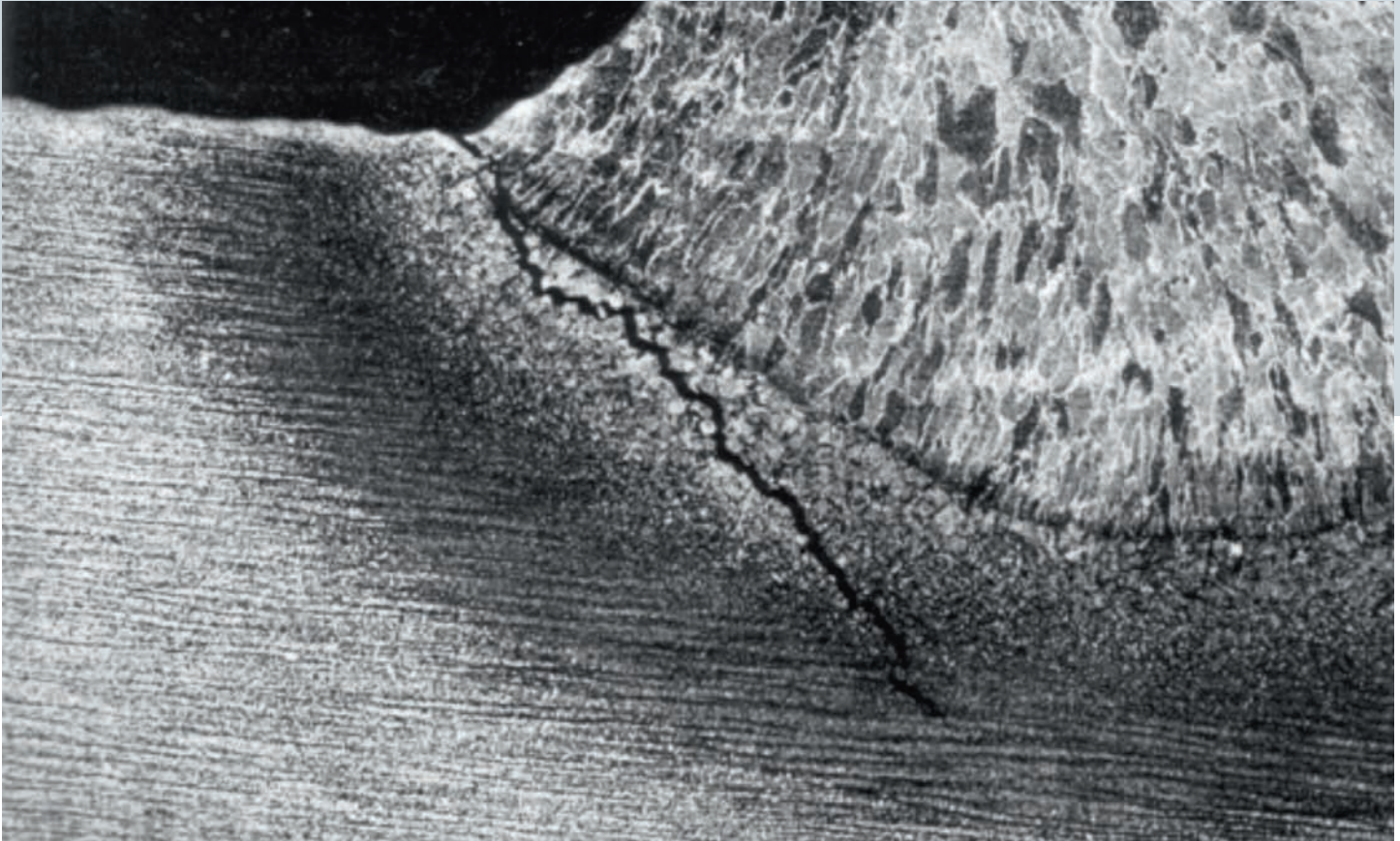
Certains groupes de matériaux, tels que les aciers très alliés et les alliages d'aluminium, présentent une forte tendance à la fissuration à chaud. Celle-ci est le plus souvent causée par la faible

résistance thermique de la structure de réseau. Les groupes de matériaux présentant une structure de réseau cubique à faces centrées (réseau CFC) ont ainsi une forte propension à la fissuration à chaud. En revanche, les aciers faiblement ou non alliés, tels que les aciers de construction S235 et S355 avec une structure de réseau cubique centrée (réseau CCC), présentent une très faible propension à la fissuration à chaud.

En fonction de leur composition chimique, les aciers très alliés présentent un réseau austénitique (réseau CFC), ferritique (réseau CCC) ou « mixte », composé par exemple de 80 % d'austénite et de 20 % de ferrite.

Différences entre les deux réseaux sur le plan de la fissuration à chaud :

1. La solubilité du soufre et d'autres éléments favorisant la fissuration à chaud est bien plus faible dans les >



Beispiel eines wasserstoffinduzierten Kaltrisses, in diesem Fall ein Unternahriss, in der WEZ. Risse dieser Art können stark verzögert, innert wenigen Minuten bis mehreren Tagen, auftreten.

Fotoquelle: Internet Dr. R. Vallant/ IWE

Exemple d'une fissure à froid par l'hydrogène, ici une fissure sous cordon, dans la ZAT. Les fissures de ce type peuvent survenir de façon très différée, de quelques minutes à plusieurs jours.

Source : Internet Dr. R. Vallant/ IWE

der WEZ thermisch beeinflusst. Dabei können die niedrig schmelzenden Phasen entlang der Korngrenzen, welche einen niedrigeren Schmelzpunkt als der Grundstoff aufweisen, aufschmelzen. Dies wiederum kann zu einem Aufschmelzriss führen.

Fertigungstechnische Massnahmen zur Vermeidung von Heissrissen

Um die Entstehung von Heissrissen möglichst zu vermeiden, sollte beim Schweisprozess die Wärmeeinbringung möglichst tief gehalten werden.

Dieses Ziel erreicht man durch:

- > Vermeiden grosser Schmelzbäder
- > den Einsatz dünner Elektroden mit geringer Stromstärke,
- > Schweißen von Strichraupen ohne Pendelbewegung,
- > den Einsatz von Schweißmaschinen neuester Bauart, welche, beispielsweise für den Schweißprozess 141 (WIG), mit konzentriertem Lichtbogen arbeiten. Mittels spezieller Technologie im Hochfrequenzbereich wird mit einem äusserst schmalen Lichtbogen ein tiefer Einbrand bei gleichzeitig geringer Streckenenergie erreicht.

Als allgemeiner Grundsatz kann festgehalten werden, dass zur Vermeidung der Entstehung von Heissrissen generell ein möglichst geringes Wärmeeinbringen während dem Schweißprozess anzustreben ist.

Nachweis von Heissrissen mittels

«Zerstörungsfreier Werkstoffprüfung» - ZfP

Die hochlegierten, heissrissempfindlichen, austenitischen Werkstoffe weisen eine grobe Gitterstruktur auf. Dies erschwert eine Rissprüfung. Am sinnvollsten erweisen sich Oberflächenrissprüfungen, wie beispielsweise das Eindringverfahren - PT, welches einfach zu handhaben ist und zudem zu einem raschen Heissrissnachweis führt.

Wasserstoffinduzierte Kaltrisse

Der während des Schweißprozesses in den Werkstoff eingebrachte Wasserstoff kann zu wasserstoffbedingten Schäden führen.

Wasserstoffquellen

Aus folgenden Quellen kann Wasserstoff in das Schweißbad gelangen: Elektrodenumhüllung, Atmosphäre, Gas, Oberfläche, organische Verbindungen und Mineralien aus Zusatzwerkstoffen.

Wasserstoffaufnahme

Während des Schweißens dissoziiert der Wasserstoff vom Lichtbogen in den schmelzflüssigen Werkstoff. Die Wasserstoffaufnahme im Schweißgut, welche während des Schweißprozesses erfolgt, ist vor allem von der Temperatur und dem Wasserstoffpartialdruck abhängig. Die Wasserstofflöslichkeit, das heisst die Eigenschaft, Wasserstoff im Gefüge aufzunehmen, ist bei hohen Temperaturen, wie sie während dem Schweißen herrschen, besonders hoch. Im erstarrten Schweißgut kann der Wasserstoff nicht

mehr aufgenommen werden und liegt in hoher Konzentration gelöst im Werkstoffgitter vor.

Die Wirkung des Wasserstoffes im Schweißgut

Der so erzeugte erhöhte Wasserstoffgehalt bewirkt eine Versprödung des Gitters. Diese Versprödungseigenschaft verschwindet im Verlaufe der Zeit durch die Diffusion des Wasserstoffs aus der Schweißverbindung. Der Diffusionsprozess kann sich über Zeiträume von Minuten bis zu mehreren Wochen erstrecken. Welche Massnahmen getroffen werden müssen, damit Schäden verhütet werden können, erfahren Sie später in diesem Beitrag.

Schäden durch den zu hohen Wasserstoffgehalt

Mikrorisse entstehen in Gebieten mit spröden Gefügebestandteilen, an welchen sich erhöhte Mengen von Wasserstoff angesammelt haben. **Fischaugen** sind lokale Werkstofftrennungen. Die helle, runde Sprödbrechfläche hat ein fischaugenähnliches Zentrum und liegt in duktiler Umgebung. Fischaugen entstehen, wenn sich das mit Wasserstoff übersättigte Schweißgut abkühlt und sich der Werkstoff nach dem Schweißen durch den hohen Druck langsam plastisch verformt.

Zeitlich verzögerte Brüche, sogenannte Kaltrisse, entstehen erst einige Tage nach dem Schweißvorgang. Diese zeigen sich in Form von Wurzelrissen, Unternahrissen, Kerbrissen und in besonderer Ausprägung von Querrissen. >

> Diese zeitlich verzögerten Werkstofftrennungen werden beeinflusst durch eine grosse Anzahl verschiedener Parameter. Massgebend sind der Wasserstoffgehalt, die Wärmebehandlung, der Gefügestand, die Diffusions- und Effusionswege sowie die Belastung der Schweißnaht.

Zeitpunkt der «Zerstörungsfreien Prüfung» ZfP
Da der Prozess der wasserstoffinduzierten Rissbildung mehrere Tage dauern kann, ist der Zeitpunkt der nachfolgenden «Zerstörungsfreien Prüfung» ZfP vom Werkstoff, der Nahtgrösse, der Werkstoffdicke sowie der Wärmeeinbringung abhängig. In der Norm SN EN 1090-2 «Technische Regeln für die Ausführung von Stahltragwerken» ist die Kontrolle der Schweißnähte wie folgt festgelegt:

Kontrolle nach dem Schweißen

Die ergänzende ZfP einer Schweißnaht darf im Allgemeinen nicht vor Ende der Mindestwartezeit nach dem Schweißen nach Tabelle 23 abgeschlossen werden.

Fertigungstechnische Massnahmen zur Vermeidung von wasserstoffinduzierten Kaltrissen
Um die Entstehung von Kaltrissen möglichst zu vermeiden, sollten folgende Massnahmen getroffen werden:

> Die zu verschweisenden Werkstoffteile müssen absolut sauber, frei von Schmutz und

Nahtgrösse (mm) ^a	Wärmeeinbringen Q (kJ/mm) ^b	Wartezeiten (Stunden) ^c	
		S235 bis S420	S460 und oberhalb
a oder S ≤ 6	Alle	Nur Abkühlzeit	24
6 < a oder s ≤ 12	≤ 3	8	24
	> 3	16	40
a oder s > 12	≤ 3	16	40
	> 3	40	48

a Die Grösse gilt für die Sollnahtdicke a einer Kehlnaht oder für die Nenndicke des Grundwerkstoffes S einer durchgeschweissten Naht. Bei einzelnen, teilweise durchgeschweissten Stumpfnähten ist das entscheidende Merkmal das Nennmass der Nahtdicke a, jedoch bei paarweisen, teilweise durchgeschweissten Stumpfnähten, die gleichzeitig beidseitig geschweisst werden, ist die Summe der Nahtdicken massgebend.

b Das Wärmeeinbringen Q ist nach Abschnitt 19 von EN 1011-1:1998 zu berechnen.

c Die Zeit zwischen Fertigstellung der Schweißnaht und dem Beginn der ZfP muss im ZfP-Bericht festgehalten werden. Im Fall von «Nur Abkühlzeit» dauert dies solange, bis die Schweißnaht genügend abgekühlt ist, um mit der ZfP zu beginnen.

organischen Stoffen sein. Die Atmosphäre sollte möglichst trocken sein.

> Zur Beschleunigung der Wasserstoffeffusion ist eine Entgasungsbehandlung aus der Schweißwärme heraus zu empfehlen. Dieser Prozess des Wasserstoffarmglühens ist auch unter dem Begriff «Soaken» bekannt. Dies geschieht beispielsweise durch eine Wärmebehandlung des Werkstücks mit einer Temperatur von 150 - 300°C während mindestens 2 Stunden.

> Je nach Schweißbedingung ist auch ein Vorwärmen erforderlich. Die Ermittlung der richtigen Vorwärmtemperatur kann der Norm EN 1011-1 entnommen werden. Dies hat den Vorteil, dass der Abkühlprozess langsamer vor sich geht und dem Wasserstoff somit mehr Zeit zur Effusion bleibt.

> Zur Herabsetzung des Wasserstoffgehalts müssen basische Stabelektroden und Schweißpulver vor dem Schweißen immer rückgetrocknet werden. >

LOIS, NORMES ET DIRECTIVES

> aciers austénitiques que dans les aciers ferritiques. C'est ainsi que, pendant la solidification de la soudure, se forment des phases à bas point de fusion, qui amènent une séparation entre les grains.

2. Les aciers austénitiques ont une expansion thermique plus forte, de même qu'une conductivité thermique plus faible. Le retrait qui en résulte favorise la propension à la fissuration à chaud.

3. À haute température, la ductilité de ces aciers est plus faible que celle des aciers ferritiques. Les tensions de soudage d'origine thermique sont donc plus élevées, de même que le risque de fissuration.

Causes de la fissuration à chaud

Les fissures à chaud sont une conséquence de la fragilisation de la matière causées par de fortes températures et des phases liquides qui en résultent le long des joints de grains.

En raison de leur point d'apparition, les fissures à chaud de la soudure sont appelées « fissures de solidification ». Lors de soudages en plusieurs passes, des fissures à chaud peuvent se former dans la zone affectée thermiquement (ZAT) ainsi que sur la soudure recuite;

elles sont appelées « fissures de liquation ».

Fissuration à chaud dans la soudure - fissures de solidification

Lors du refroidissement du bain de fusion, des phases résiduelles à bas point de fusion se forment pendant la cristallisation. Les contraintes de tension causées par le retrait peuvent ne pas être absorbées dans la zone des phases liquides. Il se forme alors des microségrégations entre les grains, ce qui cause les fissures de solidification.

Fissuration à chaud dans la ZAT - fissure de liquation

En cas de soudage en plusieurs passes, la soudure inférieure et des parties de la ZAT sont affectées thermiquement. Cela peut faire fondre les phases à bas point de fusion le long des joints de grains, qui fondent plus tôt que le matériau de base. Une fissure de liquation peut alors se former.

Mesures techniques de prévention des fissures à chaud

Pour éviter la formation de fissures à chaud, l'apport de chaleur lors du soudage doit être maintenu le plus faible possible.

Les mesures suivantes permettent d'y parvenir :

- > Éviter les grands bains de fusion.
- > Utiliser des électrodes fines à faible intensité.
- > Souder par passes sans mouvement de va-et-vient.
- > Utiliser du matériel de soudage de dernière génération travaillant avec un arc concentré, par exemple pour le procédé de soudage 141 (WIG). Une technologie spéciale à haute fréquence permet d'obtenir une pénétration plus profonde avec un arc extrêmement mince tout en limitant l'énergie d'étirage.

On peut poser comme principe général que, pour éviter la formation de fissures à chaud, il faut tenter de limiter le plus possible l'apport de chaleur lors du soudage.

Vérification de soudures à chaud au moyen d'un contrôle non destructif (CND)

Les aciers austénitiques très alliés et sensibles aux fissures à chaud présentent une structure de réseau lâche, ce qui complique le contrôle des fissures. Le plus pertinent est le contrôle de fissures superficiel, par exemple le contrôle par ressuage (PT), qui est

simple d'emploi et permet une vérification rapide.

Fissures à froid par l'hydrogène

L'hydrogène apporté dans le matériau pendant le soudage peut occasionner des détériorations.

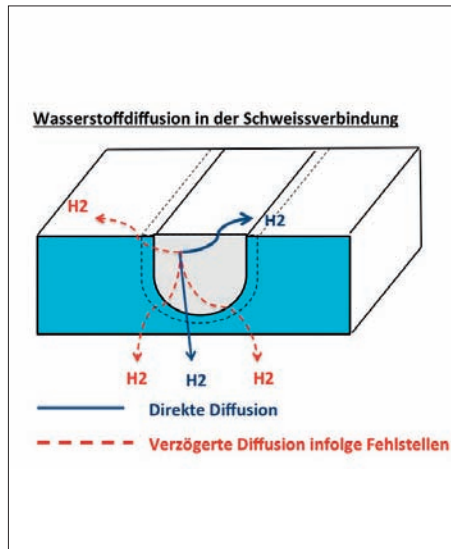
Sources d'hydrogène

L'hydrogène peut parvenir dans le bain de fusion par les sources suivantes : revêtement des électrodes, atmosphère, gaz, surface, composés organiques et minéraux issus des matériaux d'apport.

Diffusion de l'hydrogène

Pendant le soudage, l'hydrogène de l'arc se dissocie dans le matériau liquide. La diffusion de l'hydrogène dans la soudure pendant le processus de soudage dépend avant tout de la température et de la pression partielle de l'hydrogène. La solubilité de ce gaz, c'est-à-dire sa capacité à se diffuser dans l'assemblage, est particulièrement élevée à de fortes températures, telles que celles qui règnent pendant le soudage. Lorsque la soudure se solidifie, l'hydrogène ne peut plus se diffuser et reste à de fortes concentrations dans le réseau du matériau.

- > Wasserstoffkontrollierte Elektroden mit einem niedrigen diffusiblen Wasserstoffgehalt, beispielsweise der Klasse «H5» mit max. 5 ml HD/100 g SG, müssen nach dem Öffnen der Verpackung umgehend, beispielsweise innerhalb von acht Stunden, verarbeitet werden. Zu einem späteren Zeitpunkt verwendete Elektroden müssen vor der Verwendung rückgetrocknet werden.
- > Betreffend Werkstoffwahl ist zu berücksichtigen, dass mit zunehmender Festigkeit des Stahls die Gefahr eines wasserstoffinduzierten Risses steigt.
- > Verwenden Sie Stähle mit einem niedrigen Kohlenstoffäquivalent.
- > Besonders gefährdet sind hochfeste Feinkorn-



baustähle, welche eine hohe Kaltrissempfindlichkeit aufweisen. Dieses Phänomen ist Anlass zahlreicher Untersuchungen welche momentan durchgeführt werden.

- ^a Das Vorwärmen des Werkstoffes hat noch weitere Vorteile. Darüber berichten wir in einem nachfolgenden Bericht. Wir beschränken uns in diesem Artikel auf die Auswirkungen betreffend wasserstoffinduzierten Kaltrissen.

Fazit

Im Zweifelsfall lohnt sich eine Wärmebehandlung des Stahls nach dem Schweißen auf jeden Fall. Die Reparatur eines Risses, welche ein vollständiges Herausschleifen der schadhafte Stelle bedingt, ist sehr zeitintensiv und dadurch mit hohen Kosten verbunden. ■

LOIS, NORMES ET DIRECTIVES

> Conséquences de l'hydrogène dans la soudure

L'augmentation de la teneur du matériau en hydrogène fragilise le réseau. Cette fragilisation disparaît au fur et à mesure que l'hydrogène se diffuse hors de la soudure. Ce processus peut prendre de quelques minutes à plusieurs semaines. Les mesures à prendre pour éviter toute détérioration seront examinées dans la suite du présent article.

Détériorations due à un excès d'hydrogène

Les microfissures se forment dans les zones où les éléments de l'assemblage sont fragilisés, c'est-à-dire où de fortes quantités d'hydrogène se sont rassemblées.

Les yeux de poisson sont des ruptures locales du matériau. La surface fragilisée ronde et brillante possède un centre semblable à un œil de poisson et se trouve dans un environnement ductile. Ils apparaissent lorsque la soudure présentant un excès d'hydrogène refroidit et que le matériau se déforme lentement après le soudage en raison de la forte pression.

Les fissures différées, également appelées fissures à froid, n'apparaissent que quelques jours après le soudage. Elles se présentent sous la forme de fissures de la racine, de fissures sous cordon, de fissures d'entaille et surtout de fissures transversales. De nombreux paramètres influent sur ces ruptures différées, notamment la teneur en hydrogène, le traitement thermique, l'état de

l'assemblage, les voies de diffusion et d'effusion ou encore la charge du cordon de soudure.

Moment du contrôle non destructif (CND)

Comme la fissuration à l'hydrogène peut durer plusieurs jours, le moment du contrôle non destructif (CND) ci-dessous dépend du matériau, de la taille de la soudure, de l'épaisseur du matériau ainsi que de l'apport de chaleur. La norme SN EN 1090-2 « Exigences techniques pour les structures en acier » présente les contrôles des soudures de la façon suivante : **Contrôles postérieurs au soudage**
En règle générale, le CND complémentaire d'une soudure ne doit pas être effectué avant la fin du temps d'attente défini dans le tableau 23.

Mesures techniques de prévention des fissures à froid par l'hydrogène

Les mesures suivantes doivent être

prises afin d'éviter le risque de fissuration à froid :

- > les pièces à souder doivent être extrêmement propres et dénuées de toute salissure et composé organique. L'atmosphère doit être la plus sèche possible.
- > Il est conseillé de procéder à un dégauchage de la chaleur de soudage pour accélérer l'effusion d'hydrogène. Ce processus de recuit à bas hydrogène est également appelé « soaking ». Cela consiste par exemple en un traitement thermique de la pièce à une température comprise entre 150 et 300°C pendant au moins 2 heures.
- > En fonction des conditions de soudage, un préchauffage peut se révéler nécessaire. La norme EN 1011-1 peut être utilisée pour déterminer la bonne température de préchauffage. Cela présente l'avantage de ralentir le processus de refroidissement, et donc de laisser davantage de temps à l'effusion d'hydrogène.

> Afin de diminuer la teneur en hydrogène, les électrodes de base à âme coulée et la poudre à souder doivent toujours être séchées avant le soudage.

> Les électrodes à bas hydrogène avec une faible teneur en hydrogène diffusible, par exemple de la classe « H5 » avec au maximum 5 ml HD / 100 g SG, doivent être utilisées immédiatement après ouverture de l'emballage, ou dans les huit heures. Les électrodes utilisées après ce délai doivent être séchées avant usage.

> En ce qui concerne le choix du matériau, il faut considérer le fait que le risque de fissure à l'hydrogène augmente avec la résistance de l'acier.

> Utilisez des aciers avec un faible équivalent carbone.

> Les matériaux les plus à risque sont les aciers de construction à grain fin, qui sont très sensibles à la fissuration à froid. De nombreuses études sont en cours sur ce phénomène.

- ^a Le préchauffage du matériau présente d'autres avantages. Ils feront l'objet d'un prochain article. La présente contribution se limite aux effets concernant les fissures à froid par l'hydrogène.

Conclusion

En cas de doute, il est toujours judicieux de procéder à un traitement thermique de l'acier après le soudage. La réparation d'une fissure, qui impose un décapage complet de la zone endommagée, nécessite beaucoup de temps et coûte très cher. ■

Tableau 23 – Temps d'attente minimum

Taille de la soudure (mm) ^a	Apport de chaleur Q (kJ/mm) ^b	Temps d'attente (heures) ^c	
		S235 à S420	S460 et au-delà
a ou S ≤ 6	Tous	Uniquement temps de refroidissement	24
6 < a ou S ≤ 12	≤ 3	8	24
	> 3	16	40
a ou S > 12	≤ 3	16	40
	> 3	40	48

^a La taille désigne l'épaisseur théorique a du cordon d'une soudure d'angle ou l'épaisseur nominale. S d'une soudure continue. En cas de soudures bord à bord isolées et partiellement soudées à cœur, la caractéristique déterminante est la cote nominale de l'épaisseur du cordon a ; toutefois, en cas de soudures bord à bord doubles, partiellement soudées à cœur et soudées en même temps des deux côtés, c'est la somme de l'épaisseur des cordons qui est déterminante.

^b L'apport de chaleur Q doit être calculé conformément à la section 19 de la norme EN 1011-1 : 1998.

^c L'intervalle de temps séparant la réalisation de la soudure et le début du CND doit être consigné dans le rapport de CND. Si l'indication est « uniquement temps de refroidissement », cet intervalle dure jusqu'à ce que la soudure soit suffisamment froide pour que le CND puisse commencer.