

“Waterstof bij het OP-lassen bij laaggelegeerd HR-staal” - een onderschat probleem -

ing. Erwin J.M. Gering I.W.E. - Air Liquide Welding NL

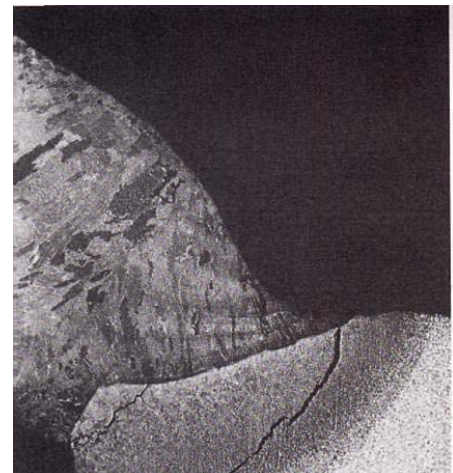
Inleiding.

Het onderpoederdek lasproces is redelijk bekend en ingeburgerd. Het betreft een booglasproces met een continu aangevoerde afsmeltende lasdraad onder een poederdek. Het poederdek zorgt dat het smeltbad wordt beschermd tegen de atmosfeer door gesmolten poeder (slag). De vloeibare slag beïnvloedt de chemische samenstelling van het lasmetaal en de laseigenschappen. Het poeder is te vergelijken met de bekleding van een beklede elektrode (rutiel, basisch). Ook met betrekking tot waterstof heeft de bekleding van een beklede elektrode veel gemeen met het poeder van het OP-proces: het is de belangrijkste bron van waterstof dat in het smeltbad wordt gebracht. Opslag, herdrogen en vochtopname zijn hier belangrijke aandachtspunten. Voor het OP-lassen van laag-en ongelegeerde staalsoorten wordt bij toenemende eisen aan de mechanische eigenschappen van de lasverbinding, veelvuldig gebruik gemaakt van basisch poeder. Met name voor basisch poeder bij het lassen van staalsoorten met een reksgrens > 600 MPa, blijkt het zeer belangrijk te zijn om een zo laag mogelijke waterstof-inbreng na te streven, daar onderschatting van de kans op scheurvorming op de loer ligt.

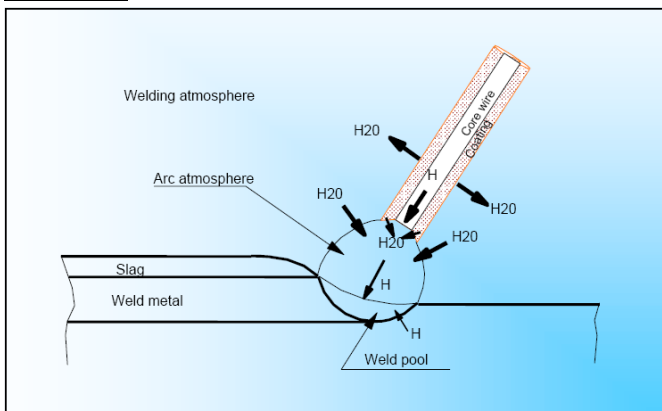
Koudscheuren.

Koudscheuren vormen een bekend onderwerp bij het lassen on- en laag gelegeerde staalsoorten. Meestal in de warmtebeïnvloede zone. De kans op koudscheuren neemt in het algemeen toe bij

- hoger C% en hoger gehalte aan legeringelementen (CET)
- grotere dikte
- hogere krimpkrachten (krimphindering)
- snelle afkoeling van de las
- bij lage(re) temperatuur van de lasverbinding (voorwarm / tussenlaagtemperatuur).
- Toenemende hoeveelheid diffundeerbare waterstof.



Waterstof.



Tijdens het lassen komt er waterstof in het smeltbad terecht. De waterstof is afkomstig van

- Bekleding / poeder
- Kerndraad / lasdraad
- Atmosfeer
- Basismateriaal incl oppervlaktevervuiling

Een gedeelte van de ingebrachte waterstof betreft diffundeerbare waterstof, welke initiële diffundeerbare waterstof genoemd wordt (HD volgens ISO/IIW 3690, éénlaagse lasrups). Een deel hiervan zal zich tijdig verplaatsen / verwijderen, waardoor lagere / verschillende concentraties in de las en WBZ zullen ontstaan.

De achterblijvende hoeveelheid (concentratie) diffundeerbare waterstof in het lasmetaal resp warmtebeïnvloede zone is (mede) bepalend voor het al dan niet optreden van koudscheuren en is afhankelijk van de volledige thermische historie en de diffusie coëfficiënt (diffusiesnelheid).

“Waterstof bij het OP-lassen bij laaggelegeerd HR-staal” - een onderschat probleem -

ing. Erwin J.M. Gering I.W.E. - Air Liquide Welding NL

“Verbeterde” lasbaarheid.

Tegenwoordig zijn veel constructiestaalsoorten een stuk minder gevoelig voor waterstofscheuren dan “vroeger”; staalsoorten met hoge sterkte zoals S690QL hoeven zelfs nauwelijks meer voorverwarmd te worden. Lastoevoegmaterialen zijn ontwikkeld om de waterstof-inbreng sterk te kunnen beperken (bijv <5 ml/100gr). Iedereen weet inmiddels wel hoe hoog de voorwarmtemperatuur moet zijn om koudscheuren te voorkomen in S690Q. Het is eigenlijk geen probleem meer.....

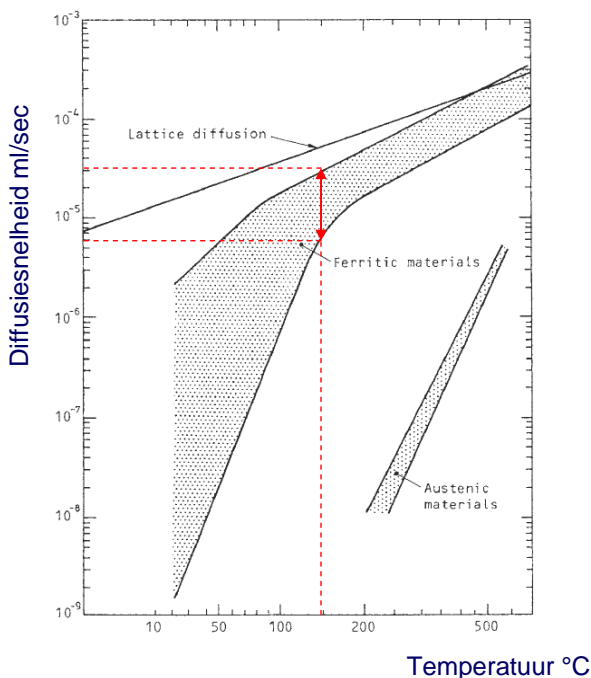
“Gewoon lassen als St 52.3, toch?”...

Echter, bij het het lassen onder poederdek van moderne staalsoorten met hoge rekgrens schuilt hier een gevaar van onderschatting : De inmiddels bekende koudscheur-theoriën en berekeningsmethoden blijken soms ontoereikend te zijn om scheurvorming te voorkomen. Het gedrag van waterstof blijkt hier namelijk een stuk gecompliceerder en ongunstiger te zijn dan algemeen wordt verondersteld.

Zoals al eerder gesteld, zijn moderne HR-staalsoorten lager gelegeerd dan enkele decennia daarvoor, en daardoor ook minder gevoelig voor koudscheuren in de warmtebeïnvloede zone (WBZ). Afgezien van koolstof, is het lasmetaal vanaf $Rp0,2 > 550$ MPa hoger gelegeerd dan het basismateriaal. Dit om de juiste sterkte en taaheid in het lasmetaal te kunnen realiseren binnen de kortstondige warmtecyclus van het lasproces. De staalfabrikant bezit overigens naast de chemische samenstelling, nog 2 extra mogelijkheden om die gewenste sterkte en taaheid in het basismateriaal te bereiken, namelijk (thermo-mechanisch) walsen en /of warmtebehandeling, waardoor het basismateriaal doorgaans een andere (lager gelegeerde) samenstelling bezit dan het lasmetaal.

In onderstaande tabel zijn enkele verschillende samenstellingen te zien voor basismateriaal en lasmetaal.

| | C | Mn | Si | Ni | Mo | Cr | CET |
|------------------------------|------|------|------|------|------|------|-------------|
| Weldox 700 E 15mm | 0,13 | 1,0 | 0,30 | 0,05 | 0,14 | 0,25 | 0,26 |
| Weldox 700 E 30 / 40mm | 0,15 | 1,2 | 0,25 | 0,05 | 0,30 | 0,21 | 0,31 |
| Weldox 700 E 50mm | 0,15 | 1,4 | 0,30 | 0,05 | 0,34 | 0,55 | 0,35 |
| OE SD3 2NiCrMo – OP 121 TT/W | 0,08 | 1,35 | 0,41 | 2,2 | 0,40 | 0,62 | 0,33 |



Niet alle staal samenstellingen bezitten dezelfde diffusiecoëfficiënt (“diffusiesnelheid”) voor waterstof (zie grafiek links). In bovenstaande tabel is te zien dat OP – lasmetaal voor S690 een andere samenstelling bezit dan een S690Q -basismateriaal. Lasmetaal met 2 - 2,5%Ni bezit een lagere waterstof-diffusiecoëfficiënt dan ongelegeerd (las)metaal. Hierdoor zal diffundeerbare waterstof minder snel uit het lasmetaal verdwijnen dan dat dit bij ongelegeerd lasmetaal het geval zou zijn.

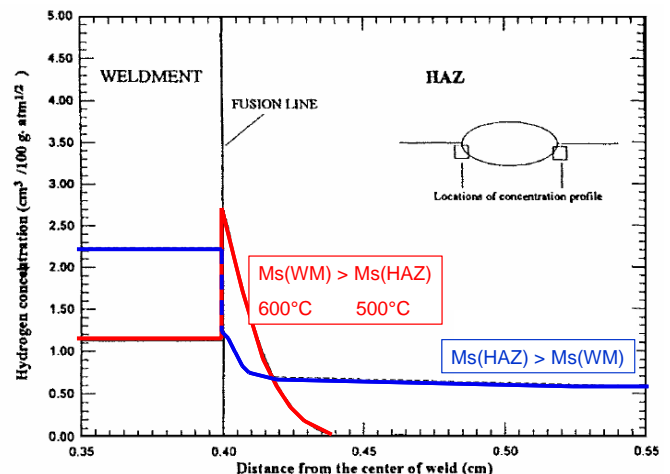
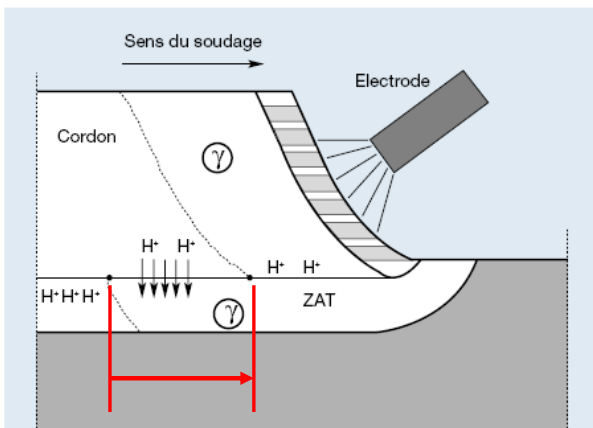
“Waterstof bij het OP-lassen bij laaggelegeerd HR-staal” - een onderschat probleem -

ing. Erwin J.M. Gering I.W.E. - Air Liquide Welding NL

Bij afkoeling van lasmetaal en WBZ is er een omzetting van austenitische structuur naar een ferritische / bainitische of martensitische structuur. De temperatuur waarbij deze overgang start is afhankelijk van de chemische samenstelling. Bij S690 in dikte boven de 30 à 50 mm, betreft het een overgang naar martensiet en wordt deze temperatuur gekenmerkt als Ms.

Een austenitische structuur bezit een grote oplosbaarheid voor diffundeerbare waterstof vergeleken met een martensitische structuur (resp ferritische of bainitische structuur). De diffusie coëfficiënt van waterstof daarentegen is in een austenitische structuur veel lager dan in een martensitische structuur (resp ferritische of bainitische structuur).

Vooraf in het verleden werd het optreden van koudscheuren in de WBZ versterkt doordat de Ms van de WBZ (met relatief hoog CET) lager was dan de Ms van het lasmetaal. Daardoor is er een grote transportdrang vanuit het lasmetaal naar de WBZ. Dit doordat enerzijds, het lasmetaal reeds (gedeeltelijk) een martensitische structuur heeft gekregen en daarmee een hoge waterstof diffusie-coëfficiënt bezit, en anderzijds de WBZ nog een austenitische structuur bezit waarin voldoende ruimte voor waterstof is (hoge oplosbaarheid) en een lage waterstofdiffusie-coëfficiënt bezit. Hierdoor ontstaat er een ophoping van waterstof vlak voorbij de smeltlijn in de WBZ (zie figuren links en rechtsonder). De WBZ bezat ook nog eens scheurgevoeligere structuur (CET) dan het lasmetaal, waardoor de (grootste) scheurproblematiek in de WBZ lag.



Met het realiseren van lagere CET-waarden in moderne basismaterialen is de koudscheurgevoeligheid van de WBZ verlaagd. Hierbij is de Ms-temperatuur van de WBZ hoger geworden. Hierdoor is er weinig of geen verschil meer tussen de Ms temperatuur van lasmetaal en WBZ, of er ontstaat zelfs een omgekeerde situatie, waarbij het lasmetaal later dan de WBZ transformeert.

Dit leidt in beide gevallen tot een situatie waarbij een kleinere hoeveelheid diffundeerbare waterstof zich uit het lasmetaal verplaatst naar de WBZ. Het gevolg is dat er een ander profiel ontstaat van de waterstofconcentratie (vergelijk rode en blauwe curve in figuur rechtsonder), waarbij een hoger waterstofgehalte in het lasmetaal te zien is. Hoger dan in de WBZ en/of hoger dan verwacht.

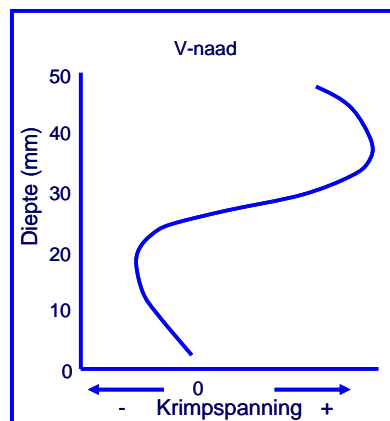
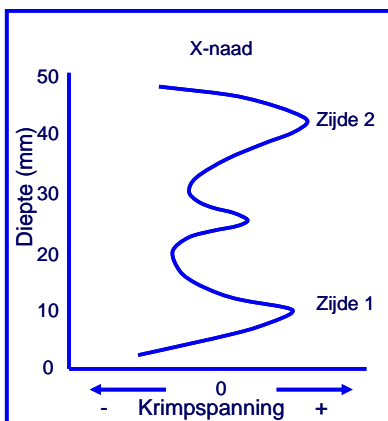
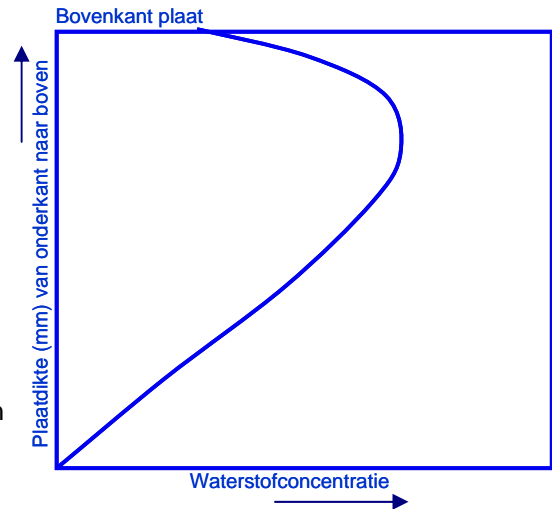
“Waterstof bij het OP-lassen bij laaggelegeerd HR-staal” - een onderschat probleem -

ing. Erwin J.M. Gering I.W.E. - Air Liquide Welding NL

Meerlaagse lasverbindingen.

Bij meerlaagse lasverbindingen blijkt de lokale diffundeerbare waterstofconcentratie over de dikterichting te variëren, waarbij het maximum zich op ca 0,1 - 0,3 van de dikte onder het oppervlak bevindt. Vlak onder het oppervlak dus. Deze verdeling wordt beïnvloed / veroorzaakt door de volledige thermische historie en de mate van omsmelting van voorgaande lagen.

Lasverbindingen die middels het OP proces worden gerealiseerd blijken een hogere maximale concentratie van waterstof in de las te bezitten, dan vergelijkbare lasverbinding middels beklede elektrode of MIG/MAG. Dit is met name te wijten aan verschillen in afmetingen en vorm van de lasrups en de inbrandingsdiepte.



Bij meerlaagse lasverbindingen blijkt dat in lengte-richting de maximale krimpspanning zich eveneens op ca 1/3 van de opgebouwde dikte onder het oppervlak bevindt. Krimpspanning in lengte richting in dikwandig meerlaagse lassen = $R_p0,2$. Hoe hoger de sterkte van het lasmetaal des te hoger de krimpspanning zal zijn. Bij toenemende rekgrens bezit het lasmetaal doorgaans een lagere vermogen tot plastische vervorming (A5%). Materiaal vloeit tijdens afkoeling door de krimpspanning. Bij grote krimpverhinderende neemt de resterende ductiliteit af.

Dit alles gecombineerd leidt tot de situatie dat scheurvorming eerder in het lasmetaal kan optreden dan in de WBZ, en eerder dan verwacht. Bij meerlaagse lasverbindingen in grotere wanddikte, zullen de benodigde voorzorgsmaatregelen dan ook afgestemd moeten worden op het lasmetaal ipv alleen op de WBZ.

EN 1011-2 geeft voorwarmtemperatuur om koudscheuren in HAZ te voorkomen, maar is niet afgestemd op het voorkomen van dwarsscheuren in het lasmetaal. De meeste methoden om de voorwarmtemperatuur te bepalen zijn gebaseerd op 1-laagse proefflassen. Deze houden dus geen rekening met een ongelijkmatige waterstofverdeling en afwijkende waterstofconcentraties in het lasmetaal van een meerlaagse las.



“Waterstof bij het OP-lassen bij laaggelegeerd HR-staal” - een onderschat probleem -

ing. Erwin J.M. Gering I.W.E. - Air Liquide Welding NL

Uit scheurproeven (lasmetaal met CET tussen 0,29 -0,33 en dikte tussen 40 en 80 mm) blijkt dat berekening van de voorwarmtemperatuur volgens EN 1011-2 methode B een te lage voorwarmtemperatuur op kan leveren. Hogere HI blijkt weinig effect op voorkomen scheurvorming te hebben.

De afwijking bleek

- bij HD = 4,5 ml/100 gr ca 30 – 90 gr C (te laag berekend)
- bij HD = 6,5 ml/100 gr ca 60 – 120 gr C (te laag berekend).

Deze afwijking bleek echter nihil bij laag waterstofgehalte HD = 2 ml/100gr.

Advies : “Voorkom zoveel mogelijk dat het er in komt, want het wil er niet uit”.

DRY-BAG.

Bepierking van waterstof-inbreng is de belangrijkste maatregel om dwarscheuren te voorkomen bij het lassen van staalsoorten met hoge sterkte zoals S690, naast toepassing van de juiste interpass temperatuur.

De hoeveelheid diffundeerbare waterstof die via het poeder ingebracht wordt is afhankelijk van :

- Selectie grondstoffen
- Chemische samenstelling van het poeder
- Productieproces van het poeder
- Opslag omstandigheden

Speciaal poeder dat in staat is de waterstof inbreng zeer laag te houden is aan te bevelen, zoals OP 121 TT/W (gemiddeld 2,7 ml/100 gr).

Vochtopname door het poeder kan op treden tijdens

- transport in de originele verpakking
- opslag in ongeconditioneerde ruimte
- productie waarbij het poeder onvoldoende wordt beschermd

Klimatologische omstandigheden beïnvloeden de vochtopname van het poeder en beïnvloeden daarmee het waterstofgehalte in het lasmetaal. De gevoeligheid voor vochtopname is per poeder verschillend. Het verband tussen vochtgehalte in het poeder en de waterstofinbreng via het poeder is ook per poeder verschillend.



| g of water vapor / kg of dry air | | Temperature | | | | | | | |
|-------------------------------------|----|-------------|----|----|----|----|----|----|----|
| | | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 27 | 30 | 35 |
| Relative humidity % | 40 | 2 | 3 | 4 | 6 | 8 | 9 | 11 | 14 |
| | 45 | 2 | 3 | 5 | 7 | 9 | 10 | 12 | 16 |
| | 50 | 3 | 4 | 5 | 7 | 10 | 11 | 13 | 18 |
| | 55 | 3 | 4 | 6 | 8 | 11 | 12 | 15 | 20 |
| | 60 | 3 | 5 | 6 | 9 | 12 | 13 | 16 | 21 |
| | 65 | 4 | 5 | 7 | 10 | 13 | 15 | 17 | 23 |
| | 70 | 4 | 5 | 7 | 10 | 14 | 16 | 19 | 25 |
| | 75 | 4 | 6 | 8 | 11 | 15 | 17 | 20 | 27 |
| | 80 | 4 | 6 | 9 | 12 | 16 | 18 | 22 | 29 |
| | 85 | 5 | 7 | 9 | 13 | 17 | 19 | 23 | 31 |
| 90 | 5 | 7 | 10 | 13 | 18 | 20 | 24 | 33 | |

Poeder “A”

Acceptable

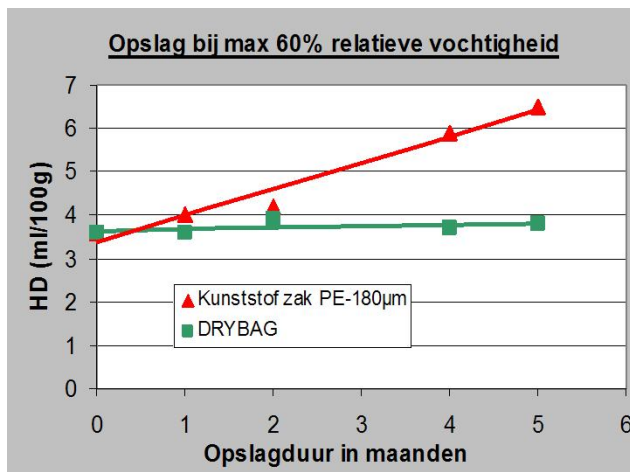
“Waterstof bij het OP-lassen bij laaggelegeerd HR-staal” - een onderschat probleem -

ing. Erwin J.M. Gering I.W.E. - Air Liquide Welding NL

Voorbeeld : voor poeder A is vastgesteld dat een absolute vochtigheid van de lucht van maximaal 11 gram water per kg droge lucht, acceptabele opslag condities zijn voor het poeder. Uit bovenstaande tabel blijkt tevens dat er een reële kans bestaat dat het poeder aan onacceptabele opslagcondities gedurende een (onbekende) tijdsduur bloot gesteld zal worden / zijn.

Bij kritische toepassingen wordt daardoor aanbevolen het poeder te herdrogen (2 -4 uur op ca 300 / 350°C). Vooral bij de gangbare polyethyleen verpakking vormt de klimatologisch historie een moeilijk in te schatten invloedsfactor. Het is daarom raadzaam het poeder te herdrogen op 300 – 350°C, gedurende enkele uren. Het is de vraag of dit herdroogproces wel altijd even betrouwbaar / consequent / juist wordt uitgevoerd. Daarnaast vormt het herdrogen een extra bewerking, die tijd en geld kost.

DRY-BAG verpakking staat daarentegen garant voor een verwaarloosbare vochtopname tijdens transport en opslag, waardoor herdrogen achterwege kan blijven en waarmee een stuk kwaliteitswaarborging gerealiseerd wordt in de laswerkplaats, zelfs in tropische landen / omstandigheden. Bovendien is het poeder daardoor ook onbeperkt houdbaar, ongeacht de opslagcondities. De semi-vacuüm verpakking is indicatief voor droog poeder.



Enkele overige conclusies:

Wanneer het risico op koudscheuren **in lasmetaal** gevreesd wordt :

- AWS D1.1 beveelt proeflassen aan om risico te “bekijken”
- BS 5135 : 2 aanbevelingen:
 - ✓ Gebruik van lastoevoegmateriaal met HD < 2,5 ml/100gr (=praktisch vrijwel onmogelijk voor het OP-proces)
 - ✓ Of nawarmen op 200°C gedurende 2-3 uur
- EN 1011 : geen concrete aanbevelingen

Volgens EN 1011 is de aanbevolen tijdsduur van 16 uur voor NDO uit te voeren veel te kort.

De scheuren kunnen ook na 1 week na het lassen pas ontstaan. Hierbij kan opgemerkt worden dat bij lasmetaal met hogere Rp0,2 (> 600 MPa) dit meestal wel binnen een aantal dagen lijkt op te treden. Voor Rp0,2 tussen 500 – 550 MPa is gebleken dat scheurvorming zelfs na 7 dagen nog kan optreden. Bij Rp0,2 < 480 MPa (in het lasmetaal) lijken dwarsscheuren onwaarschijnlijk in de praktijk.

De scheuren zijn soms moeilijk detecteerbaar. Ze ontstaan onder het oppervlak en kunnen uitgroeien waardoor ze later alsnog opgemerkt worden (soms aan het oppervlak).

“Waterstof bij het OP-lassen bij laaggelegeerd HR-staal” - een onderschat probleem -

ing. Erwin J.M. Gering I.W.E. - Air Liquide Welding NL

Literatuur:

- TOTAL specification GS PLR 212
- Air Liquide Welding - C.T.A.S. – “Pipemills support”
- Air Liquide Welding – C.T.A.S, C.Bonnet, B. Leduey : “Basic principals to produce, supply and use very low diffusible hydrogen level coated electrodes”
- EN 1011-2 : “Welding Recommendations for welding of metallic materials – part 2. Arc welding of ferritic steels”
- AWS D1.1 1988 : “Structural welding code – steel”
- BS 5135 : 1984: “Process of arc welding of carbon and carbon-manganese steels”
- Wang WW, Wong RJ, Liu S & Olson DL “Use of martensitic start temperature for hydrogen control”
- Satoh K, Terasaki T & Ohkuma Y: “Relation ship between critical stress of HAZ cracking and residual diffusible hydrogen content”
- H.W. Lee and S.W. Kang: “The relationship between residual stresses and transverse weld cracks in thick steel plate”
- COE FR, TWI : “Welding steel without hydrogen cracking”