

Overwegingen ten aanzien van voorwarmen bij lassen

Ing. Fred Neessen, EWE, en Vincent van der Mee

Als het aan de lasser lag zou er nooit voorgewarmd worden omdat het ongemakkelijk is.

Als het aan het constructie bedrijf lag zou er ook niet voorgewarmd worden omdat het "extra" kosten zijn.

Echter, toch wordt voor bepaalde materialen en diktes voorgeschreven dat er voorgewarmd moet worden!

Iedereen heeft gelijk, en waarom?

Waarom voorwarmen

In de praktijk is voorwarmen vaak een punt van discussie.

Een lage koolstofequivalent (CE) waarde in deze moderne staalsoorten nodigt uit tot het volledig achterwege laten van het voorwarmen. Volgens de ontwerp-norm EN 1011-2 die afgeleid is van de standaard BS 5135, zou bijvoorbeeld in een detail van een staalconstructie in het staaltype S460 (CE=0,44), met een onbeperkte gecombineerde wanddikte voor een lasproces met normale warmte-inbreng van minimaal 1,0 kJ/mm en een lasmateriaal met H_{DM} max. 5 ml/100g geen voorwarming nodig zijn.

Er zijn een aantal redenen waarom voorwarmen toch zinvol kan zijn. De hoofdredenen om te voorwarmen zijn:

- Verlaagt de afkoelsnelheid van lasmetaal en basismateriaal, waardoor er een minder harde structuur ontstaat met een grotere weerstand tegen koudscheuren.
- De lagere afkoelsnelheid geeft de aanwezige waterstof de mogelijkheid uit de verbinding te diffunderen, waardoor de kans op scheurvorming wordt verminderd.
- Het reduceert de krimpspanningen in het lasmetaal en basismateriaal, hetgeen belangrijk is in ver-bindingen met hoge eigen spanningen.
- Het brengt sommige staalsoorten boven de temperatuur waarbij brose breuk zou kunnen ontstaan tijdens fabricage.

Daarnaast, kan voorwarmen er toe bijdragen om betere mechanische eigenschappen, zoals betere kerfslag-waarden bij lagere temperatuur, te verkrijgen.

Wanneer voorwarmen

Indien bepaald moet worden óf voorwarmen noodzakelijk is, dient het volgende overwogen te worden:

- Staalsoort,
- Chemische samenstelling basismateriaal,
- Materiaal dikte,
- Eigen spanningen (restraint),
- Omgevings temperatuur tijdens het lassen
- Lasproces
- Diffundeerbaar waterstof niveau lastoevoegmateriaal,
- Historie van het constructiebedrijf m.b.t. scheurvorming
- Eisen in de code (norm)

Indien er een eis is in de code, dan is meestal ook de minimale voorwarm temperatuur aangegeven voor een bepaalde staalsoort, dikte en lasproces. Deze minimum waarde moet



dan aangehouden worden, onafhankelijk van werkelijke spanningen of variaties in de samenstelling. Het is wel toegestaan een hogere voorwarm-temperatuur aan te houden.

Als er geen eisen in de code vermeld staan, dient men zelf vast te stellen of voorwarmen noodzakelijk is, en zo ja bij welke temperatuur. In zijn algemeenheid is voorwarmen niet noodzakelijk bij staalsoorten tot S460 (of equivalenten) met plaatdikte onder de 25 mm. Echter, bij hogere sterkte staalsoorten, hogere waterstof gehalten, hogere spanningen en dikkere materialen dient voorwarmen overwogen te worden.

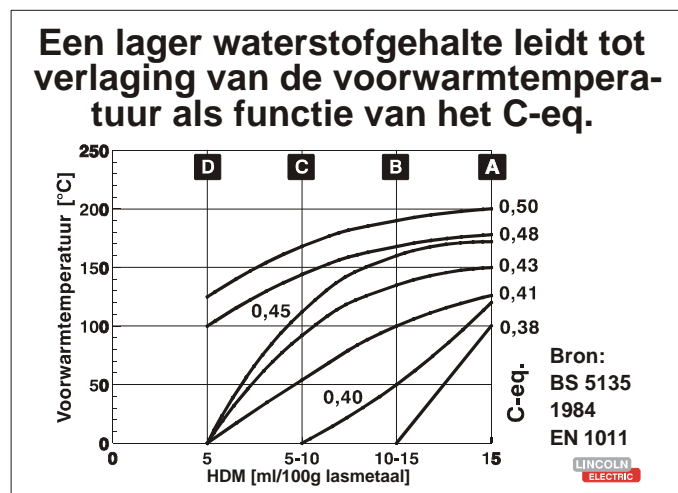
Op welke temperatuur voorwarmen

Er zijn verschillende manieren om de voorwarmtemperatuur te bepalen.

Het eenvoudigst, alhoewel niet altijd even praktisch, is het wanneer de minimale voorwarmtemperatuur is voorgeschreven in de code, zoals bijvoorbeeld in EN 1011-2 (deel 2) EN 288 of AWS D1.1 tabel 3.2.

Indien geen code is voorgeschreven, kan voor verschillende benaderingen worden gekozen:

1. Hardheid
2. Waterstof niveau
3. Formules uit de literatuur
4. Software hulpmiddelen
5. Ervaring (intern of opdrachtgever)



1. Hardheid

Beheersen van de hardheid is gebaseerd op de aannamen dat de scheurvorming niet optreedt indien (WBZ) hardheid onder een bepaalde kritische waarde ligt. Dit kan bewerkstelligd worden door de afkoelsnelheid te beperken. De kritische afkoelsnelheid voor een bepaalde hardheid kan gerelateerd worden aan het koolstofequivalent. In de literatuur [1] wordt een veelvoud van formules genoemd. Bijvoorbeeld Pcm, CE, CEN, etc. zoals aangegeven in tabel 1.

In figuur 2. wordt de relatie tussen de

verschillende C-equivalenten aangegeven.

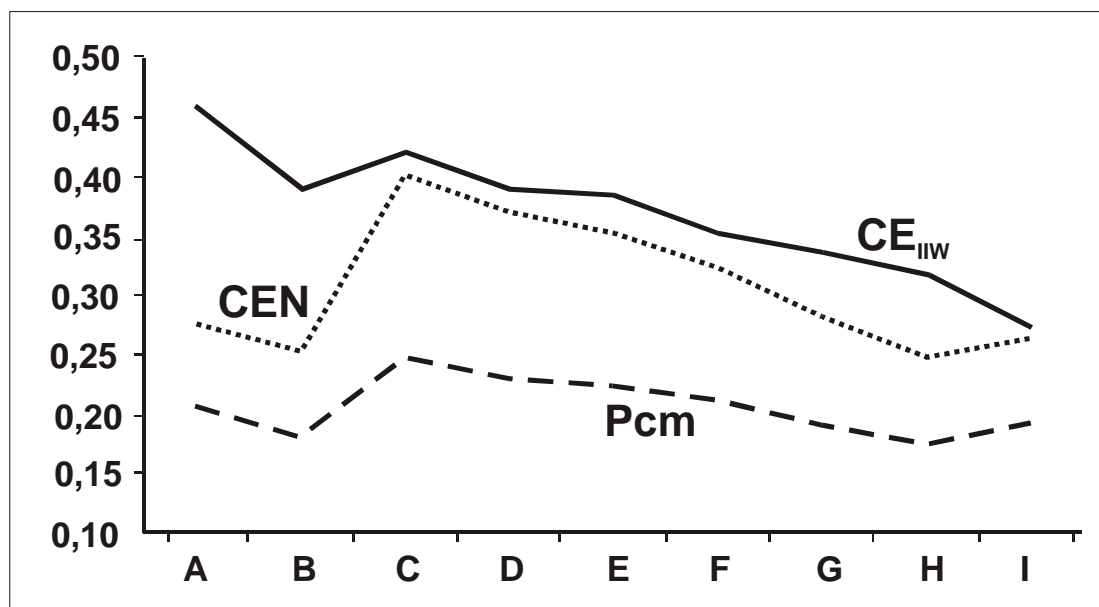
Figuur 1. Voorwarmtemperatuur in relatie tot C-eq. en Diffundeerbaar waterstofgehalte

Pcm	= C + (Si/30) + [(Mn + Cu + Cr)/20] + (Ni/60) + (Mo/15) + (V/10) + 5*B
CE	= C + (Si/25) + [(Mn + Cu)/20] + (Ni/40) + (Mo/15) + (V/10)
CET	= C + [(Mn + Mo)/10] + [(Cr + Cu)/20] + (Ni/40)
CE_{IIW}	= C + (Mn/6) + [(Cr + Mo + V)/5] + [(Cu + Ni)/15]
CEN	= C + A(C)*{(Si/24) + (Mn/6) + (Cu/15) + (Ni/20) + [(Cr + Mo + Nb + V)/5] + 5*B} A(C) = 0,75 + 0,25*tanh*[20*(C - 0,12)]

Tabel 1. De meest toegepaste formules voor het berekenen van het C-eq. op een rij

Staal	C	Si	Mn	Cu	Ni	Cr	Mo	Nb	V	B
A	0,05	0,28	0,56	1,09	0,84	0,38	0,19		0,04	
B	0,07	0,28	1,38			0,21	0,21		0,04	0,002
C	0,15	0,43	1,59							
D	0,15	0,29	1,42							
E	0,14	0,37	1,43							
F	0,14	0,27	1,20							
G	0,11	0,31	1,31					0,02		
H	0,10	0,24	1,28							
I	0,15	0,18	0,73							

Tabel 2. Chemische samenstelling van een aantal staalsoorten (zie ook figuur 2.)


 Figuur 2. CE_{IIW}, Pcm en CEN waarden voor staalsoorten uit tabel 2.

Experimenten die aan verschillende staalsoorten zijn uitgevoerd tonen dat de CE_{IIW} de koudscheur gevoeligheid van C en CMn stalen goed omschrijft, terwijl de Pcm meer geschikt is voor laag C, laaggeleerd staal.

Zoals uit figuur 2. duidelijk wordt, zijn bij "lage" koolstofgehalten CEN en Pcm vergelijkbaar, terwijl bij "hogere" koolstofgehalten CEN en CE_{IIW} een grotere vergelijkbaarheid tonen.

In de productie van hoogvaste constructiestaalsoorten hebben in de afgelopen decennia belangrijke ontwikkelingen geleid tot het gebruik van moderne staalsoorten zoals S355 en S460. Het genormaliseerde staal met C = 0,15-0,20% en een koolstof-equivalent (CE) van > 0,48 wordt daarbij vaak vervangen door TMCP en Q&T staalsoorten met een veel lager CE waarde (typ. 0,3-0,45) bij een chemische samenstelling zoals C = 0,10% en Mn = 1,2-1,5%, voor grotere diktes zwak geleerd met 0,2-0,5% Ni en soms ook micro-geleerd met Ti (~0,015%). Tevens is het niveau van verontreinigingen sterk gedaald. Het zwavelgehalte ligt typisch op een niveau van 0,001%.

Zoals bekend bepaalt de samenstelling van het staal de microstructuur in de WBZ. Met het lage koolstofequivalent wordt bij een gelijke warmte-inbreng (HI) en voorwarm- /tussenlaagtemperatuur in grote plaatdikten de vorming van ongewenste harde bainiet/martensiet beperkt. De hardheid van deze structuur-bestanddelen wordt bepaald door legerings-elementen en koolstof.

Bijvoorbeeld volgens de formules:

HV= 802 x C + 305 voor martensiet

HV= 350 x CE +101 voor bainiet

In de WBZ van constructiestaalsoorten streeft men doorgaans naar een maximale hardheid HV van 350.

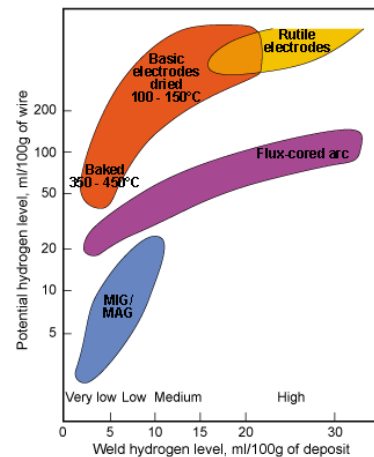
2. Waterstof niveau

Effect waterstof gehalte op voorwarm temperatuur

Beklede elektroden, gevulde draad, draad/poeder combinaties zijn de meest toegepaste lastoevoegmaterialen. Voor dikwandige constructies worden laagwaterstof producten toegepast. In dit verband worden lasmaterialen ingedeeld naar het waterstofgehalte dat in de neersmelt onder genormaliseerde condities wordt vastgesteld (ISO 3690-1983). In de norm EN 1011-2 kent men de volgende niveaus:

schaal	diffundeerbaar waterstofgehalte HDM ml/100g neersmelt
A	> 15
B	10 ≤ 15
C	5 ≤ 10
D	3 ≤ 5
E	< 3

Tabel 3.
Indeling naar waterstofgehalte in EN 1011-2



Deze norm is gebaseerd op de gestandaardiseerde metingen aan lasmetaal, neergesmolten in één laag. De warmtehuishouding bij het lassen heeft een grote invloed op de hoeveelheid effectieve diffundeerbare waterstof.

In afwijking van de norm ISO 3690, is voor de waterstofniveaus in lasmetaal de klasse "E" toegevoegd. Dit is opmerkelijk in het licht van de onnauwkeurigheid in de bepaling van een grenswaarde als 3 ml/100g.

Voor de meeste laag-waterstof producten moet gerekend worden met een verwerkingsadvies geldig voor klasse D. Uitsluitend voor een vochtbestendige beklede elektroden, in vacuumverpakking, massieve draad voor het gasbooglassen, speciale gevulde draden alsmede speciale producten, wordt een niveau van ca 2 ml/100g bereikt en wordt vanuit het lasmetaal een optimale bijdrage geleverd tot het beperken van het risico van H-koudscheuren. Voor deze lasmaterialen is het gebruik van schaal E correct.

3. Voorwarm formules

Door Florian [2] is een overzicht gegeven voor mogelijkheden om de noodzakelijke voorwarmtemperatuur te berekenen. Aan de hand van vijf verschillende formules (Thyssen, Okuda, Nippon-steel, Hart en Chakravarti) worden verschillende methoden van de voorwarmtemperatuur besproken.

Thyssen concept [3]:

De formule voor de benodigde voorwarmtemperatuur ter voorkoming van koudscheuren in lasmetaal is gelijk aan die voor de WBZ, echter het C-equivalent voor het lasmetaal moet met 0,03 verhoogd worden.

$$T_p = 700 * (CET + 0,03) + 160 * \tanh * (d/35) + 62 * H_{IIW}^{0,35} + [53 * (CET + 0,03) - 30,4] * Q - 330$$

met

CET = C + [(Mn + Mo)/10] + [(Cr + Cu)/20] + (Ni/40)

d = plaatdikte [mm]

H_{IIW} = diffundeerbaar waterstof niveau volgens ISO 3690 [ml/100g gesmolten metaal =

H_{FM}]

Q = heat input [kJ/cm]

Okuda concept [4]:

$$T_p = 0,614 * R_m + 318,6 \log H_{GC} - 554,3$$

met

 R_m = treksterkte lasmateriaal [MPa]

 H_{GC} = diffundeerbaar waterstof volgens gas chromatografische methode

 $H_{GC} = H_{IIW}$
Nippon-steel concept [5]:

$$T_p = 120 + 120 \log(H_{JIS}/3,5) + 5,0 * (hw - 20) + 0,815 * (R_m - 846)$$

 voor $15 < hw < 30 \dots 40$ mm

 hw = $\frac{1}{2}d$ voor X (double-V) naden, K (double-bevel) naden en dubbele U-verbinding

 H_{JIS} = diffundeerbaar waterstof volgens glycerine methode

 $H_{JIS} = 0,79 H_{IIW} - 1,74g$

$$T_p = 120 + 120 \log(H_{JIS}/3,5) + 5,0 * (hw - 20) - 0,05 * (hw - 30)^2 + 0,815 * (R_m - 846)$$

 voor $30 < hw < 50$ mm

$$T_p = 250 + 120 \log(H_{JIS}/3,5) + 0,185 * (R_m - 846)$$

 voor $50 < hw$ mm

Hart concept [6]:

$$T_p = 188,4 * (CE_W - 0,012 * ? t_{8/5} + 0,039 * H_{IIW}) - 108,3$$

met

 $CE_W = C + 0,378 * Mn + 0,145 * Ni + 0,468 * Cr + 0,298 * Mo$
 $? t_{8/5}$ = afkoeltijd 800-500°C

Chakravarti concept [7]:

$$T_p = 487 * (CE_C + 0,012 * H_{IIW} - 0,006 * ? t_{8/5}) - 15,3$$

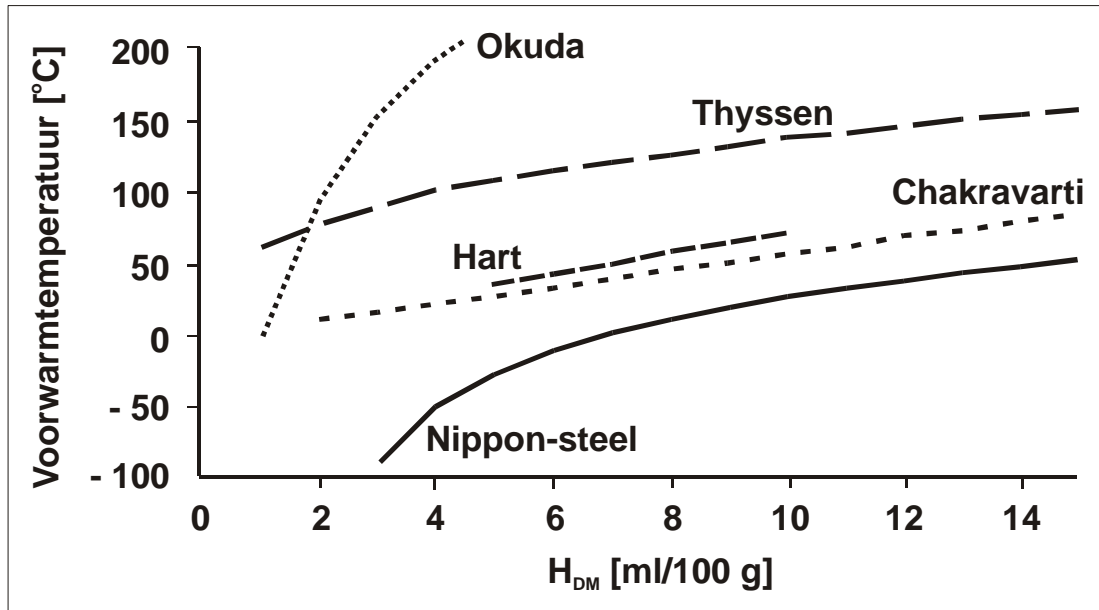
met

 $CE_C = C + 0,16 * Si + 0,07 * Mn + 0,22 * Cr + 0,03 * Ni - 0,27 * Cu$

Indien de genoemde concepten worden vergeleken, kan de invloed van de verschillende factoren worden omschreven als in tabel 4. Figuur 3 en 4 geven hiervan een grafische weergave.

Tabel 4. Verschil in factoren bij de vijf genoemde concepten

		f (H_{IIW})	f (R_m)	constant
Thyssen	[1]	$62 * (H_{IIW})^{exp0,35}$	$700 * (CET + 0,03) + 160 * \tanh(d/35) + (53 * (CET + 0,03) - 30,4) * Q$	- 330
Okuda	[2]	$318 * \log(H_{IIW})$	$0,614 * R_m$	- 554,3
Nippon-steel	[3]	$120 * \log(H_{JIS}/3,5)$	$0,815 * R_m + 5 * (d-20)$	- 569,5
Hart	[4]	$7,348 * H_{IIW}$	$188,48 CE_W - 2,261 * Dt_{8/5}$	- 108,3
Chakravarti	[5]	$5,844 * H_{IIW}$	$487 * CEC - 2,922 * Dt_{8/5}$	- 15,3

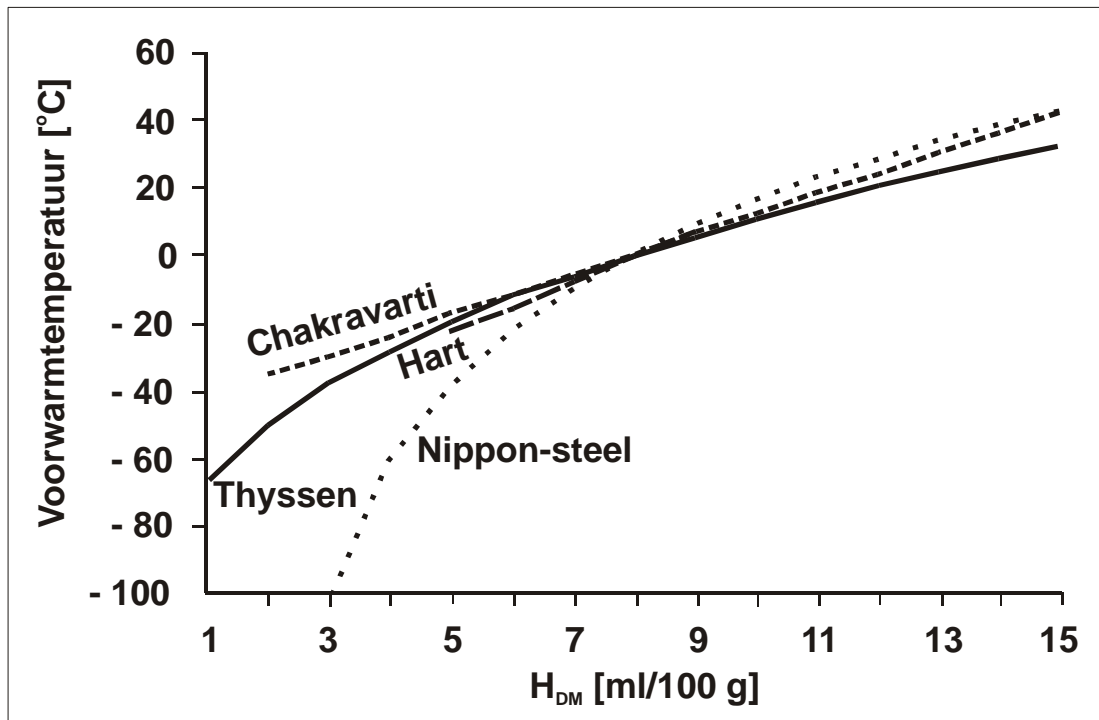


Figuur 3. Effect waterstof niveau op de voorwarmtemperatuur

Bij vergelijking van de genoemde concepten en wat in de praktijk gebruikt wordt, is de volgende formule, voor het berekenen van de noodzakelijke voorwarmtemperatuur om koudscheuren te vermijden, opgesteld:

$$T_p = 0,195 * R_m + 62 * H_{IIW}^{0,35} - 115$$

Deze formule is ontwikkeld uit Tekkentests en “bead-on-plates” testen (één laag) en is geldig gebleken voor staalsoorten met een reksgrens van 420 tot 690 MPa.



Figuur 4. Effect waterstof niveau op de voorwarmtemperatuur, met H_{IIW} is 8 ml/100g gestandaardiseerd naar "0".

4. Software

In de markt zijn diverse software programma's verkrijgbaar voor het bepalen van de voorwarmtemperatuur. Wanneer deze programma's gebruikt worden is het belangrijk te weten, hoe tot de aanbevolen voorwarm-temperatuur gekomen is. Vermeden moet worden dat het een "black-box" getal wordt [8].

Tijdens de presentatie zal een voorbeeld getoond worden van een software programma [9], dat onder andere geënt is op zowel EN 1011-2 als AWS D1.1. en dat een volledige verklaring geeft hoe de aanbevolen voor-warmtemperatuur tot stand is gekomen.

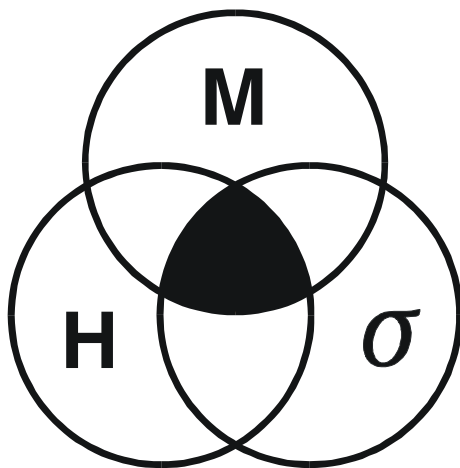
5. Ervaringen

Er is vanuit de praktijk moeilijk een absoluut getal aan te geven waarbij voorgewarmd dient te worden. Wat bij één constructie bedrijf werkt, hoeft bij een ander niet te werken, ondanks dat de lasparameters zogenaamd "identiek" zijn.

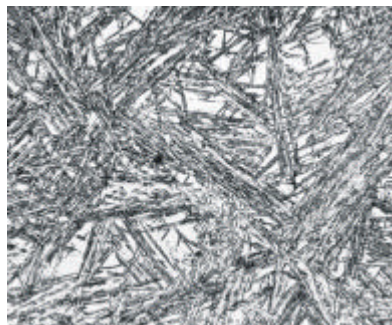
De toegepaste materialen, het lasproces en het aard van de constructie via de chemische samenstelling, de warmte-huishouding en de spanningsopbouw bepalen uiteindelijk de intrinsieke factoren, verantwoordelijk voor H-koudscheuren:

- de microstructuur
- de hoeveelheid lokaal aanwezige diffundeerbare waterstof
- de lokale spanning

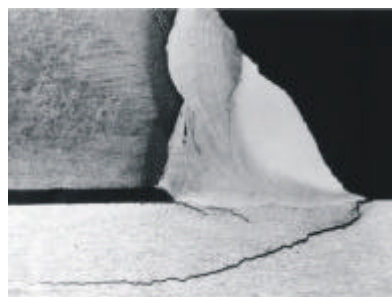
Dit beeld is geldig als model voor de scheurvorming in zowel de WBZ als ook van het



Scheurvormings model



Martensiet



Koudscheuren

lasmetaal.

Samenvatting

- Voorwarmen kan de koudscheurgevoeligheid minimaliseren en mechanische eigenschappen zoals kerf-taaiheid verbeteren.
- Voorwarmen is noodzakelijk wanneer de code dit voorschrijft. Indien dit niet voorgeschreven wordt, is het aan de lasingenieur om te beslissen of voor het toe te

passen lasproces, toevoegmaterialen, basis-materialen en materiaaldikten voorwarmen noodzakelijk is en zo ja bij welke temperatuur.

- Er bestaan verschillende hulpmiddelen (ervaring, tabellen in codes, formules, specifieke software, etc) om tot een gefundeerde keuze van voorwarmtemperatuur te komen.
- Voor "gewoon koolstof staal" is de minimale / maximale voorwarmtemperatuur niet zo strict. Voor de hogere sterkte staalsoorten is dit wel belangrijk i.v.m. de ontlaat temperatuur bij de staalproductie.
- Een absoluut getal ten aanzien van voorwarmtemperatuur om koudscheuren te voorkomen is niet te geven. Afhankelijk van omstandigheden, ervaring en in te schatten risico dient een minimale voor-warmtemperatuur toegepast te worden.

Literatuur:

- [1] Costa, L., R. Molino, M. Scasso: A new software to evaluate preheat temperature and cost, IIW-Doc. 1515-00 (ex-doc. XV-1055-00)
- [2] Florian Wolfgang: Cold cracking in high strength weld metal. Possibilities to calculate the necessary preheating temperature, IIW-Doc. IX-2006-01
- [3] Uwer, D. und H. Höhne: Ermittlung angemessener Mindestvorwärmtemperaturen für das kaltrißsichere Schweißvon Stählen, Schweißen und Schneiden 43 (1991) H. 5, S. 282-286
- [4] Okuda, N., Y. Ogate, Y. Nishikawa, T. Aoki, A. Goto and T. Abe: Hydrogen induced cracking susceptibility in high strength weld metal, Welding Journal 66 (1987) S. 141-s – 146-s
- [5] Yurioka, N.: Predictive methods for prevention and control of hydrogen assisted cold cracking, IIW-Doc. IX-1938-1999
- [6] Hart, P. H. M.: Resistance to Hydrogen Cracking in Steel Weld Metals, Welding Research suppl. January 1986. S 14 – 22
- [7] Chakravarti, A. P. and S. R. Bala: Evaluation of weld metal cold cracking using G-BOP test, Welding Journal 68 (1989) S. 1-s – 8-s
- [8] Bekkers, K., F. Neessen: Erfahrungen beim Bau der Oosterschelde-Sturmflutwehr, Schweißtechnik 1/87, SZA
- [9] Preheat Calculation Program, uitgave t.b.v. 75 jarig bestaan Lincoln Smitweld B.V., Software ontwikkeld in samenwerking met Hoge School Utrecht.