



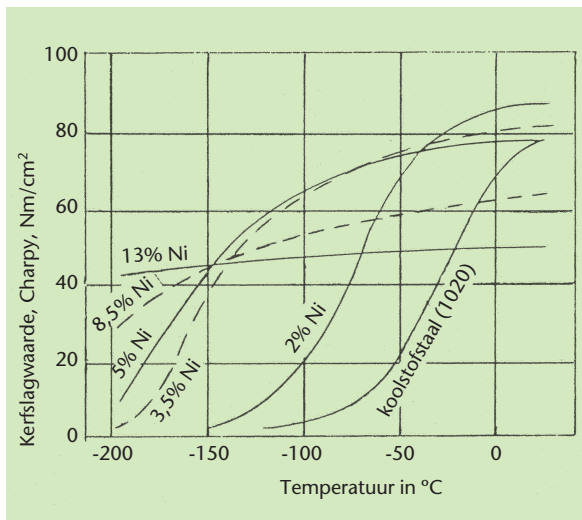
Taai & bros

Staalsoorten voor lagetemperatuurtoepassingen

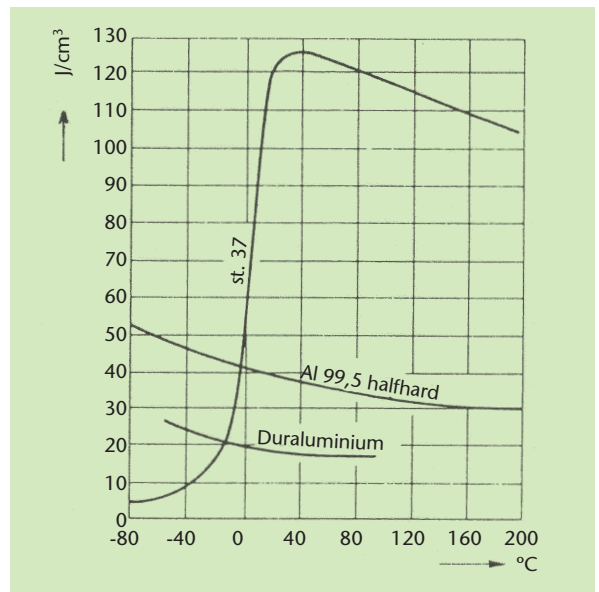
Voordat er gelast kan worden, moet er enige voorkennis zijn van het te lassen basismateriaal en hoe dit tot stand is gekomen. Het is belangrijk het gedrag van materialen te begrijpen om zo een goede las te leggen en het falen van constructies te voorkomen. In deze aflevering aandacht voor het gedrag van staalsoorten bij lage temperatuur.

Staalsoorten gedragen zich bij lage temperatuur anders dan bij hoge temperatuur. Sommige materialen zijn bij lage temperatuur significant brosser, terwijl bij andere materialen de taai-brosovergang niet voorkomt. Ook bij staal is dit het geval. Ferritisch staal vertoont een duidelijke taai-brosovergang, terwijl austenitisch staal dit verschijnsel niet laat zien. Blijkbaar is de kristalstructuur belangrijk. Een kubisch ruimtelijk gecentreerde (k.r.g.) structuur van een ferritisch staal wordt bros. Kubisch vlakken gecentreerde (k.v.g.) structuren, zoals austenitisch staal of aluminium, blijven taai. Als aan staal het austenietvormende element nikkel wordt toegevoegd, wordt het uiteindelijk austenitisch en heeft het geen taai-brosovergangstemperatuur meer (zie figuur 1). Ook aluminium (k.v.g.) wordt niet bros bij lage temperaturen (zie figuur 2).

Dit gedrag kan worden teruggevoerd op de manier waarop dislocaties door het rooster bewegen en daarmee plastische (blijvende) deformatie veroorza-



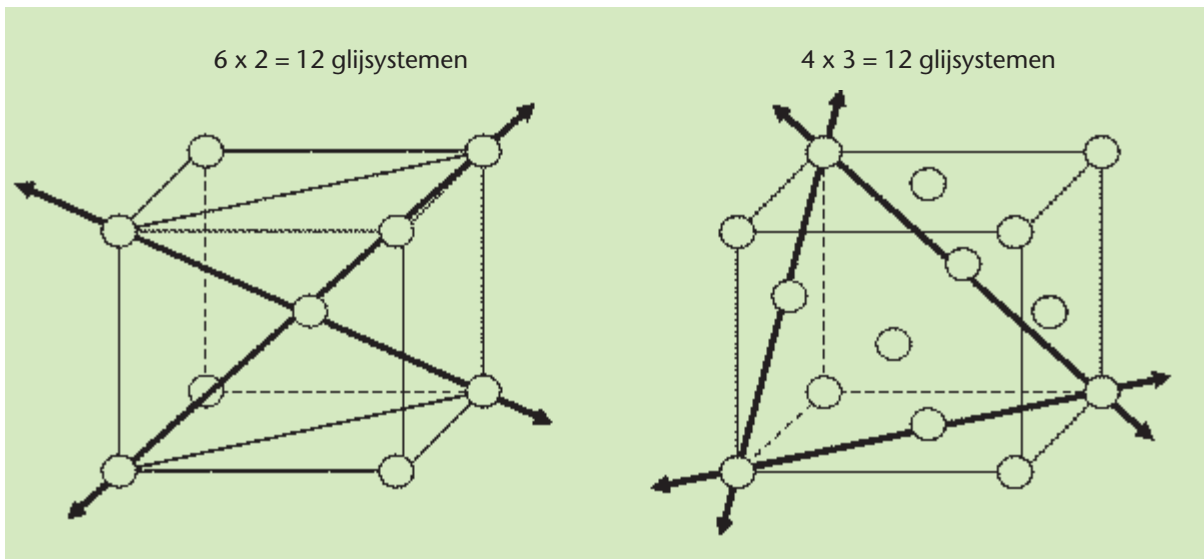
Figuur 1 - Invloed van nikkel op de overgangstemperatuur van de kerfslagwaarde van veredeld staal met 0,1 % C [Korevaar et al.]



Figuur 2 - Kerfslagwaarden van staal, aluminium en duraluminium als functie van de temperatuur [Korevaar et al.]

ken. In dichtgepakte vlakken en richtingen in de kristalstructuur kan relatief gemakkelijk afschuiving plaatsvinden. De kracht die hiervoor nodig is, is de Peierlskracht. De verschillende kristalstructuren hebben andere dichtgepakte vlakken en richtingen (glijsystemen). Ook de pakkingsdichtheid is anders. De Peierlskracht is voor k.r.g. structuren hoger dan voor k.v.g. De kracht neemt tevens sterk toe met afnemende temperatuur.

Voor het vergelijk van de kristalopbouw tussen k.r.g. en k.v.g. is in beide gevallen een mogelijkheid tot vervormen via twaalf glijsystemen weergegeven in figuur 3. Een groot verschil is dat bij vergelijk van de kristalroosters van één materiaal, zoals staal, de roosterafstand van het k.v.g. rooster groter is dan het k.r.g. rooster. Dit kan mogelijk verklaren waarom



Figuur 3 - Glijvlakken in een kubisch ruimtelijk gecentreerde en kubisch vlakken gecentreerde eenheidscel

het k.r.g. rooster van staal een duidelijke overgang laat zien ten opzichte van austenitische k.v.g. Er zijn dus redelijk wat legeringselementen nodig om bij kamertemperatuur een k.v.g. structuur te behouden voor een staal die qua roosteropbouw een austenietstructuur ondersteunen (voornamelijk nikkel en mangaan). Zie ook eerdere artikelen over Mn en Ni.

Brosse breuk

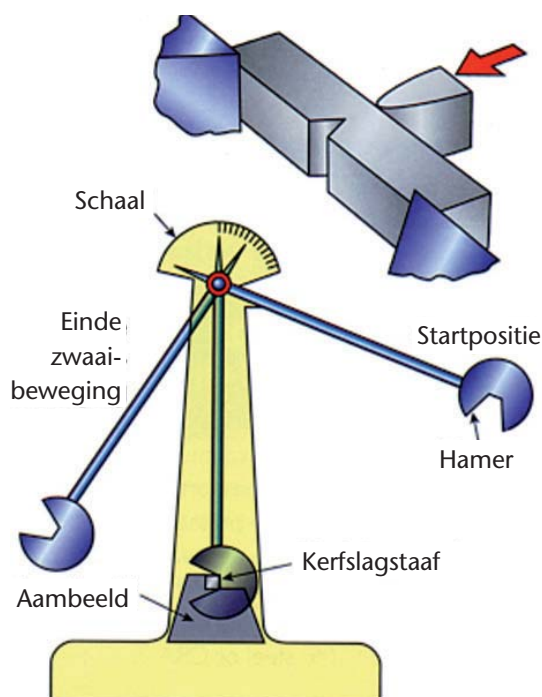
Een brossse breuk wordt ook wel een splijtbreuk genoemd. Splijting treedt op als de trekkrachten op het materiaal zo hoog zijn dat de bindingskrachten tussen de atomen overtroffen worden. Kenmerken van brossse breuk zijn het nagenoeg ontbreken van plastische vervorming ten gevolge van schuifspanningen en de zeer hoge scheurgroeisnelheden. De scheur groeit sneller dan dat het materiaal kan deformeren. Het materiaal biedt geen weerstand meer tegen scheurgroei. Het vervelende is dat een constructie, die aan brossse breuk bezwijkt, niet van tevoren 'waarschuwt' door te vervormen. Het onverwachte karakter en de vaak catastrofale gevolgen voor de constructie maakt brossse breuk een gevreesd verschijnsel. De volgende factoren zijn van invloed op brossse breuk:

- Hoge spanningen;
- Spanningstoestand; een drie-assige spanningstoestand verhindert het vloeien van het materiaal en dus de plastische deformatie. Hoe ingewikkelder het constructiedetail en hoe dikker het materiaal, des te groter de kans op een alzijdige spanningstoestand. Bij kerven treden spanningsconcentraties op, maar ook de spanningstoestand is daar anders.
- Temperatuur; de materiaalstructuur en de be-

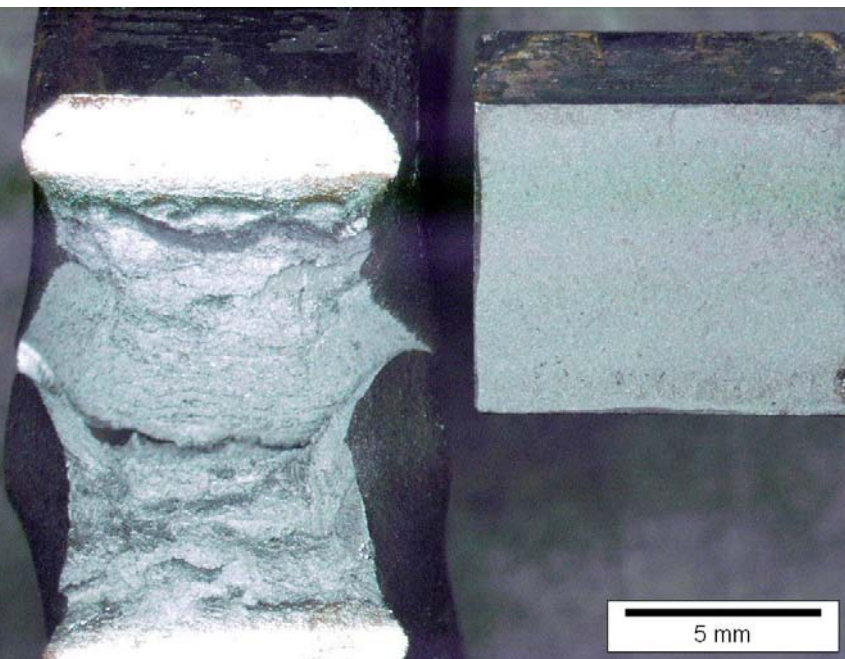
drijfstemperatuur hebben grote invloed op brossse breken. Hoe lager de temperatuur, des te gevoeliger het materiaal hiervoor is.

- Vervormingssnelheid; als de belastingtoename snel plaatsvindt, kan het materiaal onvoldoende tijd krijgen te vloeien, wat het ontstaan van brossse breuk bevordert.
- Korrelgrootte; grotere korrels resulteren in een brossser gedrag.

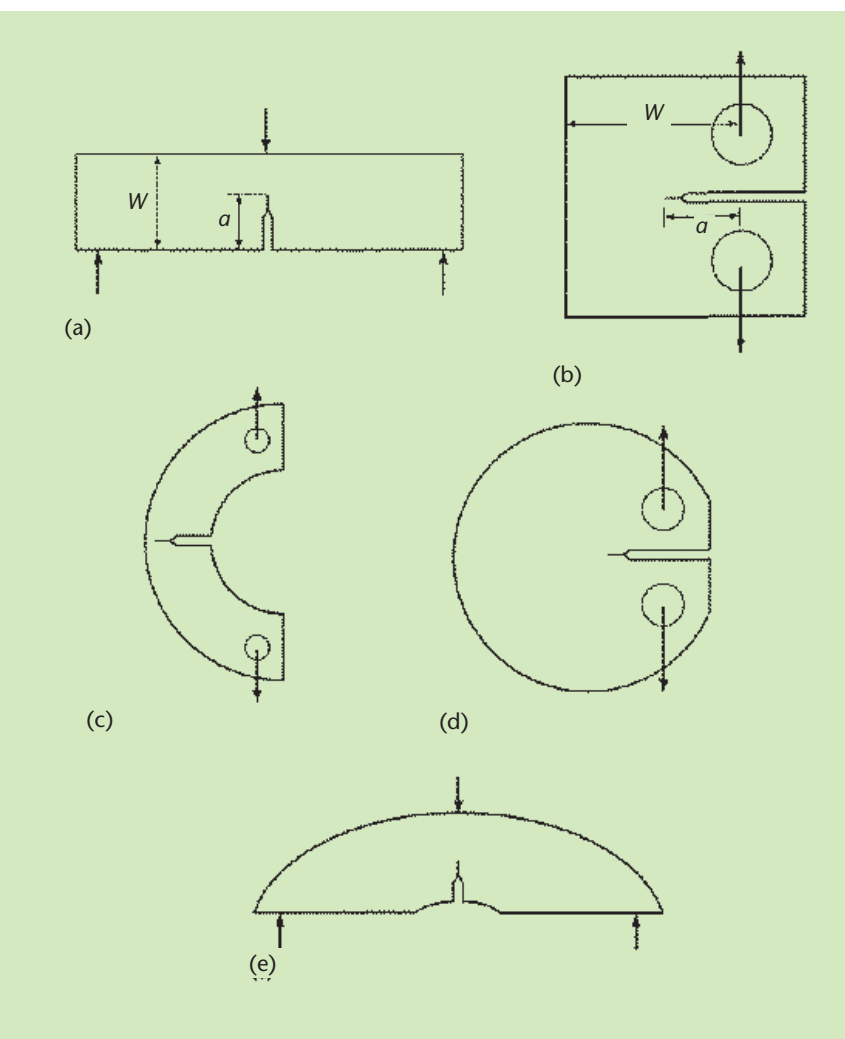
Zeker in gelaste constructies komen deze factoren vaak voor. Het wegnemen hiervan is dus zeer belangrijk om brossse breuk te voorkomen. Hierbij moet wel worden opgemerkt dat brossse breuk alleen



Figuur 4 - Kerfslaghamer



Figuur 5 - Breukvlak kerfslagstaafjes. Links taai, rechts bros



Figuur 6 - Verschillende proefstukken voor CTOD

ontstaat in dynamisch belaste constructies. Bij statische belastingen is dit nihil.

Behalve een goed ontwerp en kerfvrije lasverbindingen is de materiaalkeuze erg belangrijk. Hierna worden enkele testmethoden beschreven om het breukgedrag van materialen bij lage temperatuur te onderzoeken. Het brose gedrag komt niet tot uiting bij elke testmethode. Bij een statische trekproef op een bepaalde temperatuur kan een proefstaaf zich taai gedragen, terwijl het materiaal bij een kerfslagproef bros kan zijn.

Een constructie met een aanwezig defect (zoals een kerf) heeft een minimale systeemspanning nodig voor het ondersteunen van een instabiele scheuruitbreiding (brosse breuk). Er zijn vanuit de drukhoudende industrie onderzoeken gedaan naar het maximale spanningsniveau, waarbij geen instabiele scheuruitbreiding meer plaats kan vinden. Dit spanningsniveau is bepaald door de heer Robertson en wordt ook wel het Robertson-plateau genoemd. De werkelijke waarde is 70Mpa, maar uit veiligheidsoverwegingen wordt 50Mpa aangehouden. Dit is opgenomen in verschillende codes voor laagtemperatuurontwerp.

Kerfslagproef

De bekendste proef om het breukgedrag van een materiaal bij lage temperatuur te onderzoeken, is de kerfslagproef. Binnen de lastechniek is deze proef zo bekend dat een korte beschrijving in dit artikel zal volstaan. Een proefstuk met een vooraf aangebrachte kerf wordt door middel van een kerfslaghamer in één slag beproefd (zie figuur 4). De tijdens de slag geabsorbeerde energie (Joules per eenheid van oppervlakte) is een maat voor de kerftaaiheid. Tevens is het breukuiterslijk voor een brose breuk wezenlijk anders dan voor een taai breuk (zie figuur 5). De temperatuur waarbij de kerfslagwaarden worden bepaald liggen meestal in de range van +20 tot en met -60°C. Bij verlaging van de temperatuur krijgt het breukvlak van een ferritische kerfslagstaaf een brosser uiterlijk.

De afmetingen van de proefstaaf liggen vast in normen. De waarden uit de proef kunnen daardoor worden gebruikt als vergelijking met andere kerfslagresultaten of gestelde eisen. Afhankelijk van de gebruiksomstandigheden moet het materiaal een bepaalde hoeveelheid energie kunnen absorberen. Een uitgebreidere beschrijving van de kerfslagproef is te vinden in Laskennis Opgefrist nr. 62 (www.nil.nl).

Breukmechanische test

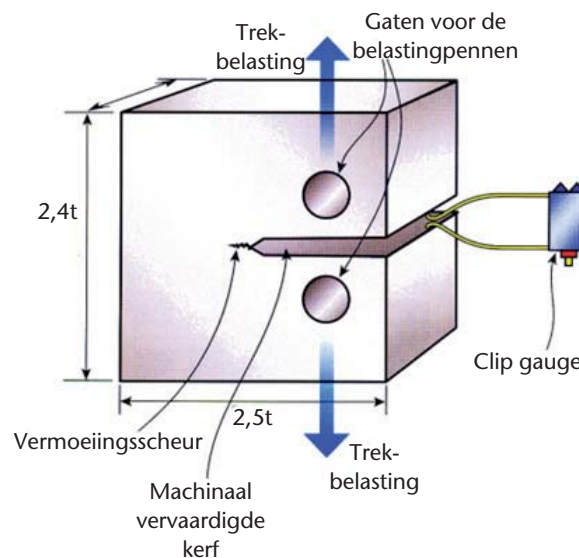
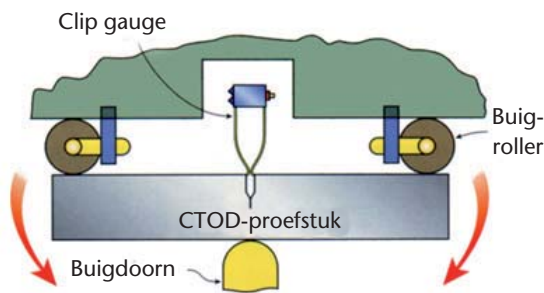
Bij Crack Tip Opening Displacement (CTOD), een breukmechanische test, is de mate van opening van de scheurtip een maat voor de taaiheid van het materiaal. Er zijn verschillende soorten tests en vormen proefstukken (zie figuur 6). De goedkoopste CTOD-test is de SENB (Single Edge Notched Bend), waarbij het proefstuk gebogen wordt om de scheurgroeisnelheid te meten.

Het proefstuk heeft dezelfde dikte als het te onderzoeken plaatmateriaal en wordt voorzien van een kerf, net als bij kerfslagstaven. Hierna wordt door middel van een wisselende belasting een vermoeiingsscheur gemaakt, die vanaf de kerf tot halverwege de plaatdikte loopt. Het proefstuk is nu gereed voor beproeving. Bij de proef wordt het proefstuk met een driepuntsbuigproef gebogen om een buig-

bereikt. Dit treedt op als de scheur zover openstaat dat er een slijtscheur ontstaat, wat leidt tot geheel of gedeeltelijke breuk van het proefstuk. Er is dus sprake van een dualisme tussen een taai en een bros breukmechanisme. Uit de proef komt een kracht-verplaatsingsgrafiek die veel lijkt op een trekkromme (zie figuur 8).

In de testcyclus en de beoordeling wordt de scheuruitbreiding onder belasting bepaald door een relatie te leggen naar de CTOD. Door het openen van het proefstuk na de test (na koelen in vloeibaar stikstof) wordt het breukvlak zichtbaar voor beoordeling. In de beoordeling gaat het om het type scheuruitbreiding (taai/bros) en in welke mate.

De beproeving wordt in drievoud uitgevoerd voor een zo representatief mogelijk beeld. Om te zien of de vermoeiingsscheur op de juiste plaats zit, bij-



Figuur 7 - Uitvoering CTOD-test

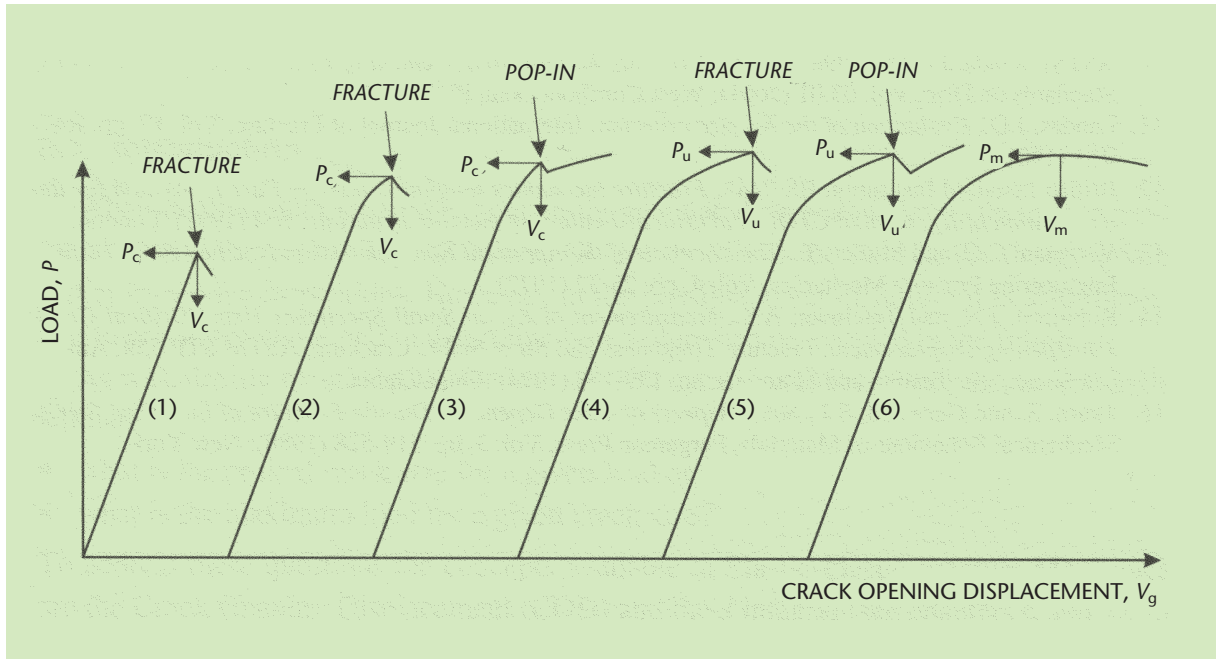
doorn, waarbij de kerf met vermoeiingsscheur wordt opengebogen.

De snelheid waarmee het proefstuk wordt belast benadert veel meer de werkelijkheid in vergelijking tot de kerfslagproef. Tijdens het buigen wordt gemeten hoe ver de kerf open gaat staan met een rekmeter (zie figuur 7). Dit is feitelijk de Crack Opening Displacement (COD), maar hieruit kan ook de verplaatsing (het openen) aan de scheurtip worden berekend. Het proefstuk kan op diverse lage temperaturen worden beproefd, bijvoorbeeld op de minimum ontwerptemperatuur. Om voldoende taaiheid van het materiaal aan te tonen, hanteert men vaak de vuistregel dat de CTOD-waarde tussen 0,1 en 0,2 millimeter moet liggen bij de minimale bedrijfstemperatuur. Tijdens de proef treedt rond de scheurtip plastische vervorming op totdat een kritisch punt is

voorbeeld in de warmtebeïnvloede zone, wordt de staaf na het frezen gepolijst en geëtsd voordat de kerf wordt aangebracht. Ook wordt na breuk gekeken of het scheurfront redelijk vlak is. Inwendige spanningen als gevolg van het lassen kunnen de oorzaak zijn van een onregelmatig scheurfront. Als dit te erg is, kan het proefstuk worden afgekeurd. Ook als de vermoeiingsscheur niet lang genoeg is, kan de proef ongeldig worden verklaard en moet deze worden herhaald. Helaas is het vervaardigen van de proefstukken een kostbare zaak.

Omdat de proefstukken voorzien zijn van een echte scheur en er beproefd wordt onder belastingsomstandigheden die representatief zijn voor de bedrijfsomstandigheden, is dit een waardevolle testmethode. Er zijn fitness-for-purpose analyses mogelijk waaruit de kritische defectgrootte berekend kan

Figuur 8 - Crack Opening Displacement als functie van de belasting. Situatie 1 geeft de curve voor een bros materiaal, situatie 5 voor een taai materiaal. Teruglopende belasting als de scheuropening toeneemt wordt een pop-in genoemd en is het gevolg van een kleine brosse scheuruitbreiding, waarna de scheur stopt in taaiër materiaal [Janssen et al.]



worden. Dit geeft een veel realistischere inschatting van kritische defectgrootten zodat falen van de constructie kan worden voorkomen. Voor in gebruik zijnde installaties is het mogelijk te beslissen of het verantwoord is beschadigde onderdelen te laten zitten of ze toch te vervangen of te repareren. Hiermee kan veel geld worden bespaard en vallen de hoge kosten van het onderzoek in het niet. CTOD-testen worden veel toegepast in de olie-, gas- en offshore-industrie. Dit zijn takken van industrie waar men te maken heeft met lage gebruikstemperaturen en een lange gegarandeerde levensduur van de constructies (zie ook Laskennis Opgefrist nr. 67, www.nil.nl).

Samengevat

Het gedrag van metalen bij lage temperaturen is zeer complex en absoluut niet in één artikel samen te vatten. Toch kunnen we samengevat zeggen dat:

- Ferritische staalsoorten zich bij lagere temperaturen bros gedragen.
- Het brosse karakter wordt bevorderd door een alzijdige spanningstoestand, een lage temperatuur en hogere reksnelheden.
- Er een constructierichtlijn is voor 50MPa, waaronder geen instabiele scheuruitbreiding plaats kan vinden (brosse breuk).
- Een kerfslagproef informatie geeft over het breukgedrag van materialen bij lage temperatuur (representatief voor dynamisch gedrag), maar dat de belasting niet overeenkomt met praktijksituaties.
- Een CTOD-proef de praktijksituatie benadert (representatief voor statisch gedrag) en informatie geeft over het gedrag van het materiaal met een

bepaalde defectgrootte. Het type belasting van de constructie bepaalt het type CTOD-test. ■

Literatuur

- Laskennis Opgefrist (nr. 62) Mechanische beproeving – De kerfslagproef – deel 1, www.nil.nl.
- Laskennis Opgefrist (nr. 67) Mechanische beproeving – CTOD-beproeving, www.nil.nl.
- F.J. ter Avest, Weerstand tegen brosse breuk van gelaste constructies, NIL-voorlichtingsdag, 3 november 1987.
- B.M. Korevaar en G. den Ouden, Metaalkunde, deel 2, DUM 1991.
- M. Janssen, J. Zuidema en R.J.H. Wanhill, Fracture Mechanics, VSSD, 2002.
- ASM Metals Handbook volume 8 – Mechanical Testing and Evaluation.

Gerri van Krieken is laspraktijkingenieur en sinds kort werkzaam als lastechnisch adviseur bij het Nederlands Instituut voor Lastetechniek. Marcel Hermans is docent aan de Technische Universiteit Delft, afdeling Technische Materiaalwetenschappen, sectie Joining and Mechanical Behaviour.