

Mechanische beproeving – CTOD beproeving

In een eerder gepubliceerde aflevering van Laskennis opgefrist (zie Lastechniek oktober 2005) is het concept van de breukmechanica geïntroduceerd aan de hand van de kerfslagproef. De kerfslagproef is een eenvoudige kwantitatieve proef waaruit alleen een indicatie van de taaiheid van een metaal wordt verkregen. In de volgende serie artikelen worden proeven beschreven waarmee de breuktaaiheid nauwkeurig op een kwantitatieve manier kan worden gemeten: de CTOD-beproeving.

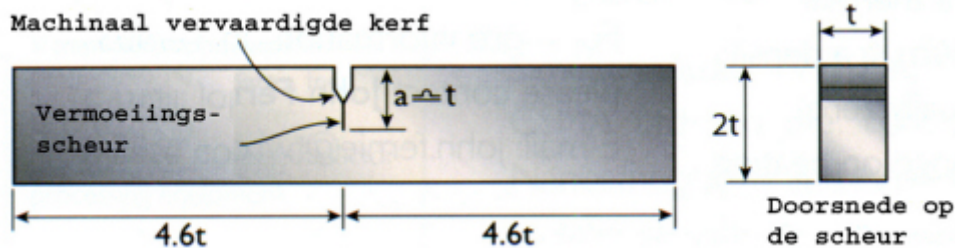
Engelse afkortingen

De CTOD-proef is een breukmechanische proef waarbij veelal de Engelse afkortingen worden gebruikt. Zo staat CTOD voor Crack Tip Opening Displacement. In het Nederlands: scheurtipopeningsverplaatsing. Om de scheurtipopening te meten, wordt een clip gauge toegepast. Een Nederlandse naam wordt voor dit meetinstrument niet gebruikt. Dit is ook het geval voor het zogenoemde pop-in effect, een korte instabiele scheurgroei tijdens de CTOD-proef.

In de CTOD-proeven wordt een proefstuk gebruikt waarvan de dikte gelijk is aan de dikte van het te onderzoeken materiaal (door de dikte proefstuk). Deze proefstukken zijn voorzien van een echte scheur en er wordt beproefd onder belastingsomstandigheden die representatief zijn voor de

bedrijfsomstandigheden. Hierdoor is een fitness-for-purpose analyse mogelijk waaruit de kritische defectgrootte berekend kan worden. Dus, voorafgaand aan de fabricage, kunnen realistische standaards worden gesteld en beslissingen worden genomen over geschikte NDO (Niet Destructief Onderzoek) -technieken en detectiegevoeligheid.

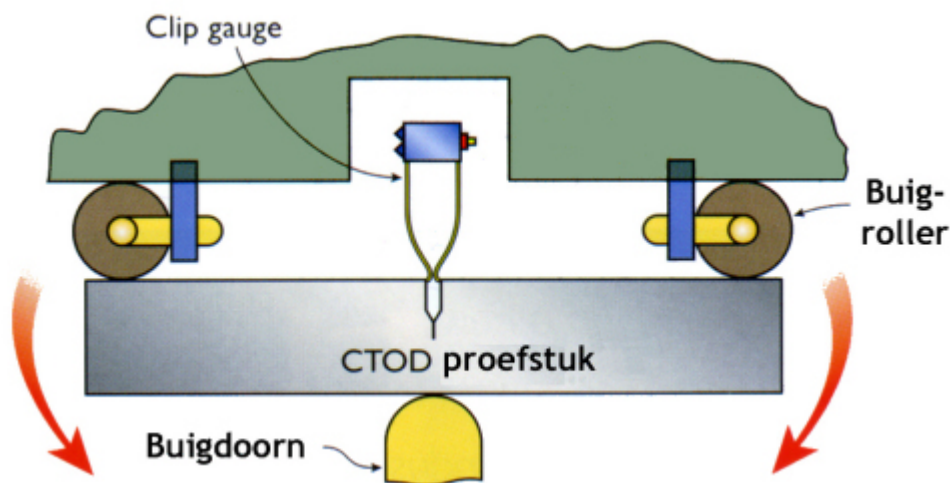
Voor reeds in gebruik zijnde apparatuur en constructies is het mogelijk om een beslissing te nemen of het verantwoord is een gescheurd of anderszins beschadigd onderdeel te gebruiken tot het tijdstip dat reparatie of vervanging mogelijk is. Een dergelijke technisch kritische benaderingsmethode kan een operator veel tijd en geld besparen: besparingen die kunnen oplopen tot honderden miljoenen Euro's als het gaat om de uitrusting van olieboorinstallaties. Hoewel de Crack Tip Opening Displacement (CTOD) proef ontwikkeld is voor het karakteriseren van metalen, wordt deze proef ook gebruikt voor het bepalen van de taaiheid van niet-metallische materialen zoals lasbare kunststoffen.



Figuur 1 - Buigproefstuk voor CTOD-metingen met een proportionele rechthoekige doorsnede.

CTOD-proefstuk

De CTOD-proef is één van de breuktaaiheidspoeven die gebruikt wordt als enige plastische deformatie voorafgaat aan catastrofale breuk. De scheurtip kan in deze proef uitrekken en de scheur kan open gaan staan, vandaar 'tip opening verplaatsing'. In tegenstelling tot de goedkope 10 x 10 mm Charpy-V kerfslagproefstukken met een stompe machinaal vervaardigde kerf, kan de dikte van het CTOD-proefstuk gelijk zijn aan de volle dikte van het materiaal. Daarbij is het CTOD-proefstuk voorzien van een echte scheur en wordt zodanig belast dat de snelheid van beproeven beter overeenstemt met de bedrijfscondities. Gewoonlijk worden drie proeven uitgevoerd op een van belang zijnde bedrijfstemperatuur. Drie proeven om een betrouwbaar en samenhangend resultaat te krijgen. Het proefstuk zelf is proportioneel, wat wil zeggen: de lengte, diepte en breedte van elk proefstuk zijn aan elkaar gerelateerd zodat, onafhankelijk van materiaaldikte, elk proefstuk gelijkvormige afmetingen heeft.



Figuur 2 - Kenmerkende proefopstelling. Het proefstuk kan gemakkelijk ondergedompeld worden in een bad met een lage temperatuur.

Basisvormen

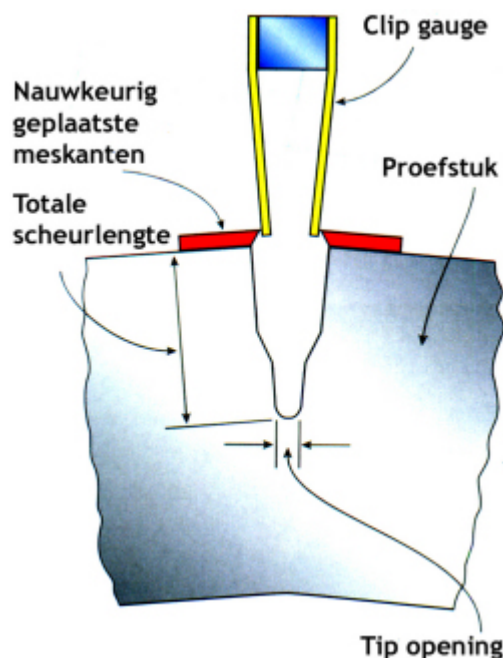
Er zijn twee basisvormen: een proefstuk met een vierkante of een rechthoekige doorsnede. Stel dat de dikte van het proefstuk gedefinieerd wordt als 'W', dan is de

diepte van het proefstuk gelijk aan $2W$ met een standaardlengte van $4,6W$. In het midden van het proefstuk wordt machinaal een kerf gemaakt. Die kerf wordt dan verlengd door aan het uiteinde een vermoeiingsscheur te introduceren zodat de totale defectgrootte gelijk wordt aan de helft van de diepte van het proefstuk, zie figuur 1. Een proef aan een 100 mm dikke lasverbinding zal daardoor een proefstuk met de volgende afmetingen vereisen: 100 mm breed, 200 mm diep en 460 mm lang. Dit maakt het vervaardigen van het proefstuk een kostbare operatie. De bruikbaarheid van deze dure proef blijkt bovendien pas nadat de proef is uitgevoerd.

De proef kan worden uitgevoerd door het proefstuk op driepuntsbuiging te belasten en door de mate van scheuropening op te meten. Dit laatste wordt gedaan met behulp van een rekmeter (strain gauge), die bevestigd is aan een klem (clip) die tussen twee nauwkeurig gepositioneerde meskanten wordt geklemd aan het begin van de scheur (scheurmond), zie figuur 2.

Bij voortgaande buiging zal plastische deformatie aan de scheurtip optreden totdat een kritisch punt is bereikt. Dit is het geval als de scheur voldoende open staat om een slijtscheur te laten ontstaan. Dit leidt tot gedeeltelijke of complete breuk van het proefstuk. De proef kan op verschillende temperaturen worden uitgevoerd, bijvoorbeeld de minimum ontwerptemperatuur of - meer zeldzaam - over een bepaald temperatuurtraject.

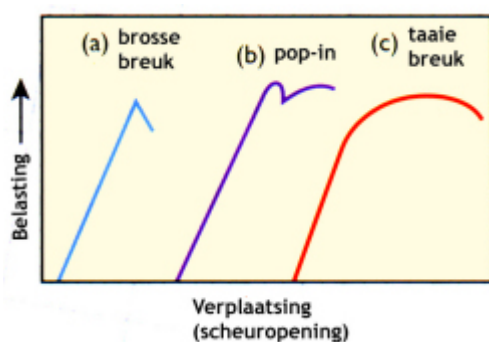
Als vuistregel geldt dat op de minimum bedrijfstemperatuur een CTOD-waarde tussen 0,1 en 0,2 mm nodig is om voldoende taaheid te demonstreren. De waarden die nodig zijn om de taaheid te kunnen berekenen, zijn allereerst de belasting waarop scheurvorming optreedt en ten tweede de mate waarin de scheur open is gaan staan op het punt van scheuruitbreiding, zie figuur 3.



Figuur 3 - Positie van het CTOD-proefstuk, onmiddellijk voorafgaande aan scheuruitbreiding.

Kracht-verplaatsingsgrafiek

Omdat de lengte van de scheur en de opening aan de scheurmond bekend zijn, is het een eenvoudig geometrisch rekensommetje om de scheurtipopening te berekenen. Tijdens de proef worden de kracht en de opening automatisch geregistreerd op een krachtverplaatsingsgrafiek. Een dergelijke grafiek is in een aantal opzichten vergelijkbaar met de trekkromme (zie figuur 3 in Laskennis Opgefrist van Lastechniek oktober 2005).



Figuur 4 - De belasting uitgedrukt tegen de scheuropeningsverplaatsing. Drie kenmerkende typen van scheurgedrag.

De CTOD-curve is een grafiek waarin kracht en rek tegen elkaar zijn uitgezet, zie figuur 4. In deze figuur worden de verschillende vormen van de curve die kunnen ontstaan schematisch weergegeven. (a) is een proef waarbij het proefstuk op een brosse manier is gebroken met geringe of geen plastische deformatie. (b) bezit een 'pop-in' waar een brosse scheur wordt geïnitieerd, maar die alleen

over een korte afstand voortschrijdt, waarna de scheur stopt in taaier materiaal. Dit kan verschillende malen optreden waardoor de curve een zaagtandvormig uiterlijk krijgt of na deze pop-in deformatie verder kan groeien op een taaie wijze zoals in (c), waarbij volledig plastisch gedrag wordt getoond.

Inspectie van scheuroppervlak

De locatie van de scheur, in de warmtebeïnvloede zone of in het basismateriaal, is belangrijk daar een onjuist gepositioneerde vermoeiingsscheur geen informatie oplevert over het gewenste gebied; er wordt geen geldige waarde verkregen. Om er zeker van te zijn dat de scheurtip zich in de juiste zone bevindt, wordt het oppervlak vaak gepolijst en geëetst en daarna geïnspecteerd met de lichtmicroscopie voordat de mechanische kerf wordt aangebracht en de vermoeiingsscheur wordt geïntroduceerd. Dit biedt de mogelijkheid de scheur heel nauwkeurig te positioneren. Deze inspectie kan na het beproeven opnieuw worden uitgevoerd als extra bevestiging van de geldigheid van de beproevingsresultaten. Als het proefstuk eenmaal is gebroken, wordt het breukvlak geïnspecteerd om er zeker van te zijn dat de vermoeiingsscheur een redelijk vlak scheurfront heeft, zie figuur 5. De inwendige spanningen die in een las aanwezig zijn, kunnen de oorzaak zijn van een onregelmatig scheurfront. Als deze onregelmatigheid van het scheurfront uitgesproken is, dan kan de proef ongeldig zijn. Om dit probleem te voorkomen, kan het proefstuk plaatselijk ter hoogte van de machinale kerf worden ingedrukt om een herverdeling van de inwendige spanningen te bewerkstelligen. Twee indrukkingen aan elke kant van het proefstuk zijn vaak te zien wanneer deze indrukking is uitgevoerd. Om een vermoeiingsscheur te introduceren, moet een klein spanningsinterval worden toegepast. Het toepassen van hoge spanningen om de vorming van een vermoeiingsscheur te bespoedigen, kunnen voor de vermoeiingsscheur een groot plastisch vervormd gebied geven en dit maakt de



Figuur 4 - Breukvlak van een CTOD-buigproefstuk. De machinaal vervaardigde kerf bevindt zich aan de onderkant. Het einde van de vermoeiingsscheur (lichter deel) is niet recht, maar enigzins gebogen.

resultaten van de proef ongeldig. Andere oorzaken van het falen van beproevingen kunnen helaas alleen worden vastgesteld als de proef is uitgevoerd en het scheuroppervlak is geïnspecteerd. De exacte lengte van de vermoeiingsscheur wordt opgemeten - dit is nodig voor de analyse - maar als de lengte van de scheur niet binnen de door de specificatie gestelde waarden valt, is de proef ongeldig. Als de vermoeiingsscheur niet in één vlak ligt, als de scheur een hoek maakt met de machinaal vervaardigde kerf of als de scheur zich niet in het juiste gebied bevindt, dan moet de proef worden herhaald.

| Relevante normen | |
|--------------------|--|
| BS 7448 Deel 1 - 4 | Fracture Toughness Tests |
| BS 6729 | Determination of the Dynamic Fracture Toughness of Metallic Materials. |
| BS 7910 | Guide on Methods for Assessing the Acceptability of Flaws in Metallic Structures |
| ASTM E1820 | Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness. |
| EN ISO 15653 | Bepaling quasistatische breuktaaiheid |

Deze aflevering in de rubriek 'Laskennis opgefrist' is een bewerking van 'Job Knowledge for welders Part 76' uit TWI Connect door Theo Luijendijk, geactualiseerd eind 2008.

Inlichtingen

Nederlands Instituut voor Lastechniek
 Boerhaavelaan 40
 2713 HX Zoetermeer
 Website: www.nil.nl
 e-mail: info@nil.nl

Informatie en advies van het NIL wordt verstrekt in goed vertrouwen en is gebaseerd op de huidige stand der technische kennis. Er kan geen garantie verleend worden aan de resultaten of effecten door toepassing van de informatie van deze website. Ook kan er geen verantwoordelijkheid of aansprakelijkheid geaccepteerd worden voor iedere vorm van verlies of schade.