



Waardoor falen metalen constructies?

VERMOEIINGSSCHADE BEHOORT TOT DE MEEST VOORKOMENDE SCHADE IN DE PRAKTIJK VAN HET SCHADEONDERZOEK. IN DE MEESTE GEVALLEN MOET GECONCLUDEERD WORDEN DAT DE SCHADE NIET HAD HOEVEN OPTREDEN INDIEN BIJ HET ONTWERP HET PROBLEEM AL ONDERKEND ZOU ZIJN.

Afdeling schadeonderzoek, Element Materials Technology, Amsterdam

ES oms treedt vermoeiingsschade op in constructies waarbij dat minder voor de hand ligt, maar meestal blijkt uit onderzoek dat vermoeiingsschade voorkomen had kunnen worden. In dit artikel wordt getracht om ontwerpers te wijzen op mogelijke valkuilen. Hoewel er geen nieuwe zaken aan de orde zullen komen, is een opfrissing van wellicht al weggezakte kennis nooit weg. Verder gaat dit artikel in op meer recente benaderingswijzen van het fenomeen vermoeiing.

Soorten vermoeiing

Vermoeiing is een vorm van schade waarbij een onderdeel beschadigd wordt (en vaak ook bezwijkt) door het ondergaan van een aantal belastingwisselingen. Belasting en spanning worden vaak door elkaar gebruikt, omdat het moeilijk is om iedere keer de meest juiste term te kiezen. In dit artikel verstaan we onder 'belasting' de krachten die op (een onderdeel van) een constructie uitgeoefend worden. De meest bekende vorm van vermoeiing is de klassieke 'high cycle fatigue'. Bij deze vorm van vermoeiing treedt schade op als gevolg van een groot aantal (honderdduizenden en meer) spanningswisselingen met een relatief lage spanningsamplitude. Dit soort vermoeiing treedt op in dynamisch belaste constructies: vliegtuigonderdelen, motoren, bruggen, turbines enzovoort. Kenmerkend voor dit type vermoeiing is, dat de amplitude van de spanningen over het algemeen duidelijk beneden de vloeigrens van het betreffende materiaal ligt, dat wil zeggen beneden de spanning die nodig is om het materiaal plastisch (blijvend) te vervormen.

Naast klassieke vermoeiing komt ook de minder bekende 'low cycle fatigue' voor. Hoewel de term als zodanig min-

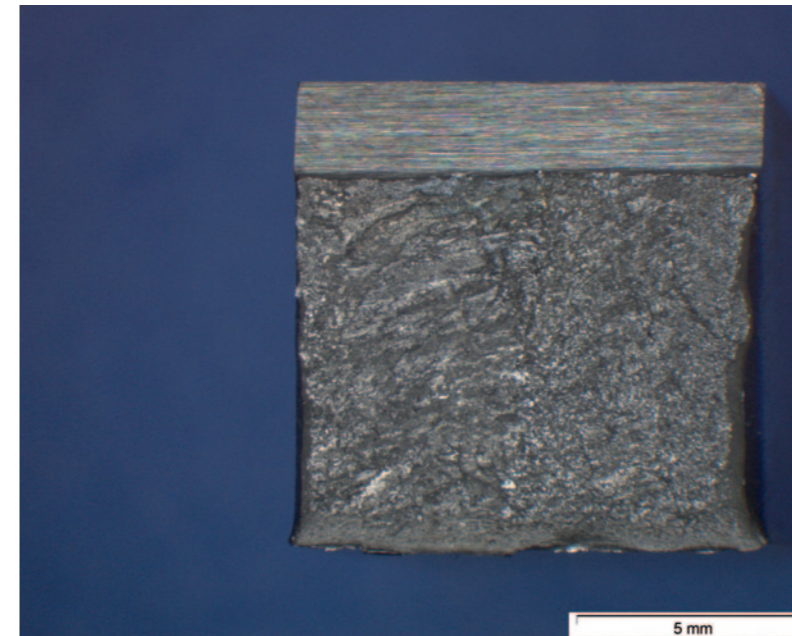
der bekend is, kent iedereen het fenomeen van een paperclip die door herhaald heen en weer buigen uiteindelijk breekt. Kenmerkend voor dit type vermoeiing is dat breuk optreedt na een relatief gering aantal spanningswisselingen met een relatief hoge amplitude (de spanningen liggen vrijwel altijd boven de vloeigrens). De grens tussen low cycle en high cycle fatigue is min of meer vloeïend. Indien schade optreedt na 1000 à 10.000 belastingwisselingen of minder, spreken we meestal van low cycle fatigue. Daarboven spreken we van high cycle fatigue.

Vermoeiing en breuk

Tot welke lengte (of diepte) een scheur in een onderdeel van constructie kan groeien voordat breuk optreedt, is niet alleen afhankelijk van de sterkte van het betreffende materiaal en de hoogte van de belastingen, maar ook van de breuktaaiheid. Breuktaaiheid is een vrij complex begrip. In het kader van dit artikel is het voldoende om een vergelijking te maken tussen bros (instabiel) en taai gedrag.

Bros en taai gedrag

Een metaal vertoont bros (instabiel) gedrag indien breuk plaatsvindt zonder (of met weinig) voorafgaande deformatie en met geringe energieabsorptie. Bij dergelijke breuken kunnen scheurgroeisnelheden optreden van 2000 m/sec. Aan een breuk in een materiaal met taai (ductiel) gedrag daarentegen, gaat een zekere mate van plastische deformatie vooraf aan het uiteindelijk breken, waarvoor ook een zekere hoeveelheid energie beschikbaar moet zijn. Bij een metaal met bros gedrag zal de aanwezigheid van een klein scheurtje of defect al voldoende zijn om bij een belastingwisseling met een relatief kleine amplitude instabi-



Afb. 1: Overwegend bros gebroken kerfslagstaaf.



Afb. 2: Taai gebroken kerfslagstaaf met aanzienlijke vervorming.

biele scheurgroei te veroorzaken, dat wil zeggen scheurgroei die, eenmaal in gang gezet, niet meer zal stoppen. Bij een taai materiaal echter zal zelfs een relatief grote scheur, onder invloed van een belastingwisseling met een relatief grote amplitude, slechts een klein stapje verder scheuren. Bij veel metalen, onder andere de meeste constructiestaalsoorten, is het breukgedrag afhankelijk van de temperatuur. Boven een zekere temperatuur (meestal een temperatuurgebied) gedraagt het metaal zich taai, onder die zogenaamde overgangstemperatuur gedraagt het zich bros.

Lek voor breuk

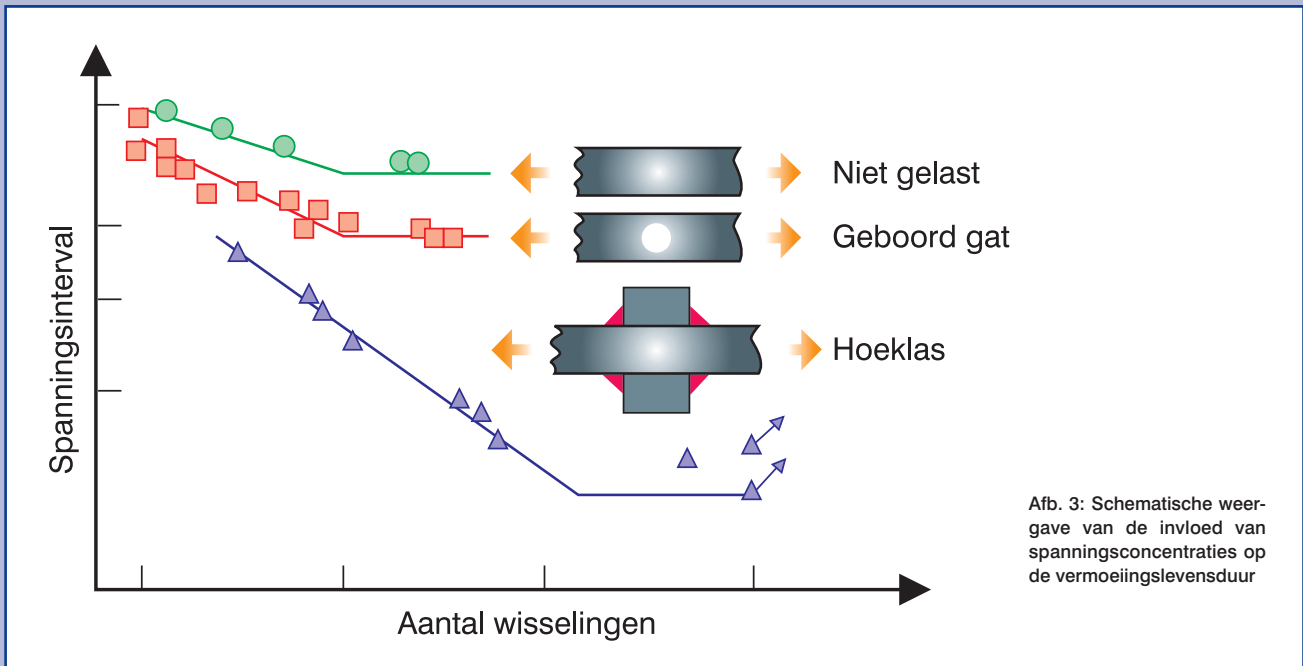
Om veiligheidsredenen is het gewenst dat een metaal zich ductiel (taai) gedraagt. Wanneer een scheur in een onderdeel onder invloed van wisselende belasting ductiel verder groeit, is de kans groter dat hij bij een tussentijdse inspectie gedetecteerd wordt, vóórdat de component faalt. In het geval van een drukvat bijvoorbeeld, kan een scheur gedetecteerd worden doordat er lekkage optreedt, dus voordat het vat bezwijkt. Voor bepaalde soorten drukvaten wordt dit 'lek-voor-breukcriterium' gehanteerd. Dit criterium stelt (eenvoudig geformuleerd) dat het ontwerp en de fabricage van zo'n drukvat zodanig beheerst moeten worden uitgevoerd, dat een vermoeiingsscheur die zich ontwikkelt in de diepterichting moet kunnen groeien en lekkage veroorzaken, zonder dat de daarbij behorende scheurlengte de kritische scheurlengte overschrijdt. (De diepte en de lengte van een scheur zijn geometrisch aan

elkaar gekoppeld.) Bij andersoortige constructies (bijvoorbeeld vliegtuigen) wordt uitgegaan van een (tijdens periodiek onderhoud) gemeten scheurlengte en de vooraf bepaalde scheurgroeisnelheden.

Submicroscopisch niveau

Schade door high cycle fatigue treedt op bij wisselende spanningen met een amplitude die lager is dan de vloeigrens. Er moet dus een mechanisme optreden dat schade veroorzaakt, hoewel het spanningsniveau zo laag is dat het onderdeel, op macroscopisch niveau, niet (direct) vervormt of bezwijkt. Dat mechanisme bestaat uit de vorming van intrusies en extrusies. Dit is een vorm van plastische deformatie op microschaal. Onder invloed van wisselende spanningen treedt lokaal, op submicroscopisch niveau, plastische deformatie op, als gevolg van afschuiving op glijvlakken in het metaalrooster. Met een toenemend aantal belastingwisselingen groeit deze embryonale vorm van schade uit tot een vermoeiingsscheurtje. Dit vermoeiingsscheurtje groeit met een verder toenemend aantal wisselingen uit tot een macroscheur, waarna het onderdeel waarin de scheur aanwezig is bezwijkt.

De embryonale fase van vermoeiingsschade neemt vaak de meeste tijd van de totale levensduur van het falende onderdeel in beslag. Naarmate het vermoeiingsscheurtje een grotere lengte krijgt, neemt per belastingwisseling de daarmee gepaarde gaande scheurgroei toe. In de laatste fase treedt breuk vaak op als gevolg van slechts enkele extra belastingwisselingen.



Invloedsfactoren bij high cycle fatigue

Of vermoeiing geïnitieerd wordt, en met welke snelheid de eenmaal geïnitieerde scheur verder groeit, is afhankelijk van een aantal factoren.

De hoogte van de belastingen

Naarmate de hoogte van de belastingen toeneemt, neemt de kans op het initiëren van een vermoeiingsscheur toe. Als de belastingen op het onderdeel zowel een statische als een dynamische component hebben, heeft de grootte van de amplitude van de wisselende component verreweg de grootste invloed.

De frequentie van de belastingwisselingen

Het optreden van kortstondige overbelastingen

De vermoeiingssterkte van het materiaal

De vermoeiingssterkte is de weerstand die een materiaal biedt tegen het initiëren en groeien van een vermoeiingsscheurtje. De vermoeiingssterkte van een materiaal wordt experimenteel vastgesteld door proefstaven te belasten met variërende grootte van de belasting, tot breuk optreedt. Als men de toegepaste belasting (de spanningsamplitude) uitzet tegen het aantal belastingcycli waarbij breuk optreedt, verkrijgt men bij veel staalsoorten een zogenaamde Wöhlerkromme, ook wel S-N curve genoemd. Uit deze grafiek blijkt dat er een belasting (spanningsamplitude) is, waarbij geen breuk op zal treden, ook al zou het aantal cycli oneindig groot zijn. De spanningsamplitude waar beneden geen vermoeiing optreedt, wordt de vermoeiingssterkte van het betreffende materiaal genoemd.

De aanwezigheid van spanningsconcentraties

Vermoeiingsscheuren initiëren meestal op plaatsen waar lokaal hogere spanningen optreden dan de nominale spanning. De meest bekende factoren die lo-

kaal hogere spanningen kunnen veroorzaken zijn: abrupte overgangen in de geometrie van een onderdeel, zoals gaten, spiebanen, dun - dikovergangen en de las. De las heeft vaak gezien vanuit vermoeiingsoogpunt een ongunstige vorm en bevat soms onvolkomenheden die de kerfwerking bevorderen. Tevens zijn in en rond de las vaak spanningsconcentraties als gevolg van krimp aanwezig. Ook in de voet van de schroefdraad op bevestigingselementen treden lokaal veel hogere spanningen op dan berekend zouden worden op basis van belasting en kerndiameter. Het effect van zulke 'stress raisers' kan uitgedrukt worden als de kerffactor. Deze geeft aan hoeveel de lokale spanningen hoger zijn dan de nominale spanningen. Naast deze geometrische stress raisers zijn er ook stress raisers van andere aard, bijvoorbeeld oxidische insluitingen in het materiaal. Ook de oppervlakteruwheid van een wisselend belast onderdeel kan een forse invloed hebben op de hoogte van de toelaatbare spanningen.

Het gelijktijdig optreden van corrosie

Een extra kritische situatie ontstaat indien een onderdeel onderhevig is aan dynamische belastingen en tegelijkertijd opereert in een corrosieve omgeving. Die corrosieve omgeving hoeft overigens niet van chemische aard te zijn. Ook 'gewone' omgevingscondities (bijvoorbeeld de lucht in een maritieme omgeving) kunnen tot gevolg hebben dat de vermoeiingssterkte drastisch verlaagd wordt. De corrosieve belasting kan enerzijds een snellere vermoeiingsscheurinitiatie veroorzaken. Anderzijds kan ook de snelheid van de corrosieve aantasting vergroot worden, doordat bij het groeien van een vermoeiingsscheur steeds 'vers' materiaal blootgelegd wordt.