

8

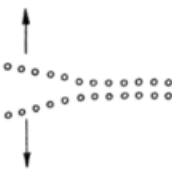
Brosse breuk

8.1. Algemene beschrijving van het verschijnsel

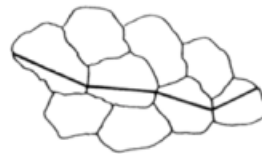
In paragraaf 3.7 werd de vervormingsbreuk besproken. Deze breuk ontstaat door holtevorming en holtegroei en is een gevolg van afschuiving. Plastische deformatie is dus essentieel voor dit type breuk.

Bij brosse breuk speelt plastische deformatie geen of nauwelijks een rol. De breuk ontstaat doordat twee roostervlakken elkaar eenvoudig loslaten, zoals is aangegeven in figuur 8.1. Omdat er sprake is van splijting langs roostervlakken wordt brosse breuk soms ook aangeduid als splijtbreuk. Splijting vindt plaats als de (trek)kracht hoger wordt dan de bindingskrachten tussen de atoomlagen. Splijtbreuk is dus een gevolg van trekspanningen en niet van schuifspanningen. De splijting verloopt in het algemeen langs de roostervlakken met de zwakste binding. IJzer splijt bijvoorbeeld langs de kubusvlakken. Het breukvlak door een bepaalde korrel is daardoor nagenoeg vlak.

Daar de verschillende korrels verschillende kristallografische oriëntaties hebben, zal de breuk bij een korrelgrens van richting veranderen, zoals wordt geïllustreerd in figuur 8.2. Het gevolg hiervan is dat het breukvlak bestaat uit vele kleine (vlakke) facetjes, die glinsterend reflecteren (figuur 8.3).



Figuur 8.1. Splijting langs roostervlakken.

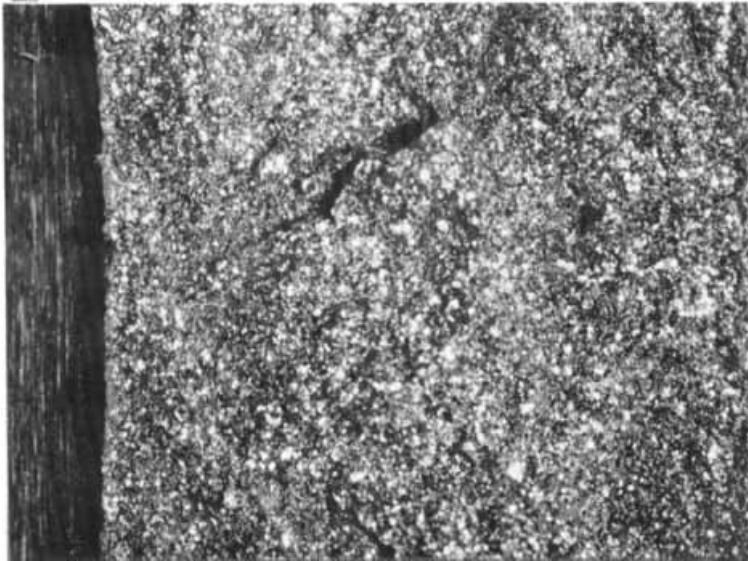


Figuur 8.2. Verloop van de splijtbreuk door een conglomeraat van korrels.

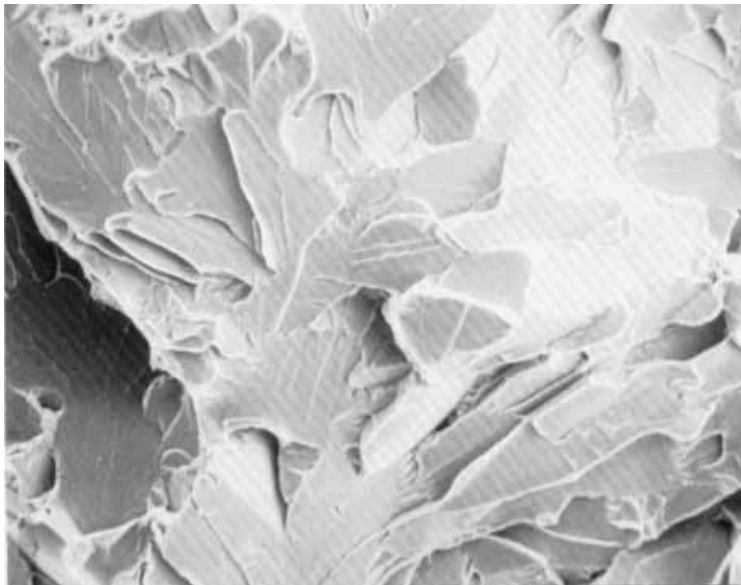
Op microschaal zijn de facetjes (splijtvlakken) nog beter zichtbaar, zoals blijkt uit figuur 8.4.

Brosse (splijt)breuk komt voornamelijk voor bij kubisch ruimtelijk gecenterde en bij hexagonaal dichtst gepakte metalen. Bekend is het optreden van brosse breuk in een aantal Liberty-schepen die tijdens de Tweede Wereldoorlog in de Verenigde Staten werden gebouwd. Van de in totaal 2500 gebouwde schepen braken er 145 zonder

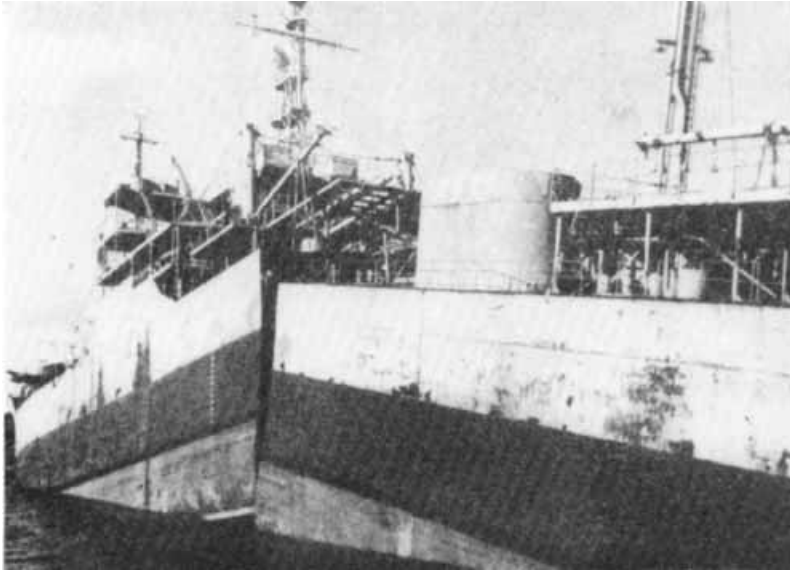
(toen) aanwijsbare oorzaak in tweeën (zie figuur 8.5), terwijl in 700 andere partiële breuken optraden.



Figuur 8.3. Splijtbreuk in ongelegeerd constructiestaal (10×).



Figuur 8.4. Splijtbreuk in ongelegeerd constructiestaal (600×).



Figuur 8.5. Brosse breuk van een Liberty schip.

8.2. Invloedsfactoren

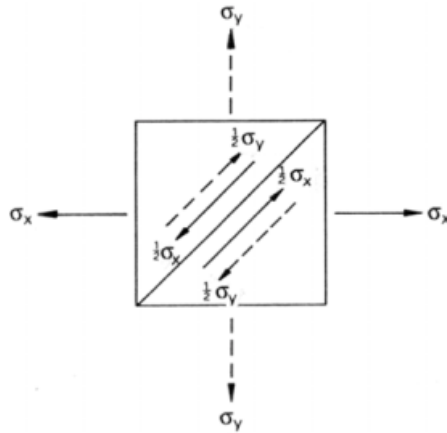
De neiging tot bros breken hangt af van verschillende omstandigheden. Algemeen kan worden gesteld dat de kans op brosse breuk toeneemt naarmate de mogelijkheid van plastische deformatie kleiner wordt. Gebleken is dat de volgende factoren, in volgorde van afnemende invloed, het optreden van brosse breuk bevorderen:

- a. een meer-assige spanningstoestand;
- b. een lage temperatuur;
- c. een grote vervormingssnelheid.

a. De belangrijkste beperking van plastische deformatie treedt op als gevolg van de aanwezigheid van een meer-assige spanningstoestand.

Voor het geval van de twee-assige spanningstoestand is dit gemakkelijk in te zien aan de hand van figuur 8.6. Op het in deze figuur aangegeven blokje werkt in de x -richting de trekspanning σ_x . Deze trekspanning levert een maximale schuifspanning ter grootte van $\frac{1}{2} \sigma_x$ in de aangegeven diagonale richting (onder 45°). Vervolgens wordt in de y -richting een trekspanning σ_y aangelegd, waardoor de spanningstoestand twee-assig wordt. Deze trekspanning levert op overeenkomstige wijze langs dezelfde diagonaal een schuifspanning ter grootte van $-\frac{1}{2} \sigma_y$. De totale schuifspanning wordt dan

$$\tau_t = \frac{1}{2} \sigma_x - \frac{1}{2} \sigma_y \quad (8.1)$$

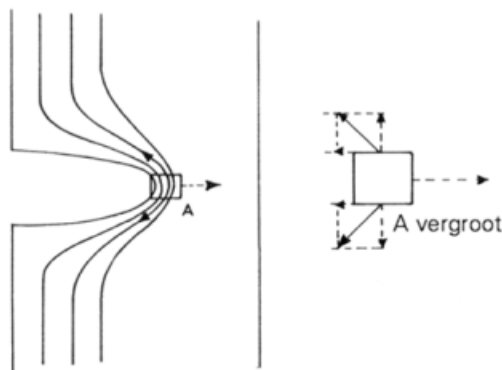


Figuur 8.6. Twee-assige spanningstoestand.

Door het toevoegen van σ_y aan σ_x wordt de totale schuifspanning dus verkleind. Voor $\sigma_x = \sigma_y$ wordt τ_t zelfs gelijk aan nul. Dit betekent dat bij twee-assige belasting de (trek)spanning veel groter kan worden dan de rekgrens zonder dat plastische deformatie optreedt. Wanneer nu de (trek)spanning groter wordt dan de 'slijtsterkte' zal brosse breuk optreden.

Bovenstaande conclusie heeft betrekking op de twee-assige belasting, maar blijkt in zijn algemeenheid ook te gelden voor de drie-assige spanningstoestand.

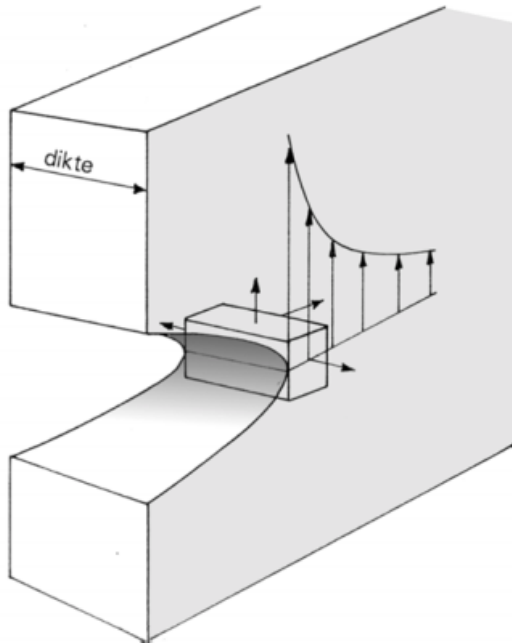
De meer-assige spanningstoestand doet zich in het bijzonder voor in de buurt van een kerf. In figuur 8.7 is schematisch aangegeven hoe de 'spanningslijnen' zich rond een kerf buigen. Er wordt als het ware scheef getrokken aan een blokje materiaal juist achter de kerfvoet. Daar het blokje ten opzichte van zijn omgeving niet kan bewegen moet er ook een horizontale kracht op werken. De spanning in het blokje is dus op zijn minst twee-assig.



Figuur 8.7. Twee-assige spanningstoestand in de buurt van een kerf.

Ten gevolge van de dwarscontractie zal het blokje in de dikterichting van de plaat

willen samentrekken. Er heerst bij de kerf echter een spanningsconcentratie (zie paragraaf 7.5), die een verloop heeft zoals is aangegeven in figuur 8.8. Het naastgelegen blokje heeft al een veel lagere spanning. Het wil nog wel samentrekken in dwarsrichting maar veel minder. Het desbetreffende blokje zal daarom het eerste blokje in zijn samentrekken verhinderen en oefent daardoor een trekkracht uit in dikterichting op het eerste blokje. De spanning is dus drie-assig. Hoe dikker de plaat, hoe sterker de verandering van de dwarscontractie en hoe groter de spanning in de dikterichting.



Figuur 8.8. Drie-assige spanningstoestand in de buurt van een kerf.

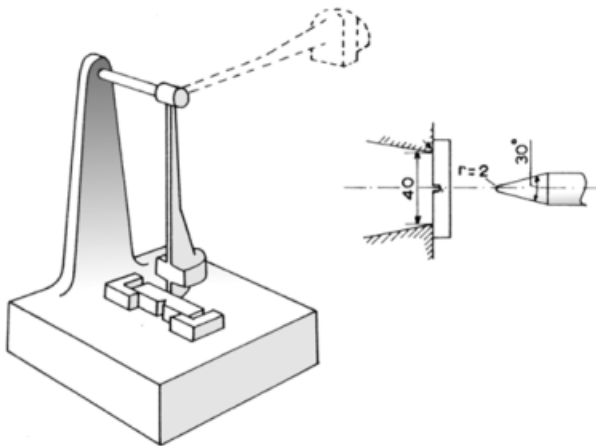
b/c. Dat een lage temperatuur en een grote vervormingssnelheid het optreden van brosse breuk bevorderen wordt direct duidelijk als men bedenkt dat beide factoren de rekgrens verhogen (zie de paragrafen 3.10 en 3.11) en daarmee de kans op plastische deformatie verkleinen.

8.3. De kerfslagproef

Het voorgaande maakt duidelijk hoe de neiging van een staalsoort tot brosse (slijt)-breuk dient te worden onderzocht: men zal een gekerfd proefstuk moeten gebruiken, beproeving bij lage temperatuur moet mogelijk zijn, en de vervormingssnelheid moet groot zijn. Er bestaan veel beproevingsmethoden, die geheel of gedeeltelijk en op verschillende manieren aan deze eisen voldoen. De bekendste hiervan is de zogenaamde kerfslagproef. Hierbij wordt de arbeid bepaald die wordt verbruikt bij het

met één slag breken van een ingekerfde proefstaaf. Deze slagarbeid (in Nm) gedeeld door de oppervlakte van de kleinste doorsnede van de proefstaaf (in cm^2) geeft de kerfslagwaarde. De verkregen waarden zijn onder andere afhankelijk van de aard van het gebruikte apparaat en van de vorm en afmetingen van de proefstaaf.

Het meest gebruikt wordt de slingerhamer van Charpy, waarbij de proefstaaf, die tegen twee aanslagen rust, in het midden wordt geraakt door een om een horizontale as slingerende hamer (figuur 8.9). De slagarbeid wordt berekend als het verschil in arbeidsvermogen van de hamer vóór de slag (bepaald door de valhoogte) en ná de slag (bepaald door de opzwaaihoogte). Deze hoogten worden gegeven door de hoek die de slinger in beide standen maakt met de natuurlijke laagste stand. De gevonden slagarbeid wijkt af van de voor het breken van de staaf gebruikte arbeid, omdat er arbeid verloren gaat door het wegslingeren van de stukken, de vervorming van het apparaat en door wrijving. Een gedeelte van deze verliezen kan worden gecompenseerd door niet met de valhoogte, maar met de opzwaaihoogte van de vrij slingerende hamer te rekenen.

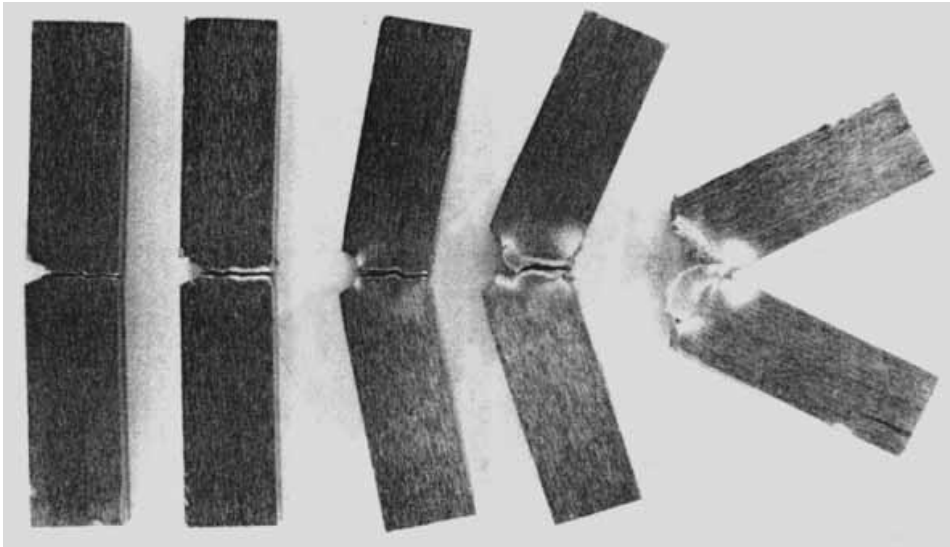


Figuur 8.9. De kerfslagproef volgens Charpy.

De vorm van de proefstaaf heeft grote invloed op het resultaat. Daarom moet deze worden voorgeschreven. Het in Nederland gebruikte normblad is Euronorm 7-55. Genormaliseerd zijn proefstaven van $55 \times 10 \times 10$ mm met een 5 mm diepe kerf en een afrondingsstraal van 1 mm of een V-vormige kerf met een diepte van 2 mm en een afrondingsstraal van 0,25 mm. Voor proeven bij lage temperatuur moet koelvloeistof beschikbaar zijn. De proefstaaf wordt in het bad met koelvloeistof gelegd en neemt daar de juiste temperatuur aan. Dan wordt hij met een tang uit het bad gehaald en in positie gelegd, om direct te worden geslagen. Bij enige routine zijn hiervoor slechts enkele seconden nodig, zodat aangenomen mag worden dat de temperatuur van de staaf op het moment van de slag nog gelijk is aan die van het bad.

Als het proefstuk bros breekt (splijting) vertoont het een vlak glinsterend breukvlak.

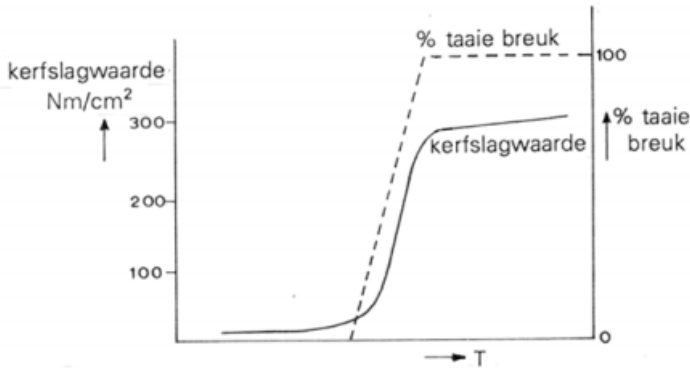
Bij het tegen elkaar passen van de helften blijkt dat de breuk zonder deformatie is ontstaan (figuur 8.10). Als het staafje taai breekt, is het breukvlak onregelmatig en fluweelachtig. Bij het tegen elkaar passen van de stukken blijkt dat een sterke plastische deformatie aan de breuk is voorafgegaan. Soms is de staaf niet geheel gebroken, maar zover gebogen dat hij tussen de steunen is doorgetrokken. In een enkel geval wordt de hamer zelfs geheel afgeremd. Dikwijls vertoont het breukvlak gedeeltelijk de kenmerken van een taaie, gedeeltelijk die van een brosse breuk. Het bij de kerf aansluitende gedeelte van het breukvlak is in dat geval glinsterend, de rest dof. Vaak wordt het (geschatte) percentage taaie breuk bij de proefresultaten vermeld.



Figuur 8.10. Gebroken kerfslagstaven.

De kerfslagwaarde van ongelegeerde en laaggelegeerde constructiestaalsoorten vertoont een sprongsgewijs verloop met de temperatuur (figuur 8.11). Dit verloop is kenmerkend voor kubisch ruimtelijk gecenterde metalen. Bij lage temperaturen is de kerfslagwaarde klein (brosse breuk). Boven de zogenaamde overgangstemperatuur worden hoge kerfslagwaarden bereikt (taai breuk). In het overgangsgebied is de spreiding van de proefresultaten erg groot. Bij een scherpere kerf verplaatst het overgangsgebied zich naar hogere temperatuur.

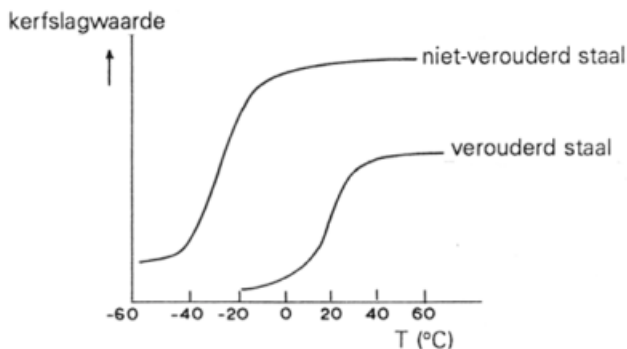
Men kan zich afvragen welke eisen aan een staalsoort gesteld moeten worden opdat een veilige constructie gewaarborgd is. Dit is in veel gevallen (nog) niet duidelijk. Voor scheepsplaat tot 25 mm dikte is er echter een redelijke correlatie gevonden tussen de kerfslagwaarde en het risico voor brosse breuk: als de spanning in de constructie lager is dan de helft van de vloeigrens, dan is de kans op brosse breuk zeer gering als de kerfslagwaarde bij de laagste gebruikstemperatuur tenminste 35 Nm/cm² is.



Figuur 8.11. De kerfslagwaarde van ongelegeerd staal als functie van de temperatuur.

Wanneer de gebruikstemperatuur niet lager is dan ongeveer $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ kan in het algemeen door bepaalde eenvoudige maatregelen tijdens de staalfabricage aan de gestelde eis worden voldaan. Er moet gezorgd worden voor een voldoende hoog mangaangehalte, een goede desoxydatie, weinig slakinsluitels en een fijne korrel. Bij lagere gebruikstemperaturen zal een ongelegeerd constructiestaal al gauw niet meer voldoen. Dan kan een keuze gemaakt worden uit de voor dergelijke toepassingen speciaal ontwikkelde nikkelstaalsoorten.

De kerfslagproef vindt een bijzondere toepassing in het onderzoek naar de gevoeligheid van staal voor veroudering. Door veroudering nemen in de loop der tijd de hardheid en de vloeigrens toe, de breekrek en de insnoering af. Het spreekt dan vanzelf dat de kerfslagwaarde ook afneemt. Veroudering kan ook kunstmatig worden teweeggebracht door 10% deformatie en een uur gloeien op $200\text{ }^{\circ}\text{C}$. De kerfslagwaarde wordt gemeten vóór en ná deze behandeling (zie figuur 8.12). De verschuiving van de kerfslagkromme is een maat voor de veroudering die het materiaal heeft ondergaan.

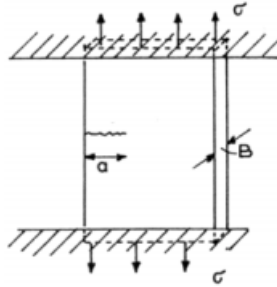


Figuur 8.12. Invloed van veroudering op de kerfslagkromme van staal.

8.4. De scheurweerstand

De in het voorgaande besproken brosse (spleijt)breuk moet niet worden verward met de laagspanningsbreuk die direct samenhangt met de aanwezigheid van scheurtjes en vooral in hoogwaardige constructiematerialen kan optreden. Deze laagspanningsbreuk is volkomen taai op microschaal; alleen macroscopisch gezien is er weinig plastische deformatie.

Beschouw een op trek belaste plaat van dikte B waarin zich een scheur van lengte a bevindt (figuur 8.13). De trekspanning wordt opgevoerd tot σ en daarna worden de einden van de plaat stevig ingeklemd, zodat verder verplaatsing van de randen niet mogelijk is. Uitbreiding van de scheur kan nu plaatsvinden als er ten gevolge van scheurgroei zoveel energie zou vrijkomen als nodig is om het nieuwe stukje scheur te vormen.



Figuur 8.13. Ingeklemdde plaat met scheur.

Als de scheur zich over een stukje Δa zou uitbreiden, dan wordt de plaat slapper. Er zal dus minder kracht nodig zijn om de einden van de plaat op hun plaats te houden. Dit betekent dat de spanning, en daarmee de opgeslagen elastische energie, daalt. Er komt dus inderdaad energie beschikbaar. De hoeveelheid elastische energie ΔU die vrijkomt is gelijk aan

$$\Delta U = \frac{\sigma^2}{2E} 2\pi a B \Delta a = \frac{\pi \sigma^2 a}{E} B \Delta a \quad (8.2)$$

Er is ook energie nodig voor scheurgroei: het materiaal moet (hoe weinig ook) plastisch deformeren en er wordt nieuw oppervlak gevormd. Stel de benodigde energie per eenheid van scheuroppervlak is gelijk aan G_{Ic} . Voor een scheuruitbreiding Δa is dan nodig:

$$\Delta W = G_{Ic} B \Delta a \quad (8.3)$$

Scheurgroei kan optreden als ΔU gelijk wordt aan ΔW . Gelijktelling van de vergelijkingen (8.2) en (8.3) geeft dan de conditie voor scheuruitbreiding:

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{EG_{Ic}}{\pi a_c}}. \quad (8.4)$$

Voor $\sqrt{EG_{Ic}}$ wordt meestal geschreven K_{Ic} , de scheurweerstand (fracture toughness), waaruit volgt

$$\sigma_c = \frac{K_{Ic}}{\sqrt{\pi a_c}} \quad (8.5)$$

Als aan vergelijking (8.5) wordt voldaan, zal de scheur niet alleen *kunnen* groeien, maar ook *blijven* groeien: er treedt (laagspannings)breuk op. De spanning waarbij dit gebeurt (de kritische breukspanning) is σ_c , de bijbehorende kritische scheurlengte is a_c .

De waarde van K_{Ic} kan worden verkregen door een proefstuk met een scheur van bekende lengte te belasten tot breuk en de bijbehorende waarde van σ_c te bepalen. Is de waarde van K_{Ic} bekend, dan kan daaruit voor elke scheurlengte de kritische breukspanning worden berekend met behulp van vergelijking (8.5). Omgekeerd kan ook de toelaatbare scheurlengte bij een bepaalde spanning worden bepaald.

De voorgaande beschouwing is gebaseerd op een berekening van de beschikbare elastische energie. Dit is echter alleen juist als er zeer weinig plastische deformatie optreedt. De toepassing van vergelijking (8.5) is daarom beperkt tot 'echte laagspanningsbreuk', dat wil zeggen tot materialen met een relatief lage K_{Ic} . Voor hogere waarden van K_{Ic} moet plastische deformatie in de berekening worden meegenomen. Deze situatie blijft hier buiten beschouwing.

Opgaven

- 8.1. Welke omstandigheden bevorderen brosse breuk?
- 8.2. Schets de kerfslagkromme van
 - aluminium;
 - niet-verouderd constructiestaal;
 - verouderd constructiestaal.
- 8.3. Wat is het kenmerkende verschil tussen vervormingsbreuk en brosse breuk? Hoe manifesteert zich dit verschil in het breukvlak?