



Onderbouwing Schade-onderzoek

Technieken voor schade-analyse en fractografie

Rapport van deelproject V, fase II

Breukvlakken en Breukmechanismen van metalen

contactgroep Fractografie

augustus 1992

Echt Schrijven

Titelpag. Titelblok te massaal → een ruwe krij van (leest leesbare!) hoofdletters.
1 of 2 witregels doen wonderen.

Inhoud: geen onderscheppingen gebruiken.

Inleiding: de contactwep fractografie - - -

En waarom ' - - - Technieken voor schadeanalyse en fractografie'
en niet ' - - - Techn. " " " fracto - - -'
of, eventueel ' - - - δ " Schade - - - " \bar{P} - - -
(lelijk, want Amerikaans)

Wsp-benoeming + wit-oering nog niet consequent

pag. 1: Oproef van fase II. \rightleftarrows wit onder en boven wsp liever niet gelijk.
 \uparrow geen nr.? (1.1) \uparrow punt weg

pag. 12: veel 3 literatuur. Aan
opsomming nu niet \uparrow inspringen? (zie bladz. ervoor)

Opsommingen (in principe) overaf laten gaan door :

p1+12: Maak opsommingen niet onnodig verschillend van karakter!

I: B — \leftarrow alken hier is I (end.) functioneel!
a: (of bij de vert a, 1°, 1°, of
1: gewoon - staat, maakt niet uit
1. voor de betekenis. Het dan -

p. 3 "ullen" is meestal overbodig! Laat het weg! (~~p. 3~~)

wit rond 3.1 3.1.1 en 3.2 ?!

p. 4 Reikt na opsomming 3.1.2 bijlt niet aan te sluiten.

p. 5 Hoera! *

Meer algemeen

Tabellen: moeilijk: • achter teksten in tabellen. Wordt ^{in het} algemeen niet gedaan. Principe als bij titels en koppe.

p. 10 geen nummers bij kopjes?!

Verbinding van striktes

2^e zin is onleesbaar en lijkt verminkt.

Ik kan vermoeden dat de g achter omstandigheden de boosdoener is.

(als de zin goed is zoals 'ie hier staat, hoort de g er niet in!)

Beter is natuurlijk de zin (al eerder) in tweeën te kappen.

p 102 Eind 2^e alinea: 'foutief'. Beter: 'ten onrechte'.

al met al: een verandering die al aardig tot leren moet! Overhoop dat als de fig. tussen de tekst zouden staan, het stuk nog veel aantrekkelijker wordt!

In deze opstelling zou een (cross) verrijping figuren - tekst niet ontstaan!

91M/014421/SCE/GRF
Datum 05.07.1992

**ONDERBOUWING SCHADEONDERZOEK
TECHNIKEN VOOR SCHADEANALYSE EN
FRACTOGRAFIE
DEELPROJECT V: LITERATUURSTUDIE
FASE II
INTERIM RAPPORT**

Opdrachtgever

: Projectgroep onderbouwing schade
onderzoek, Deelproject V
"Breukvlakken en breukmechanismen
van metalen"

Auteur(s)

: Ing. E.W. Schuring

Ons ref.nr.: 36.3.8052.MET

Uw ref.nr.: --

Oplage : 40

<u>INHOUD</u>		<u>Pagina</u>
1	INLEIDING	1
2	INDELING VAN DE BREUKTYPEN NAAR MECHANISME	3
3	GEWELDBREUK	4
3.1	Dimple of taaie geweldbreuk	4
3.1.1	Macroscopisch	4
3.1.2	Microscopisch	4
3.1.3	Invloed van het materiaal op het macroscopisch breukvlak uiterlijk	5
3.2	Interkristallijne brosse en splijtbreuk	6
3.2.1	Macroscopische kenmerken, inter- en transkristallijn	6
3.2.2	Microscopische kenmerken	6
3.2.2.1	Interkristallijne brosse breuk	6
3.2.2.2	Transkristallijn, splijtbreuk	6
3.2.3	De quasi-splijtbreuk	7
4	VERMOEIING	8
4.1	Macroscopisch	8
4.2	Microscopisch	9
5	CORROSIEVE BELASTING	13
5.1	Selectieve corrosie	13
5.1.1	Putvormende corrosie; pitting	13
5.1.1.1	Invloed van het materiaal	14
5.1.2	Interkristallijne corrosie	14
5.2	Spanningscorrosie	14
5.2.1	Invloed van het materiaal en het milieu	15
5.3	Corrosievermoeiing	16
5.3.1	Invloed van het materiaal en het milieu	17
5.4	Invloed van waterstof op het breukvlak-uiterlijk	18
5.4.1	Geweldbreuk, dimple breuk	18
5.4.1.1	Staalsoorten	19
5.4.1.2	Aluminium	19
5.4.1.3	Titaan	20
5.4.2	Vermoeiing	20
5.4.3	Vertraagde spanningscorrosie door kathodisch gevormde waterstof	21
5.5	Foute interpretaties door corrosieproducten op het breukvlak.	21

6	TRIBOLOGISCHE BELASTING	22
6.1	Algemeen	22
6.2	Slijtagemechanismen	22
6.2.1	Oppervlaktevermoeiing	23
6.2.2	Schavielslijtage, "fretting"	26
6.2.2.1	Fractografische kenmerken van schaviel slijtage	26
6.2.2.2	Metallografische kenmerken	27
6.2.2.3	Invloed van de spanningsverdeling in de omtrek van een koud getrokken draad	27
7	THERMISCHE BELASTING	28
7.1	Geweldbreuk	28
7.2	Kruip	28
	LITERATUUR	31
	TREFWOORDEN	34

Figuren 1 t/m 17

Bijlage I

1 INLEIDING

De contactgroep fractografie heeft het initiatief genomen voor een meerjarig collectief onderzoekproject op het gebied van het schadeonderzoek; "Onderbouwing Schadeonderzoek; Technieken voor schadeanalyse en Fractografie".

Binnen dit project is een vijftal deelprojecten gedefinieerd t.w.:

- I : Breukvlakonderzoek en breukmechanismen van kunststoffen
- II : Kwantitatieve metallografie
- III : Metallografische technieken voor metalen
- IV : Procedures schadeanalyse
- V : Breukvlakken en breukmechanismen van metalen.

Het is de ervaring van alle leden van de projectgroep Fractografie, dat in het algemeen minder problemen voorkomen bij het maken van fractografische opnamen met de lichtmicroscoop of de SEM dan bij de interpretatie van de verkregen beelden. Daarom is het werkprogramma "Interpretatie van fractografische opnamen" gedefinieerd. Hiervoor zijn de deelprojecten I en V uitgekozen.

Binnen dit werkprogramma zal grote aandacht worden besteed aan de punten met betrekking tot:

- a: de herkenning van breukkenmerken,
- b: de relatie met de breukprocessen
- c: de herkenning van beschadigingen van de breukvlakken,
- d: de herkenning van neerslagen, oxidatie- en corrosieproducten
- e: de reinigingstechnieken

Literatuuronderzoek zal een essentieel deel van dit onderwerp zijn.

Dit interim-rapport geeft de resultaten van de tweede fase van een literatuuronderzoek in het kader van deelproject V. Dit literatuuronderzoek is opgesplitst in 4 fasen t.w.:

- 1: Indeling van breuktypen in een schema
- 2: Herkenning van breuktypen, macroscopisch en microscopisch
- 3: Herkenning van : Typen belasting
 - welke vorm van corrosie
 - welke thermische belasting
 - welke tribologische belasting
 - of gecombineerde effecten een rol hebben gespeeld in het ontstaan van de breuk of schade.
- 4: Herkenning van de initiatiepunten van de breuk.

Opzet van fase II.

In dit interim rapport over fase II van het deelproject "Breukvlakken en breukmechanismen" zal worden ingegaan op de macroscopische en microscopische kenmerken van de verschillende breuktypen.

Bij het benoemen van de verschillende breuktypen zal blijken dat daarbij een verschil in benadering bestaat in de Duitse en Engelse literatuur. De Duitse literatuur benadert de fractografie vanuit de belastingsvorm, terwijl de Engelse literatuur een benadering vanuit het mechanisme gebruikt. De kenmerken die hieruit volgen zijn onafhankelijk van belastingsvorm.

Voor het inventariseren van de macroscopische en microscopische kenmerken van de diverse breuktypen zal daarom vooral gebruik gemaakt worden van de Engelse literatuur.

Voor voorbeelden van de besproken breukvlakken wordt verwezen naar de literatuur. Aan de hand van de verschillende interesses van de deelnemers in dit project, zullen de volgende breuken/schaden, zoals genoemd in fase I worden behandeld.

1. Gewelddreuk, bros en taai.
2. Vermoeiingsbreuk.
3. Breuk ten gevolge van corrosieve belasting met name in combinatie met een mechanische belasting,
 - waterstof geïnduceerde breuk;
 - spanningscorrosie;
 - corrosievermoeiing.
4. Thermische belasting;
 - gewelddreuk;
 - kruip.
5. Tribologische belasting;
 - vermoeiing;
 - schaviel slijtage, fretting.

Indien van toepassing zal ingegaan worden op specifieke kenmerken per materiaalsoort, waarbij de nadruk ligt op staalsoorten, aluminiumlegeringen en titaanlegeringen.

2 INDELING VAN DE BREUKTYPEN NAAR MECHANISME

In fase I is een indeling van breuktypen gemaakt uitgaande van de belastingsvorm (bijlage I). Om een beter begrip te krijgen van de ontstane kenmerken op de breukvlakken op macroscopisch en microscopisch niveau is het zinvol om tevens een indeling naar breukmechanisme te maken. Hiervoor kan de engelse literatuur als bron dienen.

De engelse literatuur [7,8] geeft vier mechanismen aan van breukverloop. Deze zijn als volgt benoemd.

1. Dimple breuk (Dimple)
2. Spleijtbreuk (Cleavage)
3. Vermoeiingsbreuk (Fatigue)
4. Decohesiebreuk (Decohesion)

Bij deze vier mechanismen kan de breuk zich op twee manieren voltrekken, namelijk:

- A. Transkristallijn (niet voor decohesie breuk)
- B. Interkristallijn

De breuk kan ontstaan door één of een combinatie van 3 manieren van belasting, te weten [7,8], figuur 1.

Mode I trekbelasting,

Mode II afschuifbelasting,

Mode III scheurende belasting (een bepaalde wijze van afschuiven, figuur 1).

De in fase I genoemde breuktypen, waarbij uitgegaan is van de belastingsvorm zijn allen in te delen volgens bovenstaande mechanismen en belasting. De verschillende breuktypen worden apart behandeld.

3 DE GEWELDBREUK

Een gewelddreuk kan zich als volgt manifesteren [7]:

- Dimple, of taaie breuk:
 - interkristallijn,
 - transkristallijn.
- Brosse breuk:
 - splijtbreuk (transkristallijn),
 - interkristallijn brosse breuk.

Of een breuk taai of bros is, hangt behalve van het materiaal en de materiaaltoestand tevens af van de deformatiesnelheid, de temperatuur en de spanningstoestand.

De breukverlopen kunnen zich voordoen onder één of een combinatie van de drie manieren van belasten (Mode I, II of III). Hoewel het breukverloop en de belastingsvormen hetzelfde kunnen zijn, zijn de mechanismen duidelijk verschillend. De verschillen uit zich in verschillen in macroscopische en microscopisch opzicht. De zo ontstane kenmerken van de dimple en de spijtbreuk zullen daarom vervolgens afzonderlijk worden besproken. Details of de vorm van de kenmerken kunnen uitsluitsel geven over de wijze van belasting.

3.1 Dimple of taaie gewelddreuk

Deze breukvorm komt bij nagenoeg alle metalen voor, onafhankelijk van hun kristalstructuur.

3.1.1 *Macroscopisch*

De dimplebreuk of taaie gewelddreuk gaat gepaard met plastische vervormingen van het materiaal nabij de breuk. Het breukoppervlak heeft doorgaans een mat uiterlijk.

De plastische vervorming geeft bovendien vaak informatie over de wijze van belasting:

- buiging,
- torsie,
- (- druk),
- trek.

Drukbelasting heeft doorgaans alleen scheuren van het belaste onderdeel tot gevolg, maar geen breuk.

De bespreking van deze bijzondere kenmerken is onderwerp van fase III van dit literatuuronderzoek.

De plastische vervorming uit zich macroscopisch in:

- shearlip
- insnoering

3.1.2 *Microscopisch*

De taaie gewelddreuk wordt gekenmerkt door zogenaamde dimples op het breukvlak. Het ontstaan van een taaie gewelddreuk kan worden omschreven als een proces dat uit drie fasen bestaat, t.w.:

1. initiatie
2. groei
3. coagulatie

van voids [10], figuur 2. De *dimples* ontstaan als gevolg van de coagulatie van de microholten (micro-voids). Voor het ontstaan van deze microholten is het noodzakelijk dat er initiatiepunten aanwezig zijn. Dit betekent dat de grootte van de dimples door het aantal initiatiepunten wordt beïnvloed. Dus hoe meer initiatiepunten, hoe kleiner de dimples en hoe groter het aantal.

Als initiatiepunt voor micro-holten kunnen dienen:

- * tweede fase-deeltjes
- * insluitels
- * korrelgrenzen (interkristallijne "dimple" breuk)
- * concentraties van dislocaties.

Metalen met grote plastische vervormingsmogelijkheden en met grote dimples, vormen vaak deformatiekenmerken op de "dimple"-randen ten gevolge van de oriëntatie van glijvlakken aan het oppervlak, figuur 2. De vorm van de dimples, dat wil zeggen volledig omringd door een rand of aan een kant open, geeft uitsluitel over de aard van de belasting. Dit is echter onderwerp van fase III van dit literatuuronderzoek en zal derhalve daar worden besproken.

De taaie geweldbreuk verloopt doorgaans transkristallijn. Interkristallijne dimple breuk komt onder andere voor bij:

- aluminium-koper legeringen onder trekbelasting. Metallografische doorsneden laten een interkristallijn scheurverloop zien met een blijkbaar bros karakter [4],
- austenitische warmvaste staalsoorten of te wel de superlegeringen.

De dimples op het breukvlak van een interkristallijne dimple breuk zijn vlak en ondiep.

3.1.3 *Invloed van het materiaal op het macroscopisch breukvlak uiterlijk*

Bij een vergelijking van de verschillende materiaalsoorten en hun breukvlakken kunnen misverstanden ontstaan bij het interpreteren van de breukvlakken. Met name bij de macrofractografische waarnemingen.

Bij non-ferro metalen en grijs gietijzer zijn er bijvoorbeeld geen kenmerkende verschillen tussen een vermoeiingsbreuk en een geweldbreuk. Dit in tegenstelling tot de breukvlakken van staalsoorten, waarbij men macroscopisch al vaak het type belasting kan herkennen [9].

De microstructuur is een andere factor die de macrofractografische interpretatie van breukvlakken bemoeilijkt. De microstructuur kan fijn of grof kristallijn zijn. Een fijnkorrelig uitzienend breukvlak kan bij ferro-metalen wijzen op een vermoeiingsbreuk. Een brossere breuk van een materiaal met een hoge hardheid geeft echter bij ferro-metalen een vergelijkbaar breukvlak uiterlijk. De vervormingssnelheid en de spanningstoestand zijn bij het ontstaan van de brossere breuk ook van belang.

Bij non-ferro-metalen kan een grofkorrelige structuur van het breukvlak een aanwijzing zijn voor een vermoeiingsbreuk, terwijl een geweldbreuk een fijnkorrelig uiterlijk heeft [9].

Een en ander is afhankelijk van o.a. de spanningstoestand. Bij bijvoorbeeld Aluminium plaat bezweken onder vermoeiing, heeft de spanningsamplitude invloed op het breukvlak uiterlijk. Een kleine amplitude geeft een fijnkorrelig breukvlak uiterlijk en een grote amplitude een grofkorrelig breukvlak.

Deze voorbeelden geven aan dat microfractografie een noodzakelijke aanvulling is in het breukvlakonderzoek.

In het algemeen zullen taaie materialen onder gemengde belasting breken onder afschuiving, waarbij het breukvlak een hoek maakt met de hoofdspanningsrichting. Bros materiaal breekt doorgaans onder trek, met het breukvlak loodrecht op de hoofdspanningsrichting [14].

3.2 Interkristallijne brosse breuk en splijtbreuk (Cleavage)

In tegenstelling tot de taaie geweldbreuk kan de brosse geweldbreuk worden beschreven als een plotselinge gebeurtenis [10]. Het scheurverloop gaat daarbij na initiatie, wat als ductiel gedrag kan worden omschreven, plotseling over in een brosse of splijtbreuk [10].

Kubisch vlakken gecentreerde materialen, zoals aluminium en austenitisch staal vertonen in het algemeen wel een instabiele breuk, maar zelden een brosse breuk, ook niet bij een lage temperatuur of hoge vervormingssnelheid.

3.2.1 Macroscopische kenmerken, inter- en transkristallijn

Macroscopisch vertoont het breukvlak geen vervormingen of deformatie. Het breukvlak is vlak en vertoont een glinsterend uiterlijk. Het breukvlak staat loodrecht op de (hoofd)spanningsrichting. De scheuruitbreidingsrichting en het begin van de scheuren is te herkennen aan breuklijnen en afzettingen.

Op het breukvlak zijn vaak "chevrons" te herkennen. "Chevrons" is een benaming voor een V-vormig patroon op het breukvlak. De punten van het V-vormige patroon wijzen naar het initiatiepunt van de scheur. Bij lage temperaturen verdwijnen de "chevrons" weer (materiaalafhankelijk) [4]. Chevron-breuken vormen een overgangsvorm tussen taaie en brosse breuken [7].

3.2.2 Microscopische kenmerken

3.2.2.1 Interkristallijne brosse breuk

Bij de interkristallijne brosse breuk zijn de korrelgrenzen van het materiaal herkenbaar. Op de korrelgrenzen zijn uitscheidingen en insluitsels aanwezig, welke een verzwakking van de korrelgrenzen hebben veroorzaakt.

3.2.2.2 Transkristallijn, splijtbreuk

Deze breuk verloopt via evenwijdige kristallografische splijtvlakken door de gehele korrel. Op het breukvlak zijn geen inhomogeniteiten, zoals insluitsels, te herkennen [1]. De breuk ontstaat tegelijkertijd op verschillende lokaties en mogelijk op verschillende niveau's. Hierdoor ontstaan zogenaamde "splijstappen" op het breukvlak, figuur 3 [7]. Tijdens het verloop van de breuk/scheur komen de splijstappen samen en vormen grotere "stappen" waardoor de bekende *rivierpatronen* ontstaan. Dit betekent dat het scheurverloop tegen de stroomrichting van het rivierpatroon ingaat [7].

De oriëntatie van de korrels ten opzichte van de scheurvoortgang beïnvloedt het uiterlijk van de rivierpatronen. Bij ten opzichte van elkaar gekantelde korrels (figuur 3a) loopt het rivierpatroon in de volgende korrel gewoon door. Als de korrels ten opzichte van elkaar zijn verdraaid, initieert de scheur opnieuw bij de korrelgrens als een aantal parallelle splijtbreuken verbonden door kleine splijstappen, figuur 3b.

Enkele andere kenmerken van breukvlakken van splijtbreuken zijn:

- "Feather markings" (veer vormige kenmerken)
- tongen
- wallner-lijnen

De *veervormige kenmerken* zijn waaivormige gebieden met een serie zeer fijne splijstappen in een groot splijtfacet. Het punt waar de waaier samenkomt is het initiatiepunt (figuur 3c [7]).

Tongen komen soms op splijtbreukvlakken voor. Tongen ontstaan doordat de splijtbreuk tijdelijk naar een ander glijvlak uitwijkt en langs een tweeling oriëntatie beweegt [7].

Wallner-lijnen vormen een bepaald splijtpatroon dat soms waargenomen wordt op breukvlakken van brossen niet-metallische materialen of op brossen insluitels of intermetallische verbindingen. Deze structuur bestaat uit twee parallelle splijstappen welke elkaar vaak snijden en zo een kris-kras patroon vormen. Wallner-lijnen ontstaan als gevolg van het samengaan van een gelijktijdige voortgang van het scheurfront en een elastische schokgolf in het materiaal [7].

3.2.3 De quasi-splijtbreuk

De overgangsvorm tussen de taai breuk en de splijtbreuk wordt quasi-splijtbreuk genoemd omdat het uiterlijk van het breukvlak overeenkomsten vertoont met de splijtbreuk. De quasi-splijtbreuk verloopt echter langs andere kristallografische vlakken dan de splijtbreuk.

Het breukoppervlak bestaat uit een groot aantal vlakke of licht concave facetten, die gevormd zijn door het samengaan van een groot aantal individuele micro-scheurtjes [19]. Elke micro-scheur groeit concentrisch vanuit een centraal initiatiepunt. Hoewel de uitbreiding ongeveer met een cirkelvormig scheurfront plaatsvindt door plastische deformatie, is de gevormde holte meer lensvormig dan bij de vorming van dimples [19]. Het samengaan van de micro-scheuren veroorzaakt de vorming van opstaande randen op het oppervlak, zogenaamde "*tear ridges*", figuur 4.

De *facetten* zijn transkristallijn en hebben geen relatie met aspecten in de microstructuur. Zelfs op relatief grote schaal verlopen vlakke gebieden niet evenwijdig aan bepaalde kristallografische vlakken [19].

Sommige aparte scheuren gaan over in zeer grote, die zich tijdens de propagatie verdelen in verschillende subscheuren over aparte vlakken en worden gescheiden door "*tear ridges*" [19]. Deze kenmerken worden "*rosetten*" genoemd [19]. De onder plastische deformatie gevormde randen die de positie markeren van het ongeveer cirkelvormige scheurfront zijn duidelijk zichtbaar op zulke rosetten.

Vaak komt quasi-splijtbreuk als een lokaal detail op het breukvlak voor en vertoont daarbij zowel kenmerken van een ductiele breuk met plastische deformatie als van een splijtbreuk. De centrale facetten van een quasi-splijtbreuk lijken daarbij sterk op een splijtbreuk.

De quasi-splijtbreuk wordt bevorderd door condities die plastische deformatie belemmeren. Dit zijn bijvoorbeeld:

- drie-assige spanningstoestand (bijvoorbeeld wortel van een kerf);
- hoge reksnelheid (kerfslagproef) in de taai-bros overgangszone.

Materialen, waarbij de quasi-splijtbreuk voorkomt, zijn

- staal
 - veredel staal (quenched and tempered),
 - precipitatie hardend,
 - austenitisch RVS;
- titaanlegeringen;
- nikkellegeringen;
- aluminiumlegeringen.

4. VERMOEIING

Het breukvlak van een vermoeingsbreuk is op te delen in 3 zones. Deze zones zijn direct terug te voeren naar de 3 stadia van een vermoeingsbreuk [7] (figuur 5), n.l.

- I Initiatie
- II Propagatie
- III Restbreuk - dimple of taaie breuk
- brosse breuk

Verder is er bij vermoeiing nog onderscheid te maken in "High Cycle Fatigue" (HCF) en "Low Cycle Fatigue" (LCF). In de literatuur is doorgaans geen eenduidige afspraak te vinden over de condities voor HCF en LCF. Enkele criteria die voorkomen zijn:

criterium	HCF	LCF
Plastische deformatie	Lokaal bij deeltjes/scheurtjes.	Gelijkmatig door de doorsnede.
Aantal wisselingen tot breuk	$> 10^5$	$< 10^5$

In de beproevingswereld wordt de plastische deformatie als criterium genomen. Bovendien wordt daarbij de HCF door de spanning gestuurd en de LCF door de deformatie.

4.1 Macroscopisch

Het breukvlak heeft een broos uiterlijk. De 3 zones zijn in het algemeen duidelijk te herkennen (initiatie, propagatie, restbreuk). Zone II, propagatie, vertoont meestal concentrische schelpvormige kenmerken (eng. "beach marks") met het initiatiepunt als middelpunt. "Beach marks" zijn een speciaal kenmerk van het scheurverloop bij vermoeiing.

"Beach marks" zijn macroscopische breukvlak-kenmerken bij vermoeiing. Hoewel "beach marks" karakteristiek zijn voor vermoeingsbreukvlakken, zijn ze niet bij alle materialen die onder vermoeiing zijn bezweken zichtbaar. Bij veel gietijzersoorten ontstaan geen "beach marks" [7].

Ook bij laboratorium tests op vermoeiing zijn op de breukvlakken geen "beach marks" aanwezig, ongeacht het materiaal, tenzij er bij de test speciale aandacht aan wordt gegeven [7]. "Beach marks" ontstaan namelijk als gevolg van veranderingen in de belasting, waardoor de scheurgroeisnelheid verandert en de invloed van het milieu op het breukvlak [7].

Op "beach marks" lijkende breukvlak-kenmerken kunnen ontstaan op niet onder vermoeiing bezweken breukvlakken van materialen, als de scheuruitbreiding cirkelvormig is geweest [7]. De restbreuk treedt op als het nog bestaande materiaal de maximale spanning niet meer kan dragen. Bij een hogere maximale spanning wordt het percentage restbreuk dus groter.

4.2 Microscopisch

Alle drie de zones hebben hun eigen kenmerken. Deze kenmerken en de grootte van de zones worden beïnvloed door:

- sterkte van het materiaal,
- microstructuur,
- milieu,
- spanning en frequentie.

Per zone c.q. stadium heeft dit de volgende invloeden op de breukvlak-kenmerken.

Zone I - Initiatie:

In deze zone zijn geen striaties aanwezig. In dit stadium vindt propagatie van microscheurtjes plaats. Het breukvlak vertoont kenmerken van een splijtbreuk met een trapvormig breukvlak ("stair-step fracture").

De breukvlak-kenmerken, initiatie en de grootte van de zone worden het sterkst beïnvloed door de microstructuur en de gemiddelde spanning. Het ontstaan van zone I kan 90% van de (vermoeiings)levensduur beslaan [7]. Een en ander hangt af van kerfgevoeligheid, oppervlak-tegesteldheid en hoogte van de belasting. Bij hoge plastische rek-amplitudes kan de scheur initiëren op korrelgrenzen. Het breukvlak dat bij dit eerste stadium van vermoeiing hoort, komt normaal gesproken voor bij breuk bij veel cycli en lage spanning en ontbreekt bij vermoeiing onder hoge spanningen bij weinig cycli [7].

Zone II - Propagatie:

Deze zone bevat de voor een vermoeiingsbreuk zo karakteristieke striaties en neemt een belangrijk deel van het breukvlak in. Bij hoge vergroting van de zone tussen de "beach marks" worden honderden tot duizenden van deze striaties zichtbaar [7]. *Striaties* markeren de posities waar de scheur tijdelijk stopt. Daarbij moet worden opgemerkt dat niet bij alle breukvlakken en metalen de striaties goed zichtbaar of aanwezig zijn. Bovendien behoeven striaties niet op beide breukvlakken aanwezig te zijn [7]. Hoogvaste Al-legeringen, b.v. 6061 (AlMgSi) vertonen bij vermoeiing duidelijk striaties. Dit is waarschijnlijk de reden dat met name aan aluminiumlegeringen gedetailleerd vermoeiingsonderzoek is uitgevoerd [21]. Daarbij zijn verschillende typen striaties beschreven, afhankelijk van de belastingscondities en het milieu [21]. Over het algemeen zijn striaties gemakkelijker waar te nemen op breukvlakken van ductiele metalen, vooral fcc-metaal.

Niet bij alle scheurgroei-eenheden zijn striaties te zien. Bij zeer hoge scheurgroei-eenheden is op het breukvlak coagulatie van micro-holten of splijtbreuk te zien, afhankelijk van de legering [7]. Dit is de overgang naar een ander breukmechanisme t.w. geweld of brosse breuk. Wanneer de scheurgroei-eenheden afneemt, worden weer striaties waargenomen. Bij zeer lage scheurgroei-eenheden lijkt het breukvlak op een splijtbreuk, zelfs bij fcc metalen. Ook bij vermoeiing in vacuüm en bij hoge temperatuur ontbreken vaak de striaties.

Als striaties afwezig zijn, wil dit niet zeggen dat het mechanisme van scheurgroei is veranderd. [21] geeft een voorbeeld van vermoeiing in een nikkel-superlegering, waarbij in de scanning elektronenmicroscopie bij breukvlakonderzoek met beeldvorming door secundaire elektronen geen striaties zichtbaar zijn. Door nu voor de beeldvorming gebruik te maken van backscatter elektronen wordt de substructuur, die ontstaat als gevolg van de voortgang en het stoppen van scheur, zichtbaar. De substructuur wordt zichtbaar gemaakt met behulp van elektronendiffractie-effecten, die een gevolg zijn van de lokaal hoge dislocatie dichtheden in de deformatiebanen [21].

Het verloop van de scheur is doorgaans transkristallijn (zie LCF vs. HCF) en verloopt over verschillende niveaus. De afstand tussen twee striaties wordt het sterkst beïnvloed door $\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$. De hoogte van de gemiddelde spanning heeft een geringe invloed en de frequentie heeft nauwelijks invloed op de afstand tussen de striaties, evenals de R-waarde:

$$\frac{\sigma_{\text{m.l.n}}}{\sigma_{\text{max}}} \quad [12].$$

Vorming van striaties

Het model dat de vorming van striaties het best beschrijft, is gebaseerd op afschuiving bij de scheurtip [7]. Dit model kan tevens verklaren waarom er bij vermoeiing in vacuüm geen striaties waarneembaar zijn en verklaart waarom ook omstandigheden, waarbij afschuiving niet direct aan de scheurtip kan plaatsvinden als gevolg van fouten in het rooster of microstructuur. Figuur 6 geeft het model schematisch weer.

Bij vermoeiing in lucht zal het vrijkomende glijvlak direct oxideren, zodat de opgetreden slip van de glijvlakken irreversibel is \Rightarrow striaties. In vacuüm oxideren de vrijgekomen glijvlakken niet, zodat de afschuiving wel reversibel is \Rightarrow geen striaties. Dit resulteert in een glad breukoppervlak zonder specifieke kenmerken.

P.W. Beaver [15] geeft in zijn studie nog een situatie aan, waarbij onder vermoeiing geen striaties ontstaan. Het betreft hier triaxiale spanningscondities, waarbij het breukvlak vlak was en brosse facetten vertoonde. Bij biaxiale spanningscondities bevatte het breukvlak vergelijkbare brosse zones, afgewisseld door zones met striaties. Effecten van de belasting op het breukvlak zullen verder in fase III van het literatuuronderzoek worden behandeld.

Voor microgelegeerd ferritisch staal (HSLA) vonden H.J. Roven en E. Nes [12] dat het concept van één striatie per belastingcyclus (bij LCF) slechts geldt binnen een smal scheurgroeiingsgebied. Daarbuiten zijn meerdere cycli per striatie nodig. Dit heeft dus gevolgen voor het bepalen van het aantal wisselingen voor breuk van een onder vermoeiing bezweken produkt.

Als striaties grof genoeg zijn, zoals mogelijk bij LCF-breuken (hoge spanningsniveaus), zijn ze lichtmicroscopisch waarneembaar. Bij lagere spanningsniveaus zijn hogere vergrotingen nodig van 1.000 tot 20.000 maal. Hiervoor is dus elektronenmicroscopie noodzakelijk (SEM of TEM).

Zone III - Restbreuk:

In deze zone zijn geen striaties aanwezig. De restbreuk kan een dimple-breuk of een brosse breuk zijn. De breukvlakkenmerken en het verloop van de breuk worden beïnvloed door de microstructuur en de gemiddelde spanning, omdat de scheurgroei steeds sterker wordt beïnvloed door statisch gedrag.

Ductiele en brosse vermoeiingsbreuk

Ook bij de vermoeiingsbreuk is onderscheid te maken tussen een ductiel en een brosse breukgedrag [9], [12]. Dit onderscheid kan worden gemaakt aan de hand van verschillen in het "strepen"-patroon op het breukvlak. Het "strepen"-profiel is afhankelijk van het materiaal en de aard van vermoeiing. Bij de ductiele vermoeiingsbreuk zijn beide breukvlakhelften elkaars spiegelbeeld (vgl. dimple breuk). De breuk treedt op tussen de aparte striaties [9]. Dit komt voor bij "zachte" materialen in combinatie met een hoge plastische deformatie bij de scheurtip en gaat samen met afschuiving over kristallografische vlakken [8].

De brosse vermoeiingsbreuk komt relatief weinig voor en is waargenomen bij hoogvaste aluminiumlegeringen en gietstaal. De beide breukvlakhelften zijn elkaars negatief, zodat ze weer kunnen worden samengevoegd. De breuk is vervormingsloos. Andere kenmerken zijn:

- vakvormige uitbreiding van de breukbanen,
- begrenzing van de "breukbanen" door fijne concentrische scheuren.

Deze vorm komt voor bij hardere materialen of in een corrosief milieu als deformatie aan de scheurtip ontstaat door slijten [8]. Een brosse vermoeiingsbreuk komt voor bij weinig wisselingen tot breuk, omdat de scheurgroei dan zeer snel verloopt.

LCF vs. HCF

Hoewel vermoeiingsscheuren doorgaans transkristallijn verlopen, is uit onderzoek bij TNO en uit de literatuur bekend dat bij bepaalde condities tijdens "Low Cycle Fatigue" (LCF) het scheurverloop interkristallijn is. De reksnelheden zijn dan zeer laag en benaderen het kruipbereik. Op het breukvlak zijn de kristalgrenzen duidelijk te herkennen.

Dit betekent dus dat bij HCF het scheurverloop doorgaans transkristallijn is, maar bij LCF zowel trans- als interkristallijn kan zijn.

Invloed van de microstructuur op de kenmerken van het breukvlak

Bij de interpretatie van breukvlakken ontstaan onder wisselende belasting, moet bij de interpretatie van met name de striaties rekening gehouden worden met de microstructuur van het materiaal.

Structuur bestanddelen zoals perliet, martensiet en andere lijnvormige structuren, evenals gietstructuren, dendrietten, kunnen op het breukvlak kenmerken veroorzaken die foutief als striaties kunnen worden aangemerkt.

Aanwijzingen, waaruit op te maken valt of de waargenomen structuren striaties of structuurbestanddelen zijn, zijn:

- afstand tussen de "lijnen",
- richting van de "lijnen", striaties worden gevormd in de hoofdspanningsrichting en liggen over het hele breukvlak hoofdzakelijk parallel.

Het is bekend dat striaties door de aanwezige microstructuur lokaal een andere richting kunnen volgen [7].

Een methode om na te gaan of het gaat om striaties of b.v. perliet wordt beschreven in [12]. Daarbij wordt het breukvlak aangeëtst. Als de "lijnen" verdwijnen gaat het om striaties, verdwijnen ze niet, dan gaat het om microstructuurbestanddelen.

K.S. Vecchio e.a. [13] hebben onderzoek gedaan naar de invloed van de microstructuur van AISI 1140 met verhoogd mangaan (1,05-1,25%) en zwavel (0,16-0,23%), op het breukvlak ontstaan onder statische en wisselende belasting. In de microstructuur waren als gevolg van het productieproces mangaansulfiden (MnS) aanwezig in de vorm van langgerekte eilanden. De MnS-eilanden lagen in de ferrietmatrix. Zij concluderen dat tijdens statische belasting de MnS-eilanden gedeeltelijk loslaten uit de ferrietmatrix. Daarbij blijft op het breukvlak een relatief gladde afdruk achter met kronkelende lijnen ("serpentine glide") en ribbels. Het breukvlak krijgt daardoor een lamellair uiterlijk. Bij hogere reksnelheden vertoont de ferrietmatrix steeds meer kenmerken van splijtbreuk, daarbij valt op dat de MnS-eilanden in de zones met splijtbreuk minder aanwezig zijn.