



# Onderbouwing Schade-onderzoek

Technieken voor schade-analyse en fractografie

Rapport van deelproject V, fase III

## Breukvlakken en Breukmechanismen van metalen

contactgroep Fractografie .

november 1993

93M/012154/SCE/SCE

22 november 1993

ONDERBOUWING SCHADEONDERZOEK;  
Technieken voor schadeanalyse en fractografie  
Deelproject V: literatuurstudie fase III

Interim rapport

Bestemd voor:

Projectgroep onderbouwing schade onderzoek, deelproject  
V, "Breukvlakken en breukmechanismen van metalen".

Samengesteld door:

ing. E.W. Schuring

Ons ref.nr. : 36.3.8052-MET

Uw ref. :

kopieën : 25

**INHOUD**

<b>1</b>	<b>INLEIDING</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>HERKENNING VAN INITIATIEPUNTEN</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>GEWELDBREUK</b>	<b>5</b>
	3.1 Taaie breuken	5
	3.2 Brosse breuken	6
	3.2.1 Initiatiepunten	6
	3.2.2 Herkennen van initiatiepunten	7
<b>4</b>	<b>VERMOEING</b>	<b>9</b>
	4.1 Initiatiepunten	9
	4.2 Herkennen van de initiatiepunten	9
	4.3 Vermoeingsbreuken in gietijzer	11
	4.4 Vermoeingsbreuken in maraging staal	12
	4.5 Vermoeingsbreuk in ferritisch lasmetaal	15
	<b>LITERATUUR</b>	<b>19</b>
	<b>BIJLAGE I: Overzicht van de relaties tussen breukmechanisme, breukvlak- kenmerk en initiatiepunten.</b>	<b>21</b>
	<b>BIJLAGE II</b>	
	Schematische voorstelling van vermoeingsbreukoppervlakken op gladde en gekerfde componenten met cirkelvormige en rechthoekige doorsneden onder verschillende belastingscondities	23

## 1 INLEIDING

De contactgroep fractografie heeft het initiatief genomen voor een meerjarig collectief onderzoeksproject 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 lichtmicroscop 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 breukvlak-kenmerken,
- b: de relatie met de breukprocessen
- c: de herkenning van beschadigingen van de breukvlakken,
- d: de herkenning van neerslagen, oxydatie- en corrosieproducten
- e: de reinigingstechnieken

Literatuuronderzoek zal een essentieel deel van dit onderwerp zijn.

Dit interim-rapport geeft de resultaten van de derde 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
- 2a: Herkenning van breuktypen, macroscopisch en microscopisch
- 2b: Herkenning van : Typen van mechanische 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.
- 3 : Herkenning van de initiatiepunten van de breuk.
- 4 : Breukvlak-kenmerken van spanningscorrosie- en waterstofbreuken.

In de fasen I en II van dit literatuuronderzoek zijn respectievelijk de typen breukmechanismen en de algemene breukvlak-kenmerken behandeld.

In fase III wordt ingegaan op de bepaling van het initiatiepunt en gedeeltelijk de herkenning van het type van mechanische belasting aan de hand van breukvlak-kenmerken. De bepaling van het initiatiepunt maakt een essentieel onderdeel uit van het schadeonderzoek omdat bij het initiatiepunt meestal de oorzaak van de breuk kan worden bepaald. Dit gebeurt dan aan de hand van de micro-fractografische breukvlak-kenmerken zoals deze in fase II zijn besproken. Uiteraard geeft daarnaast de rest van het breukvlak vitale informatie over het breukverloop.

Tevens wordt ingegaan op breukvlak-kenmerken van vermoeiingsbreukvlakken, anders dan de bekende striaties en/of "beach marks" (groeilijnen), omdat deze klassieke vermoeiingskenmerken niet altijd voorkomen.

De besproken kenmerken zijn algemeen van toepassing. Voor zover van toepassing zal dieper worden ingegaan op de volgende materialen:

- staalsoorten:
  - veredelstaal
  - Cr en Cr/Ni (RVS)
  - HSLA
  - gietstaal
  
- gietijzer:
  - perlitisch; perlitisch-ferritisch; ferritisch
  - nodulair
  - lamellair
  
- aluminium:
  - niet-warmte te behandelen legeringen (kneedlegeringen)
  - precipitatie te harden legeringen
  - gietlegeringen.

Over het algemeen hebben staal en aluminium dezelfde breukvlak-kenmerken.

## 2 HERKENNING VAN INITIATIEPUNTEN

Over het algemeen is het initiatiepunt van een breuk relatief eenvoudig te bepalen aan de hand van vooral macroscopische breukvlak-kenmerken (en minder aan de hand van microscopische breukvlak-kenmerken).

Vaak kan de zone waarin de initiatie heeft plaatsgevonden herkend worden aan een verkleuring van het breukoppervlak als gevolg van oxidatie van de scheuren. Andere breukvlak-kenmerken die aanwijzingen geven over het initiatiepunt zijn:

- "chevrons"
- striaties
- "beach marks" (groeilijnen)
- dimples
- rivierpatronen
- trapvormige breukvlak-kenmerken, (stair step fracture)
- "shear lips" cq schuinstaande randen

De relatie tussen de breukvlak-kenmerken en het initiatiepunt cq de scheurgroeirichting zal per breuktype volgens de indeling in fase II worden besproken. De nadruk zal liggen op de taaie en brose breuk en de vermoeiingsbreuk.

Bijlage I geeft een beknopt overzicht van de verschillende breukvlak-kenmerken en hun relatie tot het initiatiepunt.

Kenmerken op het breukvlak of in de (micro)structuur van het materiaal die de scheurinitiatie veroorzaken of versnellen zijn bijvoorbeeld:

- insluitsels
- smeed- en walsfouten, (bijvoorbeeld: overlappingsen, ongewenste korreloriëntatie)
- warmtebehandelingsfouten
- gietfouten, (bijvoorbeeld: segregatie, porositeit)
- lasfouten, (bijvoorbeeld: bindingsfouten, porositeit, slak- en oxidische insluitsels)
- scheuren door diverse oorzaken.
- scherpe overgangen (spanningconcentraties)

Behalve macroscopisch onderzoek met het blote oog of met een loep, zullen lichtmicroscopisch en elektronenmicroscopisch onderzoek vaak deel uitmaken van het gehele shadeonderzoek. Als het initiatiepunt is bepaald, dan zal aan de hand van de daar aanwezige breukvlak-kenmerken en eventueel met behulp van metallografische doorsneden de breukoorzaak kunnen worden vastgesteld.

Bij het herkennen van defecten speelt de gekozen onderzoeksmethode een belangrijke rol. In de meeste gevallen kan metallografisch onderzoek al uitsluitel geven, bijvoorbeeld bij overlappingsen, laminaties, ongewenste korreloriëntatie, scherpe overgangen, segregatie, warmtebehandelingen en deformaties. De lokatie en de oriëntatie van de doorsnede, de prepareermethode en de gebruikte etstechniek zijn daarbij van belang. Een en ander staat beschreven in de rapporten van deelproject III "METALLOGRAFISCHE TECHNIEKEN VOOR METALEN". Insluitsels zijn bij licht- en elektronenmicroscopisch onderzoek te herkennen als discrete deeltjes bij het initiatiepunt van de breuk. Met analyse-systemen zoals EDX (Energie Dispersie Röntgenanalyse) kunnen insluitsels nader worden geïdentificeerd. Slinkholten zijn in de Raster Elektronenmicroscopie te herkennen aan stollingsstructuren, dendrieten, en een doorgaans zeer glad oppervlak in de holten.

Scheuren als gevolg van afschrikken beginnen aan de buitenzijde. Scheuren ontstaan als gevolg van afschrikken zijn in een lichtmicroscopische doorsnede makkelijk te herkennen aan het verloop van de scheur [4]:

\* over het algemeen van buiten naar binnen.



\* in een relatief rechte lijn, waarbij de scheur open kan staan en aan het uiterste oppervlak een "shear lip" hebben.

In het geval van bijvoorbeeld corrosie zal vaak metallografisch onderzoek aan doorsneden uit moeten wijzen aan welke kant de aantasting is begonnen en welke vorm van corrosie is opgetreden (zie fase II). Bij spanningscorrosie geeft de vertakking van de scheur meestal belangrijke informatie. De scheurgroeirichting is gewoonlijk in de richting van de vertakkingen. Of de initiatie plaats heeft gevonden in een scherpe overgang is snel na te gaan met een geschikte metallografische doorsnede. Uiteraard is dit ook in de elektronenmicroscopie waar te nemen. **Oppervlakte-deformaties** die een scheur inleiden zijn eenvoudig met een geschikte metallografische doorsnede te herkennen. **Harde oppervlaktelagen**, bijvoorbeeld nitreer- en carburisatielagen en andere vormen van oppervlakteharding, zijn te herkennen aan een afwijkend breukgedrag, doorgaans bros met een vlak breukoppervlak. In een metallografische doorsnede zijn deze lagen eenvoudig te herkennen met een geschikte etsmethode. Tevens kan dan de diepte worden bepaald en kan worden nagegaan of er fouten zijn gemaakt bij het aanbrengen van de lagen.

Voor fouten in de microstructuur die scheurinitiatie veroorzaken is een geschikte metallografische doorsnede de aangewezen weg. Uiteraard kan de elektronenmicroscopie uitgerust met EDX worden gebruikt om fasen en insluitsels te identificeren. Daarbij moet niet worden vergeten dat er verschillende etsmethoden bestaan waarmee fasen kunnen worden geïdentificeerd, zie deelproject III.

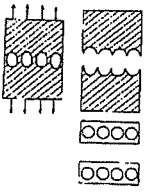
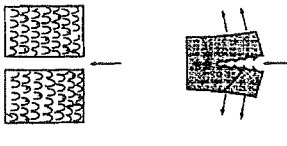
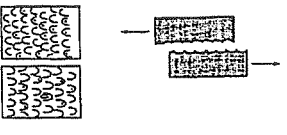
### 3 GEWELDBREUK

#### 3.1 Taaie breuken

De taaie geweldbreuk ontstaat als gevolg van overbelasting van een onderdeel en wordt gekenmerkt door een aanzienlijke plastische vervorming van het materiaal. Het breukvlak heeft vaak een schuin (shear lip) en een vlakker deel. De initiatie heeft plaats gevonden in het vlakke deel. De einden van de breuk worden doorgaans gekarakteriseerd door grote "shear lips". Het gehele breukvlak heeft macroscopisch een dof uiterlijk. Onder torsiebelasting zal de "shear lip" ontbreken, en bij hoge sterkte materialen, treksterkte boven 1000MPa, en harde brossse oppervlakte lagen zijn de "shear lips" aanmerkelijk kleiner. Microscopisch bestaat het breukvlak uit dimples. In het geval van harde materialen zijn de dimples klein en ontstaat een relatief glimmend oppervlak

Dimplevorm en -oriëntatie worden bepaald door de spanningsrichting [7]. Deze relatie wordt kort besproken in onderstaande tabel.

**TABEL I: Relatie tussen dimplevorm en -oriëntatie en spanningstoestand en scheurgroeirichting [4,7,8,16].**

spanningstoestand		dimples	
mode	omschrijving	vorm	oriëntatie
	uniaxiaal 	equiaxiaal	<ul style="list-style-type: none"> <li>dimples volledig omringd door een opstaande rand</li> </ul>
I	scheuren 	uitgerekt en ovaal	<ul style="list-style-type: none"> <li>dimples aan één kant open</li> <li>op beide breukvlakhelften wijzen de dimples in dezelfde richting, dwz. opening in dezelfde richting</li> <li>de gesloten kant van de dimples wijst naar het (lokale) initiatiepunt</li> <li>de langste richting van de dimples komt overeen met de scheurgroeirichting</li> </ul>
II en III	afschuiven 	uitgerekt en ovaal	<ul style="list-style-type: none"> <li>dimples aan één kant open</li> <li>opening tegengesteld op beide breukvlakhelften</li> <li>de langste richting van de dimples komt overeen met de scheurgroeirichting</li> </ul>



Bij een gecombineerde belasting, meer dan één mode, kan soms aan de dimplevorm en -oriëntatie de lokale scheurgroeirichting worden bepaald [7]. De verschillende combinaties van de modes I, II en III maken 14 variaties in de dimplevorm en -oriëntatie op de corresponderende breukvlakhelften mogelijk. Met aanpassing in bijvoorbeeld het ontwerp en de materiaalkeuze zijn taaie breuken meestal relatief eenvoudig te voorkomen

### 3.2 Brosse breuken

Brosse breuken komen voor in kubisch ruimtelijk gecentreerde (KRG/bcc) en hexagonaal dichtgepakte (HCP) metalen en niet in kubisch vlakken gecentreerde (KVG/fcc) metalen, met uitzondering van enkele specifieke gevallen. Brosse breuken treden makkelijker op bij lage temperaturen, hoge reksnelheden, spanningsconcentraties en bepaalde omgevingscondities [7].

#### 3.2.1 Initiatiepunten

Een brossse breuk initieert vaak op defecten ontstaan tijdens fabricage of gebruik. Er zijn 5 vormen van defecten [4]:

- scherpe overgangen; schroefdraad; hoeken; spie; gaten
- overlappingsen, grote insluitsels, oversmedingen, laminatie in plaat, ongewenste korreloriëntatie
- segregatie, insluitsels, ongewenste microstructuur, porositeit, scheuren, spleten, oppervlakte discontinuïteiten ontstaan als gevolg van: desoxidatie; korrelverfijning en gieten
- scheuren als gevolg van: bewerkingen; afschrikken; vermoeiing; waterstofbrosheid; liquid metal embrittlement; spanningscorrosie
- restspanningen

### 3.2.2 Herkennen van initiatiepunten

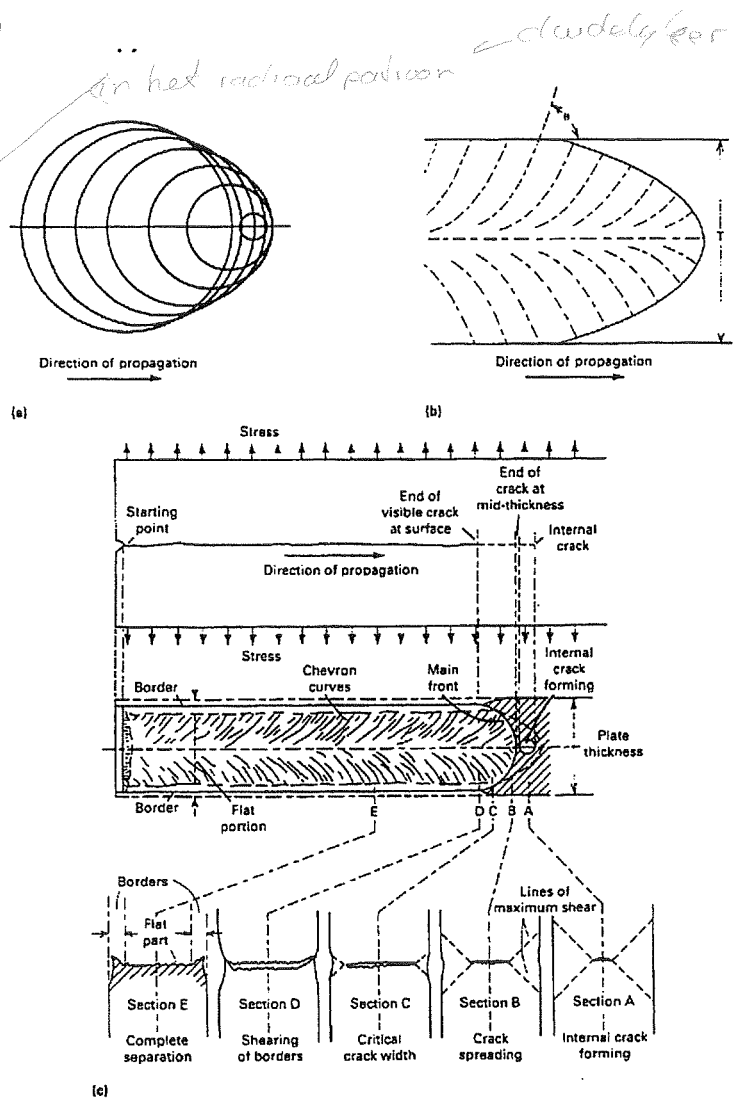
Breukvlak-kenmerken van een brossse breuk die aanwijzingen geven over het initiatiepunt zijn:

- radiaal patroon
- "chevrons"
- rivierpatronen
- tongen
- schuinstaande randen ("shear lips")

De randen van het Radiaal patroon lopen parallel aan de scheurgroeirichting en ontspringen bij het initiatiepunt. De rand ontstaat als twee scheuren die niet in hetzelfde vlak lopen samenkomen. De scheuren groeien zeer snel, voornamelijk als gevolg van quasi-splijtbreuk, naar de omtrek van de doorsnede om uiteindelijk onder de vorming van kleine schuinstaande randen ("shear lips") naar het oppervlak door te breken.

"Chevrons" en het radiaal patroon vormen samen een hulpmiddel om de initiatiezone van een brossse breuk te bepalen [4].

"Chevrons" zijn V-vormige kenmerken, ook wel bekend onder de naam "Herringbone"-patroon, waarvan de punt van de V wijst in de richting van het initiatiepunt, figuur 1. Zoals beschreven in fase II komen chevrons niet altijd op een brossse breukvlak voor, maar is één en ander afhankelijk van de temperatuur en deformatiesnelheid [7]. Een enkele keer wijst de punt van de V naar de restbreuk [4].



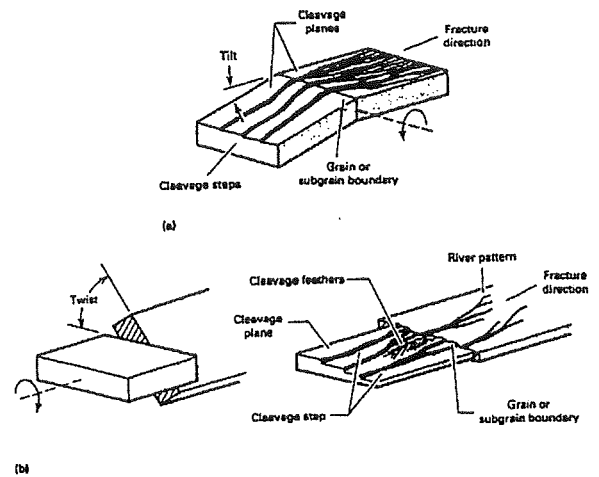
Figuur 1: Model voor de vorming van "chevrons". (a) Voortgang scheurfront. (b) scheurfront op een bepaald moment. (c) Analogie tussen de vorming van chevrons in de plaat en de "cup-cone" breuk. [4].

*Medanimo?*

*Medanimo = ...*

Rivierpatronen ontstaan als gevolg van het samenkomen van scheuren die aanvankelijk niet op hetzelfde niveau liepen. In de scheurgroei-richting zal daardoor het aantal vertakkingen afnemen. Het initiatiepunt kan gevonden worden door de rivierpatronen stroomopwaarts te volgen, figuur 2 [4,7].

**Schuinstaande randen ("Shear lips")** ontstaan aan het einde van de scheur doordat daar de spanningstoestand verandert van 3-assige in 2-assige. Vergeleken met de "shear lips" bij een taaie breuk zijn de "shear lips" van een brosse breuk *zeer* klein. Ze kunnen echter helpen bij het bepalen van het initiatiepunt cq de initiatiezone, omdat ze aanwezig zijn bij het einde van de scheur. Initieert een scheur in het midden van een doorsnede, dan breidt de scheur zich radiaal uit om bij de doorbraak aan het oppervlak kleine "shear lips" te vormen. Als de scheur aan het oppervlak initieert zal op deze plaats geen "shear lip" aanwezig zijn [4,7].



Figuur 2: Splejtstappen, "feathermarkings" en de vorming van rivierpatronen [4].

↑  
groter

## 4 VERMOEING

### 4.1 Initiatiepunten

De volgende defecten kunnen als initiatiepunt voor vermoeiing dienen en/of de vorming van vermoeiingsscheuren versnellen:

- krassen
- oppervlakte fouten:
  - randontkoling
  - te dikke (Cr) lagen
  - korrelgrens-oxidatie
- scherpe overgangen
- corrosieputten
- insluitsels
- precipitaten
- identificerings-aanduidingen, b.v. ingeslagen letters en cijfers
- lasfouten (b.v.: bindingsfouten, gasinsluitsels)
- micro-scheuren:
  - bewerkingscheuren
  - afschrikscheuren
  - warm- en koudscheuren, lassen

Meestal vindt de initiatie aan het oppervlak plaats, maar initiatie onder het oppervlak is mogelijk in het geval van:

- oppervlakte vermoeiing of spalling
  - insluitsels onder het oppervlak
  - gietfouten
- \* nitroer / carbonboren laagjes*

Bij spalling springen na onderhuidse initiatie splinters van het materiaal af[7]. Op het breukvlak zijn dan duidelijk "beach marks" aanwezig.

### 4.2 Herkennen van de initiatiepunten

Breukvlak-kenmerken die aanwijzingen geven over het initiatiepunt zijn, [4,7]:

- positie van de restbreuk
- "beach marks" cq. groeilijnen
- gladde, versmeerde zones
- trapvormige breukvlak-kenmerken, "stair step fracture"
- striaties
- vertandingen, "ratchet marks"
- pijl- of V-vormige kenmerken
- secundaire scheuren evenwijdig aan het scheurfront

Niet al deze kenmerken hoeven op een vermoeiingsbreukvlak aanwezig te zijn.

Na veel belastingswisselingen ontstaat vaak een scheur, **initiatie**, op de plaats met de maximale spanningsamplitude en/of de laagste lokale sterkte, zoals ter plaatse van:

- insluitsels
- korrelgrenzen
- intersecties van glijvlakken met vrije oppervlakken

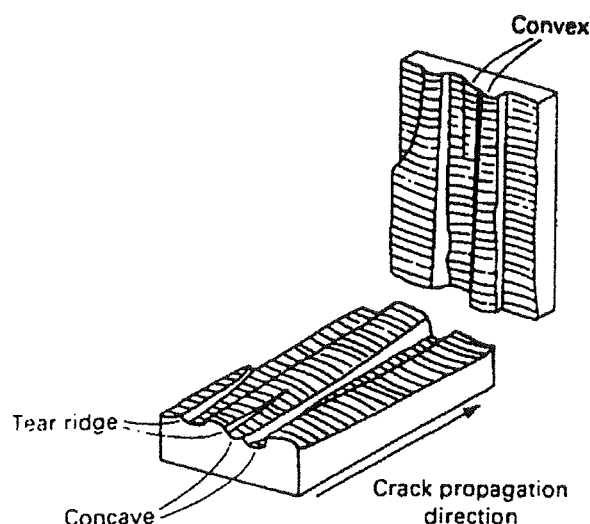
Weinig macroscopisch-plastische vervorming is karakteristiek voor de vermoeiingsbreuk.

De initiatie van een vermoeingsbreuk vindt plaats in fase I van de vermoeïng. Het fase I breukvlak is zelden herkenbaar op het breukvlak omdat de zone zeer smal is (2 tot 5 korrels). Als er al initiatiepunten zoals scheuren en scherpe overgangen aanwezig zijn, zal het fase I breukvlak vaak zelfs niet aanwezig zijn. Voor meer details over de fasen van een vermoeingsbreuk wordt verwezen naar de tweede fase van dit literatuuronderzoek.

Initiatie op meerdere lokaties bij verschillende discontinuïteiten kan optreden bij een hogere spanningsconcentraties. Het aantal cycli tot initiatie is dan lager dan bij lagere spanningsconcentraties. Daarbij is vaak sprake van een macroscopisch plastische vervorming. Een en ander is schematisch weergegeven in bijlage II (tabel 6 van VDI 3822/2) [1]. Ook het Metals handbook geeft schematische voorstellingen van het verloop van vermoeïngsscheuren in proefstaven met bepaalde geometrieën [4,7], zie ook bijlage II.

Tijdens fase II van de vermoeïng vindt scheurgroei meestal plaats over verschillende vlakken door gelijktijdige initiatie op verschillende niveaus. Op de plaatsen waar deze niveaus samenkomen ontstaan scheurranden, "tear ridges", figuur 3. Deze structuur wordt ook "stair step fracture" genoemd

De restbreuk ontstaat als laatste in fase III van de vermoeïng. Doorgaans bestaat de breuk uit twee delen een trekbreuk ontstaan onder een 3-assige spannings-toestand en een afschuifbreuk ontstaan onder een 2-assige spanningstoestand met "shear lips", onder een hoek van  $45^\circ$  ten opzichte van het oppervlak. De eventuele "shear lip" bevindt zich dus aan het einde van de scheur, de locatie van de "shear lip" is dus niet het initiatiepunt van de vermoeïng geweest. De soms aanwezige "chevrons" in het trekdeel van de breuk wijzen naar de oorsprong van de breuk.



Figuur 3: Schematisch voorstelling van vermoeïngs-striaties op verschillende niveaus [6].

De macroscopische "Beach marks" of groeilijnen zijn cirkelvormige kenmerken op het breukvlak van fase II van de vermoeïng. Groeilijnen ontstaan als gevolg van corrosie tijdens stops van de scheurgroei, bijvoorbeeld als gevolg van stilstand en bij veranderingen in de frequentie en/of het spanningsniveau. Groeilijnen breiden zich doorgaans concentrisch uit vanuit het initiatiepunt [1,4,7]. Bijlage II geeft dit schematisch weer. Afhankelijk van het spanningsniveau en aanwezige spanningsconcentraties kunnen de groeilijnen zich concave of convex uitbreiden ten opzichte van het initiatiepunt, bijlage II.

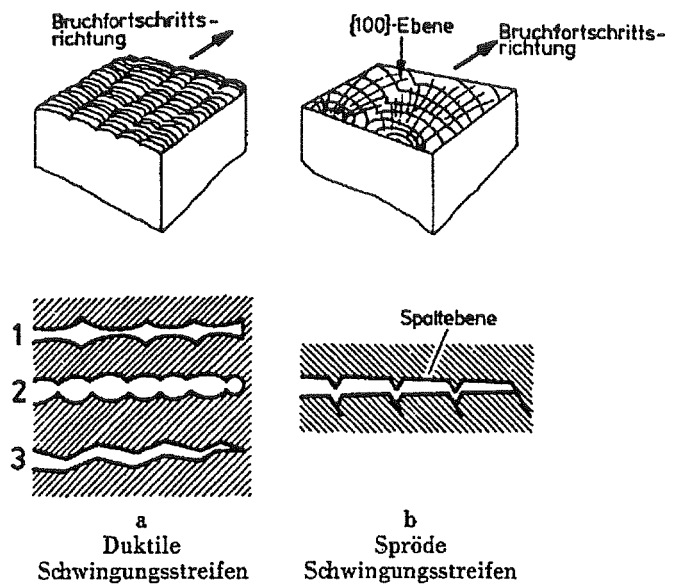
**Striaties** zijn breukvlak-kenmerken op microscopische schaal. Ze markeren de posities waar de scheur tijdelijk is gestopt. Striaties liggen evenwijdig aan de scheurgroeirichting en breiden zich vanuit het initiatiepunt concentrisch uit. Bij vermoeiing onder trek-druk is het breukvlak vaak sterk versmeerd, striaties zijn dan dus niet of nauwelijks te herkennen [4,7,17].

**Pijl- of V-vormige kenmerken** ontstaan bij duktile materialen in doorsneden met grote lengte breedte verhoudingen en hoge spanningsconcentraties in een trek-trek belasting. Het breukvlak is dakvormig tot V-vormig. Aan het buitenoppervlak waar insnoering heeft plaatsgevonden zijn microscopisch (SEM) parallelle scheurvorming en talrijke glijverschijnselen waar te nemen. De pijl op het breukvlak heeft een smalle heldere kant en een brede donker gekleurde kant. De heldere zijde bestaat uit sterk uitgerekte dimples, als gevolg van de grote hoek ten opzichte van de spanning. De donkere zijde bevat ronde dimples. Dit patroon kan als een vermoeiingsstructuur met een snelle scheuruitbreiding worden aangeduid [16]. Eén pijlelement komt overeen met één wisseling. De pijlpunt wijst in de scheurgroeirichting.

**Secundaire scheuren** zijn vaak karakteristiek voor een vermoeiingsscheur. De scheuren verlopen parallel aan het scheurfront en hun aantal neemt toe met groter worden afstand tot het initiatiepunt [8].

### 4.3 Vermoeiingsbreuken in gietijzer

Normaal gesproken komen "beach marks" niet voor op vermoeiingsbreukvlakken van gietijzer. In lamellair gietijzer bepaalt de vorm van de grafiet het scheurverloop. De vermoeiingsscheur loopt dwars door de lamellen heen en gaat tevens door gebieden van de matrix. Hierdoor is het vermoeiingsbreukvlak vlakker dan bij een geweldbreuk [17]. Striaties zijn in de ferritisch-perlitische matrix van bijvoorbeeld GG20 moeilijk te herkennen. Het ontbreken van striaties wil niet zeggen dat er geen sprake is van een vermoeiingsbreuk. In grijs gietijzer is de scheurgroeirichting over het algemeen moeilijk te bepalen, omdat het scheurfront niet aaneengesloten is. Soms kan de scheurgroeirichting aan de hand van striaties in ferrietvelden worden bepaald.



Figuur 4: Breukvlakken en profielen van vermoeiingsbreuken [16].

Vermoeingsbreukvlakken in ferritisch nodulair gietijzer kunnen de volgende breukvlakkenmerken hebben [16]:

- klassieke brosse vermoeingsbreuk met vlakvormige uitbreiding van breukbanen en geringe hoogteverschillen in de korrels,
- splijtbreuken zonder concentrische striaties
- interkristallijne vermoeingsbreukvlakkenmerken
- transkristallijne, vezel-achtige gebieden op het vermoeingsbreukvlak.

Bij een transkristallijne vermoeingsbreuk in perlitisch-ferritisch nodulair gietijzer is het zeer moeilijk op het breukvlak een onderscheid tussen de perliet en de ferriet te maken. De doorgaans slecht aan de matrix verbonden grafiemodulen worden meestal niet doorsneden.

Vergeleken met een geweldbreuk in nodulair gietijzer ontstaan onder trek, buiging of slagbelasting, wordt een vermoeingsbreukvlak gekenmerkt door striaties, een relatief geringe opening of rek van de matrix rond de nodulen en door nodulen waarvan grote stukken zijn afgebroken. Onder trek, buiging of slagbelasting is het breukvlak van ferritisch nodulair gietijzer ductiel met een aanzienlijke rek van de matrix rond de nodulen. Perlitisch nodulair gietijzer breekt daarentegen bros onder dezelfde condities.

#### 4.4 Vermoeingsbreuken in maraging staal

Vermoeingsbreuken van maraging staalsoorten (b.v. 18%Ni) worden gekenmerkt door ductiele striaties. Loodrecht op de striaties ontstaan breukbanen. Met name op het overgangsgebied naar de restbreuk zijn evenwijdig aan de striaties secundaire scheuren aanwezig. Verder is een vezelachtige structuur van de breukbanen karakteristiek voor maraging staal [16].

Figuur 5 toont vermoeings-scheuren in een 18Ni350ksi (2400MPa) maragingstaal. De vermoeings-scheuren zijn onder laboratoriumcondities aangebracht in gewone lucht en in een stikstof atmosfeer, (hoog frequent, >20Hz, en 50.000-100.000 wisselingen). Daarna zijn de proefstaven belast totdat breuk optrad. Striaties zijn bij deze condities op het breukvlak niet te herkennen bij onderzoek in de SEM.

In stikstof ontstaat een relatief vlak breukvlak met een vezelachtige structuur. In lucht ontstaat een ruw breukvlak met interkristallijne facetten, voormalige austenietkorrelgrenzen, figuur 5a. Het vermoeingsbreukvlak ontstaan bij vermoeien in lucht vertoont secundaire scheuren loodrecht op de scheurgroeirichting langs voormalige austenietkorrelgrenzen. Bij vermoeien in stikstof ontstaan geen secundaire scheuren, figuur 5b. Op de restbreuk van de in lucht vermoeide proefstaaf zijn de voormalige austeniet-korrelgrenzen duidelijk herkenbaar. In het geval van de restbreuk van de in stikstof vermoeide staaf is dit minder, figuur 5c.

Het verschil in breukverloop tussen vermoeien in stikstof en lucht kan alleen veroorzaakt worden door de aanwezige waterdamp in de lucht. Blijkbaar treedt er tijdens het vermoeien toch een (corrosieve) reactie op tussen het waterdamp en het vrije oppervlak van het maragingstaal. Daarbij ontstaat waarschijnlijk waterstof, waardoor de interkristallijne facetten ontstaan, d.w.z. lokaal zeer snelle scheurgroei.