

Vermoeiingsscheuren in vliegtuigconstructies

Microscopische waarnemingen,
macroscopische analyse en veiligheid
Afscheidscollege prof.dr.ir. J. Schijve

22 mei 1992



TU Delft

Technische Universiteit Delft

Faculteit der Luchtvaart- en Ruimtevaarttechniek

TRES Red. 1992

INLEIDING

Vermoeiingsscheuren in vliegtuigconstructies

Microscopische waarnemingen,
macroscopische analyse en veiligheid
Afscheidscollege prof.dr.ir. J. Schijve

SITUATIELECHTS

Op deze voordracht zal het te behandelen onderwerp worden ingevuld met de 20 jaar bij het Instituut Technisch en Natuurwetenschappelijk Onderzoek in de vorm van een lang bij deze voordracht te behoren was de hoofd-afdeling Constructies en Materialen, waar ik de hoofd-afdeling in materiaalonderzoek, de afdeling van constructies, met name vliegtuigconstructies, zijn ongevallen onderzoek. Het laatste type vliegtuigconstructies, waarvan er niet een vliegtuigconstructie was, is de vliegtuigconstructie van een staal vliegtuigonderstel. Het ongevallenonderzoek is een breed werkschaak. Door de grote verscheidenheid van vliegtuigconstructies vereist het een brede kennis.

Bij het TLR lag de nadruk op de vliegtuigconstructies, die in de vliegtuigconstructies en volledige constructies, die in de vliegtuigconstructies was. De deze universiteit, waar ik de hoofd-afdeling in Materialen (b.21) van de Technische Universiteit Delft, waar ik onderzoek en onderwijs doe, is een onderzoek naar het ongevallenonderzoek, door een voordracht van onderzoek naar het ongevallenonderzoek, in het licht van de vliegtuigconstructies en vliegtuigconstructies van vliegtuigconstructies, de vliegtuigconstructies, met name vliegtuigconstructies, het oplossen van vliegtuigconstructies, die in de vliegtuigconstructies.



Schijve_
red_
1992

*Dames en heren,
en in het bijzonder, U meneer de Rector Magnificus
en overige leden van het College van Bestuur,
geachte collega's en medewerkers van deze universiteit,
dames en heren studenten en oud-studenten,
beste familie, vrienden en overige gasten.*

*Het doet mij veel genoegen dat U naar de Aula bent gekomen om naar mijn
afscheidscollege te luisteren.*

INLEIDING

Gaarne zou ik U een volledig college willen geven met de klassieke omvang van 26 uur van drie kwartier. Maar daar bent U niet voor gekomen. Ik wil derhalve proberen om in hooguit drie kwartier iets te vertellen over mijn vakgebied en enige problemen, waaraan ik sinds jaar en dag intens heb gewerkt. De technische wetenschappen kunnen op verschillende manieren worden beoefend, afhankelijk van het betreffende onderwerp. Als het gaat om materialen in de vliegtuigconstructie - dat is mijn vakgebied - dan moet er nagedacht, geanalyseerd, en gerekend worden. Maar er moet evenzeer worden verkend, er moeten experimenten worden uitgevoerd, en er moeten waarnemingen worden gedaan. Vooral dat laatste, het doen van waarnemingen, veldwerk, kijken dus, kan buitengewoon boeiend zijn. Het motto van deze voordracht zou dan ook kunnen zijn: *als je niet kijkt, dan zal je het niet weten*. Het motto kan niet worden omgedraaid, als je wel kijkt dan weet je het ook, want het komt voor, zoals U bekend is, dat wij niet begrijpen wat we zien.

SITUATIESCHETS

Om deze voordracht iets beter te kunnen plaatsen, moet U eerst weten, dat ik ca. 20 jaar bij het Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium (NLR) heb gewerkt, en daarna ongeveer even lang bij deze universiteit. Bij het NLR was dat bij de hoofdafdeling Constructies en Materialen, waar ik mij moest verdiepen in materiaalonderzoek, de sterkte van constructies, niet-destructief onderzoek en het zgn. ongevallen-onderzoek. Het laatste type onderzoek moet aantonen waarom en waardoor er met een vliegtuigconstructie iets fout is gegaan, in het ergste geval een fataal vliegtuigongeluk. Het ongevallen-onderzoek is een zeer effectieve leerschool. Door de grote verscheidenheid van factoren, die een rol kunnen spelen, vereist het een brede kennis.

Bij het NLR lag de nadruk van mijn werk op vermoeiing van materialen, verbindingen en volledige constructies. Ik zal straks nog aangeven waarom dat het geval was. Bij deze universiteit, d.w.z. bij de vakgroep Vormgeving, Fabricage en Materialen (b2) van de Faculteit Luchtvaart - en Ruimtevaarttechniek, was er uiteraard een onderwijstaak, terwijl het onderzoek in belangrijke mate werd bepaald door een voortzetting van onderzoek naar het vermoeiingsgedrag van materialen in het licht van de breukmechanica, en voorts de ontwikkeling van nieuwe materialen, de metaal-vezellaminaten, met een hoge weerstand tegen het optreden van vermoeiing. Ook dat komt nog aan de orde.

De bovengenoemde twee perioden worden gekenmerkt door een aantal markante gebeurtenissen. Binnen de Nederlandse context kan dat gekarakteriseerd worden door de vliegtuigtypes, door Fokker ontwikkeld en op de markt gebracht, zie tabel 1.

Tabel 1

Fokker F27	Friendship	1° vlucht 24 nov. 1955
Fokker F28	Fellowship	1° vlucht 9 mei 1967
Fokker 50		1° vlucht 28 dec. 1985
Fokker 100		1° vlucht 30 nov. 1986
Fokker 70		
Fokker 130		

In het nieuws van alle dag wordt het succes afgemeten aan de verkoop van deze vliegtuigen, en er mag van successen worden gesproken. Dat laat echter buiten beschouwing de inspanning, die geleverd moet worden om tot een goed vliegtuig te komen. Het laat evenzeer buiten beschouwing, de vreugde die te beleven is aan de uitdaging nieuwe vliegtuigen te ontwikkelen. Die ontwikkelingen brachten uiteraard veel werk met zich mee, ook voor het NLR, o.a. het windtunnelonderzoek waarvoor het NLR over een grote deskundigheid beschikt. Problemen met constructies en materialen komen nog ter sprake. In dat verband wil ik eerst een volstrekt andere situatieschets aan U voorleggen, niet een schets van nieuwe vliegtuigen, maar van vliegtuigen, die voortijdig aan het einde van de beoogde levensduur kwamen, zie tabel 2.

Tabel 2

1954	De Havilland Comet	Van 2 vliegtuigen explodeert de romp op kruishoogte door vermoeiingsscheuren.
1957	Fokker F27	Bij de ware-grootte vermoeiingsproef op een prototype breekt de vleugel af.
1969	F-111	Vleugel breekt af in de vlucht als gevolg van een materiaalfout.
1976	Hawker Siddeley 748	Vleugelbreuk als gevolg van vermoeiing.
1977	Boeing 707	Staartvlak breekt af als gevolg van vermoeiing, vliegtuig stort neer.
1988	Boeing 737	Een vliegtuig verliest een groot deel van de romphuid op kruishoogte.

De twee Comet passagiersvliegtuigen zijn neergestort na resp. 1286 en 903 vluchten. Minitieus onderzoek van de wrakstukken toonde aan dat de romp explodeerde als gevolg van een vermoeiingsscheur bij een raam. Voor een passagiersvliegtuig met een drukcabine betekent iedere vlucht een drukwisseling. Deze wisselende belasting kan aanleiding geven tot het optreden van vermoeiingsscheuren. Maar hoe kon dat nu zo snel gebeuren, na zo weinig belastingswisselingen? Een aantal factoren heeft daartoe bijgedragen. De materiaal soort was nog al scheur gevoelig. Het ontwerp van de constructie was lokaal niet erg uitgekiend. De kennis van de breukmechanica m.b.t. de betekenis van een scheur vanuit een raam was nog niet ontwikkeld. Had de fabrikant dan helemaal niet aan het optreden van vermoeiing gedacht? Dat was wel het geval. Het rompvoorstuk was aan een vermoeiingsproef met een wisselende cabledruk onderworpen. Scheuren traden in de proef op na ca. 16000 nagebootste vluchten, dus na een ca. 12x langere levensduur dan in de praktijk. De verklaring voor dat enorme verschil met de levensduur in de praktijk moet worden gezocht in het feit, dat het rompvoorstuk eerst met een zeer hoge druk was belast om aan te tonen, dat het vliegtuig over voldoende statische sterkte beschikte. Een hoge voorbelasting leidt tot plastische vervorming van het materiaal op plaatsen waar spanningsconcentraties aanwezig zijn, d.w.z. op plaatsen waar vermoeiingsscheuren kunnen ontstaan. Op die plaatsen worden spanningspieken afgevlakt en blijven daardoor inwendige drukspanningen achter. Bij de vermoeiingsproef op het rompvoorstuk hebben deze inwendige spanningen de groei van kleine scheuren aanzienlijk vertraagd, en zodoende werd een zeer geflatteerd beeld over de levensduur verkregen, een onveilig resultaat. Was de invloed van een zeer hoge voorbelasting op daarna volgende vermoeiing dan nog niet bekend? Dat was wel het geval, het was onderzocht in het laboratorium van een Engelse universiteit. Maar helaas was deze kennis nog niet doorgedrongen tot de vliegtuigindustrie.

In 1957 werd bij Fokker een vermoeiingsproef uitgevoerd op een volledige constructie van het eerste ontwerp van de F27, op een prototype (de F-4). Na ca. 3000 nagebootste vluchten trad vleugelbreuk op als gevolg van een grote vermoeiingsscheur in de trekhuid van de vleugel. Een nieuw gemodificeerd ontwerp werd gemaakt. De dure ware-grootte proef was zeer terecht uitgevoerd. Maar er was meer aan de hand. De destijds toegepaste eenvoudige vluchtsimulatie van de praktijkbelasting, zie figuur 1a, was overdreven veilig en leidde daardoor tot een veel te pessimistisch resultaat. De sindsdien opgebouwde kennis over het ontstaan en de groei van vermoeiingsscheuren onder de grillig verloopende belastingen in de praktijk (remous, start en landing, taxi-belastingen) heeft geleid tot moderne ware-grootte vermoeiingsproeven, die een realistisch nabootsing zijn van het gebeuren in de praktijk, een zgn. vluchtsimulatieproef, zie fig. 1b. Het heeft ook geleid tot het

advies, dat een dergelijke proef voor ieder nieuw vliegtuigtype als noodzakelijk moet worden beschouwd.

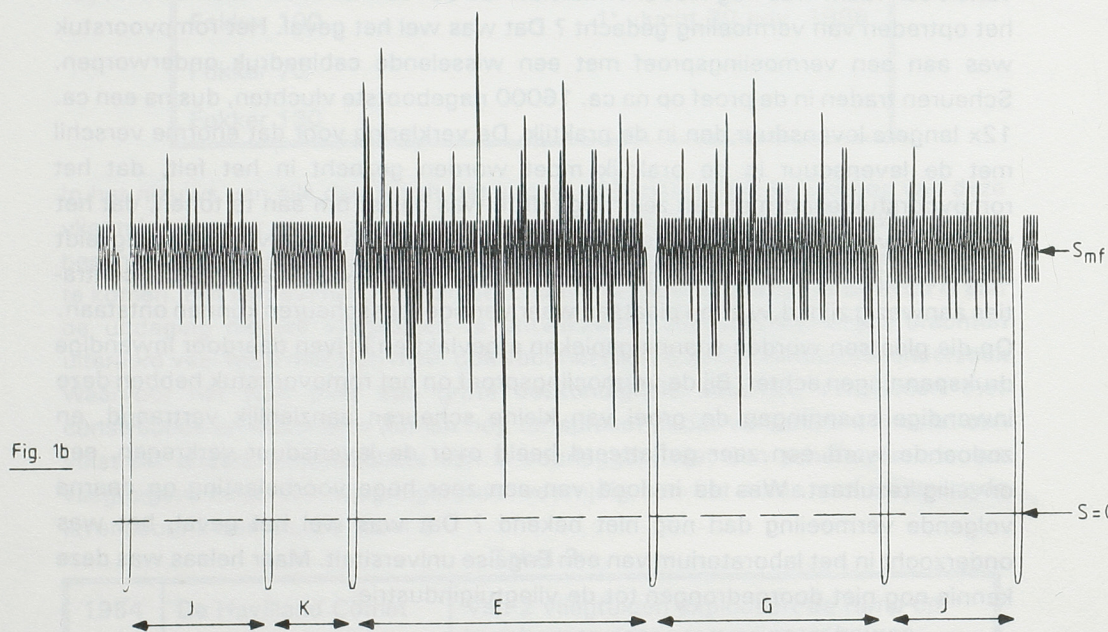
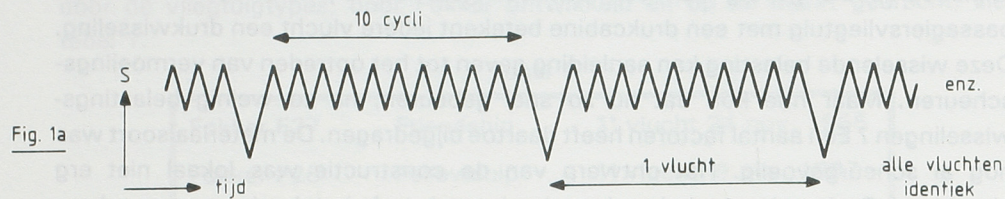


Fig. 1 De belasting op de vleugel in vluchtsimulatieproeven. Fig.1a: een vroeger toegepaste opzet. Fig.1b: nabootsing van vluchten in goed weer en in slecht weer ("randomized" volgorde).

Op het vierde in tabel 2 genoemde vliegtuig, een concurrent van de Fokker Friendship, was geen ware-grootte vermoeiingsproef uitgevoerd. Een relatief oud vliegtuig van dat type (25 759 vlieguren) verongelukte door vleugelbreuk. Het ongevallen-onderzoek toonde aan, dat er een scheur van ca. 90 cm aanwezig was. Verwacht mag worden, dat een vermoeiingsproef op het vliegtuig het ontstaan van die scheur aangetoond zou hebben. Na het ongeluk werden bij inspecties in 18 andere vliegtuigen van hetzelfde type soortgelijke scheuren gevonden met lengtes van enkele millimeters tot 6 cm, maar in één vliegtuig een scheur van ca. 70 cm.

Een schokeffect in de vliegtuigbouwwereld werd veroorzaakt door het afbreken van een vleugel van een F-111. Onderzoek van het breukvlak, zie figuur 2, toonde aan, dat de vleugel bezweken was op een scheur in een plaat van een zeer sterke, maar uiterst scheurgevoelige staalsoort. De scheur werd grotendeels in beslag genomen door een materiaalfout, die al bij de fabricage van het vliegtuig aanwezig geweest moet zijn. De grote vraag was dan ook, hoe deze fout aan de aandacht van de niet-destructieve materiaalcontrole heeft kunnen ontsnappen. De veiligheidsvoorschriften met betrekking tot vermoeiing zijn daarna bijgesteld, in belangrijke mate als gevolg van dit ongeluk, eerst de militaire voorschriften, later de civiele voorschriften. Het heeft geleid tot het begrip *damage tolerance requirements*.

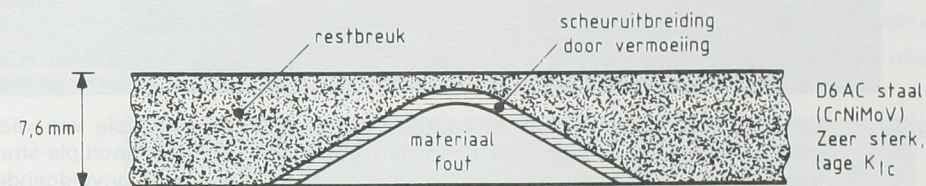


Fig. 2 Vleugelbreuk door een niet ontdekte materiaal fout in een plaat van een scheurgevoelige sterke staalsoort.

In 1977 verongelukte bij Lusaka een relatief oude Boeing 707 (16723 vluchten, 47621 vlieguren) kort voor de landing, als gevolg van het verlies van een horizontaal staartvlak. Dit bleek het gevolg te zijn van een vermoeiingsscheur in de gording van een stabilo-ligger. Het opmerkelijke is, dat Boeing de constructie zodanig had gewijzigd, dat van een fail-safe constructie gesproken kon worden. Dat wil zeggen, dat bij het bezwijken van één element van de constructie nog altijd veilig doorgevlogen kan worden. Dat principe werkt echter alleen als de constructie regelmatig wordt geïnspecteerd op de aanwezigheid van scheuren, en dat was niet het geval. In 38 andere oude toestellen van het zelfde type werden relatief kleine scheuren op dezelfde plaats gevonden, maar in één geval was de liggergording al volledig bezweken. Dit zgn. Lusaka ongeval gaf aanleiding tot diverse maatregelen van de luchtwaardigheidsautoriteiten voor het indringend bezien van de veiligheid van oude passagiersvliegtuigen. De term *geriatrische vliegtuigen* deed zijn intree.

Het laatste in tabel 2 genoemde ongeval staat bekend als het Aloha ongeluk (het vliegtuig was van Aloha Airlines). Een belangrijk deel van de huid van de romp werd er afgerukt, zie figuur 3, een stewardess werd naar buiten gezogen, het vliegtuig kon wonderbaarlijk genoeg met alle passagiers landen. Het bezwijken was het gevolg van vermoeiingsscheuren in de geklonken lapnaden, waarmee de huidplaten aan elkaar worden verbonden. Bij een groot aantal klinknagels in

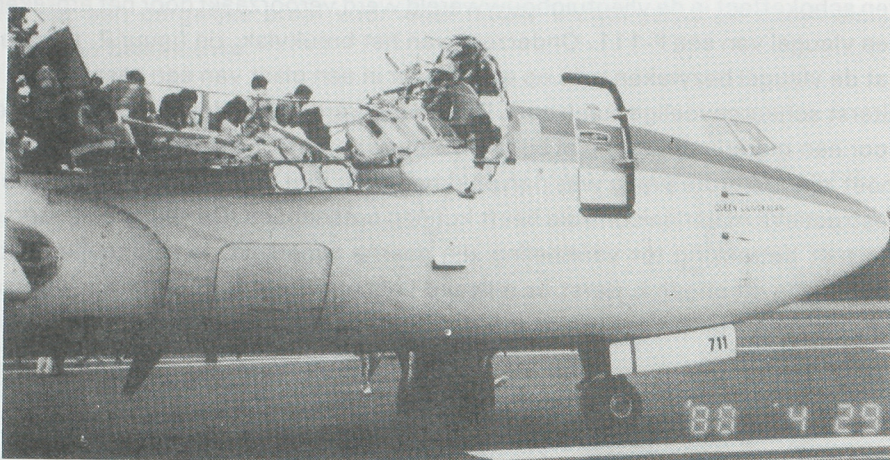


Fig.3 Een deel van de romp wordt er op kruishoogte afgerukt als gevolg van veel vermoeiingsscheurtjes op een rij in een geklonken lapnaad (multiple-site-damage, MSD). Vliegtuig was oud, slecht onderhouden en onvoldoende geïnspecteerd.

dezelfde nagelij waren kleine vermoeiingsscheuren ontstaan. Als veel van deze scheuren op een rij ontstaan, en dat is niet zo ongebruikelijk bij een geklonken verbinding, dan kan tenslotte een soort ritssluiting verschijnsel optreden. Veel kleine scheuren gaan samenvallen en vormen dan een grote scheur. Dit verschijnsel is ook van een nieuwe naam voorzien, Multiple-Site Damage, kortweg MSD, een nieuwe ziekte van oude vliegtuigen. Ook in dit geval geldt, dat goed onderhoud en inspectie het ongeluk hadden kunnen voorkomen. Alweer gaat het om een oud vliegtuig, nl. 89681 vluchten.

ONDERZOEK NAAR HET VERMOEIINGSVERSCHIJNSEL

Het ontstaan en de groei van vermoeiingsscheuren is een tamelijk complex verschijnsel. Het is afhankelijk van een groot aantal factoren. Tot op zekere hoogte mag de verworven kennis van het vermoeiingsproces in kwalitatieve zin best wel goed worden genoemd. Fundamentele aspecten van diverse invloedsfactoren worden voor een deel begrepen. Daar is wel veel onderzoek voor nodig geweest, met name veel empirisch onderzoek. Misschien zelfs te veel onderzoek, omdat er onderzoekers zijn, waarvoor het resultaat van een vermoeiingsproef alleen bestaat uit het vermelden van de bereikte levensduur in aantallen belastingswisselingen. Dat is een volstrekt minimum aan informatie. Veel meer kennis wordt verkregen als wordt nagegaan wanneer en waar scheuren ontstaan, en hoe snel en in welke vorm de scheuren groeien. Vandaar het motto, *als je niet kijkt, dan zal je het niet weten.*

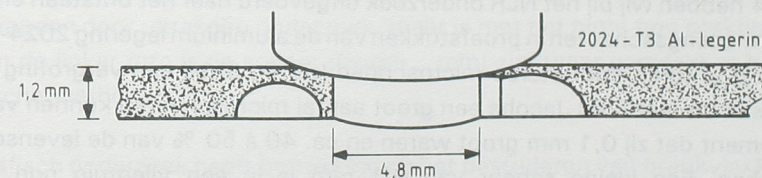


Fig.4 Twee kleine vermoeiingskernen ontstonden niet bij de rand van het klinknagelgat als gevolg van een goede klemming en lokale wrijvingscorrosie.

Een enkel voorbeeld wordt getoond in figuur 4. Eerder kwam de vermoeiingssterkte van een geklonken verbinding ter sprake. De figuur laat een breukvlak zien bij een van de klinknagels. Twee nog zeer kleine half-elliptische vermoeiingskernen zijn duidelijk zichtbaar. Zij geven aan, dat de scheurtjes *niet* geïnitieerd zijn bij de rand van het klinknagelgat, wat toch in de literatuur en in rekenmodellen vaak wordt verondersteld (pin-loaded hole concept). De klinknagels klemmen de platen

voldoende goed op elkaar, zodat de krachtsoverdracht door wrijvingskrachten in een wijder gebied kan plaatsvinden. Aan de rand van dat gebied worden dan scheurtjes geïnitieerd door het optreden van wrijvingscorrosie.

Voor het bestuderen van breukvlakken staan ons diverse middelen ter beschikking, afhankelijk van de schaal die onze interesse heeft. Een overzicht wordt gegeven in figuur 5. Diverse microscopen worden daar genoemd, maar onder geen beding mag breukvlak onderzoek voorbij gaan aan het kijken met het blote oog en met een eenvoudige loep, het zgn. macroscopische onderzoek. Het karakter van het scheurtje in figuur 4 kan op die manier vlot worden vastgesteld.

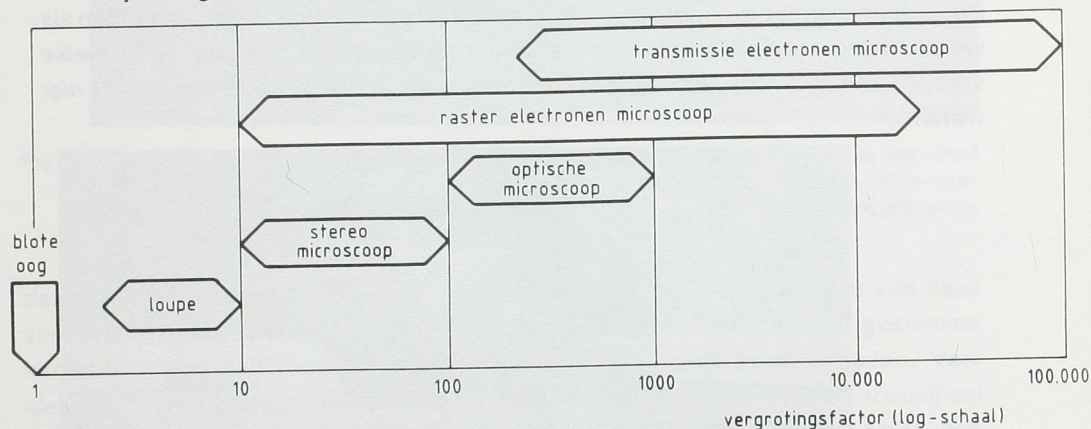


Fig.5 Een omvangrijke range van vergrotingsfactoren.

In 1964 hebben wij bij het NLR onderzoek uitgevoerd naar het ontstaan en de groei van vermoeiingsscheuren in proefstukken van de aluminium legering 2024-T3. Door langdurig te turen door stereo-microscopen (zie fig.6) bij een vergroting van 30x heb ik samen met Fred Jacobs een groot aantal microscheuren kunnen vangen op het moment dat zij 0,1 mm groot waren en ca. 40 á 50 % van de levensduur was verstreken. Een kleine scheur van 0,1 mm is in een vliegtuig nog volstrekt onschuldig. Maar op submicroscopische schaal strekt de scheur zich wel al uit over een lengte van ca. 300 000 atoom-afstanden in het kristalrooster van het aluminium. Op atomaire schaal dus al een geweldige scheur. Nog veel kleinere scheuren moeten al veel eerder aanwezig zijn. In andere laboratoria is inmiddels ook vastgesteld, dat vermoeiingsscheuren, als zij ontstaan, praktisch direct in het begin van de levensduur aanwezig zijn. Zij zijn echter langdurig voor het blote oog onzichtbaar.

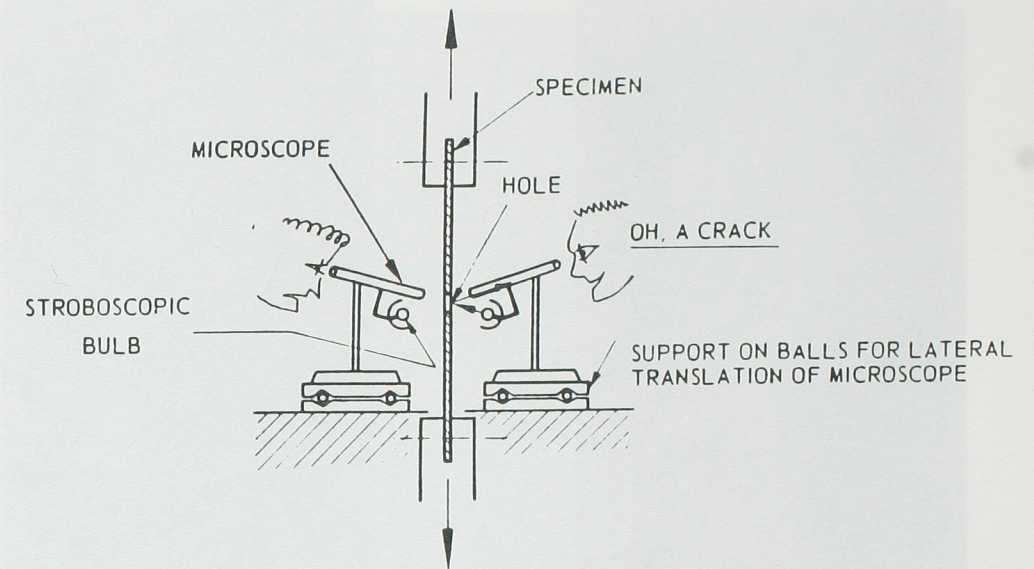


Fig.6 Het waarnemen van kleine scheuren in een vermoeiingsproef. Scheurtjes met een lengte van 0,1 mm ontstonden relatief vroeg in de levensduur.

Nu zijn ook grotere vermoeiingsscheuren voor het ongeefende oog vaak moeilijk te zien. Vermoeiing is het gevolg van cyclische plastische vervormingen in een zeer klein zone bij de tip van de scheur. Door het cyclische karakter is de macroscopische plastische vervorming praktisch nihil. Vermoeiingsscheuren "staan dicht". Figuur 7 toont een scheur in een compressorschoep van een straalmotor. De scheur werd gevonden door ultrasoon onderzoek, maar is met het blote oog praktisch niet te zien. In de linker foto is de scheur (lengte .. mm) zichtbaar gemaakt m.b.v. een magnetische methode.

Fractografisch onderzoek heeft betrekking op het bestuderen van breukvlakken, de oppervlakken van breuken, nadat het onderdeel op proefstuk bezweken is. Destijds na het bezwijken van de eerder genoemde F27 prototype vleugel heb ik het breukvlak onderzocht met de optische microscoop. Wij beschikten toen nog niet over een elektronen microscoop (EM). De optische microscoop heeft het nadeel van een zeer geringe dieptescherpte. Toch waren duidelijk lijnen waar te nemen, die correspondeerden met de scheuruitbreiding in de afzonderlijke vluchten tijdens de proef. Dat werd pas goed zichtbaar nadat de EM ter beschikking kwam. Figuur 8 toont een wel bijna klassiek te noemen EM foto van Broek en Van der Vet. Daarin zijn niet alleen de groeilijnen (striations) van de grotere belastingswisselingen te

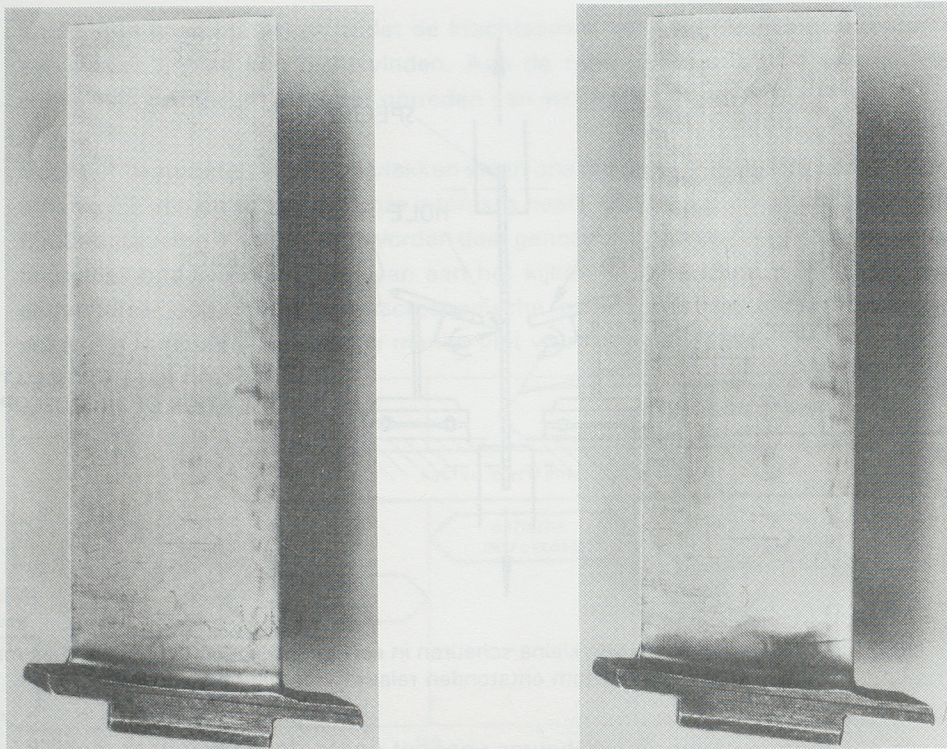


Fig.7 Een voor het oog volstrekt onzichtbare vermoeiingsscheur (ca. 10 mm) in een stalen compressorschoep van een straalmotor (linker foto) is zichtbaar gemaakt met een magnetische methode (rechter foto). De scheur werd gevonden met ultrasoon onderzoek.

zien, maar ook de fijnere lijnen, die corresponderen met de 10 kleinere belastingswisselingen in iedere vlucht. De scheuruitbreiding in iedere wisseling kan worden opgemeten. In de foto is dat gemiddeld 0.3 micron per wisseling (1 micron = 0.001 mm), maar vermoeiing is een kwestie van grote aantallen wisselingen, die zodoende toch tot grotere scheuren kunnen uitgroeien. Dergelijke microscopische breukvlak-waarnemingen hebben ons geleerd, dat scheuruitbreiding in principe in iedere belastingswisseling plaatsvindt. Daarmee konden notoire vermoeiingstheorieën, die uitgingen van een intermitterende scheurgroei (d.w.z. een spronggewijze scheuruitbreiding steeds na een groot aantal wisselingen) in het rariteitenkabinet worden bijgezet. Daar is ook het idee terecht gekomen dat microscheuren door uitgloeien nog verwijderd kunnen worden, waardoor de vermoeiingsschade geëlimineerd zou zijn. Bij microscheuren, hoe klein ook, is de atomaire samenhang verbroken (decohesie) en dat laat zich in onze technische materialen om verschillende redenen niet meer herstellen.

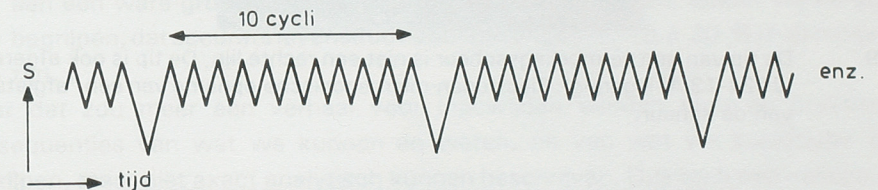
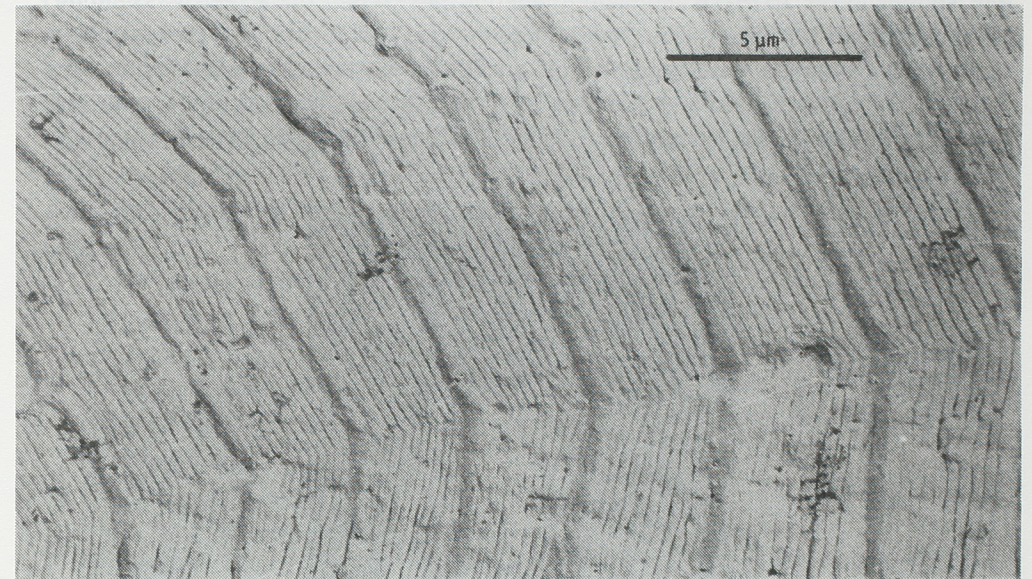


Fig.8 Scheuruitbreiding in iedere belastingswisseling, waarneembaar door groeilijnen (striations). Breukvlakfoto gemaakt met een elektronenmicroscop.

Hoe ziet een scheurtip er nu eigenlijk uit? Dat is bepaald een goede vraag. Quinton Bowles heeft dat in ons laboratorium in Delft bestudeerd. Hij was in staat om met een twee-componenten kunststof een scheur ook microscopisch geheel op te vullen. Door daarna het metaal volledig weg te etsen wordt een afgietsel van de scheur verkregen, en dat kan in de electronen microscoop worden bestudeerd. Figuur 9 is een voorbeeld daarvan. De foto is uniek om meer dan één reden. Het is de enige foto in de wereld, die groeilijnen (striations) laat zien van de bovenzijde en de onderzijde van de vermoeiingsscheur, een curiosum dus. Belangrijker is dat het scheurfront, de tip van de scheur, op microschaal geenszins een rechte lijn is (of een lijn gekromd in één vlak), zoals in de breukmechanica wordt verondersteld. De foto laat ook zien dat de scheurtip is afgerond, niet echt scherp dus. Dat is het gevolg van de microplastische vervormingen. Maar het bleek ook zo te zijn bij een lage belasting op het proefstuk, waarbij de scheur nominaal weer dicht staat. Bowles vond afrondingsstralen van de tip in de orde van iets kleiner dan 1 micron. Een tweede foto in figuur 10 (afstudeerwerk van Tony Kohlen) geeft een deel van

een scheur in de 7075-T6 aluminium legering, verkregen onder een wisselende belasting in een corrosief milieu. Hiervoor geldt weer "als je niet kijkt, dan zal je het niet weten", maar in eerste instantie gold ook "als je wel kijkt, dan weet je niet wat je ziet". In tweede instantie gaf het ons toch essentiële informatie over de interactie van een laag frequente, blokvormige wisselbelasting en een corrosief milieu.

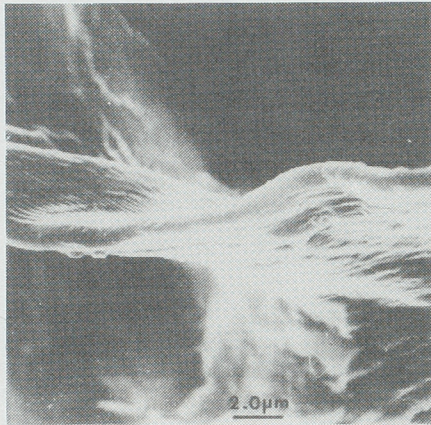


Fig.9 De tip van een vermoeiingsscheur is niet een rechte lijn. De tip is ook afgerond (2024-T3 Al-legering). Electronen-microscopische opname van een "afgietsel" van de scheur.

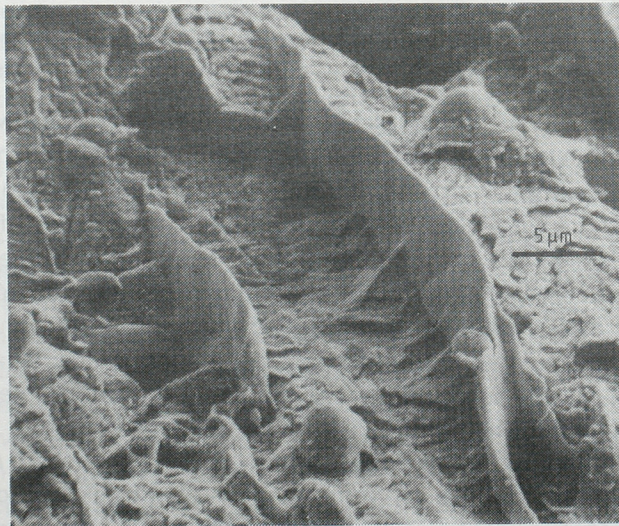


Fig.10 Het oppervlak van een vermoeiingsscheur gegroeid in een agressief milieu (zout water) (7075-T6 Al-legering) in de elektronenmicroscop.

METAAL LAMINATEN

Het onderzoek naar de groei van vermoeiingsscheuren in diverse materialen en hun invloed op de sterkte (reststerkte probleem, K_c of K_{Ic}) heeft praktische betekenis voor de materiaalkeuze van de constructeur. De resultaten zijn echter ook van belang voor het voorspellen van de groei van vermoeiingsscheuren in vliegtuigconstructies. Het feit dat de praktijkbelastingen vaak een zeer grillig verloop hebben (niet een fraai constant sinusvormig verloop), compliceert het probleem van de voorspelling aanzienlijk. De verleiding is groot om daar meer over te vertellen, bijv. over:

- scheurgroeivertraging door hoge belastingen,
- scheurgroei onder realistische vluchtsimulatie-belastingen,
- scheursluiting (crack closure) en daarop gebaseerde predictie-methoden, waar Arie de Koning van het NLR uitstekend werk heeft verricht,
- het delicate probleem van het trunckeren van belastingsspectra in vluchtsimulatieproeven,
- het inrichten van een vluchtsimulatieproef, een probleem waarbij Ben de Jonge van het NLR internationaal zijn sporen heeft achter gelaten,
- de bittere noodzaak voor de vliegtuigindustrie om ieder nieuw vliegtuigtype aan een ware-grootte vermoeiingsproef te onderwerpen, omdat wij nu goed begrijpen, dat accurate levensduur-voorspellingen (± 10 á 20 %) niet mogelijk zijn.

Maar dat zou meer een verhaal voor ingewijden worden over de praktische consequenties van wat we kunnen en weten, en van wat we kwalitatief wel begrijpen, maar niet exact analytisch kunnen beschrijven. Dus toch een college, en dat was niet de bedoeling.

Een enkel voorbeeld uit de breukmechanica wil ik U niet onthouden. Bovendien vermeld ik gaarne, dat in Delft aan de breukmechanica een belangrijke bijdrage is geleverd door Koiter en Benthem. De lineair elastische breukmechanica maakt gebruik van een veldparameter, de spanningsintensiteitsfactor K , die een directe maat is voor de spanning rondom de tip van een scheur, en daardoor bepalend is voor wat er bij die tip zal gebeuren (let wel "bepalend", niet "verklarend"). Het is interessant om te zien hoe K verloopt voor een scheur bij de rand van een ronde uitsnijding in een plaatveld. In figuur 11 wordt een vergelijking gemaakt tussen een dergelijke randscheur en een veel grotere scheur, waarbij het gat als een deel van de randscheur wordt opgevat. Het blijkt, dat al voor een kleine randscheur de waarde van de spanningsintensiteitsfactor al spoedig van dezelfde grootte is als voor de veel grotere scheur. Dat heeft een rol gespeeld bij de eerder genoemde Comet ongelukken. Kleine scheuren ontstonden bij een klinknagelgat, dicht bij de rand van een gat op een plaats waar een duidelijke spanningsconcentratie aanwezig was. Nadat een scheur de rand van het raam bereikte, zie figuur 12, was er plotseling

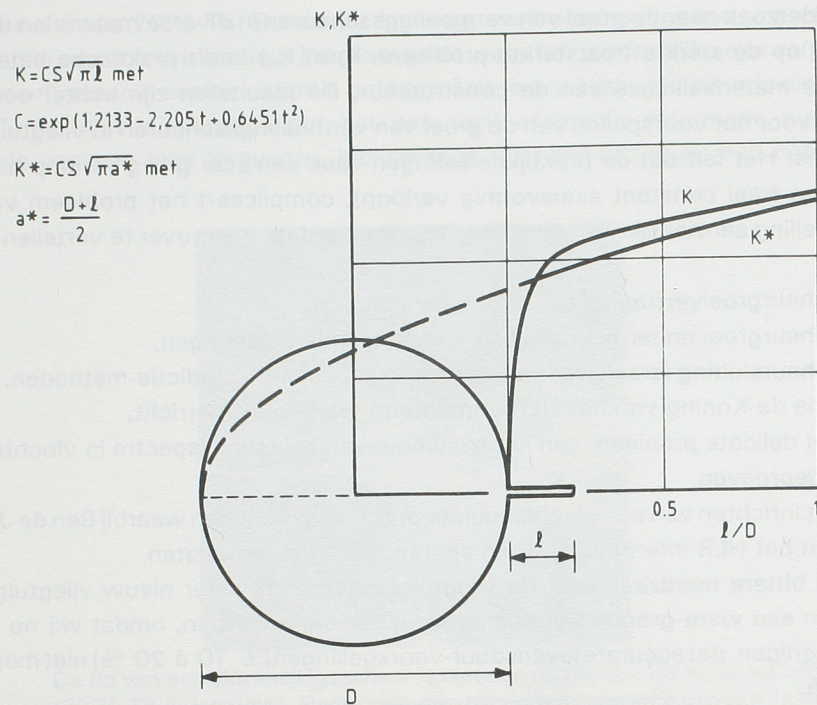


Fig.11 De spanningsintensiteitsfactor van een kleine randscheur bij een rond gat is al spoedig relatief hoog.

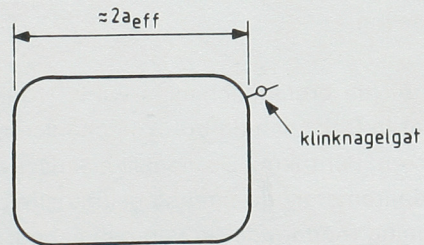


Fig.12 Een kleine randscheur bij een raam leidt tot een hoge effectieve spanningsintensiteitsfactor.

een scheur met een grote "effectieve" lengte aanwezig. Het leidde tot het bezwijken van de romp. Dat resultaat was mede afhankelijk van de constructie rondom het raam en de materiaalsoort, maar waar het hier om gaat is dat m.b.v. de breukmechanica dergelijke situaties bij het ontwerpen van een vliegtuigconstructie geanalyseerd kunnen worden.

METAAL-LAMINATEN

Dames en heren,

Bij het ontwerpen van een vliegtuigconstructie kunnen wij ons wapenen tegen mogelijke vermoeiingsproblemen door gebruik te maken van minder vermoeiingsgevoelige materialen, en door het concept van het constructief ontwerp er op af te stemmen, bijv. door het kiezen voor een fail-safe constructie, of een zgn. damage-tolerant constructie. Een mengvorm ontstaat wanneer een constructie wordt opgebouwd uit op elkaar gelijkde dunne platen. Een voorbeeld wordt

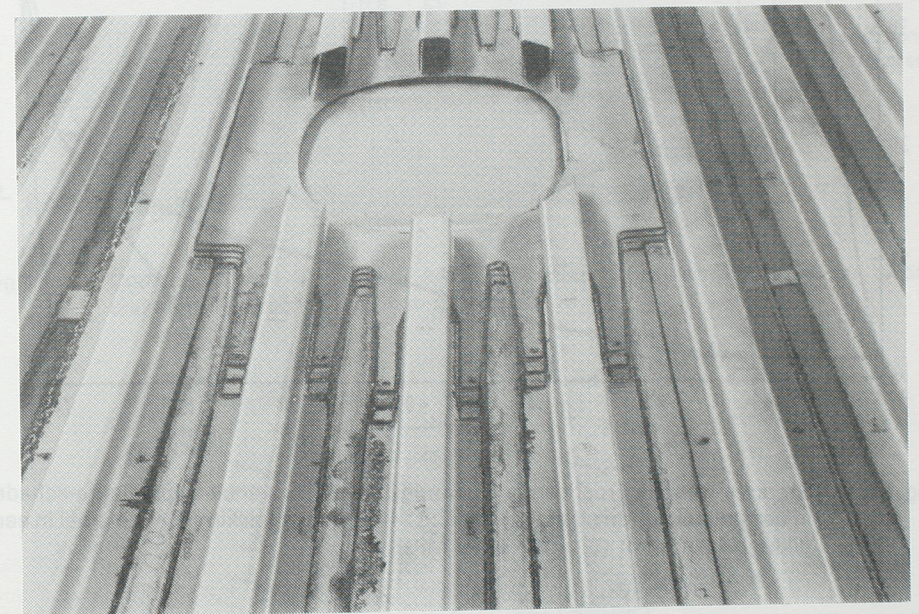


Fig.13 Een vleugel huid-constructie met op de huid gelijmde verstijvers en versterkingsplaten rond een luik, Fokker ontwerp.

gegeven in figuur 13. Wanneer een vermoeiingsscheur in een van de platen ontstaat, dan groeit hij niet onmiddellijk door in de andere platen, omdat er tussenliggende lijmlagen aanwezig zijn. Bovendien groeit die scheur in de plaat zelf ook niet zo snel meer, omdat het opengaan van de scheur onder een trekbelasting wordt beperkt door de andere platen. Het inzicht over het gedrag van vermoeiingsscheuren in dergelijke gelamineerde platen is ontwikkeld door o.a. het afstudeerwerk van Harry van Lipzig, Berry van Gestel en Harry Hoemakers. In figuur 14 wordt een voorbeeld gegeven over de scheurgroei vanuit een oppervlaktebeschadiging. In een 5 mm dikke plaat groeit de scheur relatief snel en ongehinderd verder. In het materiaal bestaande uit 5 op elkaar gelijkde 1-mm platen is die groei

veel langzamer. Aanvankelijk scheurt alleen de buitenste laag, pas later dringt de scheurvorming door in de andere lagen. Dat dit principe ook werkt in een constructie bleek bij ware-grootte vermoeiingsproeven op een vleugel huid-constructie.

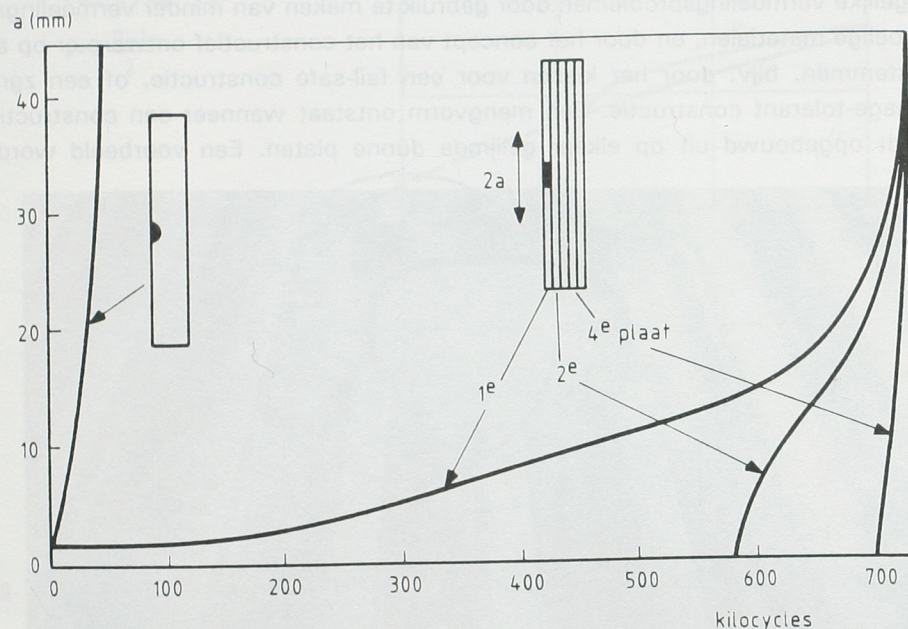


Fig.14 Sterk vertraagde groei van een vermoeiingsscheur vanuit oppervlakte-schade in een gelamineerde plaat (5x1 mm 2024-T3) in vergelijking met de groei in een dikke plaat (5mm) ($S = 80 \pm 40$ MPa).

Onder leiding van Boud Vogelesang is in ons laboratorium een zeer fundamentele stap genomen in de ontwikkeling van deze gelamineerde platen. Tussen de metaalplaten worden lagen aan gebracht van zeer sterke en stijve vezels, en tegelijkertijd wordt de dikte van de metaallagen aanzienlijk verlaagd, nl. tot 0,4 mm en dunner. De vezels worden ingebed in de lijmlagen (zgn. prepregs). Een doorsnede van het metaal-vezel laminaat wordt gegeven in figuur 15. Aan deze metaal-vezel laminaten zijn inmiddels de handelsnamen ARALL en GLARE verbonden, waarbij in ARALL aramide vezels worden toegepast (TWARON vezels van AKZO) en in GLARE geavanceerde glasvezels (R-glass en S-glass).

In figuur 16 wordt geschetst waarom deze vezels al bij een kleine scheur de groei aanzienlijk kunnen vertragen. Bij scheurgroei in de metaallagen bezwijken de vezels

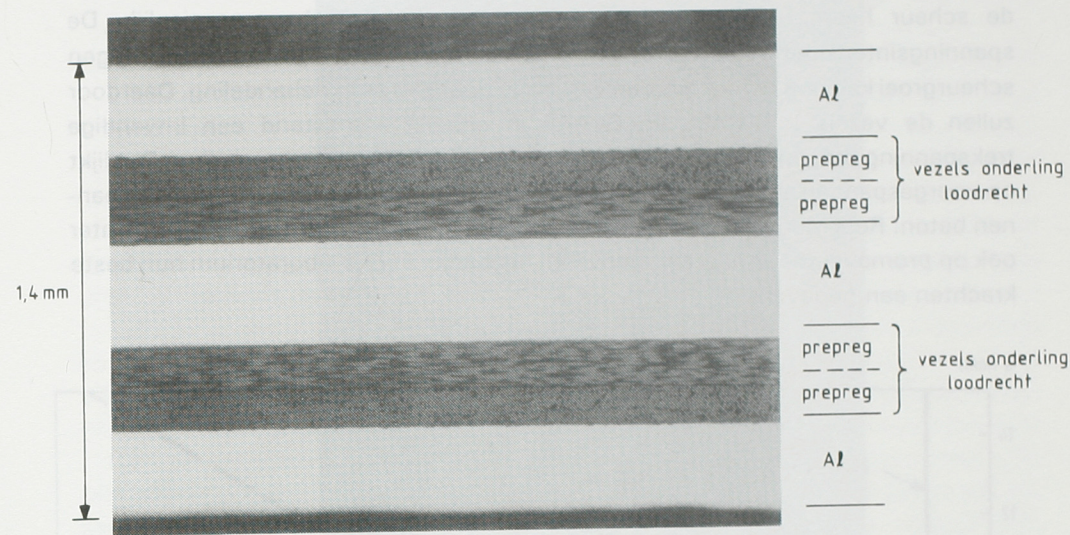


Fig.15 Doorsnede van biaxiaal GLARE met uni-directionele vezellagen in twee onderling loodrechte richtingen.

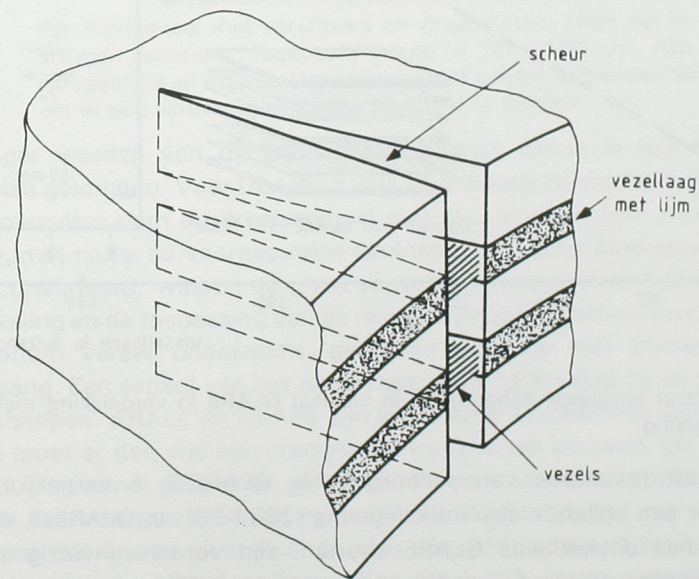


Fig.16 De vezels overbruggen de scheur, leiden kracht door de scheur en belemmeren het opgaan van de scheur. Dat leidt tot een aanzienlijk verlaagde scheurgroeisnelheden.

niet, zij overbruggen de scheur (crack bridging), leiden een deel van de kracht door de scheur heen, en beperken het opengaan van de scheur aanzienlijk. De spanningsintensiteitsfactor wordt sterk gereduceerd. De hoge weerstand tegen scheurgroei kan nog verder worden verhoogd door een strekbehandeling. Daardoor zullen de vezels in ARALL en GLARE in onbelaste toestand een inwendige trekspanning dragen, en de aluminiumlagen een inwendige drukspanning. Dat lijkt op voorgespannen aluminium, maar het is niet echt te vergelijken met voorgespannen beton. Roel Marissen was de eerste student, die aan ARALL werkte en er later ook op promoveerde. Andere promovendi hebben er in ons laboratorium hun beste krachten aan gegeven.

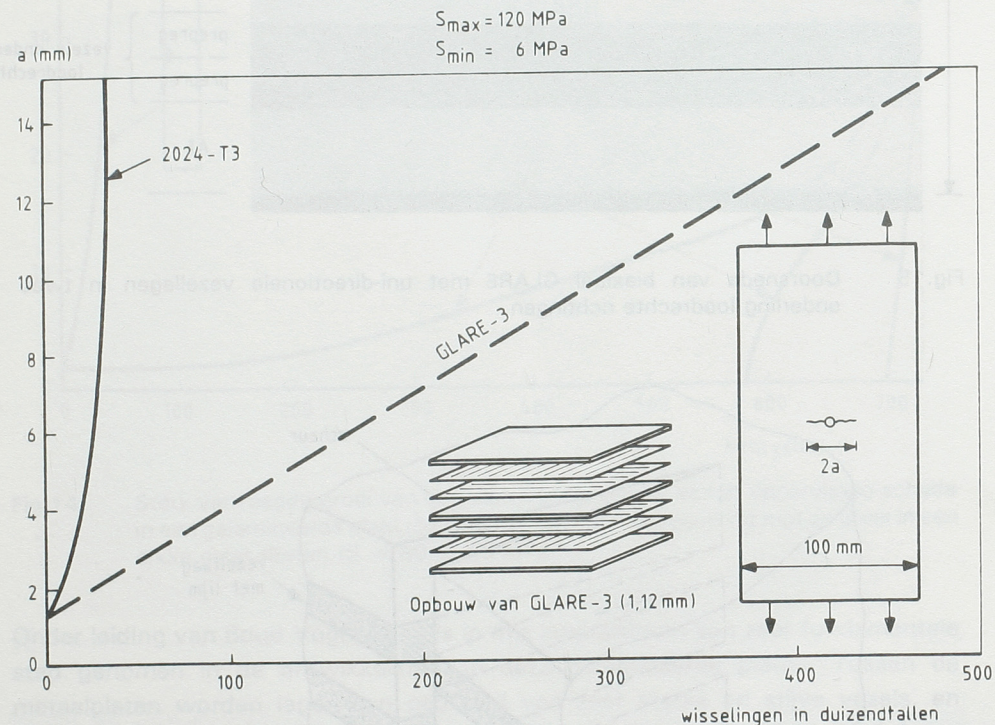


Fig. 17 Uiterst langzame scheurgroei in biaxiaal GLARE in vergelijking met een Al-legering.

Figuur 17 geeft resultaten van scheurgroei in GLARE-3 in vergelijking met resultaten voor een bekende aluminiumlegering (2024-T3). In GLARE-3, één van de vier inmiddels ontwikkelde GLARE soorten, zijn vezels aanwezig in twee onderling loodrechte richtingen, zie figuur 15. Deze GLARE-soort is bedoeld voor toepassing in de huid van een vliegtuigromp, waar een biaxiale belasting aanwezig is. Figuur 17 laat zien, dat voor de aluminiumlegering de groeisnelheid toeneemt bij

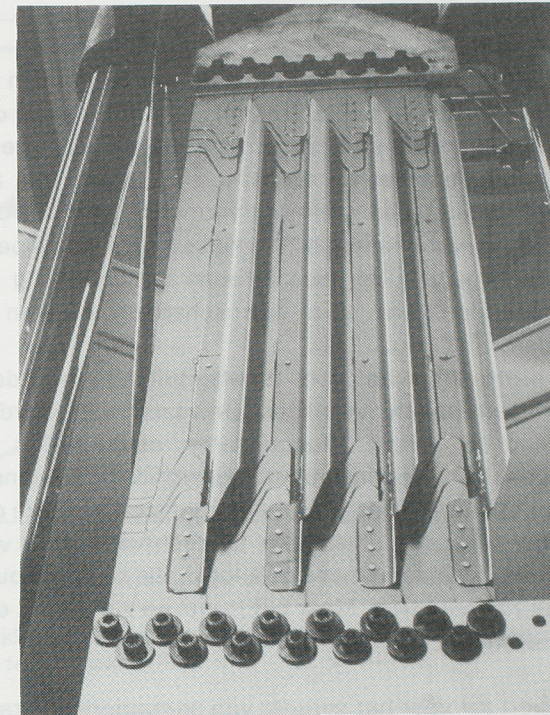


Fig. 18 Een huidpaneel met verstijvers en vingerplaten, zoals dat in een vleugelconstructie voorkomt. Breedte x lengte = 30 x 100 cm. Alle onderdelen zijn vervaardigd uit ARALL. Het paneel is met bouten verbonden aan inklemsstukken om in een vermoeigsmachine beproefd te worden.

het langer worden van de scheur. Dat gedrag wordt in het algemeen voor materialen gevonden. Voor GLARE-3 was de scheurgroeisnelheid een orde kleiner, maar bovendien nam de groeisnelheid niet toe. Voor andere ARALL en GLARE soorten, met name de voorgestreekte laminaten, zijn zelfs afnemende groeisnelheden geconstateerd, waarbij de groei soms tot stilstand kwam (crack arrest). De ontwikkeling en de toepassing van de nieuwe metaal-vezellaminaten worden in ons laboratorium verder onderzocht, gedreven door de niet aflatende inzet van Vogelesang. Een aspect van het onderzoek heeft betrekking op de technologische eigenschappen. ARALL en GLARE zijn in principe beschikbaar als plaatmateriaal. Maar je moet er dan wel een constructie van kunnen bouwen. De platen moeten bewerkt, vervormd, gelijmd en geklonken kunnen worden. Inmiddels is gebleken, dat deze bewerkingen zeer wel mogelijk zijn. Figuur 18 laat een verstijfd paneel zien, zoals dat in een vleugelconstructie kan voorkomen. Zowel de huid als de verstijvers zijn van ARALL gemaakt. Een aanzienlijk groter paneel is door Fokker vervaardigd en met succes aan een vluchtsimulatieproef onderworpen. Een gewichtsbesparing van ca. 30 % in vergelijking met een bestaande constructie werd verkregen.

NABESCHOUWING

In het verleden is de ontwikkeling van nieuwe materialen meestal een zeer langdurige zaak geweest. Dat heeft minstens drie belangrijke oorzaken.

(i) Van een nieuw materiaal moet een grote variëteit van eigenschappen bekend zijn, voordat een industrie het zal toepassen. Het gaat niet alleen om gewicht (soortelijke massa), sterkte en stijfheid, vermoeiing en corrosie, maar ook om bewerkbaarheid en vervormbaarheid (werkplaatseigenschappen), om thermische eigenschappen, het gedrag bij mechanische beschadiging (impact damage), toxische eigenschappen, enz. Die eigenschappen moeten allemaal grondig onderzocht worden.

(ii) Een tweede probleem is dat voor de vliegtuigindustrie, de luchtlijnen en de luchtwaardigheidsautoriteiten overtuigend bewezen moet worden, dat het nieuwe materiaal ook goed en veilig zal functioneren, nadat het is ingebouwd in een vliegtuigconstructie. Het materiaal moet "gecertificeerd" kunnen worden.

(iii) Het derde aspect betreft economische en maatschappelijke consequenties. Het zijn deze consequenties, die uiteindelijk de rechtvaardiging van ons onderzoek bepalen. Ik wil U niet overladen met fraseologie, die bij beschouwingen in officiële documenten vaak zo welig tiert. Maar het is wel op zijn plaats om enige randvoorwaarden te memoreren.

De civiele luchtvaart zal voor het vervoer van passagiers en vracht in de komende decennia gebruik maken van bestaande en nieuwe vliegtuigtypen. Figuur 19 geeft een voorspelling over vliegtuigen, die momenteel in gebruik zijn. De voorspelling is afkomstig van Goranson van Boeing. Vliegtuigen worden langdurig en intensief gebruikt. Een ontwerp-levensduur van 20 jaar is tegenwoordig gebruikelijk. Maar zoals uit de figuur blijkt, zijn er nu al vliegtuigen, die deze levensduur overschrijden. Dat leidt tot het probleem van *aging aircraft*. Op mijn vakgebied heeft dat betrekking op vermoeiing en corrosie, goed onderhoud en betrouwbare inspectiemethoden. Een diepgaande kennis is voor het voorspellen en beheersen van lange levensduren, voor de analyse van de veiligheid, en voor het beheer van een vloot van diverse vliegtuigen, van eminent belang.

Dames en heren,

De strategie m.b.t. veilig vliegen staat helaas onder druk van uiterst gecompliceerde economische verhoudingen. Daar wil ik niet op ingaan, ik ben geen econoom of politicus, maar een vliegtuigbouwkundig ingenieur, een materialenman, een onderzoeker. Als zodanig mag ik wel constateren, dat we in een redelijk goede situatie verkeren om de problemen van aging aircraft technisch onder ogen te zien. Als er al een zwakke schakel is, dan is dat in eerste instantie de infrastructuur om de problemen in de praktijk te beheersen, waarbij de "human factor" een rol van betekenis speelt.

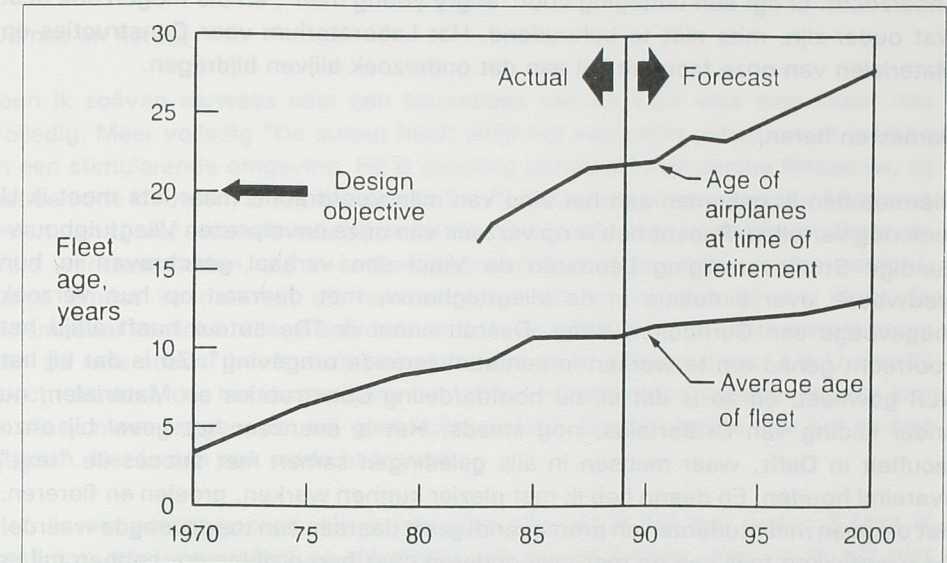


Fig.19 De leeftijd van bestaande passagiersvliegtuigen. Voorspelling van Goranson (Boeing) tot het jaar 2000.

Een geheel andere benadering van de betreffende problematiek is de introductie van nieuwe materialen. Uiteraard denk ik dan aan ARALL en GLARE. Op dit moment worden deze metaal-vezel laminaten op de markt gebracht door de Structural Laminates Company, een zgn. joint venture van de Amerikaanse aluminium fabrikant ALCOA en van het AKZO bedrijf. De eerste daadwerkelijke toepassingen voor serie productie zijn inmiddels aangekondigd.

Waarom kunnen die materialen betekenis hebben voor het spanningsveld tussen veiligheid en economie? Ik noem U een aantal redenen:

- lichter construeren van vermoeiingskritieke onderdelen, bijv. de trekhuid van de vleugel, de beplating van een drukcabine. De betekenis van een lager constructiegewicht hoeft hier niet nader te worden toegelicht.
- langere inspectie-perioden, omdat scheurtjes mogelijk wel ontstaan, maar niet of zeer langzaam doorgroeien.
- een geringe gevoeligheid tegenover corrosie-schade.
- specifieke toepassingen, zoals bijv. scheurstopperbanden en beslaglippen. De nieuwe materialen kunnen voor meer veiligheid zorgen, ook in gevallen waarbij gewichtswinst niet het primaire doel is.

Blijkbaar kan met deze nieuwe materialen winst geboekt worden in meer dan één opzicht. Evenwel, de toepassing van een nieuw materiaal begint met investeren, het nemen van technische en economische risico's, en die moeten worden

onderzocht. Er ligt een uitdaging voor "angry young man", en die mogen ook best wat ouder zijn, mits niet te behoudend. Het Laboratorium voor Constructies en Materialen van onze faculteit zal aan dat onderzoek blijven bijdragen.

Dames en heren,

Hiermee ben ik gekomen aan het eind van mijn voordracht, maar iets moet ik U toch nog vertellen. Recent heb ik op verzoek van onze onvolprezen Vliegtuigbouwkundige Studievereniging Leonardo da Vinci een verhaal geschreven in hun blauwboek over simulatie in de vliegtuigbouw, met daaraan op hun verzoek toegevoegd een Curriculum Vitae. Daaruit citeer ik "De auteur heeft altijd het voorrecht gehad om te werken in een stimulerende omgeving". Zo is dat bij het NLR geweest, en zo is dat bij de hoofdafdeling Constructies en Materialen, nu onder leiding van Dr. Bartelds, nog steeds. Het is evenzeer het geval bij onze faculteit in Delft, waar mensen in alle geledingen samen met succes de "tent" overeind houden. En daarin heb ik met plezier kunnen werken, groeien en floreren. Het omgaan met studenten en promovendi geeft daaraan een toegevoegde waarde. De gesprekken met hen en met vele anderen over hun problemen, hebben mij er steeds opnieuw toegebracht om na te denken, en zo mogelijk een bijdrage tot een oplossing te geven.

Bij het opstellen van deze voordracht heb ik gekozen voor een vaktechnische benadering. Zodoende bleef het onderwijs onderbelicht, om niet te zeggen onbelicht, en dat is niet omdat het niet mijn belangstelling heeft. Gelukkig kan ik constateren, dat de zorg om ons curriculum, de voortgezette opleidingen, en om alles wat voor onze studenten van betekenis is, in goede toegewijde handen is.

Aan veel mensen ben ik dank verschuldigd. Het begon in de vroege vijftiger jaren, toen Dr. Plantema van het NLR de materialen sector van zijn afdeling wilde versterken. Professor van der Maas vroeg lang geleden aan Harry van Leeuwen en aan mij om na 4 jaar vliegtuigbouwkundige opleiding op materialen af te studeren en dan bij het NLR in dienst te treden. Een vraag van professor van der Maas was in principe geen vraag, maar een opdracht in het belang van de Nederlandse vliegtuigbouw. Ik ben er op ingegaan en heb er nooit spijt van gehad. Ik werd een medewerker in een boeiend en spannend vakgebied waar veel kennis te vergaren was. Bovendien gaf Dr. Plantema mij alle steun om problemen technisch-wetenschappelijk te analyseren. Gaarne zou ik nog namen willen noemen van anderen, waarmee contacten en samenwerking zulke waardevolle ervaringen waren. Maar ik onttrek me aan dat probleem, met uitzondering van Boud Vogelesang en Theo de Jong, Boud, die zoveel voor de bloei van en de sfeer in ons laboratorium heeft gedaan, en Theo, die het complementaire werk deed, en niet voor de vakgroep alleen. Met hen was er een niet gereguleerde vanzelf gegroeide werkverdeling, geboren uit een gemeenschappelijk gevoel voor teamgeest. En in feite geldt dat voor de gehele vakgroep.

Dames en heren,

toen ik zoëven verwees naar een blauwboek van de VSV was mijn citaat niet volledig. Meer volledig "De auteur heeft altijd het voorrecht gehad om te werken in een stimulerende omgeving. Hij is gelukkig getrouwd met Janine Risseeuw, zij hebben drie kinderen, Ellen, Warden en Bart". Dat weet U dan ook weer. Maar wat velen van U niet weten is hoe bij de familie Schijve de werkverdeling in elkaar zit. Vele werkzaamheden, die in andere gezinnen door huisvaders worden verricht, soms omdat ze dat niet uit handen willen geven, werden bij ons door de huismoeder verricht. Alleen daardoor en door de intense en oprechte morele steun van de huismoeder heeft deze huisvader zijn werk kunnen doen. Als U daarbij mocht denken, dat het dan volgens het geijkte rollenpatroon verlopen is, dan kan ik alleen maar zeggen, dat wij geen rollen spelen. Zonder Janine was het zo niet gegaan. Het is dan ook mede haar werk.

Heb ik niet eerder gezegd, als je niet kijkt, dan zal je het niet weten ? Mag ik besluiten met een variant op dit motto: *als je niet luistert, dan zal je het niet verstaan.*

Ik dank U voor het luisteren.

