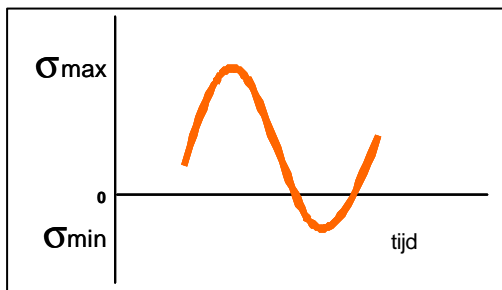


IN DYNAMISCH BELASTE CONSTRUCTIES

Het begrip dynamische belasting kan worden omschreven als: een belasting waarvan de grootte in de tijd varieert (figuur 61). Het gedrag van materialen bij een wisselende belasting wordt bepaald door de werkelijke spanningsverdeling in de dwarsdoorsnede van het onderdeel. Vermoeiing van het onderdeel ontstaat door een ongelijkmatige spanningsverdeling over metallurgische of geometrische kerf, als gevolg van voortdurende spanningswisselingen die door microscheuren ongelijkmatig worden verdeeld. Het materiaal is niet bestand tegen deze spanningspieken en resulteert in microscheurtjes die uiteindelijk tot een vermoeiingsbreuk leiden.



Voorbeeld van een wisselende belasting

De spanningsverhouding (R) wordt bepaald door de verhouding tussen σ_{\max} en σ_{\min} .
 $R = \sigma_{\max} / \sigma_{\min}$. Een zuivere wisselspanning resulteert in -1 , terwijl een zwelbelasting 0 is.

Kennis van de trilsterkte van een materiaal is noodzakelijk voor de berekening om een vermoeiingsbreuk te voorkomen. Afhankelijk van de trillingsfrequentie en de belastingsgraad wordt onderscheid gemaakt tussen:

Tijdsterkte:

Belastingsgevallen met periodiek optredende wisselingen bij een lager aantal wisselingen dan de vermoeiingssterkte (over het algemeen 10^7 aantal wisselingen), kunnen gedurende een bepaalde tijd boven de vermoeiingssterkte worden belast, zonder dat een vermoeiingsbreuk optreedt. Dergelijke gevallen komen onder andere voor bij civiele en bouwkundige constructies. Het aantal wisselingen gedurende de levensduur van de constructie (30 jaar) is

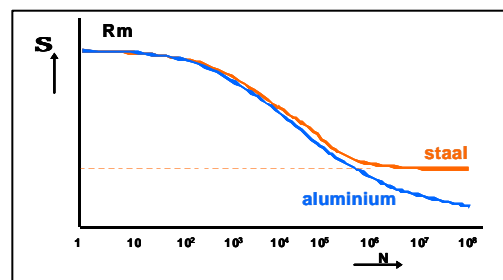
veelal lager dan het aantal wisselingen waar de vermoeiingssterkte mee aanvangt. Er kan dan met een hogere waarde worden gerekend.

Bedrijfssterkte:

In de praktijk is de belastingsintensiteit op een onderdeel bijna nooit regelmatig. Veelal treden sterke variaties op in spanningsfrequentie en – amplitude. Als gevolg hiervan is het niet mogelijk met behulp van algemene belastingsgegevens de te verwachten levensduur van een product exact te bepalen. Van aluminium zijn in beperkte mate vermoeiingsgegevens bekend die in het algemeen sterk uiteen lopen. Voor het bepalen van de exacte levensverwachting zijn veel gegevens nodig rondom de bedrijfsomstandigheden. In de ontwerpfase wordt overwegend de vermoeiingssterkte gebruikt.

Vermoeiingssterkte:

Voor het berekenen van een dynamisch belast onderdeel is het van belang te weten welke maximale spanning een materiaal kan verdragen, zonder dat het onderdeel bezwijkt aan de gevolgen van vermoeiing. De vermoeiingssterkte ligt beduidend lager dan de maximaal toelaatbare spanning bij statisch belaste onderdelen, hetgeen goed tot uitdrukking komt in de diagrammen van Wöhler¹. Bij de spanningsintensiteit waar de lijn van de teruglopende sterkte afvlakt en horizontaal gaat lopen wordt de vermoeiingssterkte genoemd.



¹ De Duitse spoorweg ingenieur August Wöhler (1819-1914) heeft de relatie tussen de grootte van wisselende belastingen en de levensduur van stalen wagonassen onderzocht en deze vastgelegd in z.g. Wöllerkrömmen of SN-curves.

Wöhlerkromme van staal en aluminium. Daar waar de lijn van de teruglopende sterkte horizontaal loopt, wordt het materiaal niet zwakker en wordt de vermoeiingssterkte genoemd.

De Wöhlerkromme van staal blijkt na circa 10.000.000 (10^7) spanningswisselingen horizontaal te lopen. Dit betekent dat wanneer een stalen constructie wordt belast met een maximale wisselende belasting σ_v , de levensduur oneindig verondersteld mag worden. In dat geval mag de constructeur aannemen dat de constructie niet meer zal bezwijken door vermoeiing. In de praktijk test men staal over het algemeen tot circa 2 miljoen spanningswisselingen.

In dit voorbeeld neemt de Wöhlerkromme van aluminium pas na een zeer groot aantal spanningswisselingen een enigszins horizontaal verloop aan. Bovendien blijkt de vermoeiingssterkte veel lager dan die van staal te zijn. Dit betekent dat **aluminium gevoeliger** is voor vermoeiing dan staal en dat de constructeur hier terdege rekening mee dient te houden.

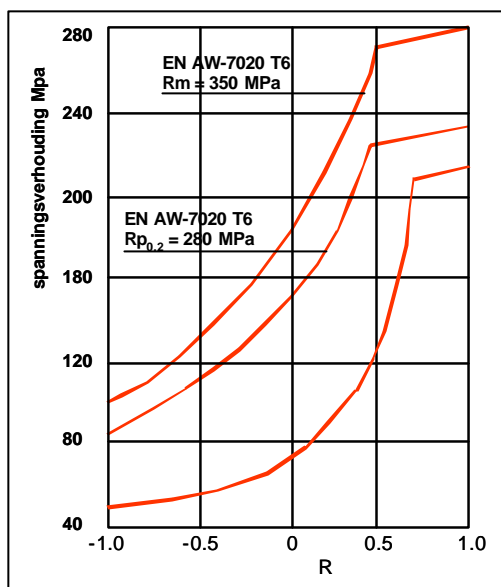
Om een indruk te krijgen van het gedrag van een aluminiumconstructie onder dynamische belastingen, wordt in de praktijk deze constructie veelal tussen de 5 miljoen en 7 miljoen spanningswisselingen getest (afhankelijk van de toepassing). Bezwijkt de constructie na dit aantal wisselingen niet, dan mag men de levensduur als oneindig beschouwen.

Van aluminium zijn in tegenstelling tot staal, maar weinig vermoeiingsdiagrammen bekend waardoor het voor een constructeur lastig zijn om op basis van goede data te construeren.

Vuistregel

Er bestaat geen algemeen geldend wiskundig verband tussen de waarden voor de vermoeiingssterkte en de sterkte R_m en $R_{p0.2}$. Toch kunnen, afhankelijk van het materiaal bepaalde benaderingswaarden bepaald worden. Als vuistregel geldt bij zwelbelastingen $\sigma = 2/3 \times R_{p0.2}$. Voor zuivere wisselende belastingen geldt: $\sigma = 1/3 \times R_{p0.2}$.

In bovenstaande figuur wordt een vermoeiingssterktediagram (VSD) weergegeven volgens Moore-Kommers-Jaspers van de legering EN AW-7020 T6. Horizontaal staat de belastingsverhouding en verticaal de maximaal toelaatbare spanning op het onderdeel. Onder een pure wisselende belasting ($R=-1$) mag deze legering volgens dit diagram circa 100 MPa bedragen.



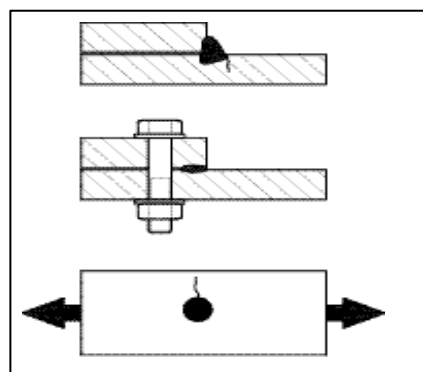
Maximaal toelaatbare spanning van een aluminiumlegering onder een dynamische belasting, volgens Moore-Kommers-Jaspers, waarbij horizontaal de belastingsgraad, verticaal spanningsverhouding.

Dit komt overeen met de bovengenoemde vuistregel $\sigma = 1/3 \times R_{p0.2}$ ($1/3 \times 280 = 94$ MPa). Hetzelfde geldt voor een zwel of sprong belasting, waarbij geldt $2/3 \times 280 = 186$ MPa.

VERMOEIING

Bij wisselende belaste constructies, kan vermoeiing een belangrijke rol spelen. De verhouding tussen eigen gewicht en veranderlijke belasting is in deze gevallen vaak laag. De verhouding tussen minimum en maximum spanning, ten gevolge van belastingswisselingen, is dan groot. Hierdoor kan vermoeiing al vrij snel maatgevend zijn in het ontwerptraject. Vermoeiingsscheuren ontstaan meestal daar waar zich hoge spanningsconcentraties voordoen

- de teen c.q. wortel van de las in gelaste verbindingen
- dikte-overgangen in het materiaal en gaten
- oppervlakken onder hoge druk ("fretting")

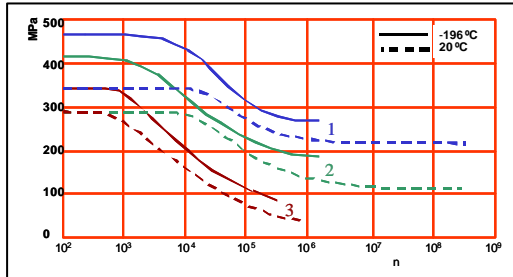


gevoelige locaties voor het ontstaan van vermoeiingsscheuren (bron: TALAT)

MAATREGELEN TEGEN VERMOEIING

In de onderstaande figuur is een Wöhlerkromme afgebeeld van de aluminiumlegering EW AW-5083. Het betreft hier de vermoeiingseigenschappen van:

- 1 het basismateriaal bij kamertemperatuur en bij -196°C
- 2 een X-stomplasmaad bij kamertemperatuur en bij -196°C (gelast met EN AW-5083)
- 3 basismateriaal voorzien van een kerf

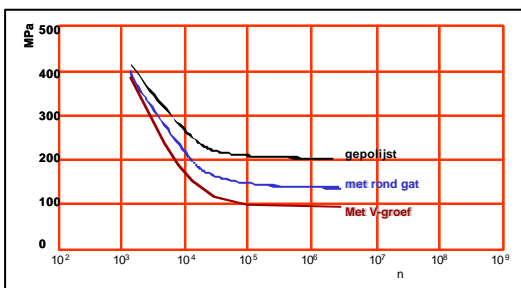


Vermoeiingscurve van aluminium EW AW AlMg4,5Mn en een X-stomplasmaad bij kamertemperatuur en -196°C

Uit figuur de blijkt dat kerfwerking een zeer negatieve invloed heeft op de vermoeiingseigenschappen van een materiaal. Dit geldt zowel voor aluminium als voor andere materialen. Voor de constructeur betekent dit dat kerfwerking in het constructie- of productontwerp zoveel mogelijk vermeden moet worden. Kerfwerking in dynamisch belaste constructies, met als gevolg een lagere vermoeiingssterkte, ontstaat onder andere door:

- een te kleine overgangsradius
- een te abrupte overgang
- krassen op het oppervlak
- een ruw oppervlak
- een slechte lasverbinding

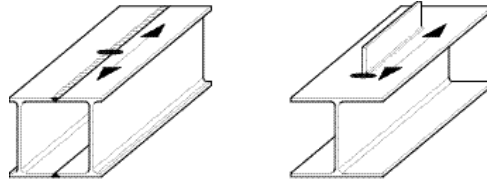
In onderstaande figuur is de invloed van kerfwerking op de vermoeiingssterkte weergegeven. Duidelijk is dat een gepolijst oppervlak een aanzienlijk hogere vermoeiingssterkte heeft dan een gegroefd oppervlak.



Invloed van het oppervlak op de vermoeiingssterkte

Een lasverbinding heeft negatieve gevolgen voor de vermoeiingssterkte van een onderdeel, doordat de vermoeiingssterkte.

Een lasverbinding heeft negatieve gevolgen voor het dynamisch gedrag van een onderdeel, doordat de vermoeiingssterkte van het gelaste materiaal beduidend lager is dan die van het basismetaal. Daarnaast ontstaat kerfwerking door de start- en stopplaatsen van de lasnaad, hetgeen het vermoeiingsgedrag niet ten goede komt. In de constructie kan hiermee rekening worden gehouden.



Gelaste verbindingen met links een hoge en rechts een lage vermoeiingssterkte, bron TALAT.

Gedurende de vereiste levensduur van een constructie mag vermoeiing niet leiden tot bezwijken van het onderdeel. De vermoeiingsberekening kan net als bij staal, worden uitgevoerd op twee manieren:

- bepaling van de vermoeiingsschade D aan het eind van de levensduur op basis van S-N lijnen (regel van Palmgren/Miner)
- bepaling van de levensduur op basis van de scheurgroeisnelheid (wet van Paris/Erdogan)

Met de moderne F.E.M-analysmethoden kan de grootte van spanningen die in een constructie optreden, vrij gedetailleerd worden aangetoond. Op deze wijze kan door wijziging van het ontwerp een te hoge lokale spanning worden verminderd tot een niveau beneden de maximaal toelaatbare spanning.

Legering + toestand	kerfslagwaarde J/cm ²	wisselbelasting R = -1 ¹	wisselbelasting R = -1 ²	zwellbelasting R = ±0 ³
EN AW-1050 O/H111	>100	-	-	-
EN AW-1050 H14	-	30	40	60
EN AW-1050 H18	-	40	50	80
EN AW-3005 O/H111	>100	-	-	-
EN AW-3005 H14	-	40	50	90
EN AW-5754 H14	35	90	100	140
EN AW-5754 H18	-	90	100	150
EN AW-5083 O/H111	35	-	-	-
EN AW-5083 H14	-	100	110	140
EN AW-5083 H18	-	110	120	150
EN AW-6060 T6	10	70	70	100
EN AW-6063 T6	10	70	70	100
EN AW-6082 T6	20	80	80	130

Richtwaarde voor de vermoeingssterkte van aluminiumlegeringen. Gemeten bij een vlakke ongekerfde niet gelaste proefstaaf 2x4mm bij 10⁷ wisselingen.

- 1 belastingsoort is een zuivere wisselbelasting op trek en druk
- 2 belastingsoort is een zuivere wisselbelasting op buiging
- 3 belastingsoort is een zwellbelasting op trek