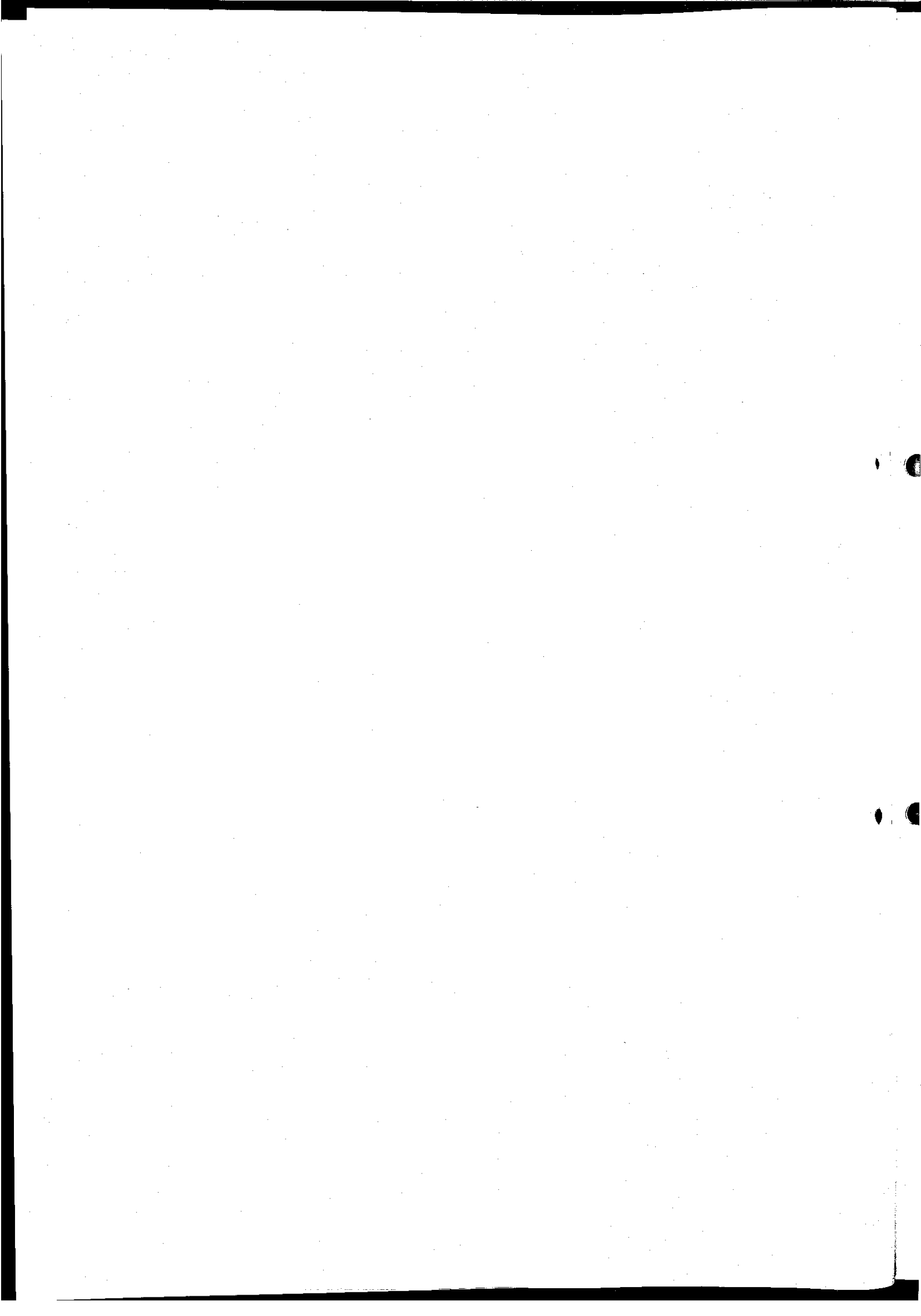


MECHANISCHE ASPECTEN BIJ HET ONTWERPEN EN CONSTRUEREN MET KERAMIEK

P.W. BACH

DIT ARTIKEL IS AANGEBODEN VOOR PUBLICATIE IN MIKRONIEK



INHOUD

Blz.

INLEIDING

HET ONTWERPEN IN KERAMIEK

BELASTBAARHEID VAN KERAMISCHE MATERIALEN

SCHEURGROEIWEERSTAND

ONDERKRITISCHE SCHEURGROEI

KRUIP

DEFORMATIEKAARTEN

THERMISCHE SPANNINGEN EN THERMOSCHOK

PROBABILISTISCHE ONTWERPBENADERING

LITERATUUR

Inleiding

Het toepassen van technische keramische producten in werktuigbouwkundige constructies vindt (nog) op betrekkelijk kleine schaal plaats. Het wordt meestal daar toegepast, waar het betrekkelijk hoge drukkrachten op moet vangen of waar het de corrosie, hittebestendigheid of slijtvastheid verbetert.

De betrouwbaarheid van keramische constructies hangt in hoge mate af van de bereidheid van een ontwerper om rekening te houden met de onvolkomenheden van deze materiaalgroep. Een belangrijke tekortkoming is de beperkte reproduceerbaarheid waarmee keramische materialen worden vervaardigd, waardoor er een tamelijk grote spreiding in de mechanische sterkte optreedt. Hierdoor wordt de interpretatie van de sterktecijfers bemoeilijkt. Men kan hierbij niet zozeer rekenen met gemiddelde sterktes maar moet uitgaan van een bepaalde faalkans of levensduur onder de gestelde belastingscondities.

Het ontwerpen in keramiek

In tegenstelling tot metalen, waar plaatselijk overbelasting door middel van plastische vervorming opgevangen kan worden, is een keramische constructie minder tolerant en kan alleen door scheurgroei de lokale spanning verlaagd worden.

Een toename van de belasting, waarbij de kritische spanning (σ_c) wordt overschreden, kan direct tot het breken van het materiaal leiden. Hierbij hangt σ_c af van de aanwezige defectgrootte. De scheurgevoeligheid van een materiaal wordt aangeduid met de K_{Ic} -factor (scheurgroeiweerstand). Keramiek is zeer gevoelig voor scheuren en heeft een lage K_{Ic} die meestal onder de $10 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ligt, terwijl die van staal boven de $100 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ligt. Ook een constante belasting, waarbij $\sigma < \sigma_c$ kan zorgen voor een zogenaamde onderkritische scheurgroei, zonder dat het keramiek onmiddellijk bezwijkt. Wanneer de scheur echter een kritische lengte heeft bereikt, dan treedt er instabiele scheurgroei op en breekt het keramiek alsnog. De tijd die nodig is totdat instabiele scheurgroei optreedt, is afhankelijk van de grootte van de beginscheur en de belasting.

Bij hoge temperatuur toepassingen kan een constructie door thermische spanningen, door corrosie of door kruip degradatie ondergaan. Thermische spanningen ontstaan door verschillen in uitzettingscoëfficiënt en warmtegeleidingsvermogen. Opwarm- en afkoelcycli kunnen voor scheurgroei en soms tot een plaatselijke overbelasting leiden met als gevolg een spontane breuk.

Door kruip kan het materiaal vervormen, waardoor het na enige tijd niet meer binnen de ontwerpspecificaties kan vallen of treedt er in het ergste geval bezwijken op door het ontstaan en samengroeien van krimpvoegen.

Toch kan men van de nuttige eigenschappen van een keramisch materiaal gebruik maken, en zo de waarde en toepassingsgebied van een produkt vergroten, door met voldoende inzicht in het materiaalgedrag te ontwerpen. Hiervoor zijn enkele algemene richtlijnen aan te geven:

- Zoveel mogelijk op druk ontwerpen.

Een belangrijk punt hierbij is dat men de ontwerpfilosofie voor metalen, die juist voorbestemd zijn om op trek belast te worden, moet verlaten. Meestal zal een constructie ingrijpende wijzigingen ondergaan als men het geheel of onderdelen door keramiek wenst te vervangen. Eventueel kan door aanbrengen van voorspanning een component van nadelige trekspanningen verlost worden.

- Scherpe hoeken en overgangen vermijden.

Door spanningsconcentratie en de vaak grotere kans op defecten bij overgangen bezwijkt een component meestal op deze plaatsen. Om kerfwerking te voorkomen kan een component soms modulair opgebouwd worden.

- Thermische uitzetting niet verhinderen.

Tenzij men bewust gebruik maakt van de uitzettingsverschillen om drukspanningen in het keramiek te creëren, kan thermische uitzetting in een constructie aanleiding geven tot ongecontroleerde en complexe spanningen.

- Grote temperatuursveranderingen (thermoschok) en temperatuurgradiënten voorkomen.

Hierdoor kunnen zodanige thermische spanningen ontstaan dat spontane breuk optreedt.

- Geen punt en lijnbelastingen creëren. Hierdoor ontstaan er lokaal grote spanningen.

- De aanwezigheid van scheurtjes en de spreiding van de eigenschappen zal aanvaard moeten worden. Hierdoor zal men met gelimiteerde faalkansen moeten gaan ontwerpen in tegenstelling tot de veiligheidsfactoren die vaak als vuistregel bij metalen gehanteerd worden. Voor de faalkansberekening biedt de Weibull statistiek een eerste benadering.

Belastbaarheid van keramische materialen

Theoretische benaderingen geven aan dat de treksterkte van een materiaal ongeveer 1/10 van de E-modulus kan zijn. De maximale of theoretische sterkte van een vaste stof hangt af van de binding tussen atomen of ionen. Wanneer de aantrekkingskracht tussen atomen/ionen onderling niet langer de aangebrachte kracht kan opnemen zal er breuk optreden. Bij zo'n breuk ontstaan twee nieuwe oppervlakken. Hiervoor moet arbeid worden verricht. Deze arbeid is gelijk aan tweemaal de oppervlakte-energie en is afhankelijk van temperatuur, druk en kristalvorm.

Met behulp van een energievergelijking kan men de theoretische sterkte berekenen. Voor een keramisch materiaal, bijvoorbeeld Al_2O_3 , is de theoretische sterkte ongeveer 140 GPa. In de praktijk worden echter breuksterkten gevonden die een factor 100 à 1000 kleiner zijn. Volgens Griffith (1920) moet die afwijking worden toegeschreven aan de aanwezigheid van zogenaamde haarscheuren. De hoeveelheid energie die nodig is om een bestaande scheur te laten groeien is veel lager dan de energie die nodig is om een scheur te laten ontstaan. Daarnaast bepaalt ook de vorm van de scheurtip de sterkte.

Voor een rechte haarscheur aan het oppervlak met een diepte van $300 \mu\text{m}$, wordt de kritische sterkte ca. 1000 maal kleiner dan de theoretische. Een kleine scheur heeft dus een grote invloed op de sterkte van het gehele materiaal.

De sterkte van een materiaal kan dus verhoogd worden door een hogere oppervlakte-energie of door een kleinere defectgrootte die vooral door een goede poederbereiding en vormgeving verbeterd kan worden.

Als de experimenteel gevonden sterkte van een materiaal altijd 100 à 1000 maal kleiner is dan de theoretische sterkte dan zijn er kennelijk altijd defecten in een vaste stof aanwezig. Deze defecten kunnen zowel inwendig als aan het oppervlak ontstaan.

De atoomstapelings aan beide zijden van een korrelgrens hebben niet dezelfde richting. Hierdoor ontstaat een slechte passing, die door de zwakke binding als een klein defect kan worden beschouwd. De diameter van de korrel zou dan een maat kunnen zijn voor de scheurlengte, en de korrelgrootte zou op zijn beurt de sterkte van het materiaal bepalen. Experimenteel is ook bevestigd dat wanneer de gemiddelde korreldiameter, d , groter wordt, de sterkte, σ_s , van het bulkmateriaal afneemt ($\sigma_s \approx 1/\sqrt{d}$). Dit geldt dan voor een perfect polykristallijn materiaal.

In de praktijk bevinden zich poriën en insluitsels in een materiaalstructuur. De sterkte van een materiaal wordt dan ook beïnvloed door meerdere defecten.

Interne defecten

- porositeit
- insluitsels
- haarscheuren ten gevolge van het vormgevingsproces
- onregelmatige of extreme korrelgroei.

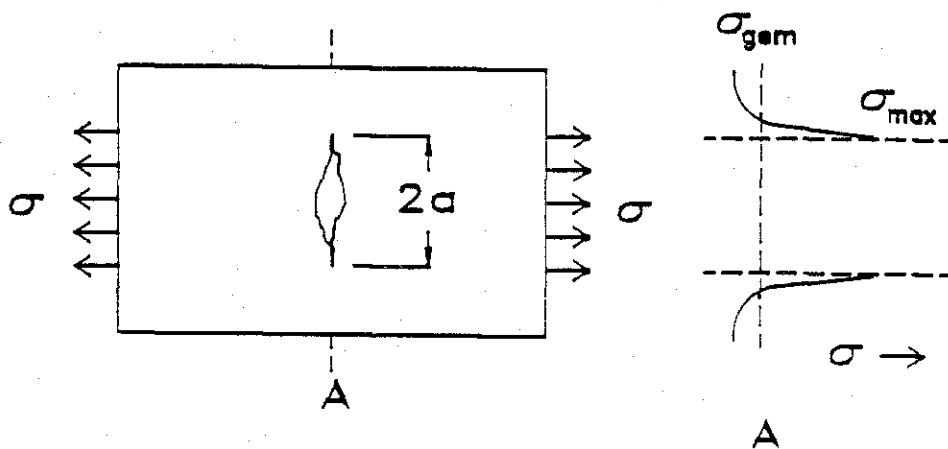
Oppervlakte defecten

- haarscheuren ten gevolge van vormgevingsproces of thermische behandeling
- gecorrodeerd oppervlak
- bewerkt oppervlak (mechanische bewerkingen veroorzaken altijd scheurtjes).

Scheurgroeiweerstand

Een gat in een metalen plaat die op trek wordt belast, verzwakt de sterkte van die plaat. De vermindering van de sterkte is echter niet alleen afhankelijk van de oppervlaktevermindering, maar ook van de vorm van het gat. Deze vorminvloed speelt ook een rol in de microstructuur van een op trek belast materiaal.

We bekijken nu een scheur die loodrecht op de richting van de trekbelasting staat (fig. 1). Aan de tip van de scheur zal zich een verhoogde lokale spanning bevinden, die door de geometrische condities van de scheur bepaald wordt.



Figuur 1. Een dunne plaat met een scheur.

In een plastisch vervormbaar materiaal zal het materiaal rond de scheurtip eerst gaan vloeien alvorens de scheur zich uitbreidt. Door het vloeigedrag zal de scheurtip een afronding krijgen en er ontstaat een "botte" scheur. Hierbij is mechanische energie omgezet in vervormingsarbeid. Een bros materiaal kan moeilijk plastisch vervormen. Een scherpe kerf blijft scherp. Wanneer de lokale spanning aan de tip van de scheur groter wordt dan de bindingssterkte tussen de atomen/ionen, zal de scheur zich uitbreiden. Daar waar een taai materiaal een deel van de elastische energie omzet in (plastische) vervormingsarbeid, zal een ideaal bros materiaal alle energie gebruiken om atoom of ionbindingen te verbreken en een scheur te laten groeien.

Volgens Irwin (1950) geldt er voor de spanningsverdeling bij de scheurtip:

$$K_I = \sigma Y \sqrt{a}$$

K_I wordt de spanningsintensiteitsfactor genoemd, σ is de aangelegde spanning loodrecht op de scheur met een lengte $2a$ en Y is een constante die afhangt van de geometrie van de scheur en zijn plaats in het bulkmateriaal. Wanneer het produkt van de aangebrachte spanning en de lengte van de scheur een bepaalde grootte hebben bereikt, zal de scheur instabiel gaan groeien. De waarde van K wordt dan de kritische spanningsintensiteit of K_{Ic} genoemd.

De kritische spanningsintensiteit wordt beschouwd als een materiaalconstante met de eenheid $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$. Deze constante wordt ook wel de scheurgroeiweerstand of "fracture toughness" genoemd.

Onderkritische scheurgroei

Bij een spanningsintensiteit K_I die lager ligt dan de kritische K_{Ic} kan ook langzame scheurgroei optreden. Het materiaal bezwijkt dan na enige tijd als de scheur zover gegroeid is dat, onder constante belastingscondities, de K_{Ic} waarde bereikt is. Informatie over deze onderkritische scheurgroei is dus nodig voor levensduurberekeningen. Vooral de oxidische keramische materialen vertonen onder invloed van water(damp) dit verschijnsel.

De scheurgroei in keramiek wordt beheerst door de spanningsintensiteitsfactor K_I die de spanningen rond de scheurtjes beschrijft. Meestal wordt de scheurgroei beschreven met een zogenaamde "power law":

$$V = AK_I^n$$

V is de scheurgroeisnelheid

A is een constante

Voor de exponent n worden voor keramiek meestal waarden > 15 gevonden.

Onder constante belastingscondities geldt voor de levensduur t_f :

$$t_f = B \sigma^{-n} \sigma_c^{n-2}$$

De σ_c is hier de kritische spanning bij de initiële scheurlengte

Al_2O_3 (bijvoorbeeld ($K_{Ic} = 2,6 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, $n = 20$, $B = 0,4 \text{ MPa}^2\text{h}$) met een initiële oppervlaktescheur van $16 \mu\text{m}$ diep en een belasting van 300 MPa kan de levensduur bepaald worden op $0,044$ uur. Bij een belasting van 200 MPa wordt de levensduur verlengd tot 145 uur en bij 100 MPa tot $1,5 \cdot 10^8$ uur.

Kruip

Kruip is een langzaam en continu deformatieproces dat een materiaal ondergaat bij hoge temperaturen (normaal gesproken bij meer dan de helft van de absolute smelttemperatuur) en betrekkelijk lage belastingen.

Het is uiteraard belangrijk om inzicht te krijgen in dit proces en om over betrouwbare kruipgegevens te beschikken. Vooral voor toepassingen bij hoge temperaturen moet een zekere veiligheid en gebruiksduur gegarandeerd zijn. Juist voor het functioneren onder deze omstandigheden is keramiek een uitermate geschikt constructiemateriaal. Aan de andere kant kan men uit de gevonden kruipdata trachten de onderliggende mechanismen te achterhalen en kunnen met deze kennis gewapend nieuwe materialen ontwikkeld worden, die beter tegen kruip bestand zijn.

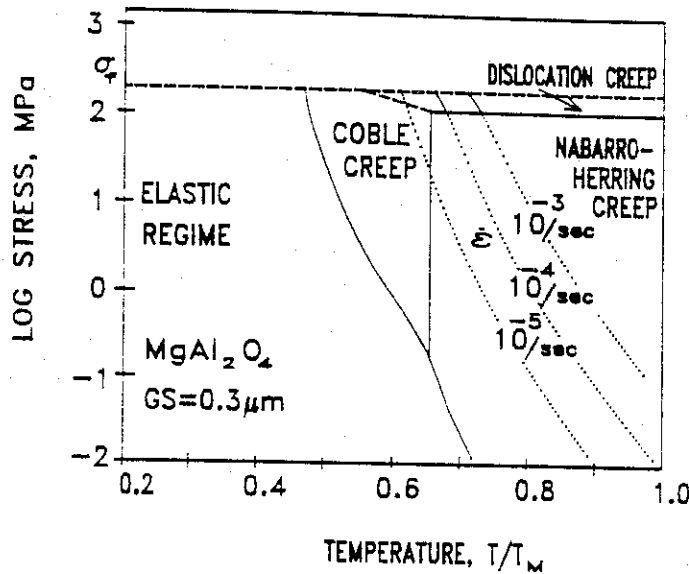
Kruip is eigenlijk een verzamelwoord, waaronder een aantal verschillende mechanismen schuilgaat, onderverdeeld in twee hoofdgroepen: de roostermechanismen, die volledig transgranulair hun werk doen en de grensvlakmechanismen, die direct in verband kunnen worden gebracht met het bestaan van kristal oftewel korrelgrenzen. Kruip is een proces waarin meestal één mechanisme overheerst, afhankelijk van de spanning en de temperatuur.

Bij keramiek spelen in het algemeen slechts twee mechanismen een belangrijke rol, te weten diffusie en het over elkaar glijden van korrels. Dit in tegenstelling tot het kruipgedrag bij metalen waar dislocatiekruip het meest voorkomt.

Deformatiekaarten

Om duidelijk te maken welk mechanisme onder een bepaalde conditie overheerst, heeft men zogenaamde "deformation maps" ontwikkeld. Meestal wordt hierin de spanning als functie van de temperatuur (als deel van de smelttemperatuur) uitgezet, waarbij eerstgenoemde een logschaal heeft. De korrelgrootte is hier constant.

Andersom kan ook: de temperatuur is dan constant. De spanning (op logschaal) wordt beschouwd als functie van de korrelgrootte (eveneens op logschaal). In de kaarten worden vaak de curves voor een gelijke kruipreksnelheid aangegeven (zie fig. 2).



Figuur 2. Kruipdeformatiekaart.

Thermische spanningen en thermoshock

De temperatuurgradiënten in een component worden bepaald door de warmteoverdracht en warmtegeleidingseigenschappen van het keramisch materiaal en de geometrische omstandigheden. De temperatuurgradiënten veroorzaken in het materiaal thermoelastische spanningen die vooral door de uitzettingscoëfficiënt bepaald worden. Als deze trek- of afschuifspanningen in een component de kritische spanning benaderen, is bezwijken of afsplinteren het gevolg. Het berekenen van de thermische spanningen in een component is uitermate complex en kan meestal alleen met numerieke methoden zoals eindige elementen analyse opgelost worden. Daarbij is de nauwkeurigheid van de oplossing erg afhankelijk van de beschikbaarheid van de juiste gegevens en de temperatuurafhankelijkheid van de eigenschappen. De gevoeligheid van een materiaal voor thermische belastingen, en een eerste schatting van de geschiktheid voor toepassing in de component, kan wel gegeven worden uitgaande van de door Hasselman opgestelde vergelijkingen. De eenvoudigste benadering is een component die aan een warmteflux wordt blootgesteld waardoor de temperatuur in een oppervlaktelaag plotseling stijgt met ΔT . Het spanningspatroon dat ontstaat is biaxiale trek of drukspanning in een oppervlaktelaag bij respectievelijk afkoelen of opwarmen. Keramisch materiaal is door de veel hogere druksterkte dus beter tegen opwarmen dan afkoelen bestand. In tabel 1 zijn de verschillende thermische schokpa-

rameters aangegeven en in tabel 2 de thermomechanische eigenschappen van verschillende keramische materialen, waarmee de thermische weerstand parameters berekend zijn.

Met de parameter R_4 kan onder andere verklaard worden waarom glas meestal plotse-ling breekt bij afschrikken en een poreuze vuurvaste tegel niet. R_4 is omgekeerd evenredig met de door thermische spanningen veroorzaakte toename van het scheuroppervlak. Een op zich mechanisch kwetsbare (lage σ_s) poreuze tegel heeft veel scheurkiemen die dan allemaal wel iets kunnen groeien (totale toename scheuropper-vlak kan wel groot zijn), maar niet zoveel dat het grote invloed op de sterkte heeft. Glas heeft een lage breukenergie en er zijn maar enkele scheurkiemen, waardoor een scheur catastrofaal kan groeien.

Tabel 1. Thermische schok parameters.

soort	parameter	eenheid	termen	eenheid
maximaal temperatuur verschil	$R_1 = \Delta T = \frac{\sigma_s(1-\nu)}{E \alpha}$	K	σ_s sterkte E E-modulus	MPa GPa
maximale warmteflux	$R_2 = R_1 \lambda$	W.m ⁻¹	ν poisson ratio $\approx 0,25$ α uitzettings- coëfficiënt	$10^{-6}K^{-1}$
maximale opwarm-snelheid	$R_3 = \frac{R_2}{\rho c_p}$	$10^{-6}m^2Ks^{-1}$	λ warmtegelei- dingscoëff.	Wm ⁻¹ K ⁻¹
scheurweer-stand thermi-sche schok	$R_4 = \frac{E\gamma_b}{\sigma_s^2(1-\nu)}$	$10^{-6} m$	ρ dichtheid c_p spec. warmte γ_b breukenergie	Mgm ⁻³ Jg ⁻¹ K ⁻¹ Jm ⁻²

De aangegeven waarden zijn slechts indicatief.

Tabel 2. Materiaalgegevens.

	glas	Si ₃ N ₄ RBSN	Al ₂ O ₃ 99,5%	SiC RBSiC	ZrO ₂ PSZ	vuurvast steen
ρ	2,2	2,2-2,6	3,9	3,1	5,6	1,2
c _p	0,91	0,86	0,99	0,88	0,53	0,95
σ _s	70	120-200	380	300	200	3
E	70	150-250	400	400	200	10
α	0,62	2,6	7,7	4,5	11,0	4,5
λ	1,8	6,0-12,5	25	100	1,3	0,4
γ _f	1	10	25	25	50	10
R ₁	1200	410	90	125	70	50
R ₂	2160	2400-5100	2250	12500	90	20
R ₃	1080	1300-2300	580	4580	30	17
R ₄	20	140-80	90	150	300	150

Probabilistische ontwerpbenadering

Doordat de mechanische eigenschappen van keramische materialen meestal niet met een gemiddelde waarde voldoende gekarakteriseerd kunnen worden door de grote spreiding, moet er op een andere wijze dan bij metalen gebruikelijk gerekend worden. Een probabilistische ontwerpbenadering houdt rekening met een bepaalde defectverdeling en spanningsverdeling in een component en daarmee wordt de kans op bezwijken berekend.

De defectverdeling in keramisch materiaal wordt meestal met de Weibull statistische distributie gekarakteriseerd. Deze zwakste schakel theorie veronderstelt dat een bepaald volume onder een uniforme spanning bezwijkt bij het grootste defect. De kans op de aanwezigheid van dergelijke defecten wordt beschreven door de Weibull statistiek. De kans op falen, F, van een component ten gevolge van een bepaald spanningspatroon is:

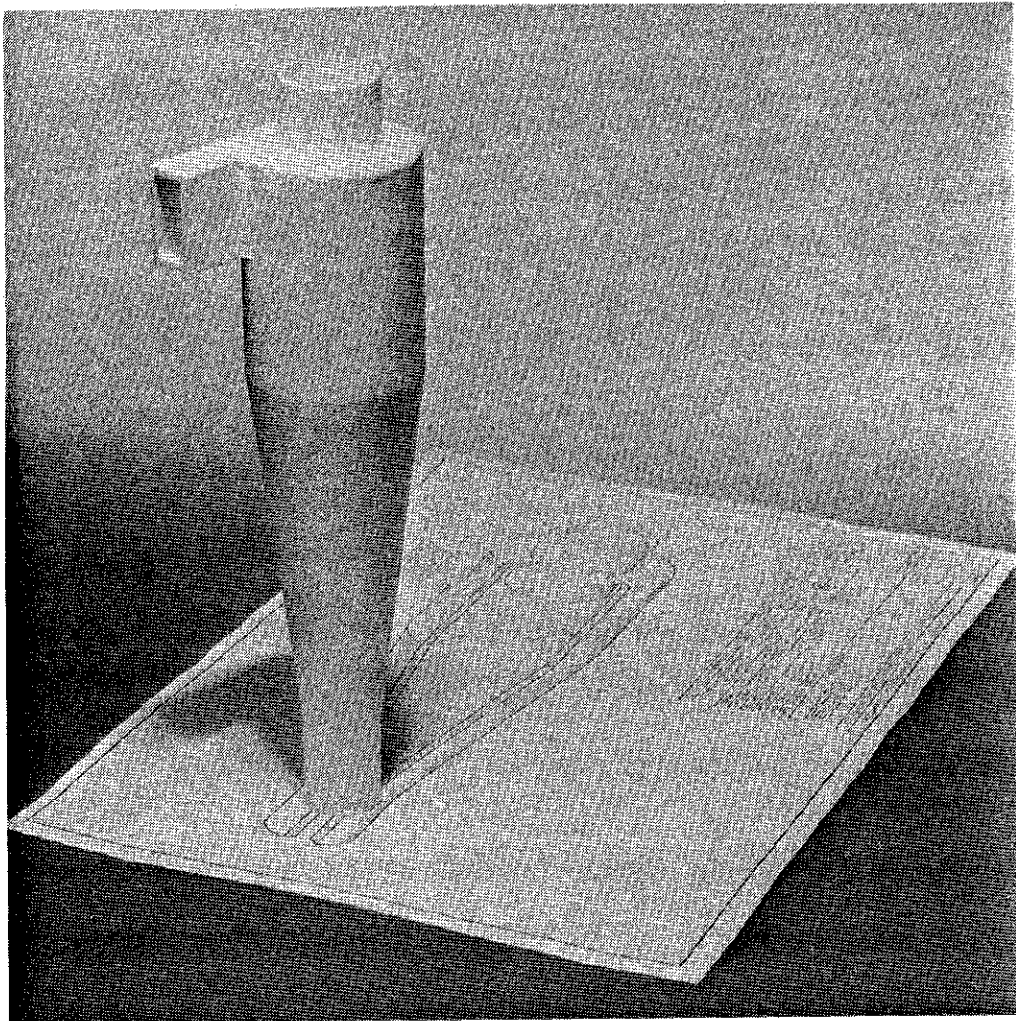
$$F = 1 - \exp - \left[\left(\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_0} \right)^m k V \right]$$

- kV = spanningvolume integraal
- σ_{\max} = maximale spanning in een component
- σ_0 = karakteristieke sterkte van het eenheidsvolume onder uniforme spanning
- m = Weibull modulus: een maat voor de spreiding van de sterkte

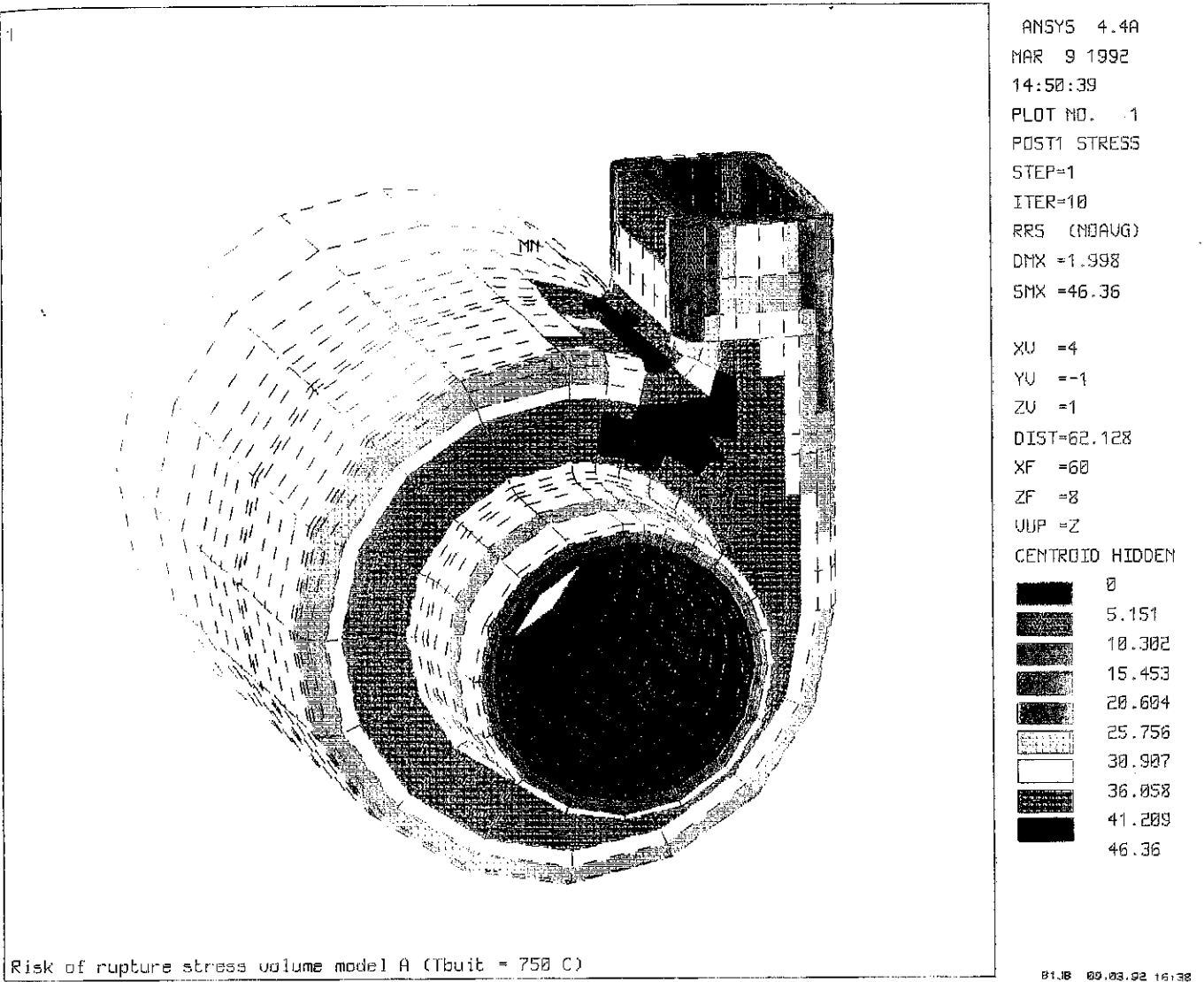
Voor oppervlakte-defecten wordt het volume V door het oppervlak A vervangen. De Weibull modulus heeft voor keramiek meestal waarden tussen 5 (slecht) en 25 (goed). Met de kV factor wordt de spanningsverdeling in een component verrekend. Ook wordt dit soms gelijkgesteld met een effectief volume V_e onder uniforme spanning σ_{\max} . Voor een uniform belast volume is kV gelijk aan V en σ gelijk aan σ_{\max} . Met de Weibull statistiek kan als σ_0 en m bekend zijn voor een bepaald keramisch materiaal (bijvoorbeeld uit trek of buigproeven) de faalkans van een willekeurige component uitgerekend worden.

De Weibull statistiek kan slechts als een eerste benadering gelden om te beoordelen of een component de opgelegde spanningen kan verdragen. Deze methode is zeer gevoelig voor een betrouwbare bepaling van de σ_0 en m waarden, hetgeen in de praktijk niet eenvoudig is en veel proeven met zich meebrengt. Verder gaat deze statistische benadering ervan uit dat in een component een zelfde defectverdeling aanwezig is als in de proefstukken en dat de defecten aan dezelfde soort spanning (meestal trekspanning) blootstaan, hetgeen in de praktijk vaak niet het geval is. Andere probabilistische ontwerpmethoden die rekening houden met meerassige spanningstoestanden en met aangepaste faalcriteria zijn momenteel in ontwikkeling. Als voorbeeld kan de ontwikkeling van een keramische cycloon, zie figuur 3, voor het gasreiniging dienen. Eerst zijn de belangrijkste sterkte en scheurgroei parameters bepaald bij 25°C en bij 1000°C met een groot aantal proefstukken van het keramische materiaal; in dit geval een goede kwaliteit aluminiumoxide. Van de cycloon is een eindige elementen model opgesteld en doorgerekend op thermische spanningen, waarna het ontwerp in eerste ronde is aangepast bij de dikteovergangen en afrondingen. Daarna zijn met een keramisch rekenpakket de faalkansverdeling en de scheurgroei-gevoeligheid per element berekend en gesommeerd, zie fig. 4. Hiermee zijn de

toelaatbare bedrijfscondities van de cycloon te bepalen of is het mogelijk het ontwerp aan te passen aan een eisenpakket.



Figuur 3. Keramische cycloon.



Figuur 4. Faalkansverdeling berekend met een FEM-model van de keramische cycloon.

Literatuur

R. Morrell

Handbook of properties of technical and engineering ceramics, part 1, HMSO 1985.

R.W. Davidge

Mechanical behaviour of ceramics, Cambridge University Press, 1979.

D.W. Richerson

Modern Ceramic Engineering, Marcel Dekker Inc. 1982.

J.A. Klostermann

Een metaalkundige visie op de mechanische eigenschappen van keramische materialen, De Constructeur nr. 10, 1987, p. 42.

P. Kochendorfer

Belangrijke punten bij het construeren met technische keramiek, De Constructeur nr. 3, 1988, p. 52.

pb-mikro.txt