Weakest-link failure prediction for ceramics

Citation for published version (APA):

Dortmans, L. J. M. G., & With, de, G. (1991). Weakest-link failure prediction for ceramics. *KGK, Tijdschrift voor Klei, Glas en Keramiek*, 12, 113-115.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/1991

Document Version:

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

Please check the document version of this publication:

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

www.tue.nl/taverne

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

openaccess@tue.nl

providing details and we will investigate your claim.

Weakest-link Failure Prediction For Ceramics*

Samenvatting:

Weakest-link faalkans voorspellingen voor keramische constructie onderdelen worden veelal gebaseerd op data verkregen uit 3- of 4-punts buigproeven. Echter, op de route van testobject tot het functioneren van de werkelijke component zijn diverse problemen te verwachten. Allereerst zijn daar de eigen beperkingen van de buigproeven. Vervolgens is er de interpretatie van deze door uniaxiale beproeving verkregen data in termen van een faalcriterium voor multiaxiale spanningstoestanden, waarvoor op dit moment geen universeel toepasbaar model beschikbaar is. In deze bijdrage zullen de diverse problemen worden aangegeven.

Daarbij zullen tevens alternatieve mogelijkheden worden besproken die gebaseerd zijn op inzicht in de microstructuur en anisotrope deformatie modellen.

Summary:

Weakest-link failure prediction for ceramic components is usually based on strength data obtained from 3- and 4-point bend tests. However, in the route from test specimen to actual component several pitfalls are encountered. Firstly, the bend tests themselves do have their problems. Secondly, there is the problem of the interpretation of the uniaxial strength data in terms of a failure criterion for multiaxial stress states, for which at this juncture no universally applicable model is available. In this contribution the difficulties encountered will be summarized. Besides alternatives will be mentioned which are based on microstructural insight and anisotropic deformation models.

Auteurs:

L.J.M.G. Dortmans, Centrum voor Technische Keramiek, Eindhoven.

G. de With, Centrum voor Technische Keramiek, Eindhoven, Philips Natuurkundig Laboratorium, Eindhoven.

* Deze bijdrage is gebaseerd op een voordracht gehouden tijdens de EPS workshop "Designing with ceramics", gehouden van 3 t/m 6 april 1990 te Petten.

Curriculum vitae

L. Dortmans werd op 29 april 1959 geboren en behaalde het ir. diploma Werktuigbouwkunde in 1983 aan de TU Eindhoven. Daarna voltooide hij in 1987 een promotieonderzoek m.b.t. "het dynamisch gedrag van het menselijk kniegewricht" aan de TU Eindhoven. In 1987 trad hij in dienst van de Technisch Fysische Dienst TNO (TPD-TNO-TUD). Sindsdien is hij als wetenschappelijk medewerker werkzaam binnen het Centrum voor Technische Keramiek met als voornaamste interesse het bepalen en modelleren van het mechanisch gedrag van keramische materialen.

G. de With werd op 19 september 1950 geboren en behaalde het drs. diploma Scheikunde in 1973 aan de RU Utrecht. Daarna voltooide hij in 1977 een promotieonderzoek m.b.t. "ladingsverdeling in moleculaire kristallen" aan de UT (voorheen TU Twente). In 1978 trad hij in dienst van het Philips Natuurkundig Laboratorium waar zijn primaire interesse ligt bij de relatie tussen vervaardigingswijzen en het mechanisch gedrag van keramische materialen. Tevens is hij sinds 1985 deeltijdhoogleraar aan de TU Eindhoven.

1. Inleiding

Weakest-link faalkans voorspellingen voor keramische constructie onderdelen worden veelal gebaseerd op data verkregen uit 3- of 4-punts buigproeven. Echter, op de route van testobjecten tot het functioneren van de werkelijke component zijn diverse problemen te verwachten.

Allereerst zijn daar de eigen beperkingen van de buigproeven die niet alleen door het beperkte geteste volume en oppervlak veroorzaakt worden. Zij zijn ook direct het gevolg van de nauwkeurigheid van de testprocedure en de kwaliteit van het oppervlak van de preparaten.

Wanneer eenmaal betrouwbare sterktegegevens zijn verzameld, is er vervolgens het probleem van de interpretatie van deze door uniaxiale beproeving verkregen data in termen van een faalcriterium voor multiaxiale spanningstoestanden, waarvoor op dit moment geen universeel toepasbaar model beschikbaar is. In deze bijdrage zullen de genoemde problemen achtereenvolgens worden besproken.

Als deze problemen omzeild kunnen worden zijn er echter nog andere problemen te verwachten welke eveneens gememoreerd zullen worden.

Op basis van de genoemde opgeloste en nog op te lossen problemen kan geconcludeerd worden dat een alternatieve aanpak waardevol kan zijn. Een alternatief zal besproken worden dat gebaseerd is op inzicht in de microstructuur en anisotrope deformatie modellen.

2. Uniaxiale buigproeven

De problemen die optreden bij het toepassen van uniaxiale buigproeven kunnen worden verdeeld in drie categorieën:

Ten eerste zijn er problemen die direct ge-

Figuur 1. Schematische weergave van een testrig voor het uitvoeren van nauwkeurige uniaxiale buigproeven.

relateerd zijn met de feitelijke uitvoering van de test zoals:

- het optreden van wrijvingseffecten bij de ondersteuning
- het optreden van locale spanningen bij de ondersteuning
- asymmetrisch aangebrachte belastingen
- torsie en afschuiving van het preparaat

De problemen verbonden aan de uitvoering van de test zijn voldoende diepgaand onderzocht (1,2,3). De algemene conclusie is dat sterkte gegevens met een nauwkeurigheid van circa 1% te genereren zijn als de genoemde effecten voldoende in rekening worden gebracht.

Ten tweede zijn er de problemen verbonden met het oppervlakte gesteldheid van het preparaat. In deze categorie kunnen bijvoorbeeld onderscheiden worden:

- de ruwheid van het oppervlak
- de aanwezigheid van beschadigingen geïntroduceerd tijdens het slijpen
- de aanwezigheid van restspanningen in het oppervlak
- het al dan niet representatief zijn van de oppervlakte gesteldheid voor dat van de actuele component

Bij deze tweede categorie is het begrip veel minder duidelijk. Vaak wordt voor een component een bepaalde (lage) oppervlakte ruwheid vereist. Deze wordt normaliter bereikt door slijpen en, indien nodig, gevolgd door polijsten. De oppervlakte schade die wordt geïntroduceerd tijdens het slijpen wordt in het algemeen niet weggenomen tijdens het polijsten. Experimenten met gepolijste preparaten hebben aangetoond dat door polijsten de sterkte iets verhoogd kan worden maar dat tevens de Weibull modulus wordt verlaagd. Ook worden door het slijpen compressieve residuele spanningen geïntroduceerd welke na polijsten geheel of

gedeeltelijk zijn verdwenen.

Er zijn mogelijkheden om de sterkte van preparaten en componenten te vergroten, bijvoorbeeld door middel van ionenimplantatie en ductiel (of "schade-vrij") slijpen. Bij de eerste methode (4) wordt getracht de bewerkingschade te verkleinen door compressieve spanningen in het oppervlak te introduceren, indien mogelijk, scheurtippen af te ronden en scheuren te herstellen. Dit heeft geresulteerd in een hogere sterkte (circa 15%) en Weibull modulus (circa 100%) voor materialen geïmplanteerd met een dosis van circa 10^{17} cm⁻² edelgas ionen. De tweede methode is in principe veel beter geschikt omdat wordt geprobeerd de introductie van bewerkingschade te vermijden. Dit kan worden gerealiseerd door gebruik te maken van een bewerkingsmachine met hoge stijfheid en grote positioneringsnauwkeurigheid (0.1 micrometer) en geavanceerde slijpwielttechnologie. Daarbij worden kleine voeding en sneddiepte gehanteerd. Toepassing van deze methode (5) op een bepaald type sialon heeft geleid tot een toename van de sterkte van 480 MPa (normaal geslepen) tot 875 MPa (ductiel geslepen). Daarbij verminderde de ruwheid van 0.35 micrometer tot 8 nanometer. Het is belangrijk om residuele spanningen in de beschouwingen op te nemen. Helaas zijn slechts voor enkele materialen min of meer complete analyses naar de invloed van restspanningen uitgevoerd. Deze weinige studies duiden er echter op dat een significante invloed van restspanningen op de sterkte mogelijk is. Voor bepaalde materialen welke een fase-transformatie vertonen, zoals ZrO₂ en BaTiO₃, kan de invloed zelfs nog groter zijn vanwege het verschil in thermische uitzettingscoëfficiënt en specifiek volume tussen de verschillende fasen. Wellicht ten overvloede zij hier nogmaals

opgemerkt dat alleen betrouwbare voorspellingen voor componenten kunnen worden gedaan indien de component en preparaat dezelfde oppervlaktebewerking hebben ondergaan.

Ten derde zijn er de problemen met de interpretatie van de testgegevens. Hier kunnen worden genoemd:

- identificatie van het type defecten (volume/oppervlakte)
- de toelaatbaarheid van toepassing van eenvoudige balkentheorie voor berekening van spanningen
- de bepaling van een schatter voor de faalkans
- het quantificeren van modelparameters m.b.v. methoden als de kleinste kwadrate methode, maximum likelihood methode of de momenten-methode.

Recent zijn er analyses van een aantal van deze aspecten gepubliceerd (6,7).

3. Multiaxiale spannings-toestanden

Na het verzamelen van sterktegegevens m.b.v. uniaxiale sterktemetingen dient een procedure te worden gevolgd om deze uniaxiale gegevens om te zetten in parameters voor een multiaxiale spanningstoestand. Voor deze transformatie zijn spanningsvolume- en spanningsoppervlakte integralen voor de gehanteerde buigproeven noodzakelijk. Aangevoerd wordt (8) dat deze spanningsintegralen voor de buigproeven langs analytische weg bepaald kunnen worden met een nauwkeurigheid

Figuur 2. Een voorbeeld van een teststuk voor het uitvoeren van uniaxiale buigproeven, hier getoond voor een glazen proefstuk.

Figuur 3. Weibull plot met overeenkomende voorspellingen voor de modellen van Lamon, Stanley en Weibull voor de 3- en 4-punts buigproef en verschillende voorspellingen voor de ball-on-ring proef.

- = 4-punts buigproef
- = 3-punts buigproef
- = ball-on-ring proef model van Lamon
- ▲ = ball-on-ring proef model van Stanley
- = ball-on-ring proef model van Weibull

van circa 1%. Dan zijn voor deze analyse geen eindige elementen methode berekeningen noodzakelijk, tenminste als de proefstuk afmetingen aan bepaalde eisen voldoen.

Als deze analyse heeft geleid tot een aantal modelparameters, zoals Weibull modulus en specifieke sterkte, dan is er helaas geen algemeen geldend model om deze toe te passen in een multiaxiale spanningstoestand. Zelfs voor een equibiaxiale spanningstoestand is de situatie nog onduidelijk (9). Bekend zijn de modellen van Weibull (normal stress criterium), Stanley (independent stress criterium) en Lamon (maximum strain energy release rate criterium). Onder de aanname dat 4-punts sterktegegevens beschikbaar zijn leiden deze modellen tot identieke resultaten voor 3-punts buigproef.

Voor een equibiaxiale spanningstoestand, zoals bij de ball-on-ring of de ring-on-ring proef, is de situatie echter geheel anders. De uit de 4-punts sterkten voorspelde gemiddelde sterkte voor de ball-on-ring proef kan circa 10% verschillen voor de verschillende modellen afhankelijk van de waarde van de Weibull modulus.

Dit mag een te verwaarlozen verschil lijken maar deze afwijkingen leiden tot een veel groter verschil in de faalkansvoorspellingen, tot een factor 10 ongeveer. Experimenteel werk om vast te stellen welk model onder welke voorwaarde gehanteerd mag worden is daarom noodzakelijk. Een aanzet daartoe wordt gegeven binnen het IOP-TK project "Ontwerpen en Construeren" dat binnen het CTK en het ECN wordt uitgevoerd waarbij zowel uniaxiale als biaxiale beproeving als numerieke modelvorming centraal staan (10).

4. Additionele problemen

Zelfs als de genoemde problemen met betrekking tot de weakest-link aanpak opgelost kunnen worden dan nog resteren bij het ontwerpen en construeren met keramische materialen een aantal relevante aspecten/problemen.

Om er slechts drie te noemen:

- langzame scheurgroei
- corrosie
- kruip

De eerste twee fenomenen zorgen voor een constant veranderende defectpopulatie onder belasting ofschoon niet duidelijk is op welke wijze. Het meenemen van deze aspecten in een weakest-link aanpak zal slechts moeizaam kunnen geschieden. Terwijl langzame scheurgroei en corrosie op kunnen treden bij kamer- en medium hoge temperatuur, zal kruip veelal alleen bij hoge temperatuur optreden. Ook hierbij is het onduidelijk hoe kruipbreuk/kruipsterkte in een weakest-link aanpak zou kunnen worden ingepast.

Het lijkt daarom noodzakelijk om afzonderlijke benaderingen te hanteren wanneer bovengenoemde factoren een rol spelen in het mechanisch gedrag van keramische component. Alternatieve oplossingen lijken hierbij gewenst.

5. Een mogelijk alternatief

Weakest-link benaderingen zijn gebaseerd op lineair elastische breukmechanica toegepast op microscopische defecten. Deze benadering laat in grote mate aanwezige microstructuur informatie buiten beschouwing. Een compleet andere benadering wordt gegeven door zgn. continuüm damage mechanica (11). In dit formalisme in zijn meest eenvoudige vorm wordt een schade parameter geïntroduceerd die de mate van isotroop verdeelde schade in het materiaal plaatsafhankelijk en tijdsafhankelijk beschrijft. Een verband tussen schade-evolutie, tijd, temperatuur en mechanische spanning wordt daarbij geponeerd. Wanneer de schade een kritieke waarde bereikt zal het materiaal bezwijken. Van origine is dit formalisme puur fenomenologisch. Er worden geen uitspraken gedaan over de aard van de schade noch over de basis voor het schade-evolutie model. Ook wordt de aanwezige microstructuur informatie nauwelijks gebruikt.

Recent zijn echter micro-mechanica modellen naar voren gebracht die als basis kunnen dienen voor het ontwikkelen van constitutieve modellen voor brosse materialen (12,13). Een combinatie tussen deze micro-mechanica modellen en continuüm damage mechanica kan resulteren in een mesoschade mechanica. De beschrijvingswijze maakt gebruik van de aanwezige microstructuur informatie, maar is niettemin gegrondvest op een anisotrope continuüm deformatie theorie. Het is echter duidelijk dat de kans van slagen van zo'n benadering afhankelijk is van de mogelijkheid om microstructuur informatie in een beperkt aantal relevante parameters samen te vatten. Binnen het CTK wordt in het kader van IOP-TK project "Ontwerpen en Construeren" een poging ondernomen om deze benaderingswijze verder gestalte te geven.

6. Slotopmerkingen/-conclusies

In deze bijdrage is ingegaan op de problemen die optreden bij het toepassen van weakest-link faalkans voorspellingen voor keramische constructie onderdelen. Met name zijn aan de orde gesteld problemen bij het verkrijgen van relevante materiaalparameters uit uniaxiale buigproeven en het toepassen van deze gegevens in een multiaxiale spanningstoestand, waarvoor op dit moment geen algemeen geldende voorschriften bekend zijn. Ook bij voorkomend tijdsafhankelijk materiaalgedrag (bijv. lang-

zame scheurgroei en kruip) zijn nog een aantal wezenlijke problemen op te lossen. De wenselijkheid voor het beschikbaar komen van een alternatieve beschrijving van het mechanisch gedrag van een combinatie van continuüm damage mechanica en micro-mechanica, aangevuld met inzicht in de microstructuur ontwikkeling, kan hiervoor een aanzet worden gegeven.

Dankzegging

Het werk in deze bijdrage is gedeeltelijk ondersteund door de Commissie Innovatief Onderzoeks Programma Technische Keramiek (IOP-TK) van het Ministerie van Economische Zaken (IOP-TK project 88.B040). De auteurs zijn Ir. J.Ch.H. Jacobs erkentelijk voor diens hulp bij de bewerking van het Engelse "extended abstract".

6. Referenties

1. R.C. Newham, 'Strength tests for brittle materials', Proc. Brit. Cer. Soc., 25(1975), pp. 281-293.
2. R.G. Hoagland, C.W. Marshall and W.H. Duckworth, 'Reduction of errors in ceramic bend tests', J. Amer. Cer. Soc., 25(1976), pp. 189-192.
3. H. Scholten, L. Dortmans, G. de With, P. Bach en B. de Smet, 'Design and analysis of uniaxial and biaxial bend tests for ceramics', Defect and Diffusion Forum, 57/58(1988), pp. 350-380.
4. C.J. McGargue, 'The mechanical properties of ion implanted ceramics - a review', Defect and Diffusion Forum, 57/58(1988), pp. 350-380.
5. P. Shore, 'State of the art in damage free grinding of advanced engineering ceramics', Symp. Advanced Engineering with Ceramics, 145/14-13-89, London.
6. B. Bergman, 'How to estimate Weibull parameters', Brit. Ceram. Proc., 39(1987), pp. 175-185.
7. L. Dortmans and G. de With, 'Noise sensitivity of fit procedures for Weibull parameter extraction', aangeboden aan J. Am. Cer. Soc.
8. F.S. Chauw and P. Stanley, 'An assessment of systematic errors in beam tests and brittle materials', J. Mater. Sci., 20 (1985), pp. 1782-1786.
9. L. Dortmans and G. de With, 'Weakest-Link failure prediction for ceramics using finite element post processing'.
10. L. Dortmans, H. Scholten, G. de With, P. Bach en B. de Smet, 'Advanced materials testing and design', IOP-TK poster, KGK 11(1990), pp. 292.
11. J.L. Chaboche, 'Continuous damage mechanics - a tool to describe phenomena before crack initiation', Nucl. Engng. Des., 64(1981), pp. 233-247.
12. M. Kachanov and J.-P. Laurs, 'Three dimensional problems of strongly interacting arbitrarily located penny-shaped cracks', Int. J. Fract., 41(1989), pp. 289-313.
13. V.I. Fabrikant, 'Close interaction of coplanar circular cracks in an elastic medium, Acta Mech., 67(1987), pp. 39-59.