

Ontwerpen en construeren met technische keramiek; een vak apart*

Dr. ir. J.T. van Konijnenburg, Hoogovens Industrial Ceramics, Beverwijk**.

Toepassing van technisch-keramische producten in werktuigbouwkundige constructies vindt nog slechts op betrekkelijk kleine schaal plaats. Keramiek wordt meestal toegepast daar waar het geheel opgesloten kan worden, waardoor alleen betrekkelijk lage drukkrachten op het materiaal zullen ontstaan, en daar waar het als bekleding kan dienen van wanden, goten enz. vanwege de slijtvastheid of de corrosievastheid van het desbetreffende keramische materiaal.

Als voorbeelden van dergelijke toepassingen kunnen genoemd worden slijtvaste tegels in goten en silo's voor transport van abrasieve materialen. Een algemeen bekend voorbeeld van het gebruik van keramiek vanwege haar corrosievast gedrag zijn de keramische afsluitelementen in waterkranen. Wil men keramiek toepassen onder meer complexe mechanische/thermische spanningscondities, dan zal eerst een analyse van deze condities gemaakt dienen te worden; waarna kan worden nagegaan of een oplossing met keramiek gevonden kan worden en of deze technisch en economisch verantwoord is. In dit artikel wordt aan de hand van een aantal voorbeelden de werkwijze bij het ontwerpen en construeren met keramiek duidelijk gemaakt.

Karakteristieken van technische keramiek

In deze paragraaf wordt eerst een aantal basiskennmerken van keramiek nader belicht. Het is moeilijk voor keramiek een eenduidige definitie te geven, zodat veelal wordt volstaan met een omschrijving. Deze geldt ook voor technische keramiek en luidt als volgt: "Keramiek is een anorganisch, niet-metallisch materiaal, dat vanuit een poeder, via een geschikte vormgevingstechniek tot een halfproduct wordt gevormd". Dit halfproduct krijgt na een warmtebehandeling bij hoge temperatuur zijn eindeigenschappen. Om het eindproduct dan nauwkeurig op maat te krijgen, is veelal nog een mechanische nabewerking nodig^[1]. Technische keramiek is een bijzondere vorm van keramiek in het alge-

meen en wordt gekenmerkt door het feit, dat als uitgangspunten meestal al chemisch zuivere poeders worden gebruikt, die meestal ook nog langs chemische weg zijn bereid. De technisch-keramische grondstoffen zijn in twee groepen te verdelen, namelijk oxydische en niet-oxydische materialen. Tabel 1 geeft een aantal voorbeelden.

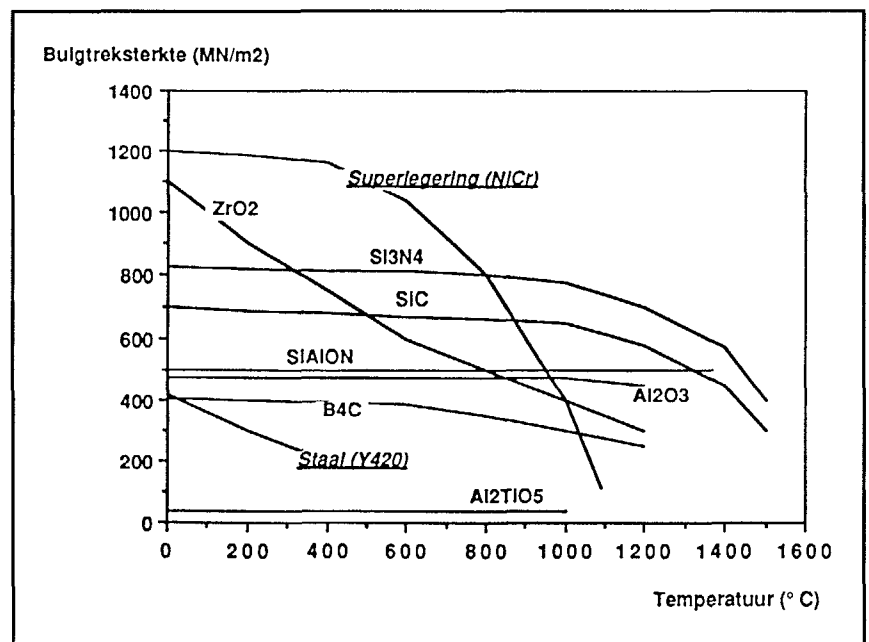
Tabel 1 Technisch-keramische grondstoffen

Oxydische stoffen	Niet-oxydische stoffen
Al ₂ O ₃	SiC
ZrO ₂	Si ₃ N ₄
ZrSiO ₄	SiAlON
BeO	ALN

De belangrijkste eigenschappen van keramische materialen zijn hun lage dichtheid, hoge hardheid, mechani-

sche sterkte, maar ook hun brosheid. Verder hebben ze in het algemeen ten opzichte van staal een hoog smeltpunt. Kenmerkend voor de meeste keramische materialen is de hoge corrosievastheid. Het zal duidelijk zijn, dat deze opsomming slechts een zeer globaal beeld geeft.

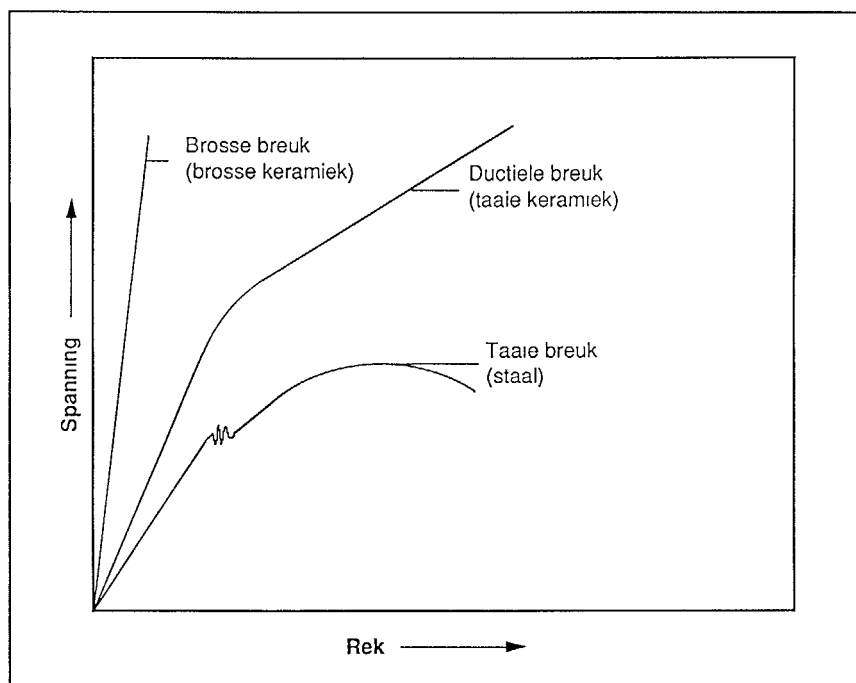
De eigenschappen van de verschillende keramische materialen kunnen nog een grote variëteit vertonen. *Figuur 1* geeft dit voor de buigsterkte als functie van de temperatuur weer. Een probleem bij de interpretatie van de sterktecijfers vormt enerzijds het brose gedrag van het materiaal en anderzijds de reproduceerbaarheid waarmee keramische producten nu nog gemaakt kunnen worden. *Figuur 2* geeft schematisch een spanningrekcurve van een "taai" metaal en een "bros" keramiek weer. Kenmerkend voor het metaal is, dat het plastisch kan vervormen, terwijl een keramisch materiaal dit niet kan. Inmiddels zijn er keramische materialen ontwikkeld met een vrij grote mate van elasticiteit, maar bij kamertemperatuur is geen plastisch gedrag mogelijk^[2]. Daar keramische materialen nog weinig reproduceerbaar vervaardigd kunnen worden, treedt er een spreiding op in de eigenschappen van het eindproduct. Voor de constructeur betekent



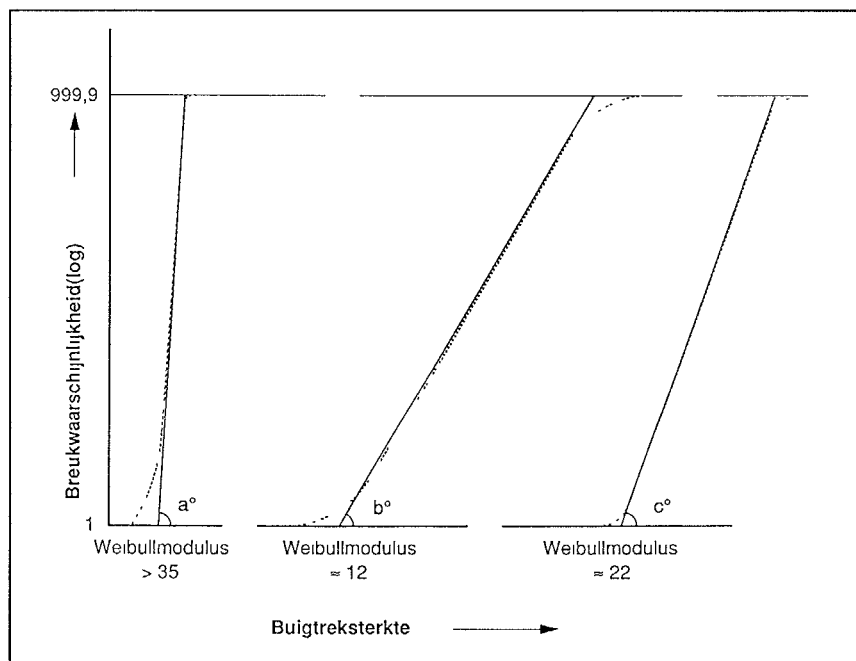
Figuur 1 Buigsterkte bij hoge temperatuur

* Dit artikel is eerder geplaatst in *Materialen* (1989) nr 1, officieel orgaan van de Bond voor Materialenkennis.

** De tekst van deze lezing kwam tot stand door medewerking van ing F.A. Schuurmans en dr S. Sinnema van Hoogovens Industrial Ceramics te Beverwijk.



Figuur 2 Spanning-rekcurven van brossse en taaiere materialen



Figuur 3 Schematische voorstelling van de breukwaarschijnlijkheidscurven met Weibull-modulussen

dit een vaak niet aanvaardbare onzekerheid bij het construeren. Momenteel tracht men dit euvel te onderwerpen door aan te geven met welke spreiding de constructeur rekening dient te houden. Dit gebeurt met behulp van de zogeheten Weibull-statistiek³⁾. Figuur 3 geeft een voorbeeld van de spreiding in sterkte van enkele materialen uitgezet met behulp van de Weibull-methode. De hellingshoek van deze curven wordt opgegeven als de Weibull-modulus en dient zo hoog mogelijk te zijn. Metalen

hebben meestal waarden ruim boven 35, terwijl de meeste keramische materialen niet verder komen dan hooguit 25.

De buigsterkten zoals aangegeven in figuur 1 in vergelijking met die van staal en een superlegering, laten al zien waardoor de ingenieur toch zo door keramiek wordt aangetrokken. De sterkte blijft immers tot hoge temperatuur op peil. Dit biedt derhalve mogelijkheden om machines en motoren bij hogere temperaturen te laten

opereren. Op deze manier kan dan een beter procesrendement worden verkregen. Zoals in de inleiding al is aangegeven, gaat dat helaas niet altijd zonder meer op. Zo is gebleken, dat het rendement van de dieselmotor zo'n 3% naar beneden ging toen men de zuiger en verbrandingskamer isoleerde met een keramisch materiaal. Dit betekent niet dat de theorie van Carnot hiermee omver wordt geworpen, het betekent alleen, dat de dieselmotor voor het nieuwe werkingsgebied opnieuw ontworpen zal moeten worden. Het blijkt echter, dat de automobiefabrikanten voor die stap terugdeinzen. Eigenlijk kan voor de technische keramiek voor werktuigbouwkundige toepassingen bovenstaand verhaal steeds herhaald worden. Veel toepassingen zijn bedacht door keramiekproducenten - met name Japanse en Westduitse - maar steeds blijkt dan weer dat het ontwerp niet goed is geweest. Vaak wordt het metalen voorwerp zonder meer in keramiek nage maakt, waarbij er dan aan voorbij wordt gegaan dat het materiaal broos is, of een andere uitzettingscoëfficiënt heeft dan het metaal. Na inbouw breekt het keramische product. Helaas zijn er dan maar weinigen die de mogelijkheden van keramiek nog verder willen bestuderen.

Werkwijze bij het ontwerpen

Technische keramiek biedt dus vooral mogelijkheden door haar hoge smeltpunt, grote hardheid, grote mechanische stabiliteit en last but not least de corrosievastheid. De afwijkende thermische uitzetting ten opzichte van metalen en het brossse karakter van het materiaal vormen wel de belangrijkste knelpunten. Het is daarom niet mogelijk zonder meer metalen onderdelen door keramische te vervangen. Over het ontwerp van het onderdeel en over de inbouwmogelijkheden zal nagedacht moeten worden. Tot nu toe is met name aan deze aspecten door de keramische industrie onvoldoende aandacht besteed. Keramiek voor werktuigbouwkundige toepassingen kan alleen een succes worden wanneer bovengenoemde twee punten worden opgelost.

Wil men in een installatie een snel slijtend onderdeel door een keramisch onderdeel vervangen, dan zullen eerst de procesomstandigheden waaronder het onderdeel moet functioneren nauwkeurig vastgelegd moeten worden. Op grond van deze gegevens kan dan tot een materiaalkeuze worden gekomen. Dit kan de keuze voor een bestaand materiaal zijn, maar het kan ook zogenaamd "materials-engineering" betekenen. Het laatste komt erop



Figuur 4 Doorsnede tweedelige wandverdunde bus

neer dat een dusdanige materiaalcompositie wordt uitgewerkt die het beste aan de gestelde eisen voldoet, hetgeen veelal een nieuw materiaal betekent. Een voorbeeld hiervan is de glaskeramiekplaat zoals die is ontwikkeld voor elektrische kookplaten in keukens.

Na de materiaalkeuze volgt de keuze van de vormgevingstechniek voor het onderdeel. Hiervoor is wederom de analyse van de bedrijfsomstandigheden nodig. Deze analyse is erop gericht het uiteindelijke voorwerp zo goed mogelijk af te stemmen, ook qua vormgeving, op de omstandigheden in de installatie. Dit betekent het uitvoeren van spanningsberekeningen, waaruit blijkt of het voorwerp de opgelegde spanningen ook zal weerstaan. Wanneer dit goed is verlopen, zal aandacht besteed moeten worden aan de mogelijkheden om het voorwerp aan de rest van de installatie te monteren. Is het mogelijk om het in te klemmen, moet het misschien gelijmd worden, of kan het wellicht zelfs worden gelast?

Voor een goed resultaat met keramiek zal aan al deze onderwerpen aandacht besteed moeten worden. Hoogovens besteedt vanuit haar kennisachtergrond juist aan deze zaken aandacht.

Enkele praktijkvoorbeelden

In deze paragraaf zullen voorbeelden worden behandeld, waarmee wordt geïllustreerd op welke wijze bij de Hoogovens Groep voor bestaande procesproblemen oplossingen in keramiek worden gezocht.

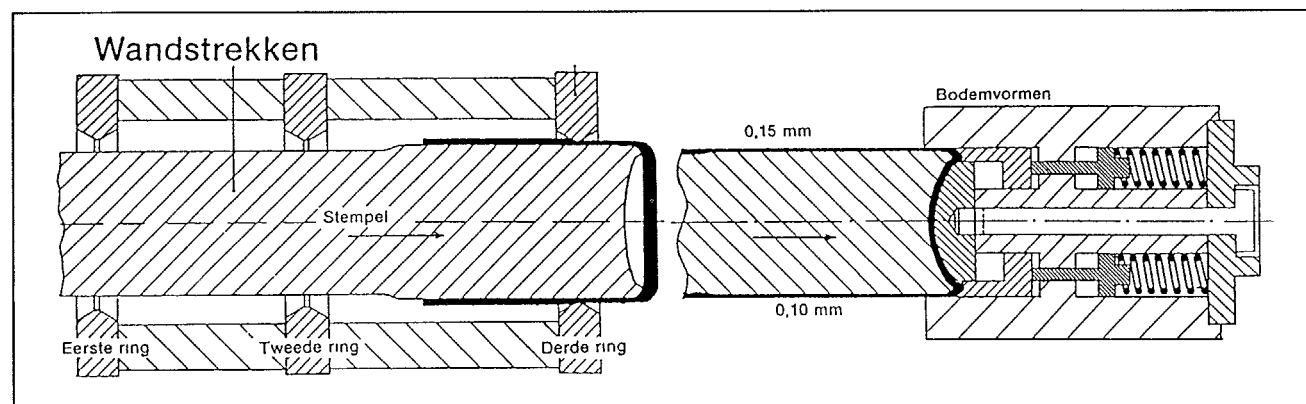
Koud vervormen van staal

Het koud vervormen van staal vormt een groep van processen waarbij zeer grote krachten worden uitgeoefend op de daarbij gebruikte matrijzen. Dit geldt onder meer voor het trekken van staaldraad, maar ook voor het vormen van de tweedelige wandverdunde drankenbus. De tweedelige wandverdunde bus wordt toegepast voor koolzuurhoudende dranken, als cola en bier. *Figuur 4* geeft de doorsnede van een drankenbus weer. Een dergelijke bus wordt gemaakt uit een vlak cirkel-

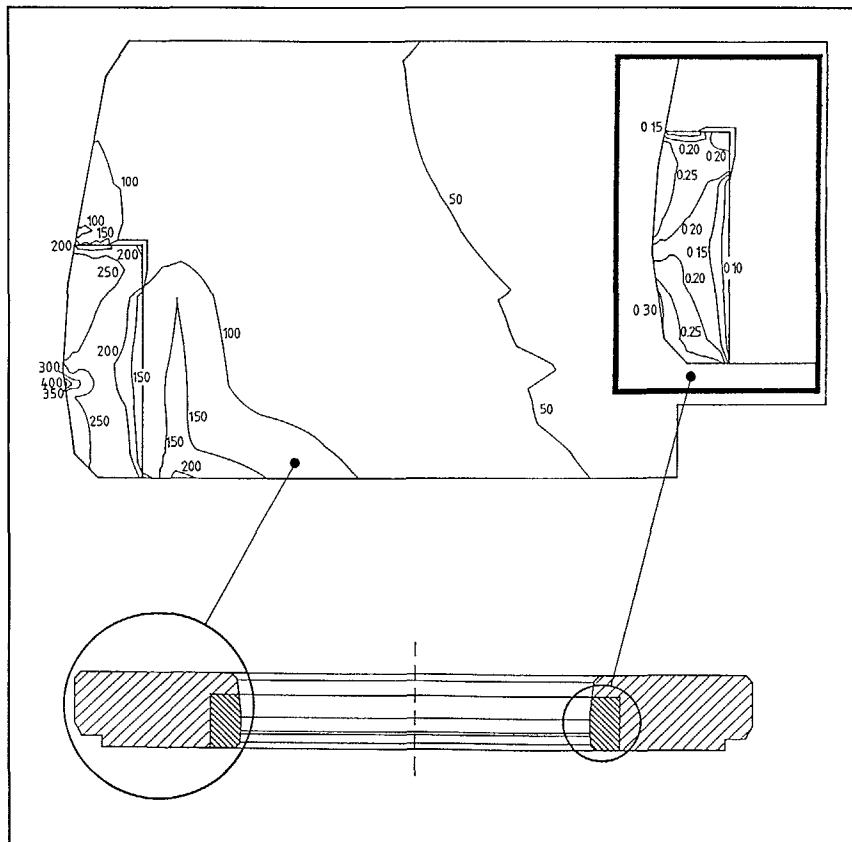
vormig plaatje blik. Bij het wandverdunningsproces wordt gebruik gemaakt van een hardmetalen stempel en wandverdunningsringen met een hardmetalen binnenring. Een productielijn bestaat in het algemeen uit een bekervormer en vijf wandstrekmachines. Elke wandstrekmachine heeft een toolbox met drie wandverdunningsringen. *Figuur 5* geeft het wandstrekproces in één zo'n ring weer.⁽⁴⁾ De eigenlijke vervormingsring is een hardmetalen ring die aan grote slijtage onderhevig is. Uit oogpunt van superieure slijtvastheid van enkele keramieksoorten is het wellicht mogelijk de hardmetalen binnenring te vervangen door een keramische. Ten opzichte van de bestaande configuratie zou vervanging door keramische ringen de volgende voordelen kunnen bieden:

- a langere standtijden door hogere slijtvastheid,
- b de "sticking" van de metaallaag (tin) op de ring zou wellicht minder kunnen zijn;
- c lagere vervormingskrachten, omdat de wrijvingscoëfficiënt tussen blik en keramiek lager kan zijn. Hierdoor zou wellicht tevens met een dünnere tinlaag volstaan kunnen worden.

Alvorens te komen tot praktijkexperimenten is het wandstrekproces modelmatig geanalyseerd door medewerkers van het Research Laboratorium van Hoogovens in IJmuiden. Met behulp van een eindig elementenrekenmodel worden momenteel berekeningen gemaakt, waarbij de eigenschappen van de hardmetalen ring zijn vervangen door die van achtereenvolgens verschillende keramische materialen. Uit de berekeningen blijkt dat met name het krimpen van de ring in de metalen houder kritisch is. Voor keramische materialen wordt in het gebruikte programma het zogenaamde Druecker-Prager-Kriterium gehanteerd, waarmee de bezwijkcriteria worden bepaald.



Figuur 5 Het wandstrekproces



Figuur 6 Spanningsberekeningen van de wandstreking weergegeven in een doorsnede van de ring plus de stalen vassing. De complete figuur geeft de spanningscontouren tijdens strekken weer. De inzet geeft de relatieve faalspanning van de keramische vervormingsring aan. Hieruit blijkt, dat de spanningen ruim onder de kritische waarde blijven

Wat keramische materialen betreft is het essentieel, dat zij niet even sterk op druk als op trek te belasten zijn en dat in het model ter plaatse van de knooppunten wordt bekeken hoe de spanningssituatie is; op basis daarvan wordt de verhouding tot de faalspanning berekend. Dit betekent echter, dat de contourplots in absolute spanningen een ander beeld te zien kunnen geven dan die uitgedrukt in relatieve faalspanning, zoals uit *figuur 7* blijkt. De weergave in *figuur 6* heeft betrekking op een zeer slijtvast keramisch materiaal. Uit de figuren blijkt dat de processpanningen tijdens het wandstrekken wel onder de bezwijkspanning van het materiaal zullen liggen, mits voldoende gecompenseerd door de voorspanning tengevolge van het krimpen van de binnenring. De materiaaldeskundige en de constructeur zullen nu zelf op basis van eigen opgedane ervaring moeten bepalen of de gevonden spanningen voldoende ver onder de bezwijkspanning liggen om buiten het bereik van de spreiding in sterkte van het materiaal te blijven. De volgende stap in het onderzoek zal nu dan ook zijn, na te gaan of er een materiaalleverancier te vinden is die de gewenste ring met voldoende zekerheid van de juiste sterkte zal kunnen

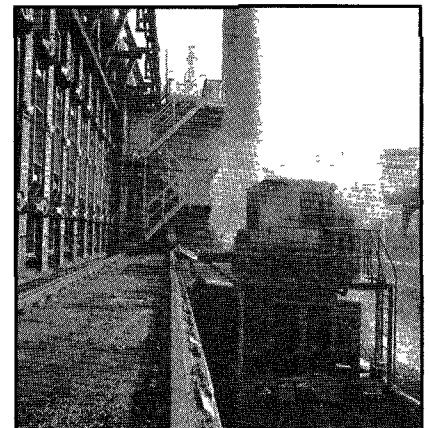
maken. Daarbij komt dan nog een aantal zaken aan de orde die niet via berekening gesimuleerd kunnen worden. Zo zal nagegaan dienen te worden of het slijpen en polijsten van de ring geen negatieve invloed op zijn sterkte zullen hebben en of tijdens het wandstrekproces geen korrels onverwacht uitbreken.

De berekeningen hebben geleerd, dat de sterkte voldoende zal zijn, praktijkproeven zullen nu nog moeten leren of het materiaal werkelijk voldoet

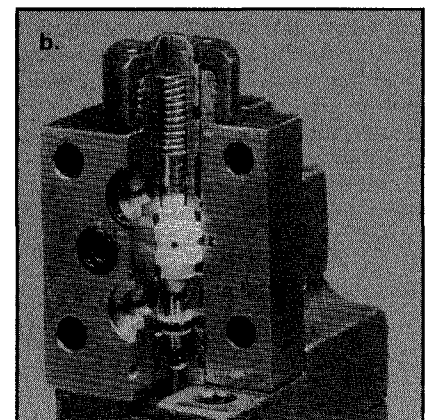
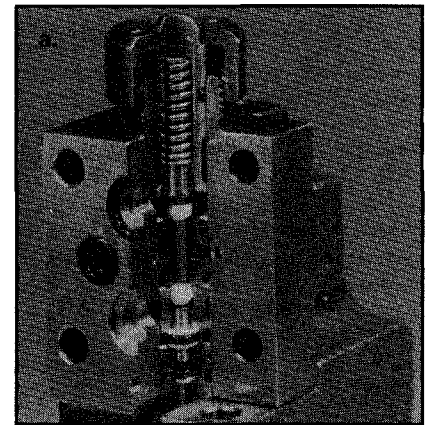
Een hogedrukvoorstuurtentiel

Hogedrukvoorstuurtentielen bevinden zich na de hogedrukwaterpomp waarmee de deuren van de cokesfabriek worden gereinigd. Cokes wordt geproduceerd in hoge kamers met een breedte van ca 40 cm. Na afloop van het proces wordt de cokes met behulp van een stempel naar buiten geschoven; zie *figuur 7*. Aan de afdichtingsmessen van de deur blijft teer kleven, hetgeen aanleiding kan geven tot milieu-onvriendelijke gaslekage van de deuren. Het reinigen van deze onderdelen gebeurt met een hogedrukwaterstraal (700 bar), in de waterverdeelapparatuur zijn de desbetreffende tentielen aangebracht.

Een van de aan sterke slijtage onderhevige onderdelen is de stalen zitting van deze hogedrukvoorstuurtentielen. De standtijd van deze zitting is drie à vier weken. Het verbruik ligt op circa 1500 stuks per jaar. Een eerste proef is uitgevoerd door de stalen zitting exact in keramiek te kopiëren. Dit ontwerp faalde, doordat de zitting al bij



Figuur 7 Het uitdrukken van de gare cokes. In een van de ruimten van de deurmachine is de hogedrukreinigungsapparaat opgesteld



Figuur 8 Tentiel voor water met een druk van 700 atmosfeer
a oude ontwerp in metaal
b door vervanging van de kwetsbare metalen onderdelen door een aangepast onderdeel uit keramiek is de levensduur vertienvoudigd

montage in het ventielhuis scheurde. Na herontwerp, waarbij het aantal onderdelen van vijf naar drie is teruggebracht, waardoor tevens montagefouten worden voorkomen, is een ventiel ontstaan dat momenteel een meer dan tienvoudige levensduur blijkt te bezitten. *Figuur 8a* en *figuur 8b* geven het oude en nieuwe ventiel weer.

Slotopmerkingen

Tot slot van dit artikel worden enkele essentiële punten aangegeven waarmee de constructeur rekening dient te houden wanneer een onderdeel in keramiek wordt ontworpen. Hij dient zich de volgende vragen te stellen:

1. Hoe functioneert het conventionele onderdeel?
Daarbij rekening houdende met het type belasting waaronder het onderdeel wordt gebruikt, zoals druk, temperatuur, mechanische stoten, thermische schokken, mechanische dan wel chemische slijtage. Hoe kan het onderdeel gemonteerd of gedemonteerd worden? Kunnen door procesfouten tijdens bedrijf extreme krachten op het onderdeel gaan werken, die de bezwijkspanningen te boven gaan?
2. Kan een onderdeel uit technische keramiek werkelijk tot een zodanige standtijdverbetering leiden dat een kostenvoordeel wordt gerealiseerd? Het nut van keramiek ten opzichte van andere mogelijke materialen

zal bij iedere nieuwe toepassing opnieuw beoordeeld dienen te worden. In een aantal gevallen kan een proces-, constructie- of materiaalwijziging een eenvoudiger oplossing bieden.

3. Hoe groot is het risico, wanneer plotseling breuk van het keramisch onderdeel optreedt?
Bij experimenten in de praktijk is het van belang om eerst een eenvoudige risico-analyse uit te voeren waarbij een schatting wordt gemaakt van de gevolgen van een calamiteit voor het milieu, het productieproces en de kosten van productiestilstand.
4. Kan de huidige vormgeving van het onderdeel wel in keramiek worden uitgevoerd?
Bij de beoordeling van het onderdeel dient te worden nagegaan of het scherpe hoeken en plotselinge overgangen in wanddikte bevat. Deze dienen vermeden te worden, evenals scherp uitlopende groeven. Vermijd niet strikt noodzakelijke hoge maattoleranties en oppervlaktegesteldheden, daar deze zeer kostenverhogend werken. Vermijd verder zo mogelijk asymmetrische vormen en ongelijkmatige belastingen door een gedeeltelijk aangeliggend draagvlak te creëren.
5. Wat is het gevolg van een eventueel herontwerp op de andere onderdelen of het proces?
Een gewijzigd onderdeel kan in-

vloed hebben op de omliggende constructie, waardoor een ongewenste kostenverhoging voor de gehele installatie kan ontstaan.

Bovenbeschreven aandachtspunten geven aan dat ontwerpen en construeren in technische keramiek werkelijk een vak apart is. Vooral bij industriële installaties zal naar Taylor-made-oplossingen gezocht dienen te worden. Dit vereist een diepgaande samenwerking tussen constructeur en eindgebruiker en vaak ook met de producent van de keramiek, omdat het ontwerp zodanig gemaakt dient te worden, dat het goed reproduceerbaar gefabriceerd kan worden.

Literatuur

- [1] Veringa, H. J., "Wat is technische keramiek", *Materialen* (1989) nr. 1, p. 25.
- [2] Davidge, R. W., "Mechanical Behaviour of Ceramics". Cambridge University Press (1979).
- [3] Weibull, W. A., "Statistical Distribution Function of Wide Applicability" *J. Appl. Mech.* 18 [3] (1951) 293-297.
- [4] Ras, H. B., van den Hoeven, J. A., Janssen, E., "A Numerical Calculation of the Stress Distribution During wall Ironing", *Proceedings of the 2nd International Conference on Numerical Methods in Industrial Forming Processes* (1986) p. 229.
- [5] "Engineering Applications of Ceramics Materials Society for Metals", Metals Park Ohio (1985).

Symposium Kennissystemen binnen TNO

Binnen TNO wordt vanuit inhoudelijke deskundigheid sedert geruime tijd en op diverse plaatsen gewerkt aan onderzoek en ontwikkeling op het gebied van kennissystemen, gericht op het toepasbaar maken van deze nieuwe technologie voor overheid, industrie en andere geïnteresseerden.

Het symposium biedt een goed overzicht van de ontwikkelingen die binnen TNO gaande zijn op het gebied van kennissystemen, en maakt duidelijk wat TNO op dit terrein te bieden heeft.

Programma

Plenaire Mondriaanzaal

08.30-09.30 uur

Registratie

09.30-10.00 uur

Introductie door W. C. L. Zegveld,

Hoofdgroep Beleidsstudies en Informatie TNO

10.00-10.30 uur

Koffiepauze

Parallelle Mondriaanzaal

10.30-11.00 uur

De toepasbaarheid van technieken voor kenniselicitering H. H. Bogers, Projectgroep Bedrijfskunde TNO

11.00-11.30 uur

FIFE. De ontwikkeling van een intelligent front-end, G. G. Wagenaar, Hoofdgroep Maatschappelijke Technologie TNO

11.30-12.00 uur

Beslissingsondersteuning aan het management bij damage control situaties, J. M. C. Schraagen, Instituut voor Zintuigfysiologie TNO

12.00-13.30 uur

Discussie, lunch en demonstraties

13.30-14.00 uur

De mogelijkheden van expertsystemen in verkeer en vervoer, M. J. M. van der Vlist, Instituut voor Ruimtelijke Organisatie TNO

14.00-14.30 uur

DELFT: Een kennissysteem voor de woonruimteverdeling in Delft, A. G. G. Op 't Veld, Instituut voor Ruimtelijke Organisatie TNO

14.30-15.00 uur

Theepauze

15.00-15.30 uur

MILIAM: Een beleidsondersteunend kennissysteem voor de mestproblematiek, C. Kwakernaak, Studiecendrum voor Milieu-onderzoek TNO

15.30-16.00 uur

ARIE: Een expertsysteem voor fotochemische luchtverontreiniging, H. Diepenmaat, Hoofdgroep Maatschappelijke Technologie TNO

Parallelle Escherzaal I

10.30-11.00 uur

Een kennissysteem voor de ondersteuning van seismische interpretatie

Vervolg zie pag. 51