

Toepassing van keramiek voor mechanische onderdelen

W.L. Neijmeijer

Introductie

In de laatste tien jaar is technische keramiek in de industrie een belangrijk onderwerp geworden, zowel voor onderzoek als voor toepassingen. De toepassingen van deze nieuwe groep materialen worden gekarakteriseerd door trefwoorden als slijtage, oxydatie, hoge temperatuur en corrosie, waardoor ze geschikt lijken voor toepassingen in verbrandingsmotoren, turbines, pompen en voor gereedschappen. Hoewel de technologische ontwikkeling veel belovend is, groeit het aantal toepassingen slechts langzaam. De belangrijkste oorzaken voor deze langzame groei zijn de problemen bij het fabriceren en bewerken van keramische onderdelen en de inherente brosheid van het materiaal. Desondanks kan de toepassing van keramiek in veel gevallen voordelen bieden, waar voorheen nooit aan het gebruik is gedacht. Bovendien kan keramiek de noodzakelijke eigenschappen bieden voor nieuwe en veeleisende toepassingen.

Voor een verdere verbreiding van de toepassingen van keramiek zullen degenen die betrokken zijn bij het ontwikkelen en ontwerpen van nieuwe producten goed op de hoogte moeten zijn van de mogelijkheden en de beperkingen van dit materiaal. In dit artikel worden enkele richtlijnen gegeven voor het ontwerpen en het toepassen van keramische onderdelen.

Keramiek als materiaal

Keramiek wordt gewoonlijk gedefinieerd als een niet-metallisch of anorganisch materiaal dat tijdens het fabricageproces gesinterd moet worden. Deze de-

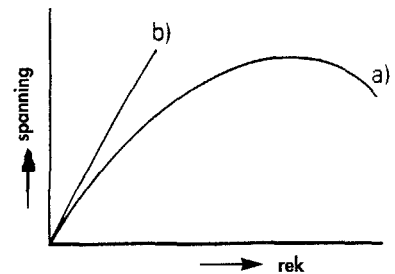
finitie is zowel van toepassing voor de traditionele keramiek als voor de meer geavanceerde technische keramiek. In de laatste genoemde groep kan een ordening naar 'functioneel' en 'structureel' worden aangebracht, zie figuur 1.

Functionele keramiek wordt toegepast vanwege specifieke fysische eigenschappen. Toepassingen binnen Philips voor dit soort keramiek zijn bijvoorbeeld ringkernmagneten, recorderkoppen, spoelkernen en hoge-druk natriumlampomhullingen. Structurele keramiek wordt toegepast voor slijtage- en hogetemperatuur-bestendige delen of in verband met de stabiliteit in corrosieve omgevingen. Deze laatste groep is onderwerp van dit artikel.

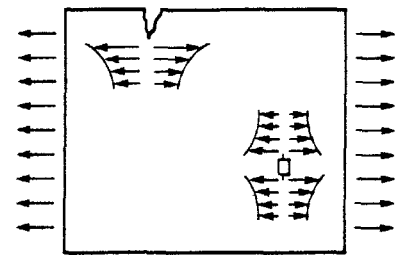
In het algemeen heeft structurele keramiek de volgende gunstige eigenschappen.

- hoge hardheid,
- grote slijtvastheid,
- hoge temperatuur bestendigheid,
- corrosie- en oxydatie bestendigheid,
- lage soortelijke massa(dichtheid),
- en de volgende ongunstige eigenschappen:
 - brosheid,
 - geringe sterkte,
 - moeilijk te bewerken,
 - grote spreiding in materiaaleigenschappen.

Voor structurele toepassingen zijn voornamelijk de volgende vier materialen belangrijk: zirconiumoxyde (ZrO_2), aluminiumoxyde (Al_2O_3), siliciumnitride (Si_3N_4) en siliciumcarbide (SiC). Tabel 1 geeft zowel enige mechanische en fysische eigenschappen van deze materialen alsmede enige toepassingen. Mengsels van Al_2O_3 en ZrO_2 worden vaak toegepast, evenals $SiAlON$, een verbinding van Si_3N_4 , AlN (aluminium-



Figuur 2. Vergelijking van het spanning/rek gedrag van metaal (a) en keramiek (b).



Figuur 3. Spanningsconcentraties als gevolg van onvolkomenheden in het product: a) oppervlakscheur, b) porie.

nitride) en Al_2O_3 . AlN wordt toegepast vanwege de gunstige combinatie van elektrische weerstand en goede warmtegeleiding.

Mechanische eigenschappen

Sterkte en taaiheid

Anders dan bij metalen, die plastisch vervormen voordat breuk optreedt, wordt het mechanisch gedrag van keramiek gekarakteriseerd door elastische rek tot breuk optreedt, zie figuur 2. De maximale trekspanning van keramiek hangt nauw samen met een kritische spanning die lokaal optreedt als gevolg van spanningsconcentraties rond materiaalfouten zoals poriën, scheurtjes of insluitels, zie figuur 3. Als de kritische spanning bereikt wordt, breekt de keramiek. De kritische spanning hangt niet alleen van het gekozen materiaal af, maar ook van de grootte en de vorm van de materiaalfouten. Bij grote en scherp gevormde insluitels is de spanningsconcentratie hoog, zodat reeds bij geringe uitwendige belasting breuk kan ontstaan. Taaiere materialen, zoals metalen, zijn daarentegen veel minder gevoelig

Traditionele keramiek	Technische keramiek	
aardewerk porcelein pottenbakkerswerk tegels	Functioneel ferrieten magneto-plumbieten piëzo-elektrische translucenten	Structureel ZrO_2 (zirkoonoxyde) Al_2O_3 (aluminiumoxyde) Si_3N_4 (siliciumnitride) SiC (siliciumcarbide)

Figuur 1. Voorkomende keramieksoorten

voor lokale materiaalfouten, omdat de lokale spanningsconcentratie lager wordt door het optreden van plastische rek ter plaatse van de spanningsconcentratie.

Recente verbeteringen van de sterkte en taaiheid van keramiek zijn voor een deel het gevolg van een reductie in de grootte en het aantal van de materiaalfouten na fabricage. Dit is bereikt door verbetering van de poeder(grondstof)kwaliteit en een hogere dichtheid, bijvoorbeeld door Heet Isostatisch Persen (HIP).

Omdat keramiek is vervaardigd uit een samengeperst poeder blijft er altijd een geringe hoeveelheid poriën en insluitsels aanwezig. In de praktijk kunnen dichtheden van 98 - 99% van de theoretische dichtheid worden bereikt.

Uit tabel 1 blijkt dat ondanks de brosheid van keramiek momenteel bruikbare waarden voor constructieve toepassingen worden bereikt. Dit is in het bijzonder van toepassing voor ZrO_2 , precieser aangeduid met yttria partieel gestabiliseerd zirkonia, wat momenteel een van de taaieste keramieksoorten is. De getallen in de tabel krijgen meer zeggingskracht door demonstraties als het in een houtblok timmeren van een zirkonia spijker of de waarneembare elastische invering van een zirkonia spiraalveer.

De sterkte van keramische onderdelen wordt als gevolg van de spreiding in eigenschappen vaak statistisch benaderd. Dit wordt onder andere gedaan door het toepassen van Weibull-statistieken, waarmee de breukwaarschijnlijkheid van een keramisch onderdeel kan worden bepaald. Een meer rechttoe rechtaan benadering is het bepalen van de minimum sterkte en deze als ontwerpgegeven te gebruiken, of het beproeven van alle onderdelen bij overbelasting, zoals momenteel met turboladers gebeurt.

Slijtage en wrijving

In het algemeen is keramiek zeer goed tegen slijtage bestand. Slijtvastheid is echter geen materiaaleigenschap, maar een eigenschap die geldt voor een bepaalde combinatie van materialen en omgevingsomstandigheden, zoals vochtigheid, snelheid, temperatuur, enzovoort. Daarom zouden specifieke combinaties van materialen en omstandigheden eerst moeten worden uitgetoetst voordat men ze gaat toepassen. Combinaties die gewoonlijk met goed resultaat kunnen worden toegepast zijn bijvoorbeeld SiC - staal, ZrO_2 - staal en Si_3N_4 - staal. De combinatie ZrO_2 - staal heeft een lage wrijvingscoëfficiënt ($\leq 0,2$). Onderlinge combinaties van ke-

ramiek zijn minder gewenst door de hoge wrijvingscoëfficiënten met waarden tussen 0,4 en 0,8. Glijdend contact tussen Si_3N_4 en Al_2O_3 of tussen ZrO_2 en ZrO_2 kunnen daarom beter worden vermeden. Daarentegen kan een glijdend contact van Al_2O_3 en Al_2O_3 met een wrijvingscoëfficiënt van 0,45 nog acceptabel zijn.

De fabricage van keramische onderdelen

Bij de fabricage van onderdelen uit keramiek kunnen de volgende stappen worden onderscheiden:

- mengen van het keramische poeder met een bindmiddel,
- vormgeven en samenpersen,
- verwijderen van het bindmateriaal,
- sinteren,
- nabewerken.

Deze vijf stappen zullen worden beschreven voor het 'spuitgieten', zie figuur 4. Eerst moet een spuitgietbare massa worden aangemaakt. Dit wordt gedaan door het mengen van het keramische poeder met een bindmiddel. Als bindmiddel wordt gebruik gemaakt van bijvoorbeeld een thermoplastisch materiaal zoals polyetheen of polypropreen, bevochtigers en vloeimiddelen. Voor het mengen is een kneedmachine met ver-

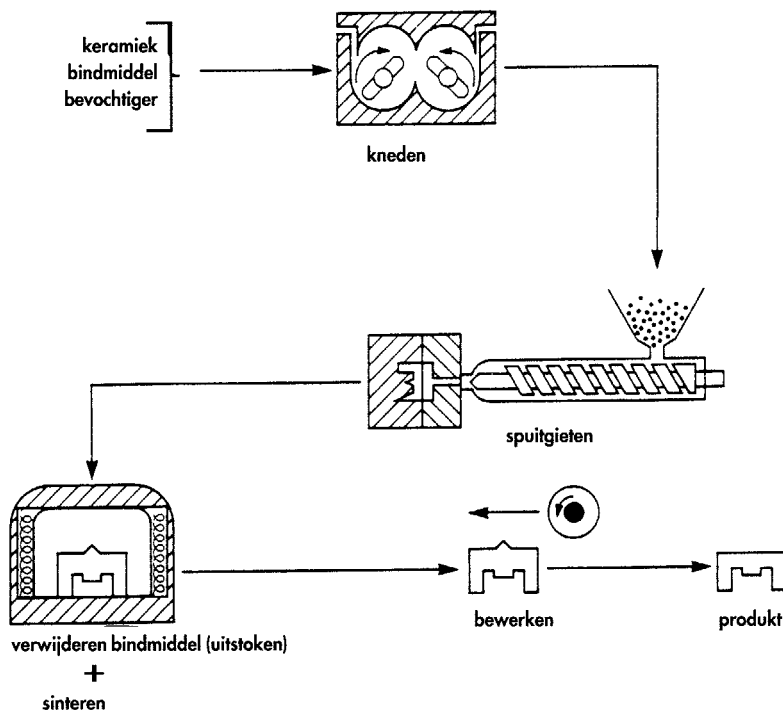
		Al_2O_3	ZrO_2	SiC	Si_3N_4	AlN
Dichtheid	[gr/cm ³]	3,8	6,1	3,15	3,2	3,3
Hardheid (knoop, 100 gr)		2100	1800	2800	1550	1200
Buigsterkte	[MPa]	340	1200	400-600	400-700	340
Druksterkte	[MPa]	2500	2000	2200	2500	2100
Elasticiteitsmodulus	[GPa]	310	200	410	300	340
Constante van Poisson		0,27	0,23	0,17	0,25	—
Thermische geleidbaarheid	[W/mK]	29	2	110	35	200
Uitzettingscoëfficiënt	[10 ⁻⁶ K ⁻¹]	8,5	10,5	4,9	3,2	4,6
Electrische weerstand (20°C)	[Ωcm]	10 ¹⁴	10 ¹⁰	10-100	10 ¹²	10 ¹³
Bestendigheid tegen thermische vermoeïing		slecht	redelijk	goed	excellent	excellent

Toepassingen

- Al_2O_3 : slijtvaste onderdelen, gereedschappen, substraten, isolatoren,
 ZrO_2 : slijtvaste onderdelen, snijgereedschappen, kleppen
 SiC : corrosieve milieus, kleppen, lagers, sproeiers
 Si_3N_4 : hogetemperatuur toepassingen, turbinebladen, turbochargers, sproeiers
 AlN : hoge thermische geleiding, kroezen, substraten, heat sinks

Tabel 1. Enkele eigenschappen en toepassingen van structurele keramiek.

Toepassing van keramiek voor mechanische onderdelen



Figuur 4. Fabricage van keramische onderdelen door middel van spuitgieten.

warming noodzakelijk in verband met de hoge viscositeit van de massa. Na het mengen wordt de massa gegranuleerd (tot korrels gemalen) en in een spuitgietmachine toegevoerd.

Na het spuitgieten zijn de zogenaamde *groene* produkten ontstaan, die wel de vorm maar niet de sterkte van het uiteindelijke produkt hebben. Bij de volgende stap (c) wordt de binder verwijderd. Dit wordt gedaan door het produkt langzaam op te warmen tot een temperatuur van 600 °C. Bij deze temperatuur is het bindmiddel verbrand en vervluchtigd zonder sporen achter te laten. Het verwijderen van het bindmiddel is een belangrijke en tijdrovende stap die nauwkeurig moet worden uitgevoerd om te vermijden dat gasinsluitels ontstaan die scheuren en fouten veroorzaken door het expanderen van het gas. Als het bindmiddel verwijderd is wordt de temperatuur verhoogd tot de sintertemperatuur – gewoonlijk 1200 - 1800 °C – waarbij een verhoging van de dichtheid plaatsvindt (stap d). Na het sinteren moet de dichtheid zodanig zijn dat een optimale sterkte, hardheid en taaiheid verkregen is.

Een van de voordelen van het spuitgieten is het produceren van produkten waaraan weinig hoeft te worden nabewerkt omdat ze reeds hun uiteindelijke vorm hebben. Het nabewerken is namelijk een

zeer kostbare en tijdrovende activiteit gezien de hardheid van de keramiek. Een ijzeren wet is dat, als het enigzins kan, nabewerken vermeden moet worden.

Spuitgieten is een bijzonder goede methode voor het fabriceren van ingewikkelde vormen in grote aantallen. De mogelijke vormen kennen slechts weinig beperkingen en zijn vergelijkbaar met die bij het spuitgieten van kunststoffen. Er moet wel rekening gehouden worden met krimp tijdens het sinteren.

Alle vormgevingsmethoden voor keramiek hebben te maken met krimp omdat ze uitgaan van poeder dat verdicht wordt tijdens het fabricageproces. Bij het spuitgieten kan de krimp oplopen tot 25% doordat grote hoeveelheden bindmiddel (tot 50%) nodig zijn om de massa te kunnen spuiten. Desondanks kunnen nauwe produkttoleranties van 1% routinematig gerealiseerd worden. Een aanvullend voordeel van spuitgieten is de uniformiteit van de krimp. De reproduceerbaarheid van de afmetingen, die de beheersing in maatnauwkeurigheid begrenst, is momenteel circa 0,5%. Nauwere toleranties vergen een machinale nabewerking.

Ontwerpregels

De volgende richtlijnen kunnen voor het ontwerpen van keramische onderdelen worden gegeven, zie de voorbeelden in figuur 5:

- vermijd trekspanningen,
- vermijd schokkende of stotende belasting,
- vermijd scherpe hoeken, de radius moet minimaal 0,2 mm zijn, Scherpe hoeken veroorzaken scheuren tijdens het verwijderen van het bindmiddel en het sinteren; gelijktijdig veroorzaken zij door hun vorm lokale spanningsconcentraties
- vermijd gaten bij de rand,
- vermijd grote materiaaldiktes,
- vermijd lange dunne doorsneden,
- vermijd ondersnijdingen.

Keramiek met metaal verbinden

Het verbinden van keramiek met metaal zal in veel toepassingen voorkomen. In die gevallen waar grote temperatuurverschillen kunnen optreden moet erop gelet worden dat de uitzettingscoëfficiënten van beide materialen goed overeenkomen. In dit opzicht is de relatief hoge uitzettingscoëfficiënt van oxydische keramiek gunstig voor het verbinden met bijvoorbeeld een ferritisch staal. In andere gevallen zouden FeNiCo en FeNi-legeringen voor een passende uitzettingscoëfficiënt kunnen zorgen.

Verbindingen kunnen op verschillende manieren worden gerealiseerd:

- mechanisch, zie figuur 6, met een krimpassing, perspassing (veroorzaakt drukspanningen in de keramiek, wat gunstig is in verband met de belastbaarheid), schroefdraad, bouten en moeren, clips, mechanische positionering
- lijmen (de bedrijfstemperatuur voor veel lijmsorten is begrensd tot 250 °C)
- hardsolderen.

Met hardsolderen ontstaan sterke verbindingen (> 100 MPa) die tevens een goede temperatuurbestendigheid hebben. Als voorbehandeling voor het solderen wordt op het keramiek een metaalcoating aangebracht hetzij door PVD (Physical Vapour Deposition) of een galvanisch proces. Met name bij het solderen zijn passende uitzettingscoëfficiënten van belang om scheuren te vermijden tijdens het afkoelen vanaf de hoge hardsoldeertemperatuur.

Conclusie

Als gevolg van recente ontwikkelingen in de verwerking en eigenschappen van keramische grondstoffen zijn de mogelijke toepassingen van keramische onderdelen aanzienlijk verruimd.

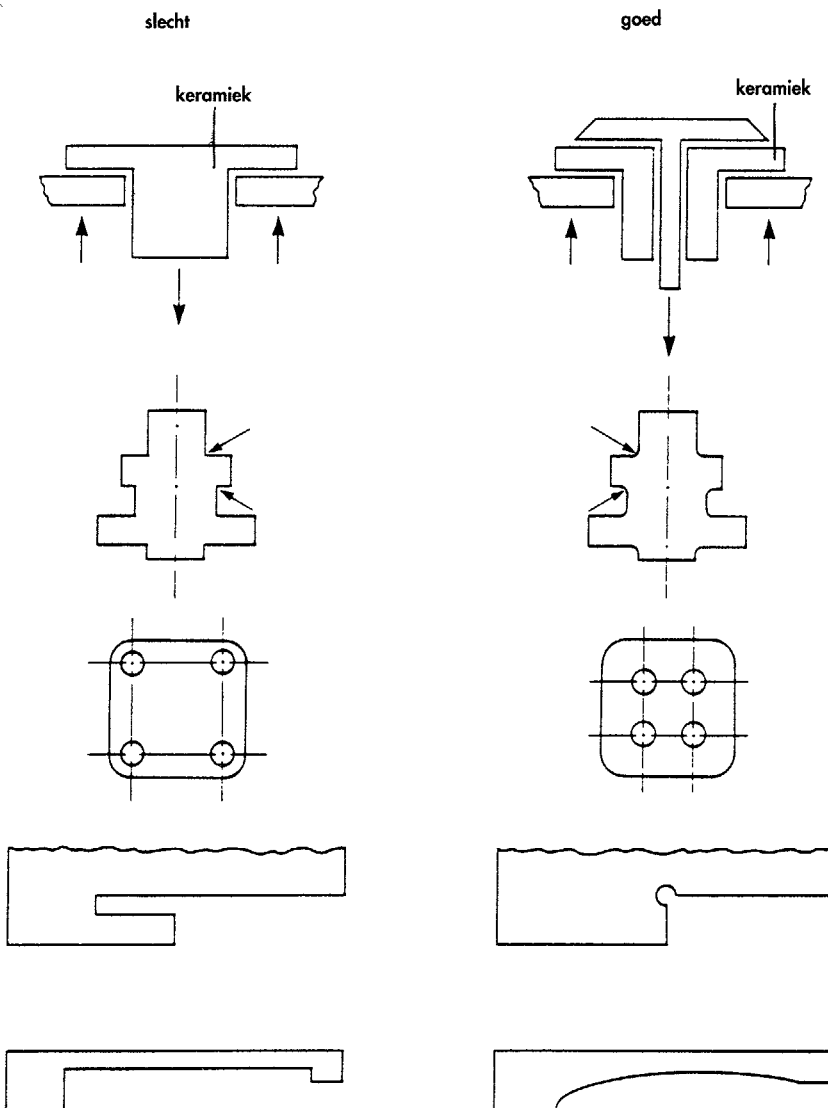
De toepassing van keramiek vergt een specifieke benadering bij het ontwerp van de onderdelen en de keuze van de

verbindingstechnieken.

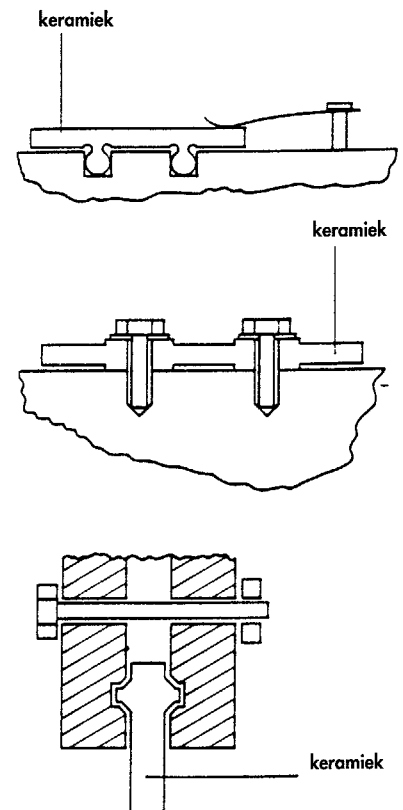
Bij de massaproductie van ingewikkeld gevormde onderdelen is spuitgieten een zeer passende fabricagetechniek.

Dr. ir. W.L. (Wilbert) Neijmeijer studeerde aan de Universiteit van Twente en promoveerde in 1987 op een onderzoek naar de fabricage van meeraderig Nb₃Sn supergeleidend draad. Sinds 1989 werkt hij als onderzoeks- en applicatiemedewerker op het gebied van metalen en keramiek bij het Centre for Materials, Technology and Innovation van de Philips Plastics en Metaalwaren Fabrieken PMF te Eindhoven.

Dit artikel is een vertaling van een eerder verschenen artikel in Philips Production Means 2(1990)4



Figuur 5. Enkele voorbeelden van de "ontwerpregels" voor keramische onderdelen.



Figuur 6. Enkele voorbeelden van het mechanisch verbinden van keramiek aan metaal of keramiek.