

Keramiek als

Vooroordelen! Die maken dat technische keramiek meestal niet als eerste oplossing voor een precisietechnologisch probleem wordt gekozen. Immers, keramiek heeft de reputatie bros en scheurgevoelig te zijn. Anderzijds heeft dat materiaal echter een aantal heel bijzondere eigenschappen. Zorg dat je er daar ten minste twee van benut en dat je tevens met slimme constructieve maatregelen de enkele bezwaren van keramiek ondervangt, stellen Kees Visser en Rick Bruggeman van Ceratec Technical Ceramics in Geldermalsen. Dan kun je trots op je precisietechnologische constructie vermelden: “Ceramic inside”.

• Frans Zuurveen •

In 1983 startte Kees Visser samen met zijn vrouw Wilma een bedrijfje voor het toepassen van technische keramiek. Daarvóór had hij bij de Chamotte Unie al ervaring opgedaan met de productie van keramische materialen voor ovens. En in Japan had hij geleerd dat keramiek nog meer

potentie heeft, namelijk als innovatief constructiemateriaal voor hoogwaardige technische toepassingen. Hij realiseerde zich dat er voor technische keramiek in Nederland en Europa een terrein braak lag voor verspreiding van kennis en voor technologische ontwikkeling.



Afbeelding 1. Het moderne machinepark van Ceratec Technical Ceramics omvat een arsenaal aan CNC-slijpmachines; rechts een vier-assige uitvoering.

probleemoplosser

Vandaag de dag is Ceratec met zijn twintig medewerkers een florierend bedrijf met een CNC-gestuurd machinepark en software die daarop heel effectief is toegesneden; zie Afbeelding 1. Rick Bruggeman is er de salesmanager en hij draagt bij aan cursussen die technici leren hoe technische keramiek verantwoord kan worden toegepast.

Soorten technische keramiek

Ceratec is gespecialiseerd in het toepassen en bewerken van diverse soorten keramiek: siliciumcarbide SiC, siliciumnitride Si₃N₄, boriumcarbide B₄C, boriumnitride BN,

aluminiumnitride AlN, zirkoonoxide ZrO₂ en aluminiumoxide Al₂O₃. Tot de materialen die Ceratec levert en bewerkt, behoren ook saffier en robijn, in feite ook (heel zuiver) aluminiumoxide maar bij robijn enigszins 'verontreinigd' met chromoxide Cr₂O₃. Saffier en robijn vinden vooral toepassing in de vorm van kogels, met een kleinste rondheidstolerantie van 0,2 µm. Alle genoemde materialen hebben als gemeenschappelijk kenmerk een hoge drukvastheid en een beperkte treksterkte. Toch bestaat er per soort een aanzienlijke variatie in eigenschappen en daarmee in toepassingsgebied; zie Tabellen 1 en 2.

Tabel 1. Kenmerkende, kwalitatieve eigenschappen van diverse typen keramiek.

Type keramiek	Eigenschappen
Siliciumcarbide (SiC)	zeer slijtvast, chemisch bestendig
Siliciumnitride (Si ₃ N ₄)	hoge sterkte, gecombineerd met hoge slijtvastheid, goede weerstand tegen thermoshock
Boornitride (BN)	relatief zacht waardoor eenvoudig bewerkbaar, geen bevochtiging door metalen
Aluminiumnitride (AlN)	zeer hoge warmtegeleiding, chemisch bestendig
Zirkoonoxide (ZrO ₂)	stootbestendig, thermisch isolerend
Aluminiumoxide (Al ₂ O ₃)	slijtvast, zeer stijf, elektrisch isolerend, temperatuurbestendig
Robijn (bijna 100% Al ₂ O ₃ + Cr ₂ O ₃)	hoge oppervlaktekwaliteit, fraaie kleur
Saffier (100% Al ₂ O ₃)	hoge oppervlaktekwaliteit, transparant

Tabel 2. Kwantitatieve eigenschappen* van diverse typen keramiek.

	Al ₂ O ₃	ZrO ₂	Si ₃ N ₄	SiC	AlN	BN
Zuiverheid (%)	99,7	96	90	99		> 98,5
E-modulus (GPa)	370	200	275	410		30/25
Poissonconstante	0,27	0,31	0,25	0,17		0,13
Dichtheid (g/cm ³)	3,85	6,0	3,3	3,1	3,3	2,05
Druksterkte (MPa)	2.500	2.000	2.500	2.200		
Treksterkte (MPa)	280	-	400	180		
Buigsterkte (MPa)	300	1.000	750	410	300	70/30
Taatheid (MPa.m ^{1/2})	4	10	7	3,2		
Uitzetting (10 ⁻⁶ /K)	5,5	10	2,5	4	4,4	2/7,5
Warmtegeleiding (W/mK)	30	3	35	110	180	65/45
Elektrische Weerstand (Ω.cm)	10 ¹⁴	10 ¹⁰	10 ¹²	10-100	10 ¹⁴	10 ¹²
Max. temperatuur lucht (°C)	1.500-1.800	800-900	1.200	1.500	1.000	800
Hardheid (HV 0,5)	1.900	1.120	1.450	2.800	1.100	

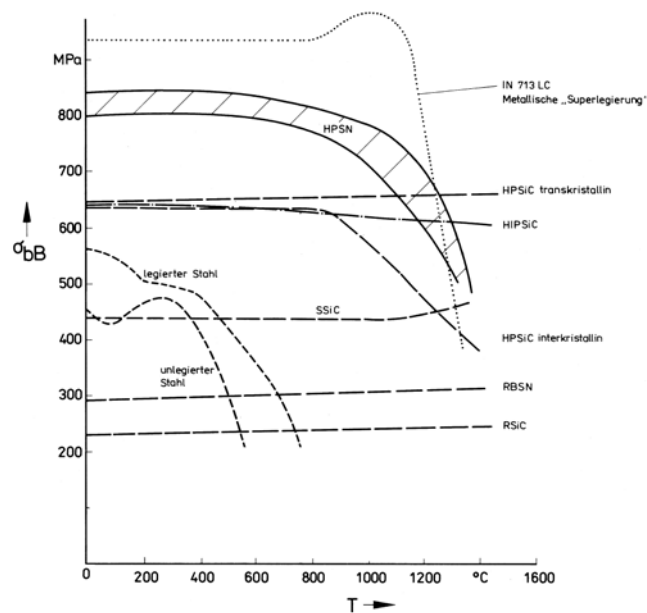
* Gemiddelde waarden; alleen voor BN zijn enkele uiterste waarden vermeld.

Kwantitatieve eigenschappen

Uit de veelheid aan getallen in Tabel 2 zijn enkele interessante eigenschappen af te leiden. Bijvoorbeeld dat siliciumcarbide extreem hard is – op de schaal van Mohs zelfs 9,8 – en dat de druksterkte in het algemeen circa een factor 10 hoger is dan de treksterkte. (Het probleem van een geringe treksterkte is dikwijls door constructieve maatregelen te ondervangen, waarover later meer.) De meeste keramieksoorten hebben een hogere elasticiteitsmodulus dan staal, SiC is zelfs twee keer zo stijf als staal, terwijl de soortelijke massa (met uitzondering van ZrO_2 en BN) ongeveer een factor 2 kleiner is. Aluminiumnitride combineert – en dat is heel uniek – een goede warmtegeleiding met een hoge elektrische isolatiewaarde. Daardoor is dat materiaal uitstekend geschikt voor koelplaten van elektrische componenten ('heat sinks'). Boornitride heeft een hardheid op de schaal van Mohs van 1 à 2 en is daardoor gemakkelijk te bewerken.

De getallen in Tabel 2 zijn gemiddelde – voor BN uiterste – waarden en variëren per soort, omdat de fijnheid van het uitgangsmateriaal en de sintercondities de uiteindelijke kwaliteit bepalen. Als het sinterproces goed is uitgevoerd, zijn de diverse keramieksoorten in principe porievrij. De daarmee samenhangende geringe of ontbrekende ontgassing maakt technische keramiek daarom zeer goed bruikbaar in (ultra)hoog vacuüm. Anderzijds bepaalt de korrelgrootte, korrelvorm en homogeniteit van het uitgangsmateriaal de aard en hoeveelheid van de dislocaties in het gesinterde product. De dislocaties kunnen onder belasting een aanzet geven tot scheurvorming en het uiteindelijke bezwijken van een onderdeel. Vandaar dat er met steeds fijnere keramische poeders wordt gewerkt, tegenwoordig zelfs met nanopoeders.

Een groot voordeel van keramiek is de hoge temperatuurbestendigheid. Afbeelding 2 laat zien hoe voor diverse keramiek- en staalsoorten de buigsterkte afneemt met de temperatuur. Keramiek blijft in sommige gevallen tot bijna 1000 °C bruikbaar. Bijzonder is ook de hoge slijtweerstand van keramiek, die vaak samenhangt met de hardheid. De meeste keramieken zijn chemisch zeer bestendig, uitgezonderd de aantasting door het uiterst agressieve fluorwaterstof, HF. SiC is echter wel bestand tegen HF, terwijl ZrO_2 – in tegenstelling tot andere keramieksoorten – gevoelig is voor zoutzuur, HCl.



Afbeelding 2. De buigsterkte als functie van de gebruikstemperatuur voor enkele staal- en keramieksoorten. (HP: warm geperst, HIP: warm isostatisch geperst, S: gesinterd, RB: C en Si chemisch reactief gekoppeld, R: gerekristalliseerd)

Een recentelijk geïntroduceerd composietmateriaal bestaat uit koolstofvezels in een matrix van silicium. Bij het sinteren vormt zich in het grensgebied van Si en C siliciumcarbide, waardoor het uiteindelijke materiaal de stijfheid en sterkte van koolstofvezels combineert met de hardheid en slijtvastheid van siliciumcarbide. De koolstofvezels kunnen kort zijn ('chopped') of lang en dan bij voorkeur georiënteerd in de richting van de trekbelasting. Soms worden ook SiC-vezels gebruikt. Dergelijk – kostbaar – supermateriaal vindt toepassing in de ruimtevaart voor hitteschilden en in de automobiellindustrie voor remschijven.

Bewerken van keramiek

De kwaliteit van een keramisch product wordt in hoge mate bepaald door die van de diverse fasen in de vormgeving: samenpersen van poederdeeltjes, sinteren in een oven, ten slotte nabewerken door slijpen, honen, leppen en/of laserbewerken. Er bestaan nog andere nabewerkingsmethodieken, zoals ultrasoon bewerken, waterstraalsnijden en vonkeroderen, maar die worden door Ceratec niet toegepast. Nabewerkingen aan het harde, gesinterde product zijn kostbaar, enerzijds omdat dure machines nodig zijn, ander-

zijds omdat de bewerkingstijden lang zijn. Het nabewerken vindt in bijna alle gevallen plaats met diamantgereedschap.

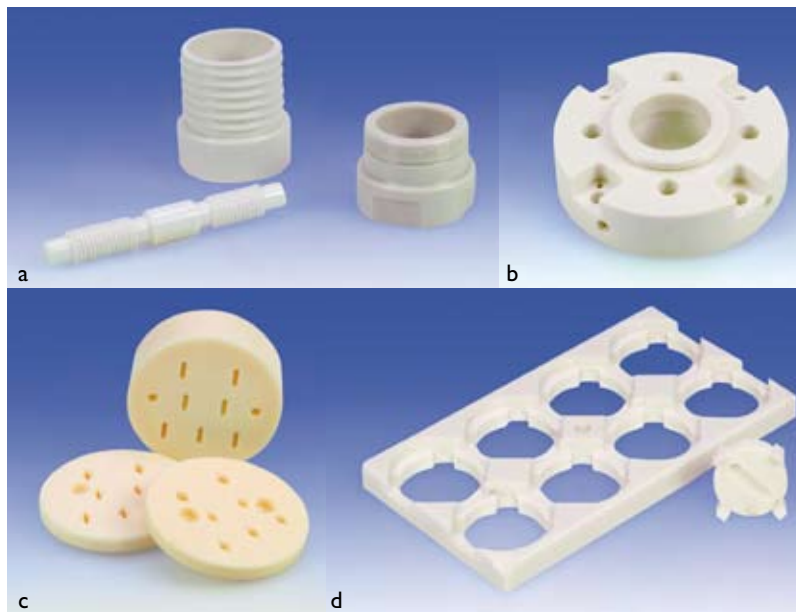
Het voorgaande maakt duidelijk dat efficiënt produceren betekent dat de 'ruwe' vorm van het gesinterde product zo goed mogelijk die van het uiteindelijke product benadert. Dikwijls kan daarvoor worden uitgegaan van plaat- of stafmateriaal, dat uit de handel wordt betrokken. Maar gelukkig bestaat er nog een andere mogelijkheid: voorbereken van het ongesinterde product. Dat nog zachte product wordt 'groen' genoemd, maar is in werkelijkheid wit, zwart (B_4C en SiC) of grijs (Si_3N_4). Het groene product kan met relatief korte doorlooptijden worden voorberekt door het te draaien, boren en frezen. Daarbij is het belangrijk dat het groene product geen dichtheidsverschillen vertoont, omdat deze tijdens het sinteren tot vervormingen leiden die inwendige spanningen kunnen veroorzaken. Bovendien moet rekening worden gehouden met krimp van het groene product tijdens het sinteren, in de praktijk 14 à 20%.

Ceratec richt zich op enklafabricage en het met hoge precisie maken van kleine tot middelgrote series. Aangezien gangbare precisieslijpmachines zijn ontworpen voor het bewerken van metalen, in het algemeen staal, is het Ceratec-machinepark speciaal voor het bewerken van keramiek gemodificeerd. De reden is dat het slijpen van keramiek met diamantslijpschijven in een aantal opzichten afwijkt van het slijpen van staal: de slijpsteen moet met een veel hoger toerental draaien, er moet met uiterst geringe aanzetten – tot $1\ \mu m$ – kunnen worden gewerkt, er worden speciale slijpemulsies gebruikt en de geleidingen moeten zo worden afgedekt dat ze weinig of in het geheel niet in aanraking komen met het slijpsel in de slijpemulsie. De aanpassing van ingekochte machines wordt door Ceratec in eigen huis uitgevoerd. Daarbij wordt er ook voor gezorgd dat de slijpemulsie na filteren kan recirculeren.

Bijna alle slijpmachines zijn voorzien van CNC-besturing, met als extra voordeel dat de gegevens van het CAD/CAM-programma van de klant in veel gevallen rechtstreeks in de machinebesturing kunnen worden ingevoerd. Ceratec is verder in staat het ontwerp van de klant met een eindige-elementenprogramma door te rekenen, zodat er zekerheid ontstaat over de toelaatbaarheid van de trekspanning. CNC-besturing maakt het bovendien mogelijk bijzondere vlakken te slijpen, zoals asferen, torussen en niet-rotatiesymmetrische vrije vormen.

Schijnbaar onmogelijk

Ceratec is in staat met hoge precisie schroefdraad in keramiek te maken; zie Afbeelding 3a. Het gaat hier om onderdelen van ZrO_2 , gemaakt uit gesinterd stafmateriaal op een rondblijfbank. De vorm van de schroefdraad is afkomstig van een gedresseerde diamantslijpschijf. Ceratec kan ook met vingervormige diamantslijpstenen diepe gaten en sleuven in gesinterd keramiek te maken; Afbeelding 3b toont een onderdeel met diepe gaten en uitsparingen, Afbeelding 3c onderdelen met doorgaande sleuven en gaten voor een doseerunit van Al_2O_3 . Met vingervormige diamantslijpstenen in miniatuurformaat is het ook mogelijk uit gesinterd plaatmateriaal in korte tijd prototypes te maken, zoals gecompliceerde onderdelen van ZrO_2 (zie Afbeelding 3d).



Afbeelding 3. Voorbeelden van Ceratec's kunnen.

- (a) Onderdelen van ZrO_2 met schroefdraad gemaakt met een vormslijpschijf.
- (b) Een onderdeel van ZrO_2 met diepe gaten.
- (c) Onderdelen voor een doseerunit van Al_2O_3 , voorzien van doorgaande sleuven en gaten.
- (d) Gecompliceerde onderdelen van ZrO_2 gemaakt uit gesinterd plaatmateriaal met een slijpsteen van niet meer dan 1 mm doorsnede.

De lange bewerkingstijden van keramische producten hoeven niet per se te leiden tot lange levertijden, want een aantal CNC-machines kan 's nachts onbemand doorwerken.

Daarvoor wordt dikwijls gebruikgemaakt van speciale referentiegereedschappen waarop het werkstuk reproduceerbaar wordt opgespannen. Zo'n referentiegereedschap is voorzien van een aantal vlakken waarop de machine het slijpgereedschap nauwkeurig uitricht. Automatische slijpgereedschapwisseling completeert de toerusting voor onbemand bewerken. Het werkstuk verhuist compleet met referentiegereedschap naar de meetkamer, zie Afbeelding 4, voor de eindcontrole. Het gereedschap vereenvoudigt de nulpuntsbepaling door de meetmachine. Zowel de meetkamer als de werkplaats met slijpmachines zijn geklimatiseerd, de eerste met een tolerantie van ± 1 °C, de tweede met ± 2 °C.



Afbeelding 4. De meetkamer bij Ceratec.

Constructietips

Een bezwaar van keramiek is dat het slechts beperkt op trek kan worden belast. Maar door handig te construeren kunnen trekspanningen in een product worden vermeden of gereduceerd. Een fraai voorbeeld daarvan is het in Afbeelding 5 getoonde kogellager. Een stalen ring (RVS 316) die om een keramisch kogellager is geperst, brengt in de buitenste keramische loopring en de kogels drukspanningen teweeg, zodat bij belasting van het lager de trekspanningen toelaatbaar blijven. Ceratec heeft deze kogellagers met ringen van ZrO_2 en kogels van Si_3N_4 in diverse afmetingen op

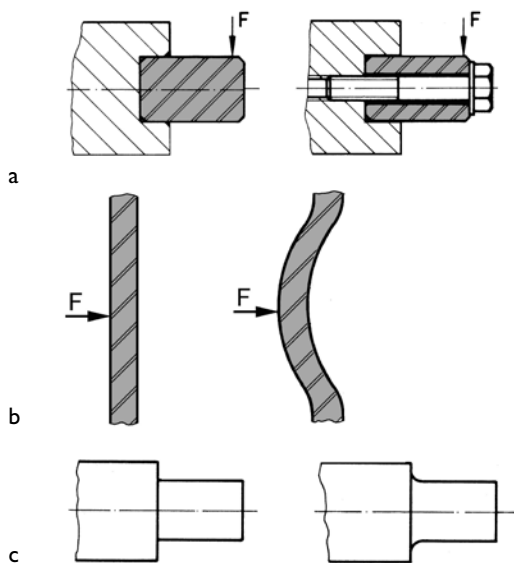


Afbeelding 5. Een kogellager met ringen van ZrO_2 en kogels van Si_3N_4 , voorgespannen door middel van een ring van RVS 316.

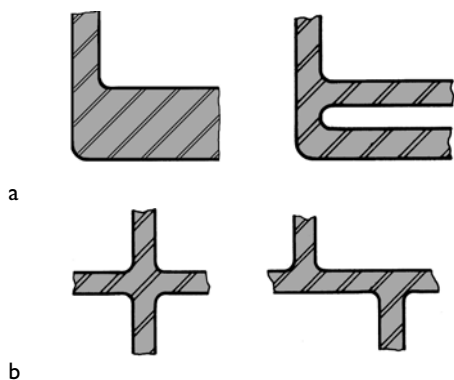
voorraad, vanaf een asdiameter van 30 mm tot en met 90 mm. De lagers werken zonder smering of worden door het medium gesmeerd. Bij niet te hoge toerentallen en belastingen kunnen ze ongesmeerd worden toegepast in vacuüm. Ook chemisch agressieve omgevingen zijn – eventueel in combinatie met hoge temperaturen – belangrijke toepassingsgebieden.

De tekening van Afbeelding 6a laat een ander voorbeeld zien van het onderdrukken van trekspanningen door voorspannen van het keramische onderdeel. In het voorbeeld van Afbeelding 6b zijn trekspanningen gereduceerd door een belaste wand gebold uit te voeren. En natuurlijk is het aanbrengen van afrondingen een probaat middel om spanningsconcentraties en kerfwerking te onderdrukken, zie Afbeelding 6c.

Afbeelding 7 laat zien hoe wisselende wanddikten en opeenhopingen van materiaal vermeden kunnen worden. Dat heeft te maken met de vorming van het groene product in persgereedschap en met de latere vervorming bij het sinteren. Daarbij behoren ook de van giettechniek en van kunststofvormgeving bekende aanbevelingen, zoals makkelijke lossing uit het gereedschap. Ten slotte een vanzelfsprekende constructieve raadgeving: zorg dat er aan het



Afbeelding 6. Diverse opties voor het onderdrukken van trekspanningen (telkens rechts weergegeven).
 (a) Het keramische onderdeel met een bout voorspannen.
 (b) Een belaste wand gebold uitvoeren.
 (c) Afrondingen introduceren, die tevens kerfwerking voorkomen.



Afbeelding 7. Te vermijden bij het construeren met keramiek (zoals links weergegeven; rechts de verbeterde vormgeving).
 (a) Veranderingen van wanddikte.
 (b) Opeenhopingen van materiaal.

gesinterde product zo weinig mogelijk nabewerkingen nodig zijn.

Geavanceerde toepassingen

Tot slot een paar geavanceerde – werkelijk probleemoplossende – toepassingen van keramiek. Afbeelding 8 toont een lagerconstructie voor een abrasieve omgeving met hoge temperatuur. Het gaat om een radiaal en axiaal werkend glijlager, dat bestaat uit nauwkeurig in elkaar passende loopvlakken van SiC. Het lager is ontworpen voor de toepassing in magneetgekoppelde pompen. Bij een magneetgekoppelde pomp ontbreekt een kwetsbare aafdichting omdat de rotor in vloeistof draait, terwijl de gewikkelde stator zich in lucht bevindt. Stator en rotor zijn van elkaar

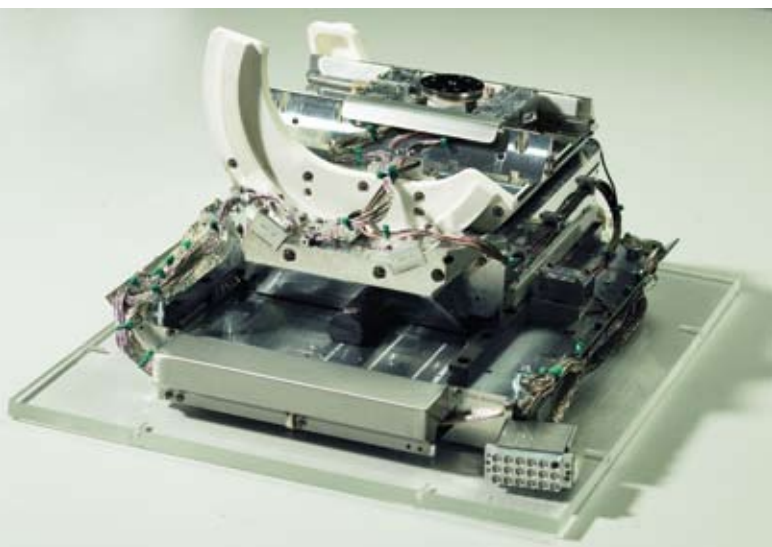


Afbeelding 8. Glijlagerconstructie met nauwkeurig in elkaar passende loopvlakken van SiC, bedoeld voor toepassing in magneetgekoppelde pompen.

gescheiden door een dunne metalen wand. Het lager draait in de te verpompen vloeistof, die tevens als smeermiddel fungeert. De vloeistof mag slijtende deeltjes bevatten en de temperatuur kan tot 500 °C bedragen. Ceratec vervaardigt niet alleen de keramische bussen maar ook de onderdelen van roestvast staal, hastelloy en zelfs titaan. De lager-samenstellingen worden in diverse maten – van 10 tot 225 mm asdiameter – geleverd aan de pompindustrie.

Voor een ander geavanceerd product, dat Frencken Mechatronics in Eindhoven maakt voor FEI Company, levert Ceratec enkele essentiële onderdelen van keramiek. Dat product is een vijfassige preparaattafel, zie Afbeelding 9, voor een scanning-elektronenmicroscop (SEM), die veel in de IC-industrie wordt toegepast. De preparaattafel werkt in hoogvacuüm, wat betekent dat er alleen niet-ontgassende materialen mogen worden gebruikt: metaal en keramiek. De materialen moeten ook antimagnetisch zijn, zodat de preparaattafel veel onderdelen van aluminium bevat. De grootste preparaattafel moet Si-plakken (wafers) van 300 mm diameter met een positioneer-nauwkeurigheid beter dan 1 µm reproduceerbaar kunnen verplaatsen.

Ceratec maakt onderdelen voor de kantelbeweging om een horizontale as en voor een slimme combinatie van rotatie om een verticale as en translatie in de richting van die as



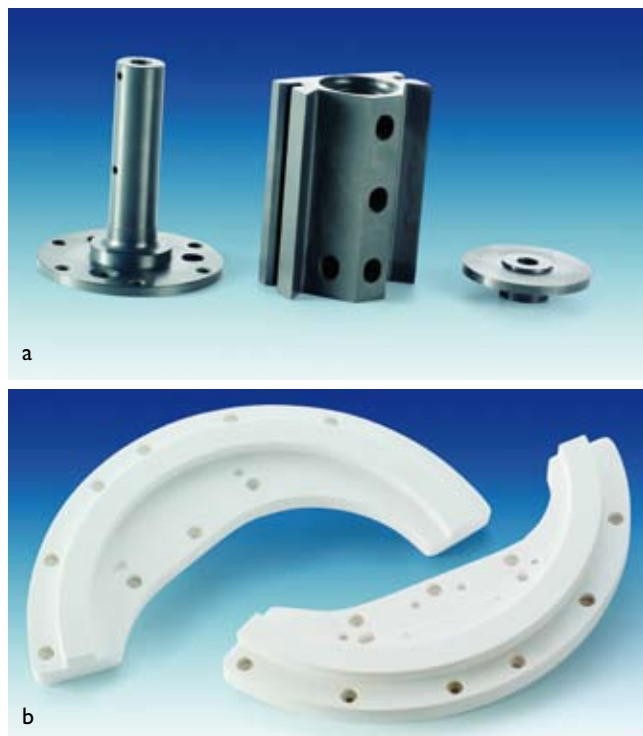
Afbeelding 9. Een vijfassige SEM-preparaattafel van FEI Company, met enkele essentiële onderdelen van keramiek.

(z-beweging). Keramiek biedt een oplossing voor het combineren van uitdagende eisen: goed vacuümgedrag, zeer stijf, heel licht en niet magnetiseerbaar.

De combinatie van rotatie en z-translatie integreert samen met kogels van siliciumnitride twee functies in drie onderdelen, zie Afbeelding 10a. Het middelste onderdeel is aan twee kanten voorzien van een V-groef voor de rechtgeleiding in de z-richting. De centrale boring heeft aan boven- en onderzijde loopgroeven voor kogels zonder kogelkooi. De links afgebeelde as en de rechts afgebeelde ring zijn eveneens voorzien van loopgroeven. Samen met de kogels ontstaat er zo een rotatielager dat constructief te vergelijken is met het bekende balhoofd van een fiets. Het materiaal van de drie onderdelen is eveneens siliciumnitride.

Afbeelding 10b toont twee schalen van de wiegconstructie voor de kantelbeweging. Over deze schalen met een lageradius van 108 mm rolt via keramische kogels de hierboven beschreven combinatie van rotatie en z-translatie en maakt zo een kantelbeweging. De schalen zijn vanwege de gunstige specifieke stijfheid (de verhouding E/ρ van elasticiteitsmodulus en soortelijke massa) vervaardigd van aluminiumoxide. Piëzomotoren die met ultrasone frequentie worden aangedreven, verzorgen de kantelbeweging door zich periodiek 'af te zetten' tegen de zijvlakken van de schalen.

Op de combinatie van rotatie en z-translatie (Afbeelding 10a) is een positioneermechanisme voor de x- en y-beweging gemonteerd. Het bijzondere van de zo ontstane vijfassige preparaattafel is dat de preparaatbeweging eucentrisch is. Dat wil zeggen dat als het snijpunt van de rotatieas en de kantelas eenmalig in de optische as is gebracht, dat snijpunt niet meer van plaats verandert als het preparaat in x-



Afbeelding 10. Keramiek in de preparaattafel van Afbeelding 9.
(a) Onderdelen van siliciumnitride voor de gecombineerde rotatie en z-translatie.
(b) Onderdelen van aluminiumoxide van een wiegconstructie voor de kantelbeweging.

of y-richting wordt bewogen. Met andere woorden: als de microscopist via de x,y-beweging diverse delen van het preparaat observeert, kan hij desgewenst het preparaat kantelen of roteren terwijl het observatiepunt op zijn plaats in het beeld blijft. Een eucentrische preparaattafel verhoogt het bedieningsgemak van een SEM dus aanzienlijk.

Denken in keramiek

Het voorgaande laat zien dat keramiek een eigenzinnig materiaal is met een aantal bijzondere eigenschappen, die per soort nogal uiteenlopen. Die speciale eigenschappen maken het mogelijk problemen op te lossen die bij de conventionele toepassing van metalen of kunststoffen heel hardnekkig kunnen zijn. Maar omdat het construeren in keramiek speciale expertise vereist, verdient het in de meeste gevallen aanbeveling te praten met deskundigen die 'kunnen denken in keramiek'. Dit artikel biedt daarvoor voldoende aanknopingspunten.

Auteursnoot

Frans Zuurveen is freelance tekstschrijver te Vlissingen.

Informatie

www.ceratec.nl