

Richtlijnen voor het slijpen van technisch keramiek

Eigenschappen, fabricage en toepassing van technische keramiek (3)

J.J. Saurwalt

Een van de meest toegepaste nabewerkingsmethoden voor technische keramiek is het slijpen met diamantschijven. In vergelijking met andere bewerkingsmethoden kan hiermee met een relatief hoge afnamesnelheid een goede eindkwaliteit behaald worden.

Thermische processen gaan meestal gepaard met hoge vermogensdichtheden waardoor ongewenste veranderingen van de oppervlaktekwaliteit door smelten, stollen, scheuren en fase-overgangen kunnen plaatsvinden.

Mechanisch bewerken met gedefinieerde snijkanten, zoals bij draaien en frezen, is moeilijk zo niet onmogelijk vanwege de hoge hardheid van keramische materialen.

Polijssten en leppen zijn vooral geschikt als nabewerkingstechniek vanwege de geringe afnamesnelheid.

In het algemeen kan gesteld worden dat de slijptechniek moeilijk vastgelegd kan worden vanwege het brede scala van beschikbare slijpmethoden enerzijds, zie figuur 1, en het grote aantal procesparameters anderzijds, zie figuur 2.

In de praktijk wordt het slijpproces parallel sterk beïnvloed door slijtage, verstopping, toenemende onrondheid en temperatuurstijging van de slijpschijf en de veelal niet constante kwaliteit van de te bewerken keramische materialen.

Een aantal van deze aspecten wordt nader toegelicht, waarbij tevens een aantal praktisch toepasbare richtlijnen wordt gegeven.

De invloed van de kwaliteit van het keramiek

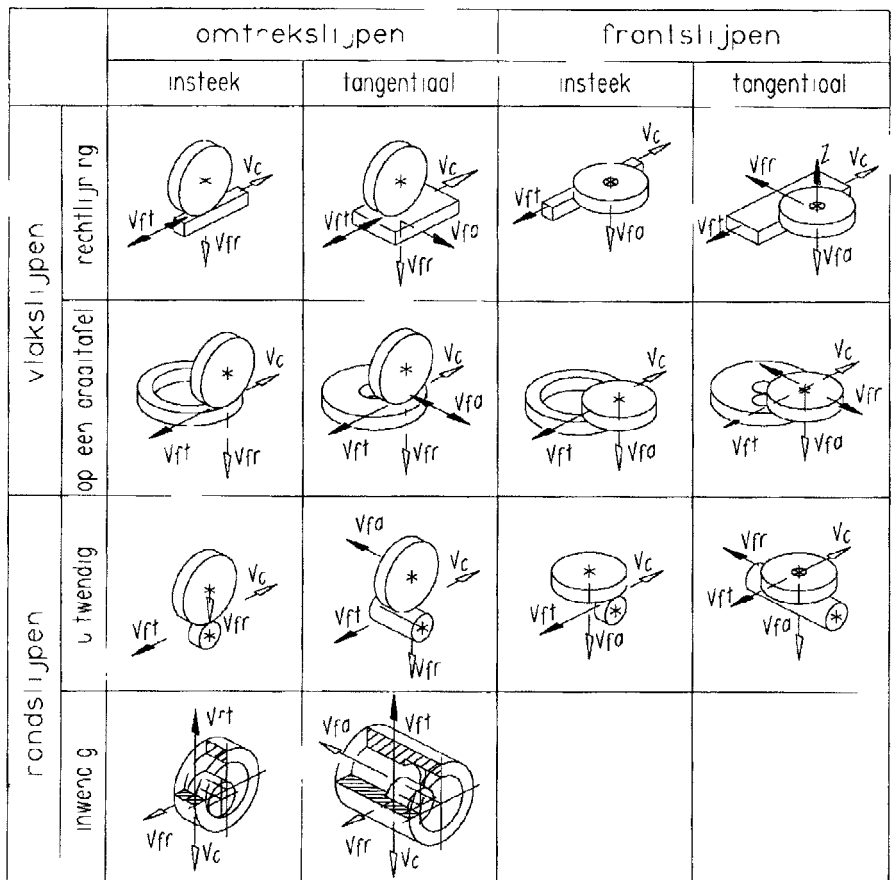
Alvorens een bewerking te starten dienen de eisen ten aanzien van de nauwkeurigheden en ruwheden te worden bekeken. Bij het slijpen van keramiek is het verstandig daarbij dan ook de

noodzakelijke oppervlakte-betrouwbaarheid en de microstructuur van het keramiek te betrekken. Het heeft bijvoorbeeld geen zin een contour met veel moeite uit te slijpen als de afwerking van een laser-gesneden product

al voldoet. Zo hoeft men bij een grof korrelig keramiek niet extra veel moeite te doen om beschadigingen (scheuren) te voorkomen, omdat enerzijds de korrelgrootte zelf al een defectstructuur voor het keramiek is, en

gemiddelde grootte van de slijpkorrel [μm]	richting	ruwheid R_a	
		NKA- Al_2O_3	Alsint 99,7
D126	langs	0,52	1,38
	dwars	0,77	1,09
D46	langs	0,21	0,49
	dwars	0,44	0,65

Tabel 1. R_a -ruwheden zijn afhankelijk van keramiekstructuur en slijpkorrel. Ze zijn bepaald met mechanische taster $r = 2,5 \mu\text{m}$, $LT = 4,80 \text{ mm}$, $\text{cut-off} = 0,80 \text{ mm}$.



Figuur 1. Illustratie van de indeling van de belangrijkste slijpbewerkingen. Hierin is v_c de snijsnelheid en v_{fr} , v_{ft} , v_{fa} de snelheid van de tafelvoeding in respectievelijk axiale, radiale, tangentiële richting.

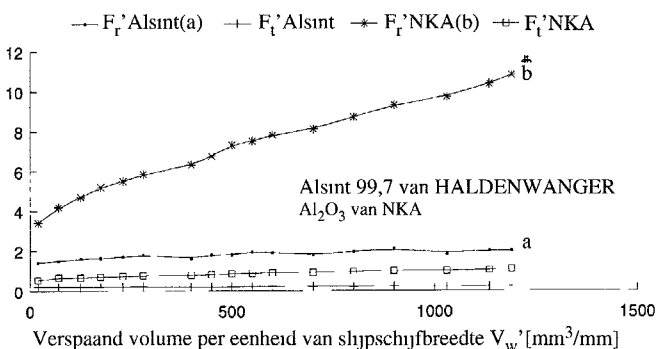
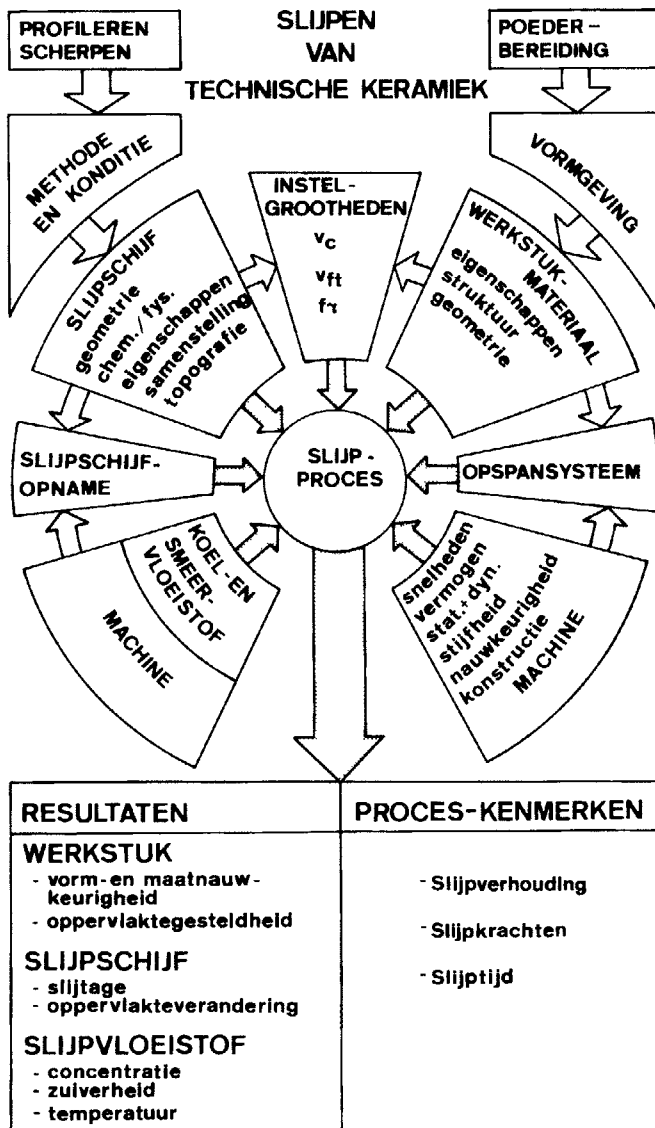
anderzijds het slijpen vooral op het uitbreken van korrels zal berusten wat niet snel in beschadigingen groter dan het korrelniveau zal resulteren. De korrelgrootte is ook direct van invloed op de ruwheid, zie tabel 1. Bij

grofkorrelig keramiek met een dichtheid van circa 96% is alleen een superglad oppervlak te verkrijgen door het dicht(ver)smeren van het oppervlak. Tijdens het bewerken blijkt direct al

de invloed van de verschillende kwaliteiten. De slijpkrachten die optreden bij het slijpen van *grof*korrelig aluminiumoxyde, zoals bijvoorbeeld de Al-sint-kwaliteit, liggen op hetzelfde niveau als die bij het slijpen van vensterglas. Vergeleken met *fijn*korrelig aluminiumoxyde krijgt men een heel ander verloop van de slijpkrachten als functie van het verspaande volume per eenheid slijpschijfbreedte, zie figuur 3. Daarnaast dient rekening gehouden te worden met de thermische geleidbaarheid van de verschillende soorten keramiek. De oxydische keramieken zijn in het algemeen isolatoren, terwijl nitriden en carbiden goede warmtegeleiders zijn.

Belangrijke mechanische eigenschappen, die een indicatie van de "slijpbaarheid" geven, zijn hardheid gecombineerd met de scheurweerstand (K_{IC}). Globaal gezien geeft de volgende reeks de bewerkbaarheid van moeilijk tot relatief gemakkelijk weer: composieten op basis van Al_2O_3 en ZrO_2 - heet geperst $Si_3N_4 - Si_3N_4$, ZrO_2 , Sialon - $SiC - Al_2O_3$.

Figuur 2.



Figuur 3. Pendelslijpen van twee kwaliteiten Al_2O_3 . Slijpschijf: 1A1, D126, C75, Bz387; $v_c = 30$ m/s, $v_{ff} = 10$ m/min, $f_r = 10$ μ m.

Slijpcondities en slijptechnieken

De soort slijpschijf en de slijpcondities staan direct in relatie met de gebruikte slijpmachine en het werkstukmateriaal. In principe wordt een compromis gezocht tussen totale slijpdruk, de slijpkracht (snededikte) per korrel, het trillingsniveau, de thermische belasting en de constantheid van het slijpproces.

Om keramiek zo min mogelijk te beschadigen zijn slijpcondities nodig met een kleine snededikte per slijpkorrel [1].

In principe kan dit worden gerealiseerd door:

- het gebruik van slijpschijven met een kleine korrelgrootte;
- het slijpen met een hoge slijpsnelheid;
- het kruipslijpen.

Het gebruik van een fijnere slijpkorrel bij dezelfde concentratie levert veel meer slijpkorrels op. Hierdoor ontstaat per korrel een kleinere snededikte, zie figuur 4 [2]. Een nadeel van fijnere slijpschijven is dat de toepasbare aanzet en daarmee de afnamesnelheid ook

Eigenschappen, fabricage en toepassing van technische keramiek (3)

sterk afneemt. Om dit te ondervangen deelt men het slijpen op in de stappen voorslijpen en naslijpen. Bij het naslijpen dient de beschadigde laag van het voorslijpen te worden verwijderd. Dit kan betekenen dat dan 50 tot 100 µm afgeslepen moet worden.

Het voorslijpen gebeurt in het algemeen met een korrelgrootte groter dan of gelijk aan 126 µm (codering D126) en het naslijpen met een korrelgrootte kleiner dan of gelijk aan 46 µm (codering D46). In de praktijk wordt dit uitgevoerd met een pendelslijpinstelling, waarbij per keer een laagdikte variërend van 0,5 tot 50 µm wordt afgeslepen.

De slijpkrachten per eenheid (1 mm) slijpschijfbreedte liggen met deze methode tussen 5 en 35 N/mm (in normaalrichting).

In principe zijn alle slijpschijven voor

deze methode geschikt. Vaak worden echter kunststofgebonden diamantschijven gebruikt met een vrij borste, van een nikkellaagje voorziene diamantkorrel. De reden hiervoor is dat de krachten per korrel bij pendelend voorslijpen hoger zijn dan bij kruipslijpen, op grond waarvan de korrels sterker in de binding verankerd moeten zijn.

Bij het verhogen van de omtreksnelheid van de slijpschijf worden meer korrels gebruikt om hetzelfde materiaalvolume te verwijderen. Per korrel neemt de snededikte hierdoor dus af.

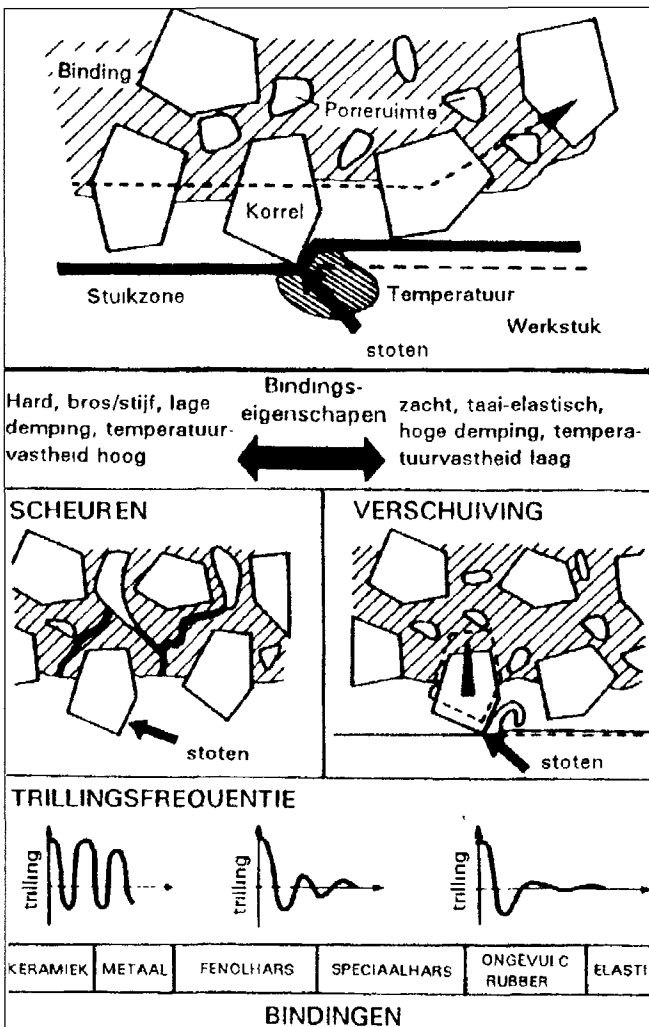
Het gebruik van hogere slijpsnelheden wordt in feite begrensd door thermische effecten, grafitiseren of sterk afronden van de diamantkorrels en het optreden van nadelige effecten aan het keramiek. Toch zijn voor het doorslijpen van wafers snijsnelheden van 70 m/s

niet ongebruikelijk. Een slijpmachine moet hiervoor wel geschikt zijn omdat bij conventionele slijpmachines boven ca. 35 à 40 m/s allerlei ongewenste trillingen optreden [3].

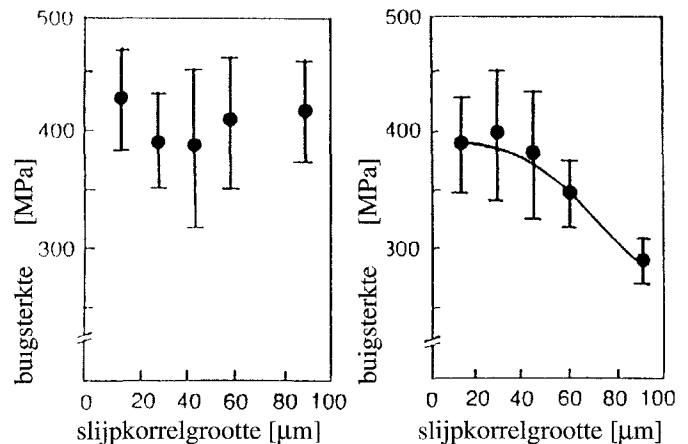
Kruipslijpen

Slijpen met een zeer grote snededikte gecombineerd met een langzame voeding van het werkstuk wordt kruipslijpen of diepslijpen genoemd. Hierbij ontstaat een groot contactvlak tussen schijf en werkstuk. Op korrelniveau wil dit zeggen dat erg veel slijpkorrels gelijktijdig in het slijpproces actief zijn. Hierdoor is de snededikte per korrel gering.

Het grote voordeel van kruipslijpen is dat de afnamesnelheid niet kleiner is dan bij het pendelend voorslijpen, en vaak zelfs hoger doordat geen tijd verloren gaat aan de loze pendelslag. Bij het kruipslijpen van keramiek liggen de praktisch bruikbare snededikten tussen 0,1 en 10 mm.



Figuur 5. Elastisch gedrag van bindstoffen



Figuur 4. Buigsterkte van aluminiumoxyde afhankelijk van de slijpkorrelgrootte bij loodrechte (links) en parallele slijprichting (rechts). Specificatie van het Al₂O₃: gemiddelde korrelgrootte 2-4 µm; maximum korrelgrootte 10 - 12 µm; dichtheid 3,83 g/cm³; zuiverheid 99,56%; sintertemperatuur 1610 - 1630 oC.

materiaal	hardheid HB (N/mm ²)	E-modulus (N/mm ²)	contact- stijfheid (N/µm)	contact- slapheid (µm/N)	demping
Sintermetaal					0,003
Al	↑	↑	↑	↓	0,010
Al-fenol					0,015
Fenol					0,060
PU-hard- schuim					0,090

Figuur 6. Eigenschappen van enige dragermaterialen voor slijpschijven.

Problemen bij het kruipslijpen

Een nadeel van deze techniek is dat de totale krachten ongeveer een 10 maal hoger niveau liggen als bij het pendelslijpen en daarna nog sterk toenemen. Deze hoge krachten veroorzaken grote slijpproblemen. Niet alleen buigt de slijpmachine uit, maar ontstaan ook vaak zelf-exciterende trillingen, waardoor een steeds sterkere on rondheid van de slijpschijf wordt opgebouwd. Bij een statische stijfheid van de slijpmachine van 30 N/ μ m, gecombineerd met een slijpkracht van 120 N/mm en een active snedebreedte van 5 mm, ontstaat een uitbuiging van de machine van 20 μ m. Deze maatafwijking is niet te corrigeren zonder na te pendelen en is zeer groot ten opzichte van de minimale verplaatsing van 0,5 μ m die moderne slijpmachines kunnen realiseren.

De trillingen vormen echter een groter probleem. Wanneer een slijpschijf door trillingen on rondheid opbouwt in de orde van micrometers, is dat meer dan de lokale snededikte per korrel. De gewenste geringe snededikte door het grote aantal actieve korrels treedt niet meer op en het proces wordt "frezen met één snijtand" wat tot ernstige beschadiging van het keramiek kan leiden [1].

Voor al het wel of niet optreden van deze trillingen (de dempingskarakteristiek) en de statische stijfheid zijn erg machinafhankelijk [3]. Uit eigen proefnemingen bleek een machine, volledig uitgevoerd met voorgespannen hydrostatische lageringen, tot nu toe het minst gevoelig voor de vorming van deze trillingen en bijbehorende on rondheid. Zelfs met niet gebalanceerde schijven bleken hiermee zeer goede slijpresultaten mogelijk.

Een tweede probleem bij kruipslijpen is de koeling en de afvoer van het verspaande materiaal. In het algemeen wordt daarom met niet te hoge slijpsnelheden gewerkt, veelal kleiner dan 35 m/s. Om trillingsproblemen te minimaliseren worden veelal kunststofgebonden slijpschijven gebruikt die in verhouding goede dempende eigenschappen hebben, zie figuur 5 [3]. Ook het dragermateriaal van de slijpschijf speelt hierbij een belangrijke rol, zie figuur 6 [3]. Omdat de dia-

mantkorrel slechts zeer on diep langs en door het materiaal slijpt, rondt deze zeer sterk af. Om deze reden wordt een brosse, ongecoate diamant gebruikt die makkelijk versplintert of uit de binding komt. Nadeel van de kunststofgebondenschijven is echter de slechte warmtegeleiding en de geringe ruimte voor verspaand materiaal en koelvloeistof. Het is mogelijk dat relatief poreuze keramisch gebonden slijpschijven hiervoor een betere oplossing kunnen bieden. Ook zouden bij zeer stijve slijpmachines met zeer goede dempende eigenschappen metaalgebonden slijpschijven aantrekkelijk kunnen zijn in verband met de slijtvastheid gecombineerd met de goede warmtegeleiding. De beide mogelijkheden worden nog nader onderzocht.

Slijprichting

De slijprichting, mee- of tegenlopend, kan het beste gekozen worden aan de hand van eigenschappen van het keramiek. Zirconoxyde – dit lijkt zich bij kruipslijpen min of meer als een metaal te gedragen omdat er daadwerkelijk sprake is van spaanvorming – kan het best tegenlopend geslepen worden, waarbij de korrel geleidelijk steeds dieper gaat snijden. Dan wordt niet het gros van het afgeslepen materiaal tussen schijf en werkstuk meegevoerd. Het meer brosse aluminiumoxyde kan het best meelopend geslepen worden. De korrel treedt dan met de volle snededikte in en heeft zodoende de grootste kans te versplinteren, waardoor zich weer nieuwe scherpe snijkanten vormen, terwijl het pulverachtige slijpsel minder problemen geeft.

De slijpschijf en voorbereiding

Uit voorgaande paragraaf bleek reeds dat de slijpschijf voor wat betreft binding, structuur, diamantsoort en concentratie afgestemd moet zijn op de soort en de kwaliteit van het te slijpen keramiek, de slijpmethode en de eigenschappen van de slijpmachine.

In de glasbewerking bestaat een sterke traditie om bronsgebonden slijp gereedschap te gebruiken. Voor het slijpen van technische keramiek is dit gereedschap minder geschikt. In een bronsbinding worden namelijk meest-

al regelmatige monokristallijne diamantkorrels gebruikt die sterk de neiging hebben tot afronden en daardoor hoge normaalkrachten opbouwen. Omdat in Nederland voornamelijk lichte slijpmachines gebruikt worden, leiden deze harde schijven tot opbouw van on rondheid en daardoor tot een stotende belasting op het keramiek. Dit effect wordt versterkt door het moeilijk profileerbaar zijn van deze harde binding, waardoor deze schijven niet snel op de machine te profileren zijn voor aanvang van de slijpbewerking.

In het algemeen zullen kunststofgebonden schijven, met polykristallijne diamantkorrels, zijnde een agglomeratie van kristallen, de voorkeur genieten. Voor algemeen gebruik geeft de uitvoering met vernikkelde diamanten de beste resultaten, terwijl bij kruipslijpen of bijzondere temperatuurkritische bewerkingen onbedekte diamanten de voorkeur genieten.

Voor de aanvang van het slijpen en vooral bij kruipslijpen is het van essentieel belang om de slijpschijf exact rond te maken, te scherpen en te balanceren. De bestaande traditie om met de hand met een scherpsteen te scherpen geeft veelal aanleiding tot on rondheid, omdat de scherpteconditie over de gehele omtrek van de slijpschijf on gelijkmatig kan worden. Het verdient de voorkeur om met behulp van een kruipslijpinstelling de slijpschijf te scherpen, of een automatische scherpesteentoevoer aan te brengen waarmee ook tijdens het slijpen scherpen mogelijk is. Voor het rondmaken van een slijpschijf is het "overslijpen" van zacht staal een aantrekkelijke methode omdat aan het slijpbeeld direct afgeschat kan worden of de schijf rond is. Zodra het "vlakjes" patroon verdwenen is, wat kenmerkend is voor on rondheid, is de schijf goed. De beste resultaten worden verkregen door een lage snijsnelheid te gebruiken (10 à 15 m/s) waardoor veel spaan ontstaat en hiermee pendelend (aanzet circa 30 μ m) met een continue dwarsvoeding een plaat te overslijpen.

Wanneer veel schijven per dag gewisseld worden of er zwaardere metaalgebonden schijven gebruikt worden, is een automatische balancering aan te bevelen.

Eigenschappen, fabricage en toepassing van technische keramiek (3)

Beheersing van het slijpproces

De grootste problematiek bij het slijpen wordt veroorzaakt door het feit dat het slijpen geen stationair proces is. Bij het slijpen van keramische materialen zijn vooral de continue oplopende slijpkrachten een probleem. Dit probleem kan gedeeltelijk ondervangen worden door een goede reiniging van de slijpschijf met een koelvloeistofstraal onder hoge druk tegen de draairichting in. Wanneer dit niet voldoende is kan met behulp van een continue scherpsteentoevoer gezorgd worden voor uitbreuk van afgesleten diamant. In figuur 7 [4] wordt dit gedemonstreerd. Zonder toevoer van de scherpsteen, $Q'_{sb}=0$, neemt de normaalkracht toe als functie van het verspaand volume. Bij $Q'_{sb}=0,2$ mm³/mm.s is de toename minder sterk, terwijl in alle gevallen door een tijdelijke verhoging van de scherpsteentoevoer de slijpkrachten weer afnemen. Bij serieproductie kan tevens de diamantschijf afgestemd worden op het slijpproces. Of met deze technieken de opbouw van trillingen bij kruipslijpen voldoende onderdrukt kan worden is nog onderwerp van nader onderzoek.

Filtratie van koelvloeistof

Een zeer belangrijk maar moeilijk te beheersen punt bij het slijpen is de koeling. In de eerste plaats kan het soort koelvloeistof het gedrag van het keramiek beïnvloeden. Ten tweede kan men zich afvragen of het hittebestendige keramiek wel gekoeld moet worden. Flittemperaturen ontstaan, mede door de geringe smerende werking van water, toch wel. De directe afkoeling van het materiaal door het water, na passage van de slijpkorrel, veroorzaakt wel een temperatuurschok waar verschillende keramische kwaliteiten slecht tegen kunnen. Principieel lijkt het om beide redenen dan ook beter om met olie te slijpen. Het materiaal gedraagt zich taaier en er ontstaan door de betere smering minder hoge flittemperaturen en het materiaal wordt daarna minder snel afgekoeld. Praktische bezwaren zoals gebruiksgemak, filtratie, brandgevaar en milieu-belasting zijn een belemmering voor

het gebruik van slijpolie.

In de praktijk is de filtratie van de koelvloeistof bij het slijpen van keramiek een probleem. Het grootste gedeelte van het keramiekslijpsel bevindt zich in de orde grootte van 1 – 10 µm, wat met een bandfilter niet verwijderd wordt. Het filteren vindt dan ook pas plaats als de deeltjes onderling zijn gaan agglomereren, waardoor ze alsnog uitgefilterd worden. De beste ervaring tot nu toe is bereikt met centrifugeren. Het belang van filtratie is zeer groot. Het is niet alleen het behoud van de hele slijpinstallatie, maar ook van het slijpproces, opdat de schijf niet nodeloos verstopt raakt met keramisch slijpsel.

Conclusies en opmerkingen

Concluderend kan gesteld worden dat voor het slijpen van keramische materialen de slijpcondities en het slijpschijftype afgestemd dienen te worden op de eigenschappen van het te bewerken materiaal en de te gebruiken slijpmachine.

Voor de opbouw van de hiervoor noodzakelijke kennis wordt bij het Energieonderzoek Centrum Nederland te Petten sinds 1986 onderzoek uitge-

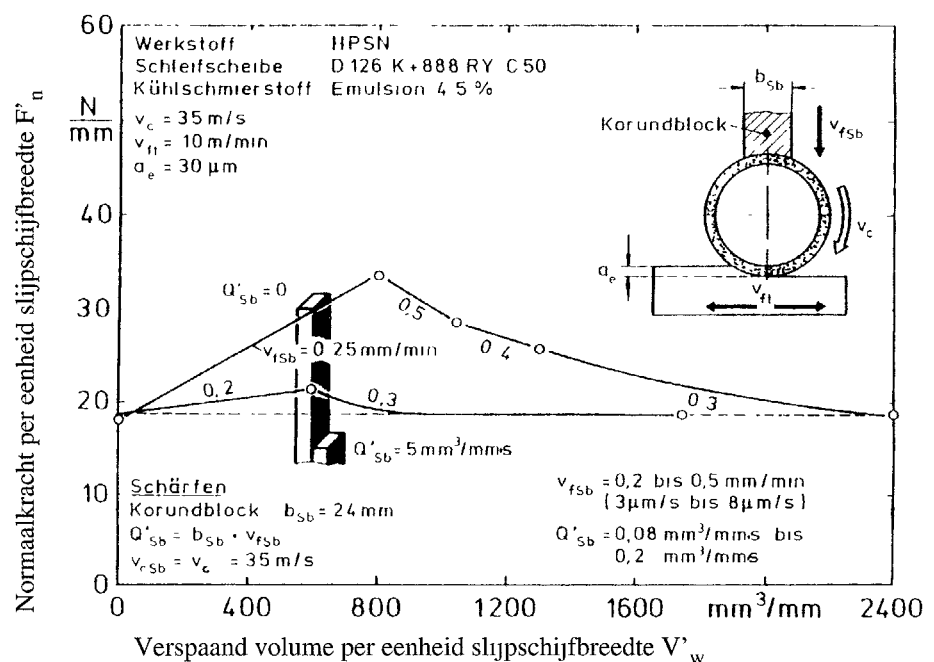
voerd op het gebied van het bewerken en met name het slijpen van technische keramiek. Dit onderzoek wordt gedeeltelijk in samenwerking met de TU Delft en met ondersteuning van het Innovatiegericht Onderzoekprogramma Technische Keramiek (IOP-TK) uitgevoerd.

Literatuur

- [1] Saurwalt, J.J., Kwaliteitsbeheersing bij het bewerken van keramische onderdelen voor structurele toepassingen, Klei Glas Keramiek 10(1991)
- [2] Matsuo, Y., Ogasawara, T., Kimura, S., Yasuda, E., Statistical analysis of the effect of surface grinding on the strength of alumina using Weibull's multi-modal function, Journal of Materials Science, No 22, 1987, p 1482-1488
- [3] Lutz, G., "Einfluss von Schwingungen beim Flachpendelschleifen", Schleifen und Trennen, 115(1991) p. 16, tijdschrift van TYRO-LYT
- [4] Tio, T.H., Neueste Erkenntnisse in der Bearbeitung von Keramiken durch Pendelplanschleifen. Vortrag anlässlich des Arbeitskreises "Keramikbearbeitung", Produktionstechnisches Zentrum Belin, Oktober 1988

Auteursnoot

Dr ir J.J. Saurwalt is verbonden aan het Nationaal Keramisch Atelier NKA, Service Unit Technologie van het Energieonderzoek Centrum Nederland



Figuur 7. Invloed van de scherpsteentoevoer op het verloop van de normaalkracht als functie van het verspaand volume per eenheid slijpschijfbreedte. Q'_{sb} is de afnamesnelheid van de scherpsteen per eenheid slijpschijfbreedte.