

## WAT GEBEURT ER BIJ SLIJPEN VAN GLAS EN KERAMIEK?

A. Broese van Groenou  
Philips' Natuurkundig Laboratorium

### Samenvatting

Slijpen, met vaste korrels, en leppen, met losse korrels, zijn processen die zich in een waternevel afspelen en weinig toegankelijk lijken op een werkplaatsmachine.

Toch is het mogelijk enige systematiek in dit bewerken te brengen, door onder reproduceerbare omstandigheden te meten. Men vindt dan een verband tussen de materiaalafname, de krachtcomponenten en de snelheid van het slijpwiel.

Een grootheid die dit verband karakteriseert, is de specifieke energie,  $e - J/mm^3$ .

Het microscopische model voor slijpen en leppen is de eenpunts kras. Met een goed gedefinieerde diamantpyramide bepaalt men de relatie tussen de vorm van de punt en de kracht nodig voor vorming van een groef. Ook hier kan men de specifieke energie bepalen en voor vergelijking met het slijpexperiment gebruiken. De beschadiging van het oppervlak kan men in verband brengen met de Vickers hardheid en de scheurfactor.

Tevens geeft dit krassen een inzicht in de zwakke plekken van het materiaal.

### 1. Inleiding

Er zijn maar weinig producten die na een bereiding op hoge temperatuur ineens de goede vorm en de juiste afmetingen hebben. Nabewerking moet dan het gewenste oppervlak leveren.

De mechanische bewerking omvat vaak meerdere stappen, waarbij eerst, vrij snel, door slijpen de grove correcties op de vorm aangebracht worden; daarna, veel langzamer, door leppen en polijsten de kwaliteit van het oppervlak verbeterd wordt.

Analyse van deze processen is weinig aantrekkelijk aangezien zij zich afspelen op luidruchtige en weinig toegankelijke werkplaatsmachines. De essentiële onderdelen, zoals het slijpwiel, de slijpkorrels en het werkstuk zijn slecht waar te nemen tijdens het proces omdat zij in een waternevel gehuld zijn.

De noodzaak van een goede vormgeving en de vrij hoge kosten van deze bewerking dragen er echter toe bij om over deze drempels heen te stappen en een analyse van het bewerken te geven.

In de volgende paragraaf zullen we aangeven hoe het slijpsysteem systematisch benaderd kan worden en welke experimenten nodig zijn om tenslotte te komen tot een model, gebaseerd op niet al te moeilijk toegankelijke kerngetallen.

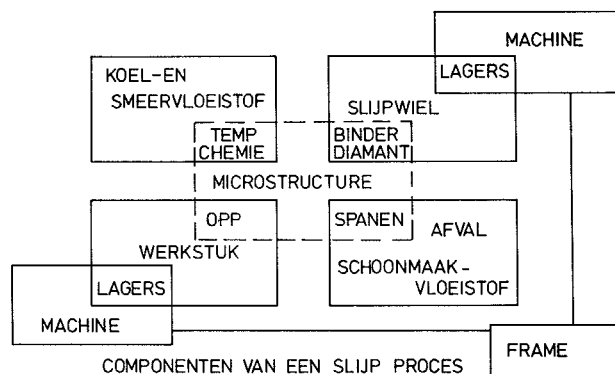
Chemische aspecten, zoals die bij polijsten optreden, blijven buiten beschouwing.

Een voorbeeld, het leppen met losse korrels, zal in paragraaf 3 illustreren welke grootheden met de 'lepbaarheid' van een materiaal samenhangen.

Het lepproces heeft veel last van slecht reproduceerbare omstandigheden, meer dan het slijpen, waar men slijpkorrels gebruikt die vast in een binder verankerd zijn. Dit vereenvoudigt de beschrijving, de materiaalafname wordt voorspelbaar – paragraaf 4 – en de slijpkrachten kunnen in verband worden gebracht met machine- en materiaalgrootheden.

Om meer inzicht in het materiaalgedrag te krijgen maakt men gebruik van krasproeven met slechts één slijpkorrel van bekende vorm – paragraaf 5 –.

Wil men de krasresultaten toepassen in een model van het slijpen en leppen, dan wordt gedetailleerde informatie over de slijpkorrels nodig – paragraaf 6 –. Vòòrdat een economische



Figuur 1. Blokschema van de onderdelen van een slijpsysteem. In het gestippelde centrum vindt op microscopische schaal het slijpen plaats.

analyse mogelijk is, zou men ook nog de slijtage van deze korrels moeten kennen, bovendien zou men willen weten hoe verschillende bewerkingsstappen op elkaar aangepast moeten worden.

In het volgende zullen wij ons moeten beperken tot een overzicht van de huidige opvattingen over mechanisch bewerken.

Daarbij worden resultaten gebruikt van het eigen onderzoek uitgevoerd in het Natuurkundig Laboratorium van de N.V. Philips, waarbij vooral gezocht is naar de materiaaleigenschappen die van belang zijn voor het bewerken.

De harde brosse materialen zoals magnetische keramische materialen en allerlei glazen blijken dan een aantal eigenschappen gemeenschappelijk te hebben

### 2. Bewerksystematiek

Wat maakt de analyse van het slijp- en lepproces zo gecompliceerd? Er zijn twee oorzaken.

Ten eerste zijn er een zevental componenten bij betrokken – Figuur 1 –, die, ten tweede, contact met elkaar maken, op een microscopische schaal. Wat zich afspeelt in het centrum van figuur 1 is dus niet te volgen met het blote oog, waardoor de hulpmiddelen van de klassieke werkplaats ons niet verder brengen. Een korte opsomming van wat de microscoop hierbij waarneemt:

- de slijpkorrels, toch al klein, steken een fractie van hun grootte boven de binder uit;
- de toppen van de slijpkorrels dringen het werkstuk binnen en nemen materiaal weg;
- het weggenomen materiaal schuurt over de binder;
- de slijpkorrels slijten, breken af of breken uit;
- de binder vervormt zelf ook
- dunne slijpschrijven, bijv. zagen, buigen uit.

Omdat deze gebeurtenissen zich op een micronschaal afspelen, zijn ook de vervormingen van de machines en van het frame van belang.

Het schema in figuur 1 toont een gesloten lus, zodat ook trillingen een rol spelen!

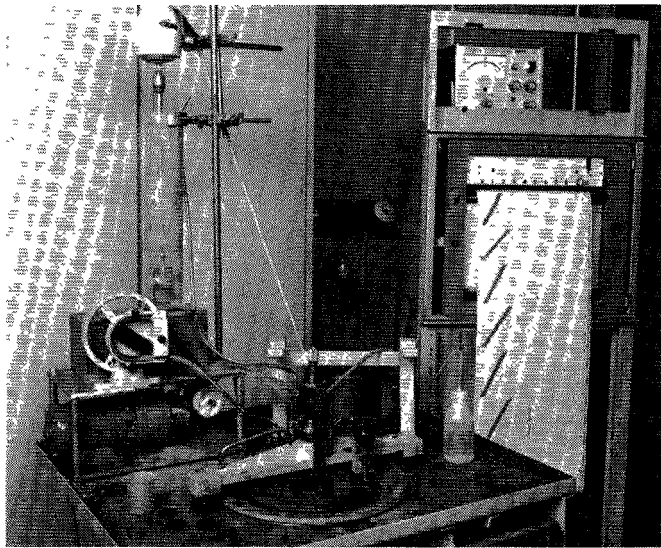


Foto 1. Laboratoriumopstelling voor het meten van de materiaalafname bij leppen. Op de voorgrond de bovenste stilstaande gietijzeren leppan. De slurrytoevoer (carborundum en water) is links achter. De verticale verplaatsing wordt op de recorder (rechts) geschreven, waar het effect van verschillende gewichten te zien is.

Hoewel de slijtage in volume van een diamant slijpwiël ca.  $10^{-4}$  maal de volumeafname van het werkstuk is, kan dit toch tot onreproduceerbare situaties leiden.

Het bovenstaande geeft een idee van de vervormingen die in een slijpsysteem optreden, wanneer de onderdelen in contact zijn en dus krachten op elkaar uitoefenen.

Hieruit volgt een meetprogramma voor slijp- en leponderzoek: 1e, het registreren van de werkstuk- en slijpkorrelafname en de optredende krachten en,

2e, het microscopisch waarnemen van de optredende materiaalvervorming.

### 3. Leppen

Bij het leppen wordt materiaal afgenomen door het werkstuk te bewegen over een laag losse korrels op een vlakke plaat. De plaat kan van gietijzer zijn of van pek; het plaatmateriaal is in het algemeen zachter dan het werkstuk, dat weer zachter is dan de lepkorrels.

Op een tweezijdige lepmachine zijn in ons laboratorium proeven gedaan aan een groot aantal keramische materialen – Foto 1 –. Voor een gegeven aandrukkraft werd de afnamesnelheid gemeten, wat alleen betrouwbaar kon gebeuren indien de omstandigheden zo goed mogelijk constant bleven; zowel de lepplaat als de slijpkorreltoevoer, hier carborundum in water, mogen niet veranderen. Voor een gegeven korrelgrootte is de hoogte-afname redelijk lineair met de normaalkraft en neemt toe met de rotatiesnelheid.

Definieert men de leppbaarheid,  $L$ , als:

$$L = Z/F_n v_s$$

met  $Z$  de volumevermindering per tijdseenheid,  $F_n$  de normale kracht en  $v_s$  de omtreksnelheid,

dan blijkt  $L$  omgekeerd evenredig met de Vickers-hardheid,  $H_v$ , te zijn – Figuur 2 – [1]. Een redelijke correlatie wordt gevonden, ondanks vrij wat spreiding.

Om snel te kunnen leppen – hoge  $Z$  –, is de conclusie, moet men een hoge kracht en een hoge omtreksnelheid gebruiken of een materiaal kiezen met een lage hardheid en bijvoorbeeld met een hoge porositeit en grote korrels [2].

Gezien de spreiding, is de Vickers-hardheid niet de enige parameter; ook het deels rollen, deels vastzitten van de slijpkorrels in de lepplaat, het versplinteren van de korrels en de eigenschappen van het werkstuk kunnen een rol spelen.

Wil men een antwoord op de vraag, wat er precies gebeurt bij bewerken van keramiek, dan is een eenvoudiger situatie gewenst dan men bij het leppen ontmoet.

### 4. Slijpen

De korrels op een slijpwiël worden onbeweeglijk vastgehouden door een binder, die, bij keramiek en glas slijpen, vaak een metaalbinder is, bijvoorbeeld brons of nikkel.

De materiaalafname voor een vakslijpbank is eenvoudig te berekenen.

Kent men de snediediepte,  $a$ , de voedingssnelheid,  $v_w$ , en de breedte,  $b$ , van de zone waar wiel en werkstuk contact maken – Figuur 3 –, dan is de volume-afname  $Z$ , gegeven door:

$$Z = a \cdot b \cdot v_w \quad - \text{mm}^3/\text{sec} - \quad (1)$$

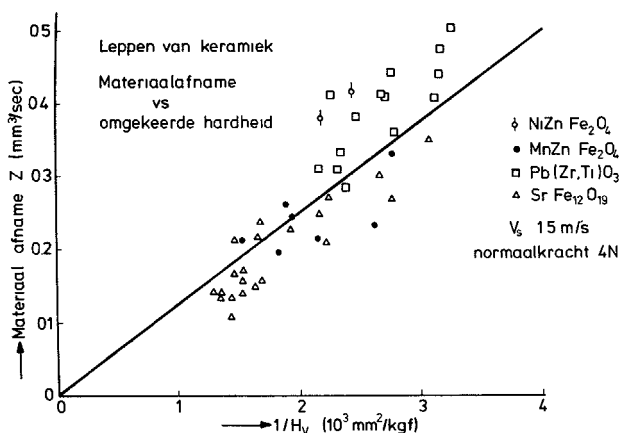
Weet men hoeveel vermogen,  $W$ , er bij het slijpen nodig is, dan kent men de energie die nodig is voor het verwijderen van een volume-eenheid materiaal, de specifieke energie  $e = J/\text{mm}^3$  – en geldt:

$$e = W/Z \quad (2)$$

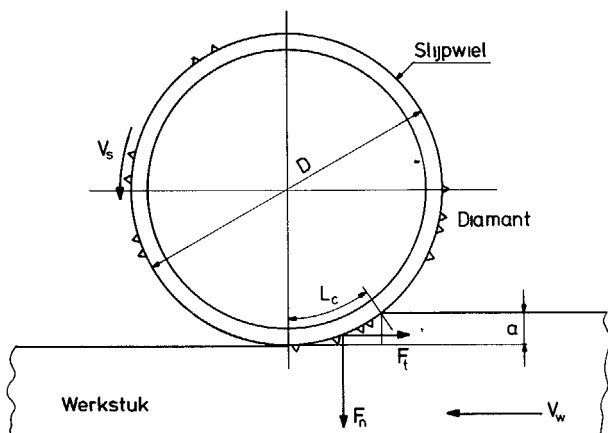
een van de kengetallen van het slijpproces.

Om een beter idee te krijgen waarmee de specifieke energie samenhangt, moeten wij meer in detail kijken naar het slijpwiël. De slijpkorrels, meestal diamanten, bewegen met de omtreksnelheid,  $v_s$ . Bij het vervormen en verwijderen van een dunne laag van het oppervlak oefenen de diamanten een kracht uit.

Men ontbindt deze kracht in een normale component,  $F_n$ , en een tangentiële component,  $F_t$  – zie figuur 3 –.



Figuur 2. Lepresultaten voor een aantal keramische materialen. De snelheid van afname, voor gegeven draaisnelheid en normaalkraft, is uitgezet tegen het omgekeerde van de hardheid.



Figuur 3. Schema van het contact tussen slijpwiël en werkstuk. Omtreksnelheid van de diamanten is  $v_s$ , aanzet  $a$ , voeding  $v_w$  en contactlengte  $l_c = (aD)^{1/2}$ . De componenten van de gemeten slijpkracht zijn  $F_n$  en  $F_t$ .

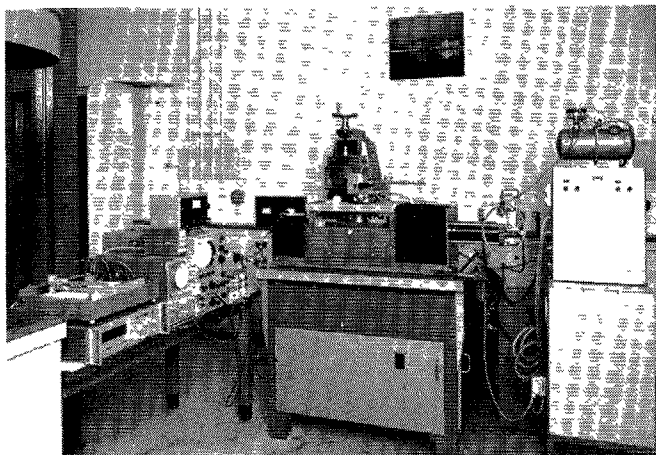


Foto 2. Laboratoriumopstelling voor slijponderzoek bij hoge snelheden. In het midden de vlakslijpbank met h.f.-motor en olie-gelagerde werkstukslade. Links de electronica en taperecorder, rechts de olieregeling met daarop het water van de mistkoeling.

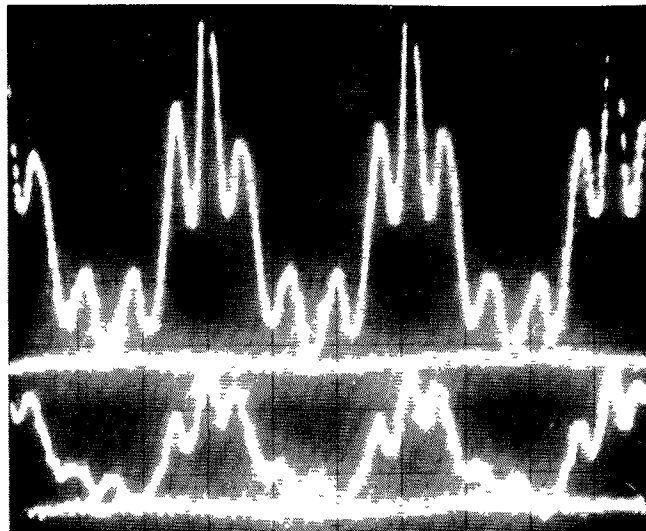


Foto 3. Krachtpulsen gedurende twee onwentelingen van het slijpwiel.  $F_n$  (boven) en  $F_t$  (onder) gedurende passage (20N/div gevoeligheid); tijd tussen pieken is 3ms (motorfrequentie 330 Hz,  $v_s = 58$  m/s) voeding  $v_w = 60$  mm/s, aanzet  $a = 700$   $\mu$ m,  $h_{eq} = 0.75$   $\mu$ m.

Het slijpvermogen geleverd door  $F_t$  zodat geldt:

$$W = F_t v_s \quad (3)$$

Men kan (1), (2) en (3) combineren, zodat:

$$F_t = W/v_s = eZ/v_s = eb(av_w/v_s) = ebh_{eq} \quad (4)$$

waar een grootheid  $h_{eq} = e_q$  staat voor equivalent - geïntroduceerd is door:

$$Z = bv_s h_{eq} \text{ en:} \quad (5)$$

$$h_{eq} = av_w/v_s \quad (6)$$

$h_{eq}$  is dus een praktische grootheid die opgebouwd is uit snedediepte, voedingssnelheid en wielsnelheid.

Op een andere fysische betekenis van de grootheid  $h_{eq}$  wordt later nader ingegaan.

Vergelijking (4) laat zien dat de slijpkracht,  $F_t$ , uit drie factoren opgebouwd is:

$b$ , de breedte van de contactzone in Figuur 3; de materiaalgrootheid  $e$  - de specifieke energie - en de combinatie van machine-instelling en  $h_{eq}$ .

Vergelijking (6) geldt voor een vlakslijpbank, voor andere opstellingen is (5) bruikbaar.

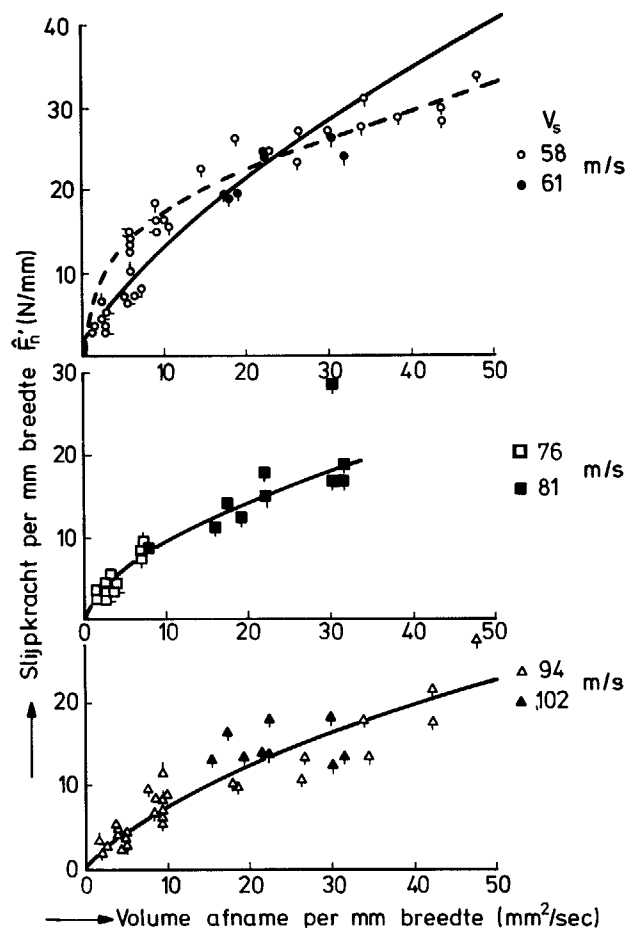
Tot zover de formele beschrijving van de horizontale krachtcomponent. De vraag is, voldoet  $F_t$  inderdaad aan relatie (4).

Op ons laboratorium zijn slijpproeven gedaan bij  $v_s$ -waarden tussen 60 en 100 m/sec.

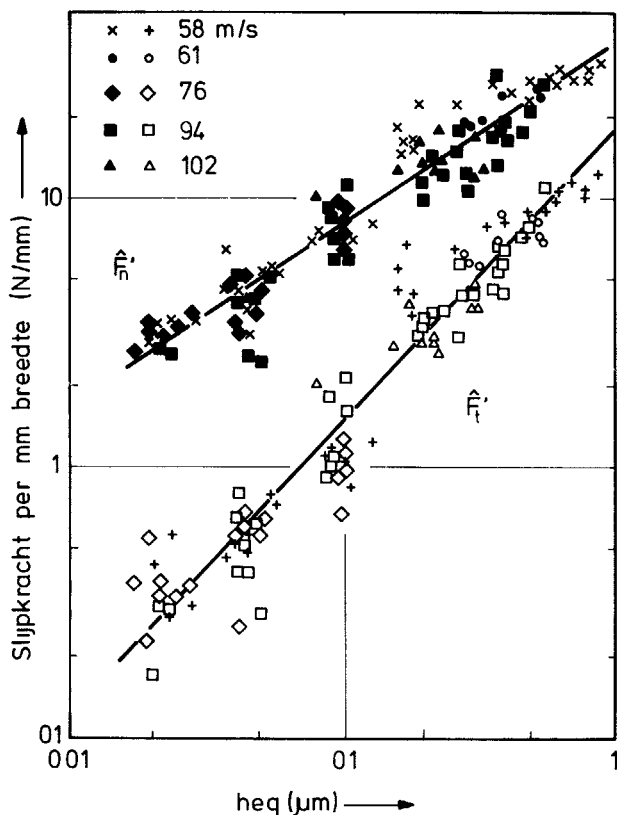
Een aantal keramische materialen en glazen zijn onderzocht op een vlakslijpmachine - Foto 2 -. Bij het meten van de slijpkrachten bleek dat beide krachtcomponenten,  $F_t$  en  $F_n$ , gepulst zijn - Foto 3 -.

Ook in andere opstellingen hebben wij geconstateerd dat een slijpwiel wel rond lijkt, maar niet rond is op de schaal waarop het slijpen plaats vindt; een variatie van 1/1000 van de straal over een hoek van 20° geeft al voldoende modulatie van de voedingssnelheid om het contact te verbreken!

Gebruiken we de topwaarde van de krachtpulsen, dan vindt men dat de relatie tussen  $F_n$  en  $Z$  nog afhangt van de wielsnelheid,  $v_s$  - Figuur 4 -. Wegens de evenredigheid tussen de kracht en de breedte,  $b$ , is het gebruikelijk om de kracht op te geven per eenheid van breedte van het contactvlak.



Figuur 4. Hoge-snelheidslijpen van een magneetmateriaal. De slijpkracht is uitgezet tegen de afnamesnelheid  $Z$ , beide gedeeld door de breedte van de contactzone. (De getrokken lijnen zijn aangepast aan  $y = Ax^n$ , de gestippelde lijn geldt alleen de hogere  $Z$  waarden).



Figuur 5. Slijpkrachtcomponenten uitgezet tegen  $h_{eq} = Z/bv_s$  (punten van Fig. 4).



Foto 4. Kraspatroon gemaakt door het inlopen van het slijpwielt op de opstelling van foto 2.  $v_s = 90 \text{ m/s}$ ; materiaal: MnZn ferriet.

Gebruikt men in plaats van  $Z$  echter  $h_{eq}$ , die met  $Z$  samenhangt volgens vergelijking (5), dan is er geen systematisch verschil meer tussen de verschillende  $v_s$ -waarden – Figuur 5 – [3]. Dit resultaat betekent volgens (4) dat de specifieke energie  $e$  geen sterke functie van  $v_s$  is.

Het verband tussen kracht en  $h_{eq}$  hebben wij voor een aantal glazen en keramische materialen gevonden. Voor enkele laag-smeltende glazen treden echter afwijkingen op bij hoge wielsnelheid: zodra de warmteontwikkeling van belang wordt, zijn snedediepte,  $a$ , en voeding,  $v_w$ , niet meer gelijkwaardig [4-5] en verliest  $h_{eq} \propto v_w$  zijn zin.

Uit de helling van de  $F_t$ - $h_{eq}$  kromme in figuur 5, die ongelijk één is, volgt dat de specifieke energie nog afhangt van  $h_{eq}$ , of van  $F_t$ , of  $F_n$ , maar op dit zogeheten 'size-effect' gaan wij hier niet verder in.

Het verband tussen  $F_n$  en  $h_{eq}$  kan men analoog aan vergelijking (4) schrijven door het invoeren van de slijphardheid,  $H_g$ :

$$F_n = H_g b h_{eq} \tag{7}$$

ook  $H_g$  varieert met  $h_{eq}$  – Figuur 5 –.

Met (4), (5) en (7) vindt men een verband tussen de volume afname snelheid  $Z$  en de krachtcomponenten:

$$Z = F_n v_s / H_g \text{ en ook:} \tag{8}$$

$$Z = F_t v_s / e,$$

waar de verhouding van  $e$  en  $H_g$  gelijk aan de krachtverhouding  $f$  is.

Uit deze formules begrijpt men waarom er een sterke tendens is naar slijpen met hoge omtreksnelheid: bij gelijke  $Z$  kan men kleinere krachten gebruiken, met hopelijk lagere wielslijtage en geringere materiaalbeschadiging.

Dat vereist echter machines en slijpwieken die zonder bijverschijnselen dergelijke snelheden aankunnen.

De vermelde experimenten tonen aan dat de machinegrootheid  $h_{eq}$  een nuttige parameter is. Voor het slijpen van metaal wordt dit al jaren vanuit de Leuvense Universiteit aanbevolen [6, 7]. Wat betekent de grootheid  $h_{eq}$  eigenlijk?

Uit vergelijking (5) ziet men dat  $h_{eq}$  de gemiddelde dikte is van de laag slijpsel die continu over het bewegende wieloppervlak uitgespreid wordt. Men noemt  $h_{eq}$  daarom de continue spaandikte.

Zou het slijpsel blijven liggen op het wiel, dan vult het de ruimte tussen de diamanten op met een laagdikte  $h_{eq}$  per omwenteling van het slijpwielt. Voor fijnslijpen is  $h_{eq}$  ongeveer  $0.01 \mu\text{m}$ , zodat er vele lagen op een wiel kunnen zonder schoonmaken; voor grofslijpen is een typische waarde  $1 \mu\text{m}$ , zodat schoonspuiten hard nodig is. Het is duidelijk dat de uitsteekhoogte van de diamant hierbij een wezenlijke rol speelt.

Hoeveel van de diamanthoogte gebruikt wordt hangt af van het aantal 'actieve' deeltjes in de contactzone,  $N_d$ .

Maken deze elk een groef met doorsnede  $A_d$ , dan is de totale materiaalfname:

$$Z = N_d A_d v_s \tag{9}$$

Is de vorm van de deeltjes pyramidaal en is de groef dus driehoekig van doorsnede, met breedte  $b_d$  en diepte  $d$ , dan is  $A_d = \frac{1}{2} b_d d = d^2 \tan \theta$ , waar  $2\theta$  de tophoek van de pyramide is. Met (5) en (9) kan  $d$  uitgedrukt worden [8] in  $N_d/b$  en  $h_{eq}$  en geldt:

$$d = [b \cotg \theta / N_d]^{1/2} h_{eq}^{1/2} \tag{10}$$

Doen slechts weinig diamanten mee, dan is de groefdiepte  $d$  veel groter dan  $h_{eq}$ !

De uitsteekhoogte en dus het aantal slijpende deeltjes, en dus ook  $d$ , variëren over het wieloppervlak. Dit is duidelijk te zien in een experiment waar een iets hellend gezet werkstuk éénmaal afzonderlijke diamanten – Foto 4 – op willekeurige plaatsen beginnen.

Tevens geeft dit experiment informatie over de soort materiaalvervorming. Onder de microscoop blijken er eerst ondiepe, gave groeven gevormd te worden, die bij grotere diepte uitbrokkelen. Bij weer grotere diepte werken de schollen van naburige groeven samen.

Deze beelden suggereren dat tenminste een deel van het slijpen bestudeerd kan worden door de krassende werking van één slijpdeeltje te onderzoeken.

### 5. Krassen

Het maken van een kras is een simpele, eeuwenoude proef.

In ons laboratorium geschiedt deze als volgt: het werkstuk, nu een gepolijst preparaat, beweegt onder een diamant door – Figuur 6 –.

De diamant heeft een pyramidale vorm met een zorgvuldig geslepen, scherpe punt – straal kleiner dan 0,5 micron –. De belasting op de diamant is door de balans goed instelbaar –  $F_n$  tussen 0,05 en 5 N –. De tangentiale kracht op de diamant wordt gemeten m.b.v. rekstrookjes en met een microscoop neemt men verschijnselen bij de punt waar. De krasselnelheid is variabel tussen 0,4 en 400  $\mu\text{m}/\text{sec}$ .

Met deze krasproef zijn een groot aantal kwantitatieve gegevens verkregen [9, 10]. Typische krassen, gemaakt bij verschillende belasting ziet men in de foto's 5.

Bij lage  $F_n$  is er een keurige groef, evenals bij het inlopen van het slijpwielt – Foto 4 –. De groef is mooi glad. Bij hogere belasting treden scheuren en schollen op.

Bekijken we eerst de groefvorming.

De krachtmeting levert waarden voor de verhouding  $f = F_t/F_n$ , die, zoals uit een beschouwing van de krachten op het contactvlak volgt – Figuur 7 –, samenhangt met de tophoek van de pyramide,  $\theta$ , en de wrijving op het contactvlak. Uit de gemeten  $f$  waarde –  $= \text{tg}\beta$  in figuur 7 – volgt dat de resultante van  $F_t$  en  $F_n$  vrijwel loodrecht op het contactvlak tussen pyramide en werkstuk slaat, d.w.z.  $f \sim \cot \theta$ , terwijl de wrijving op het contactvlak –  $\text{tg}\alpha$  – veel kleiner is. \*

De invloed van de vorm van de diamant op de krachtverhouding  $f$  is voor een groot aantal keramische en metallische materialen gevonden: scherpe punten geven een hoge  $f$ , botte zoals een bol of een afgesleten pyramide geven een lage  $f$ .

De waarde voor een bol, bijv. ca. 0,1, kan men dan als de echte Coulomb wrijving beschouwen. Dit type groefvorming noemt men 'ploegen'.

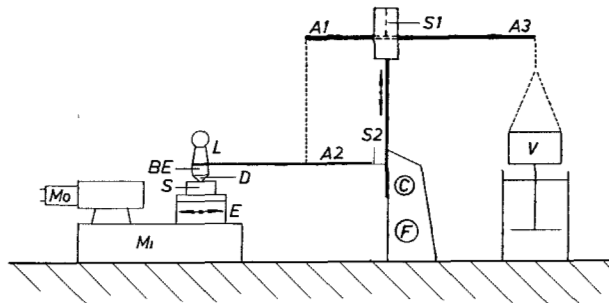
De druk op het contactvlak kan men in het ploegmodel berekenen uit de specifieke energie,  $e$ , of uit de krashardheid,  $H_s$ , die volgen uit resp.  $F_t$  en  $F_n$ , en de afmetingen van de groef –  $b_s$  = breedte,  $d$  = diepte –:

$$e = F_t/A_t = 2F_t/b_s d, \tag{11}$$

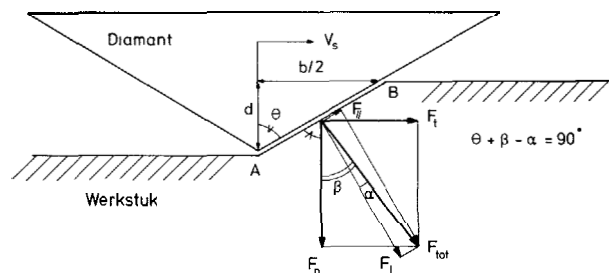
waarin  $A_t = \frac{1}{2}b_s d$  de doorsnede van de groef is.

$$H_s = F_n/A_n = 4F_n/b_s^2, \tag{12}$$

waar  $A_n$  de projectie van het contactvlak op het oppervlak is. Uit de gemeten breedte en diepte krijgt men hiermee de waarde van de specifieke energie die behoort bij de groefvorming.



Figuur 6. Schematische tekening van het krasapparaat.  $S$  = preparaat,  $D$  = diamant,  $Mo$  = motor,  $M_i$  en  $E$  zijn overbrengingen,  $BE$  = buigelement met rekstrookjes,  $L$  = belasting  $F_n$ ;  $A_1$ ,  $A_2$  en  $A_3$ , zijn armen van de balans,  $S_1$  en  $S_2$  zijn veren;  $C$  en  $F$  hoogte-instelling. Het geheel staat op een voor trillingen gedempte tafel.



Figuur 7. Schema van het contact tussen diamant pyramide en werkstuk.  $AB$  is het contactvlak, waar de kracht  $F_{tot}$  aangrijpt.  $F_t$  en  $F_n$  zijn de experimenteel gemeten componenten.  $F$ -evenwijdig is veel kleiner dan  $F$ -loodrecht  $\cdot d$  en  $b$  zijn diepte en breedte van de groef.  $2\theta$  is de tophoek van de pyramide.

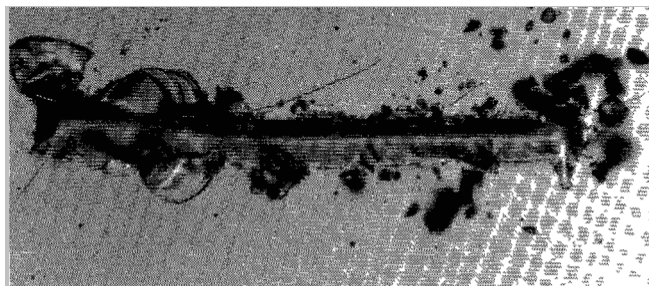
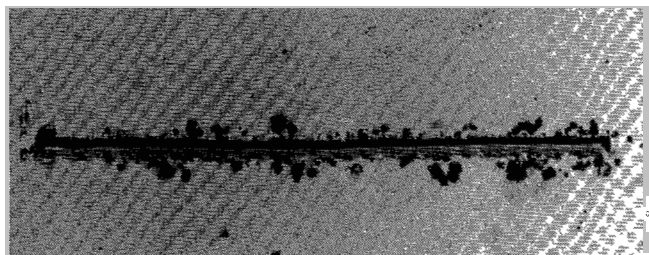


Foto 5. Krassen op een MnZn ferriet, gemaakt met een pyramidale diamant met  $120^\circ$  tophoek onder een belasting van 0,1 N – bovenste foto – en 0,5 N – onderste foto –. Lengte van de kras 150  $\mu\text{m}$ .

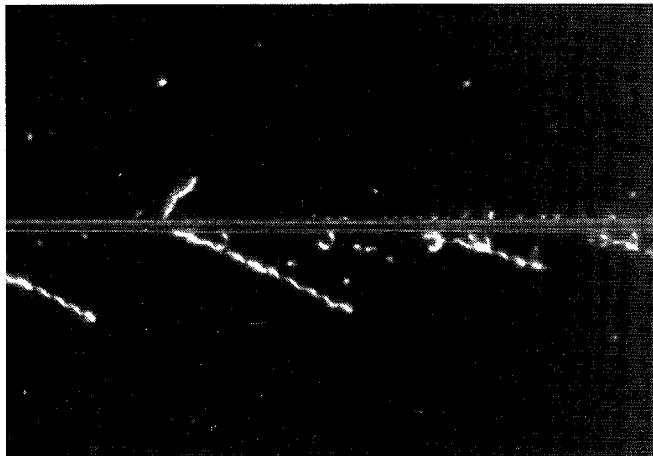
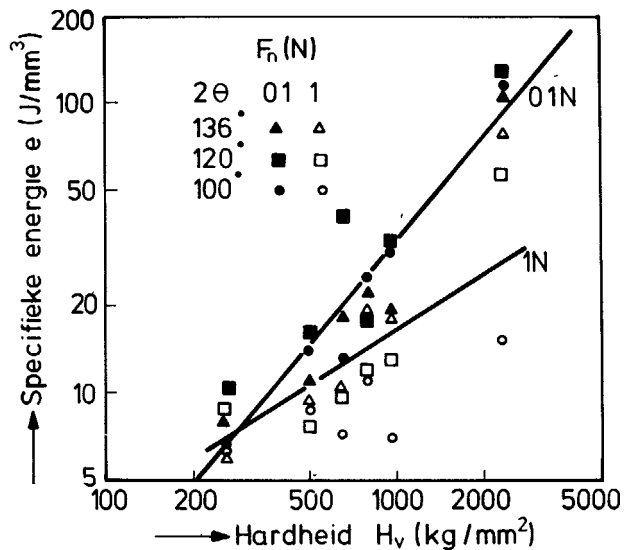
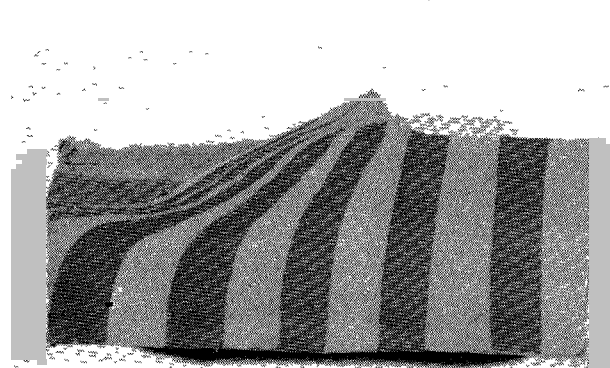
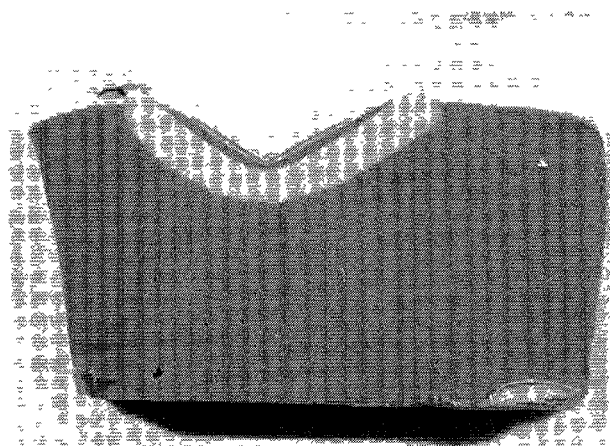
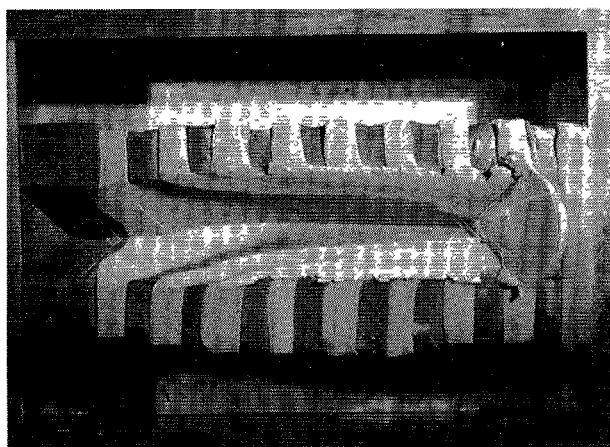
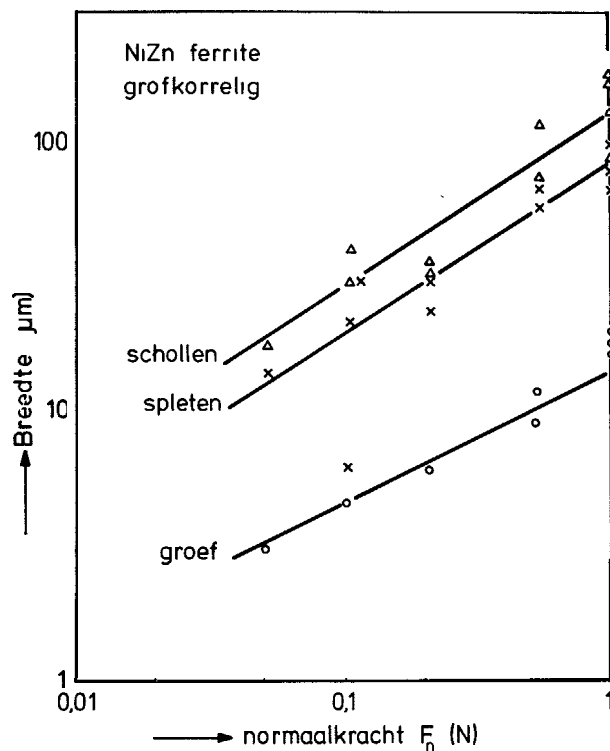


Foto 6. Fijne kras op glas met krulvorming afval dat nog aan het materiaal vastzit.



Figuur 8. Specifieke energie bepaald uit een krasproef met diverse pyramides bij twee  $F_n$  waarden voor een aantal keramische materialen met verschillende hardheid (ZnO, loodglas, MnZn- en NiZn ferriet, hexagonaal ferriet en  $Al_2O_3$ ).



Figuur 9. Breedsie van de oppervlakteverstering op een grofkorrelig NiZn ferriet als functie van de normaalkracht. De groefbreedsie volgt  $F_n^{1/2}$  (d.w.z. constante hardheid), de spleten en schollen volgen  $F_n^{2/3}$  (d.w.z. constante scheurweerstand).

Foto's 7. Klei gekrast met een metalen pyramide. De versmering in de groef is beperkt tot een dunne laag onder het oppervlak.

Experimenteel [9, 10] zijn  $e$  en  $H_s$  vrijwel gelijk; er blijkt een goede correlatie te zijn van  $e$  met de Vickers hardheid  $H_v$  – Figuur 8 –, die nog beter wordt indien men beide hardheden meet bij dezelfde deformatiesnelheid [11].

De druk op het contactvlak,  $F_{tot}$ , gedeeld door oppervlak AB in figuur 7, is in goede benadering gelijk aan  $e$  en dus aan  $H_v$ ; dit betekent dat voor een hardheid van 1000 kg/mm<sup>2</sup> de druk 100.000 atm. bedraagt.

Deze waarde maakt aannemelijk dat plastische vloeit van een materiaal als glas mogelijk is, dat zich onder trekspanning zo bros gedraagt.

Ook het afval dat bij krassen ontstaat, vertoont hierdoor soms een onverwacht uiterlijk – Foto 6 –.

Het ploegen in metalen is niet verschillend, ook daar is  $f = \cot \theta$  en  $e = H_v$ .

Om een beter idee te krijgen van de versmering die bij krassen in het oppervlak optreedt hebben wij op plasticine een grote pyramide laten bewegen – Foto 7 –. Bij voorzichtig doorsnijden bleek een dunne laag over grote afstand versmeerd te zijn [10].

Behalve vervorming in het oppervlak, vindt men ook krasseffecten onder het oppervlak, die men soms door etsen zichtbaar kan maken.

Een voorbeeld is een kristal van MgO – Foto 8 – waar tot op een diepte van 100  $\mu\text{m}$  dislocaties aangetoond kunnen worden. Zeer fraai onderzoek is gedaan aan dit soort deformatie door Hockey [12] en door Becker [13] met behulp van transmissie electronen-microscopie.

In kristallen is de vervorming op grotere diepte aan te tonen dan in fijn-korrelige materialen.

Het is jammer dat de oppervlakte-ruwte na slijpen in het algemeen geen goede maat is voor de diepte van de deformatie.

Bij hogere belastingen treden scheuren rond de kras op, zowel verticale als horizontale die schollen kunnen vormen – Foto's 5 –.

De scheurlengte en de uitgebreidheid van de schollen,  $c$ , hangen met de belasting samen volgens  $F_n^{2/3}$  – Figuur 9 – [3].

Men kan proberen het begrip scheurweerstand, bekend uit de sterkteleer, toe te passen op deze kleine scheurtjes in het oppervlak. Volgens Lawn's 'halve-stuivermodel' [14] geldt dan:

$$c = (2F_n/K_1)^{2/3}/\pi,$$

waar  $K_1$  de scheurfactor is.

De aldus gevonden waarde stemt goed overeen met die uit een dubbele torsie-scheurproef [11].

Bij dit soort langzame scheurverschijnselen vindt men in glas en keramiek effecten van de scheursnelheid, ten gevolge van de invloed van water en waterdamp.

Bij slijpsnelheden zijn deze effecten afwezig.

De krasproef levert naast informatie over de grootte van de scheuren ook gegevens over de zwakke plekken van het materiaal: scheuren treden op bij korrelgrenzen, of er bij voorkeur doòr de korrels zoals in foto 9.

In glas en andere inhomogene materialen kan men scheurloze gebieden tegenkomen op verschillende plaatsen.

De krassende diamant is zelf ook onderworpen aan de slijpkracht, wat tenslotte tot de slijtage van het slijpwiel leidt.

Foto 10 toont diamantresten in een wiel met bronzen binder. Het ziet er naar uit dat de ronde groeven ontstaan zijn doordat de diamanten verplaatst zijn alvorens af te breken. Dit zou dan weer een voorbeeld van 'ploegen' zijn!

Het is interessant dat men harde materialen als glas en keramiek slijpt met slijpkorrels in een taai binder, terwijl metaal geslepen wordt met een borste, keramische, binder.

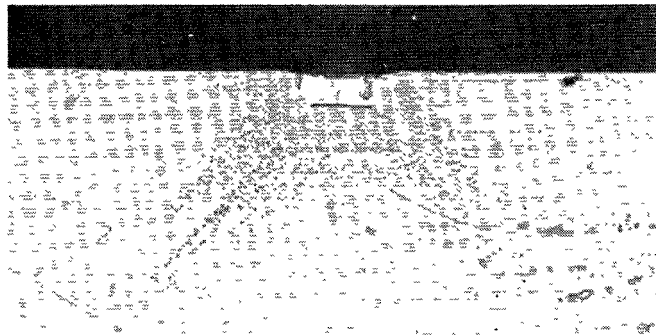


Foto 8. MgO kristal, (100) vlak, loodrecht op kras gekloofd. Na etsen is de materiaalvervorming zichtbaar als een gebied met veel dislocatieputten met twee uitlopers onder 45°. Vlak onder de kras is een horizontale en een verticale spleet zichtbaar.



Foto 9. NiZn ferriet na een kras onder een belasting van 0,5 N. Het oppervlak vertoont scheuren in de korrels en schollen door de korrelgrenzen heen (zie links boven, vlak bij het begin). De drie witte schollen aan de onderzijde zijn opgewipt nadat de diamantpyramide gepasseerd was.



Foto 10. Oppervlak van een slijpwiel met 100  $\mu\text{m}$  diamanten in een brons binder. De slijtage uit zich hier als een soort grachtvorming aan de kant van de diamant waar de kracht aangreep. Na deze binder-deformatie is de diamant afgebroken.

## 6. Slijpmodel

Zoals de inloop van het slijpwielt liet zien, heeft het slijpen met krassen te maken. Hebben slijpparameters als specifieke energie en krachtverhouding een duidelijke relatie tot de overeenkomstige krasgrootheden?

Bij het krassen is ons gebleken dat de  $f$  waarde  $-f = F_t/F_n$  – niet afhangt van de belasting  $F_n$ ; tenminste zolang de punt scherp is, anders verandert de gemiddelde tophoek.

De krachtverhouding uit het slijpexperiment is dus ook afhankelijk van de vorm van de deeltjes: hoe scherper, hoe hoger de krachtverhouding.

De specifieke energie bij de krasproef werd bepaald uit  $F_t$  en de afmetingen van de groef. Zolang bij het slijpen alleen een groef gemaakt wordt, kan men verwachten dat de slijpwaarde van  $e$  met de kraswaarde overeenstemt. Worden echter ook scheuren gevormd of zelfs schollen losgemaakt, dan zal het weggenomen volume aanmerkelijk hoger kunnen zijn dan dat van de groef alleen.

Het maken van schollen is een splitsproces, dat in brossen materialen weinig energie vraagt.

In de breuk: energie/volume =  $e$ , verandert dus de teller weinig en de noemer veel wanneer scholvorming optreedt; zodat geldt:

$$e_{\text{slijp}} \ll e_{\text{kras}}$$

Van beide gevallen hebben wij voorbeelden.

Voor een hexagonaal ferriet – een veelgebruikt magneetmateriaal – zijn de  $e$ 's praktisch gelijk; 7 en 8 J/mm<sup>3</sup> respectievelijk. Voor een kubisch ferriet – toegepast in magnetofoonkoppelen – is het slijpproces energetisch veel goedkoper dan het krassen door de gemakkelijker scheur- en scholvorming – 3 en 5 J/mm<sup>3</sup> respectievelijk.

Wil men deze vergelijking meer kwantitatief uitwerken, dan moet een schatting gemaakt worden van het aantal scheuren langs een groef en van de kans dat nabuurgroeven elkaar gunstig beïnvloeden. Veldkamp en Klein Wassink [15] hebben een model gemaakt waarin zowel de hardheid als de scheurweerstand een rol spelen.

Wil men kunnen voorspellen welke materiaalbeschadiging optreedt bij een gemeten slijpkracht, dan moet bekend zijn welke kracht uitgeoefend werd op 'de' diamant. Het aantal actieve diamanten,  $N_d$ , moet dan bekend zijn om de gemiddelde kracht te berekenen en daaruit het materiaalgedrag.

Opmerkelijk is het dat met stijging van de slijpkracht en de volume-afname  $Z$ , ook het aantal  $N_d$  toeneemt, waardoor de kracht per diamant lang niet zo snel stijgt als de totale kracht, d.w.z. de ruwte en de materiaalbeschadiging variëren vaak minder met  $h_{eq}$  dan de totale kracht.

## 7. Conclusies

Voor het slijpen van zowel glazen als keramische materialen concluderen wij het volgende.

Het slijpsysteem bestaat uit mechanisch samenhangende delen, die op de contactvlakken krachten op elkaar uitoefenen. Nuttige kengetallen zijn de volgende:

- a.  $h_{eq}$ : de continue spaandikte, berekend uit vergelijking (5).
  - $h_{eq}$  bepaald de slijpkracht;
  - $h_{eq}$  is evenredig met het kwadraat van de indringdiepte van de gemiddelde diamant: voor fijnslijpen is  $h_{eq} \leq 0.02 \mu\text{m}$ , voor grofslijpen is  $h_{eq} \geq 0.2 \mu\text{m}$ ;
  - $h_{eq}$  is de dikte van het afval die per omwenteling van het slijpwielt door het water weggespoten moet worden.
- b.  $e$ : de specifieke energie, berekend uit vergelijking (2).
  - Tot hoge omtreksnelheid,  $v_s$ , behoudt  $e$  zijn waarde, behalve in smeltende glazen.
  - $e$  bepaalt de slijpkracht;
  - $e$  is evenredig met de Vickers hardheid  $H_v$ , indien voornamelijk groefvorming optreedt;
  - $e$  is lager dan  $H_v$  voor materialen waar gemakkelijk scheuren gevormd worden.

Naast deze grootheden zou men wensen dat er meer experimentele informatie beschikbaar komt over de slijpkorrels: het aantal actieve slijpende korrels in het contactvlak,  $N_d$ , en de volume-afname van het slijpwielt voor een gegeven materiaalafname  $Z$ . Met deze gegevens zou men een slijpsysteem kunnen optimaliseren naar kosten voor een gegeven materiaalbeschadiging.

De toekomstige ontwikkeling van het slijpen van glas en keramiek gaat vermoedelijk als volgt:

- De wielsnelheid  $v_s$  zal verder opgevoerd worden. Volgens vergelijking (8) kan dan een kleinere kracht gebruikt worden voor dezelfde verspaning, of een hogere  $Z$ , bij dezelfde kracht.
- In onze proeven gaf 100 m/s geen probleem.
- De koelmethode en de afvoer van het afval zullen dan verbeterd moeten worden.
- De instrumentatie van slijpbanken kan uitgebreid worden. Naast verplaatsingsmeters kan men denken aan krachtopnemers.
- Lettend op de krachtpulsen weet men dan beter waarmee men bezig is.
- Er worden meetmethodes ontwikkeld voor het meten van het aantal actieve diamanten op een slijpwielt.
- Tezamen met de totale kracht weet men dan wat elke slijpkorrel voor beschadiging aanricht.

Het is denkbaar dat aldus de slijptechniek profiteert van de verkregen inzichten.

Eindhoven maart 1977

Dit artikel bevat de uitgewerkte tekst van een voordracht voor de Nederlandse Keramische Vereniging op 11 maart 1977 te Eindhoven. Het wordt ook geplaatst in 'Klei en Keramiek' en 'GlasTechnische Mededelingen'.

## Referenties

- [1]. A. Broese van Groenou, *IEEE Trans. on Magn.*, MAG-11 (5) (1975) 1446-1451.
- [2]. R. W. Rice en B. K. Speronello, *J. Am. Cer. Soc.*, 59 (7-8) (1976) 330-335.
- [3]. A. Broese van Groenou, J. D. B. Veldkamp en D. Snip, *J. de Physique* 38, C1 (spec. ICF 2 nummer).
- [4]. K. Takazawa, *Ind. Diamond Rev.*, (1972) 143-149.
- [5]. M. Maris en R. Snoeys, paper 604, 14th Mach. Tool Design and Res. Conf., Manchester 1973.
- [6]. R. Snoeys, *Annals C.I.R.P.*, 20 (2) (1971) 183-181.
- [7]. R. Snoeys, J. Peters en A. Decneut, *Annals C.I.R.P.* 23 (2) (1974) 227-238.
- [8]. M. C. Shaw, *New Developments in Grinding*, p. 221-258, Carnegie Press, Pittsburgh 1972.
- [9]. A. Broese van Groenou, N. Maan en J. D. B. Veldkamp, *Philips Research Reports*, 30 (1975) 320-359.
- [10]. N. Maan en A. Broese van Groenou, *Wear* 42 (1977) 365-390.
- [11]. J. D. B. Veldkamp, *Gordon Conferentie New Hampshire 1976*, ongepubliceerd.
- [12]. B. J. Hockey, *The Science of Ceramic Machining and Surface Finishing*, S. J. Schneider en R. W. Rice editors, p. 333-339. *NBS special* 348, 1972; *Proc. Brit. Cer. Sec.* 20, 1972, 95-115.
- [13]. P. F. Becher, *J. Am. Cer. Soc.* 57 (2) (1974) 107-108; 59 (3) (1976) 143-145.
- [14]. B. R. Lawn en E. R. Fuller, *J. Mat. Sc.* 10 (1975) 2016-2024.
- [15]. J. D. B. Veldkamp en R. J. Klein Wassink, *Philips Res. Rep.* 31 (1976) 153-189.