

Breukvorming bij het snijden van glas

Het oorspronkelijke artikel 'Median crack initiation and propagation beneath a disc glass cutter' van M. V. Swain (Saint Gobain Recherche)* is eerder gepubliceerd in het tijdschrift *Glass Technology* Vol. 22 no. 5 October 1981. Na vertaling en bewerking door F. Simonis is het hier opgenomen.

Bij het snijden van glas ontstaan mediane en laterale barsten. In dit artikel wordt de vorming van mediane barsten beschreven onder invloed van een stilstaande en een bewegende (rollende) glassnijder van wolframcarbide. Tevens wordt ingegaan op de breukmechanica van het ontstaan en van de voortplanting van deze barsten. De analyse is d.m.v. observaties bevestigd. Ook wordt aandacht gegeven aan de invloed van de snijsnelheid en omgevingscondities op de breukvorming.

Door een aantal auteurs (1-5) is de invloed onderzocht van de geometrie van glassnijders en van de kracht waarmee deze bewogen worden op het ontstaan van de mediane barst, met name de barstdiepte. Bestudeerd zijn zowel rollende als krassende glassnijders. Geen van de auteurs heeft echter getracht de breukmechanica te beschrijven die hieraan ten grondslag ligt. Vrij recent is door Lawn (6, 7) de breukmechanica voor axisymmetrische voorwerpen uitgewerkt en zoals hier zal blijken is het mogelijk deze theorie uitbreiden tot het ellipsoïd-vormige contact van een glassnijderwiel. In een eerder artikel (8) is reeds het deformatie proces aan de orde gekomen van het glasoppervlak onder de druk van een glassnijwiel. Dit artikel is een uitbreiding hierop in zoverre dat ook de vorming en voortplanting van de mediane barst aan de orde komt. In volgende artikelen zal de invloed van snijwielgeometrie en kracht alsmede het ontstaan en groeien van laterale barsten nader besproken worden.

1. Beschrijving van de barstvorming onder een snijwiel.

In het algemeen ontstaan onder een glassnijder drie verschillende barsttypen:

1. Mediane (normale) barsten
2. Laterale barsten
3. Oppervlakte barsten

Deze drie barstverschijnselen zijn schematisch weergegeven in fig. 1. De mediane en laterale barsten behoren gezien hun ligging vlak onder het direkte opper-

vlak tot de zgn subsurface cracks. Voor het glassnijproces is vooral de vorming van mediane barsten van belang. Laterale barsten dienen zoveel mogelijk te worden voorkomen. In dit artikel wordt vrij algemeen ingegaan op de vorming van mediane barsten gevolgd door een studie van de breukmechanica. Allereerst wordt statisch contact bekeken, ge-

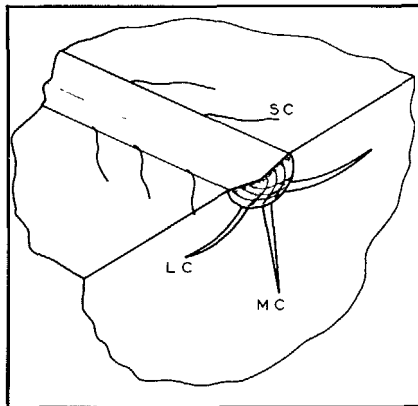


Fig. 1 Schematische weergave van de verschillende typen barsten die kunnen ontstaan bij het snijden van glas. SC = oppervlakte barsten, LC = laterale barsten en MC = mediane barsten

volgd door rollend contact. Voorzove niet anders is aangegeven betreffen alle waarnemingen en opmerkingen barstvorming in natron-kalkglas.

Statisch contact

Wanneer een glassnijder wordt belast met een cirkelvormige glassnijder kunnen afhankelijk van de kracht, snijhoek en omgevend medium al of niet diepe (subsurface) barsten in het oppervlak ontstaan (mediane en laterale barsten). Teneinde de vorming van de barsten te begrijpen zijn microscopische waarnemingen verricht van onder het glassnij-

wiel (fig. 2). Hieruit blijkt dat bij het belasten met een snijwiel allereerst kleine barstjes gevormd worden evenwijdig aan de inkeeping en juist buiten het contactvlak. Deze barstjes zijn het gevolg van de daar aanwezige trekspanning als gevolg van het indrukken. Bij verder indrukken worden deze barstjes

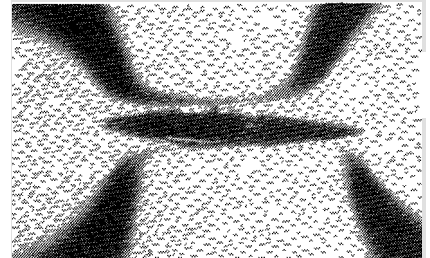


Fig. 2 Het ontstaan van microcracks rond het contactoppervlak bij het belasten met een snijwiel (5,5 mm diam, snijhoek 137°, belasting 12 kg, contactlengte 560 µm) Onderaanzicht.

geabsorbeerd in het contactvlak en nieuwe barstjes ontstaan weer daarbuiten. Uit waarnemingen in zij-aanzicht (fig. 3) is gebleken dat bij continue belasting deze barstjes zich verder ontwikkelen in de richting van de aanwezige schuifspanning. Echter de mediane en laterale barsten ontstaan vrijwel nooit tijdens het indrukken. Uit waarnemingen tijdens het belasten en ontlasten met een snijwiel blijkt dat deze subsurface cracks bijna altijd ontstaan tijdens het ontlasten zoals in fig. 4 goed te zien is. In deze figuur wordt het duidelijk dat de subsurface cracks pas ontstaan nadat de belasting van 10 kg is teruggebracht tot 1 kg. Soms ontstaat één mediane barst, veelal echter twee barsten (laterale barsten, 40-50° met het oppervlak). Soms komen beide barsttypen tegelijk voor. De laterale barsten zijn meestal latere uitlopers van de hierboven genoem-

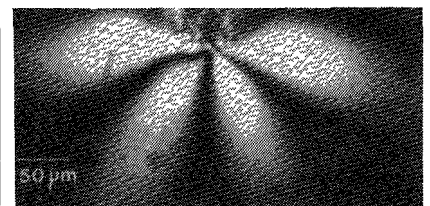
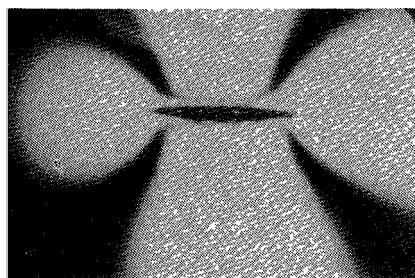
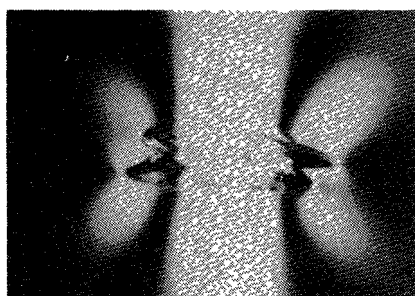


Fig. 3 Zij-aanzicht van fig. 2 bij een belasting van 7 kg

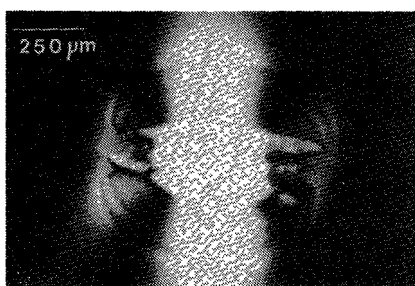
* Momenteel werkzaam bij CSIRO, Melbourne, Australië



a



b



c

Fig. 4 Waarnemingen bij onderaanzicht van het belasten en ontlasten met een statische glassnijder (snijshoek 137°, 5.5 mm diam).

a. max. belasting 10 kg
b. tijdens ontlasten 1 kg
c. volledig ontlast

de kleine oppervlakte barstjes die tijdens het indrukken ontstaan zijn. De vorming van laterale barsten hangt sterk af van het omringende medium. In een inerte atmosfeer (bv paraffine) ontstaan nauwelijks of geen laterale barsten.

Bewegend (rollend) contact

Het spanningsveld dat wordt opgewekt in het glasoppervlak door een rollende glassnijder lijkt erg veel op die van het statische contact van fig. 4. Dit mag ook verwacht worden aangezien de wrijvingscoëfficiënt erg laag is.

Bij een bewegende glassnijder ontstaan de subsurface cracks evenals bij het statische contact op het moment nadat de belasting is opgeheven. De trekspanning in het glas na belasting is er de oorzaak van dat de kleine geïnitieerde barstjes die ontstaan zijn tijdens het indrukken, kunnen uitgroeien tot volwaardige

subsurface cracks. De uiteindelijke vorming vindt dan ook vooral plaats vlak achter (schuinonder) het snijwiel. Het ontstaan is op film geobserveerd. Figuur 5 toont de situatie voor het glassnijden in lucht.

De spanningslijnen direct onder het snijwiel verdwijnen zeer snel na het passeren van het snijwiel doordat later nog laterale barsten ontstaan onder invloed van waterdamp (spanningscorrosie). In paraffine treedt dit niet op. De spanningslijnen blijven hier ook na het passeren van het snijwiel bestaan. Ook wordt in een normale lucht atmosfeer een zeker doorgroeien van de geïnitieerde mediane barst waargenomen onder statische belasting in tegenstelling tot de vorming ervan in paraffine. Ook hier is de invloed van waterdamp aanwezig (corrosie van de geïnitieerde barst leidt onder invloed van trekspanning tot verhoogde scheurvorming).

Ook de snijsnelheid is van belang. Bij lage snelheden ontstaat een regelmatige mediane barst, terwijl bij hogere snelheden een onregelmatige vorm optreedt gecombineerd met een verpulvering van het glasoppervlak. De invloed van de omgeving is bij hoge snelheden verwaarloosbaar. De cracktip verplaatst zich zichtbaar dan zo snel dat bij het ontstaan van de mediane barst de aanwezige waterdamp niet snel genoeg in de barst kan diffunderen. De onregelmatige barstvorm en de verpulvering van het glasoppervlak bij hogere snelheden is vermoedelijk het gevolg van het wegzakken van het snijwiel in de geïnitieerde barst.

Bij lage snelheden wordt dit niet geconstateerd. De reden hiervan is onbekend.

2. Breukmechanica van de mediane barstvorming

In afwijking met andere auteurs zoals Lawn en Evans (15) wordt er op basis

van de hiervoor vermelde waarnemingen vanuit gegaan dat de werkelijke subsurface barstvorming plaatsvindt pas als de belasting wordt weggenomen. Tijdens de belasting vindt er deformatie van het oppervlak plaats en ontstaan kleine barstjes aan het contact grensvlak. De basisgedachte is dat de optredende spanning in het glas ten gevolge van het belasten alleen wordt bepaald door de elastische deformatie terwijl de spanning tijdens het ontlasten bepaald wordt door de opgetreden plastische deformatie en het resterende spanningsveld. Er wordt aangenomen dat deze resterende spanning een bepaalde fractie is van de oorspronkelijk aangebrachte belasting. Zodoende blijft de breukmechanica zoals door Lawn en Evans gepresenteerd in grote lijnen gehandhaafd en treedt slechts hierdoor een extra evenredigheidsfactor op. Zonder deze theorie hier te herhalen kan afgeleid worden dat voor het initiëren van een subsurface barst een minimale belasting P_c nodig is welke afhangt van de glaseigenschappen en de vorm van het snijwiel:

$$P_c = \frac{K_c^3 (\tan \psi)^{2.5} R^{0.5}}{\gamma^3 E^3 k^4} - \tan \psi^{2.5} R^{0.5} \quad (1)$$

hierin is ψ = snijhoek van het snijwiel

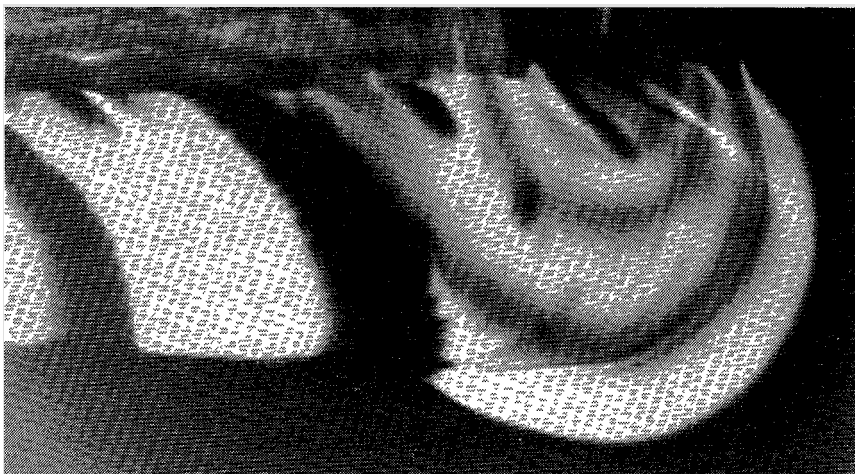
R = straal van het snijwiel

γ = evenredigheidsconstante waarin de excentriciteit van het contact in meespeelt

K_c (kritische stress-intensity factor), E (elasticiteitsmodulus) en k zijn eigenschappen van het glas.

Bij versleten snijwielen is γ laag en de ver-

Fig. 5 Interferentiepatroon onder een inmiddels stilgezet snijwiel (snijshoek 150°, 6 mm diam., 6 1 kg). Het snijwiel is van links naar recht bewogen in een luchtatmosfeer. Links van het snijwiel zijn de interferentiepatronen al weer verdwenen



eiste belasting dus hoog. In figuur 6 is de relatie volgens formule (1) experimenteel ook bevestigd. Na het initiëren groeit de barst door tot een lengte die bepaald wordt door het resterende spanningsveld. Afgeleid kan worden dat voor de barstlengte dan geldt:

$$C = \frac{(1-\nu^2) P^{4/3}}{16\pi K_c^2 (kR)^{2/3} \tan \psi^{5/3}} \div \frac{R^{2/3} \tan \psi^{5/3} P^{4/3}}{\quad} \quad (2)$$

waarin: C = barstlengte
P = belasting
 ψ = snijhoek
 K_{cr} k en ν zijn weer glaseigenschappen

Indien de wrijving tussen het snijwiel en het glas wordt meegerekend wordt formule (2):

$$C = \frac{P^{4/3} (1-\nu^2) (1-\mu \tan \psi)^2 (\tan \psi)^{1/3}}{16\pi K_c^2 (kR)^{2/3} (\mu + \tan \psi)^2} \quad (3)$$

μ = wrijvingscoëfficiënt

Zoals in de figuren 7, 8 en 9 is aangegeven blijkt deze theorie goed overeen te komen met waarnemingen. De barstdiepte is evenredig met de aangebrachte belasting tot de macht 4/3 en omgekeerd evenredig met de diameter van het snijwiel tot de macht 2/3. Ook is de snijhoek van groot belang. In figuur 9 wordt aangetoond dat het verwaarlozen van de wrijving vooral bij kleine snijhoeken niet toegestaan is. Bij sterke wrijving (lage snelheden) neemt de barstlengte af.

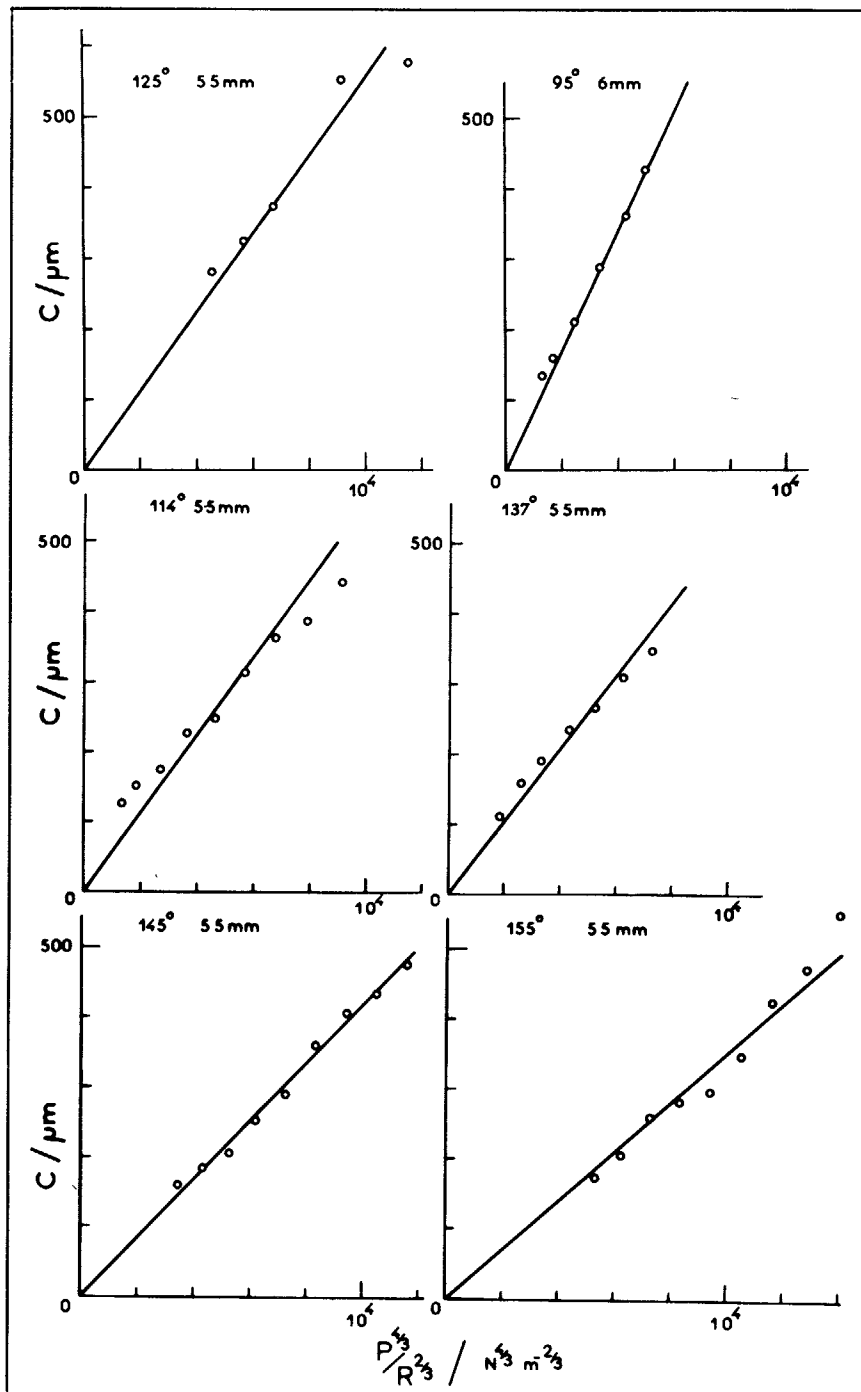


Fig 7 De mediane barstlengte voor verschillende snijwielen (snijhoek is gevarieerd, diam 5.5 mm). Langs de horizontale as is de grootte uitgezet $P^{4/3}/R^{2/3}$ in overeenstemming met formule (2).

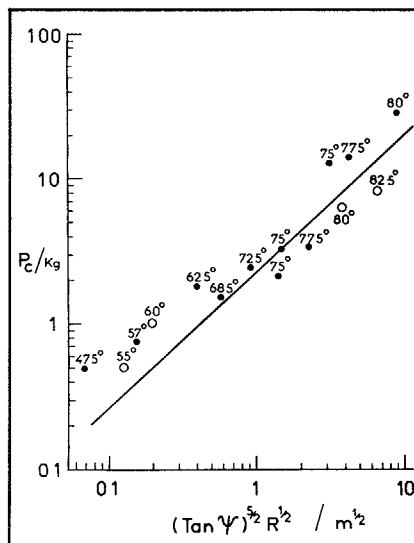


Fig. 6 Experimenteel bepaalde waarden van de kritische belasting voor het initiëren van een mediane barst. De snijhoek en de diameter van het snijwiel is hierbij gevarieerd. Sommige waarden zijn na bewerking overgenomen van Mairlot (2) en Metras (22).

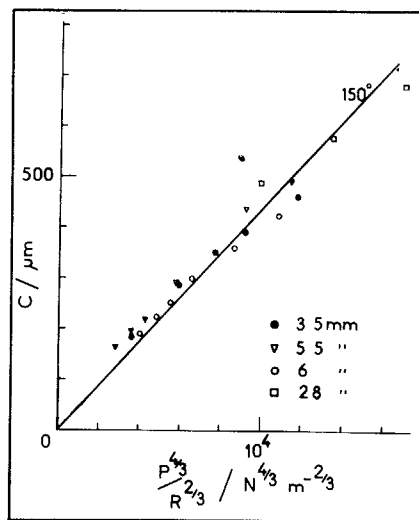


Fig. 8 De mediane barstlengte voor snijwielen met verschillende diameters Snijhoek 150°. Goede overeenstemming met formule (2)

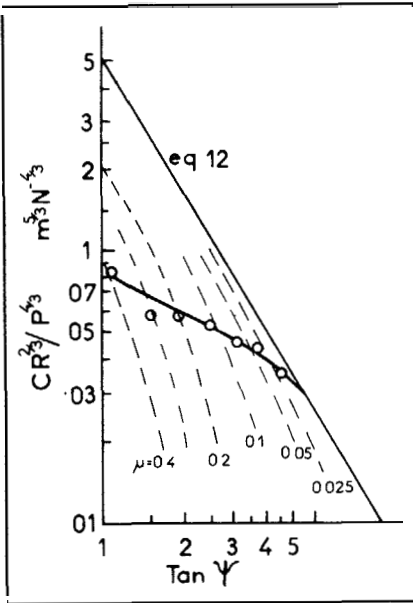


Fig. 9 Vergelijking tussen de formules (2) en (3). De aangegeven cirkels zijn de bijbehorende waarnemingen. Vooral bij kleine snijhoeken is het effect van wrijving groot. Bij sterke wrijving ontstaat een geringere barstlengte.

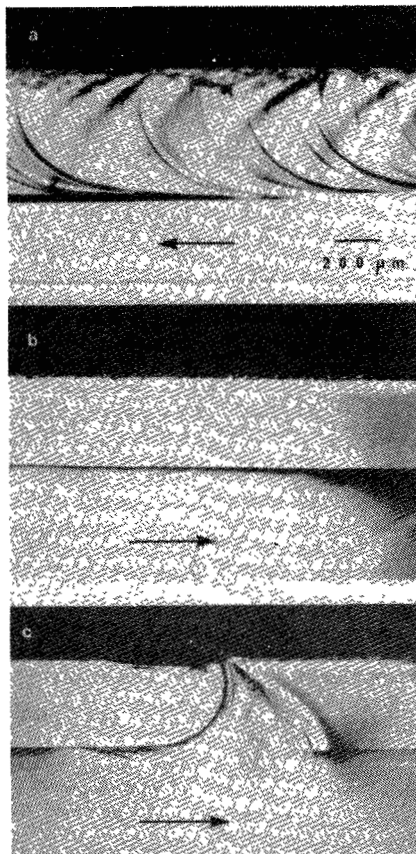


Fig. 10 Invloed snijnsnelheid op de barstvorming.
a. 1.0 m/s
b. 10⁻⁴ m/s
c. 10⁻² m/s

ij de boven genoemde experimenten is de mediane barstdiepte gemeten door het glas te breken. In het breukvlak is een duidelijke afdruk van de oorspronkelijke barst waar te nemen (fig. 10^{a,b,c}). Alhoewel dit niet in de figuren te zien is, wordt waargenomen dat bij lage snelheden de gemiddelde barst niet direct tot het oppervlak doorloopt. Bij hogere snelheden treedt dit wel op. Hierdoor neemt de wrijving tussen snijwiel en glas af.

3. Invloed snijnsnelheid op de barstdiepte

verschillende auteurs zoals Peter (4), Eldkamp (23) en Hara en Nakayama (13) onderzochten de invloed van de snijnsnelheid op de mediane barstdiepte. De resultaten zijn tegenstrijdig. In sommige gevallen bleek een hogere snelheid gunstig te zijn, in andere gevallen juist niet. Verder opheldering zijn een groot aantal experimenten uitgevoerd bij een constante elastische constante van 6.1 kg, een snijhoek van 50° en een 5.5 mm diameter snijwiel in een gebied van 1-10⁻⁵ m/s. De experimenten zijn uitgevoerd in lucht en in paraffine. Figuur 11 geeft een overzicht van de resultaten. Bij hoge snelheden is de barstdiepte bimodaal verdeeld, en regelmatig gevormde barsten zoals die ook bij lagere snelheden voorkomt, wordt afgewisseld met een onregelmatig gevormde barst die dieper is en bij hogere snelheden gaat overheersen (fig. 10). Alhoewel er aanwijzingen zijn dat dit het gevolg is van het verschijnsel dat bij hogere snelheden het snijwiel in de tip van de mediane barst penetreert, blijft de oorzaak vooralsnog onopgehelderd

(wrijving of wigvorming?). Wel zou dit het brokkelige snijspoor verklaren dat bij hogere snelheden optreedt.

Ook valt op dat bij hogere snelheden de barstdiepte niet afhankelijk is van de omringende atmosfeer, zoals dit bij lagere snelheden wel het geval is. Bij lagere snelheden treedt onder invloed van waterdamp versterkte barstvorming op ten gevolge van spanningscorrosie. De waterdampdiffusie is echter reëlf traag zodat alleen bij lage snelheden een merkbaar effect optreedt.

Omdat spanningscorrosie ook de vorming van laterale barsten bespoedigt moet men dit zoveel mogelijk voorkomen.

In een inerte atmosfeer (paraffine bijv.) komt geen spanningscorrosie voor.

Literatuur

- 1 de Waal, H. (1963). *Silic. Ind.* **28**, 545
- 2 Mairlot, H. (1974). *Silic. Ind.* **39**, 333.
- 3 Ord, P.R. (1957). *J. Soc. Glass Technol.* **41**, 245T
- 4 Peter, L. (1964). *Glastech. Ber.* **40**, 470.
- 5 Holland, A.J. & Turner, W.E.S. (1937). *J. Soc. Glass Technol.* **21**, 383
- 6 Lawn, B.R. & Wilshaw, T.R. (1975). *J. Mater. Sci.* **10**, 1049
- 7 Lawn, B.R., Evans, A.G. & Marshall, D.B. (1980). *J. Am. Ceram. Soc.* In press
- 8 Swain, M.V. (1980). *Glass. Technol.* **21**, 290.
- 9 Hagan, J.T. & Swain, M.V. (1978). *J. Phys. D* **11**, 2091
- 10 Ernsberger, F.M. (1969). *Physics Chem. Glasses* **11**, 240.
- 11 Swain, M.V. (1979). *J. Am. Ceram. Soc.* **62**, 318
- 12 Marshall, D.B. & Lawn, B.R. (1979),

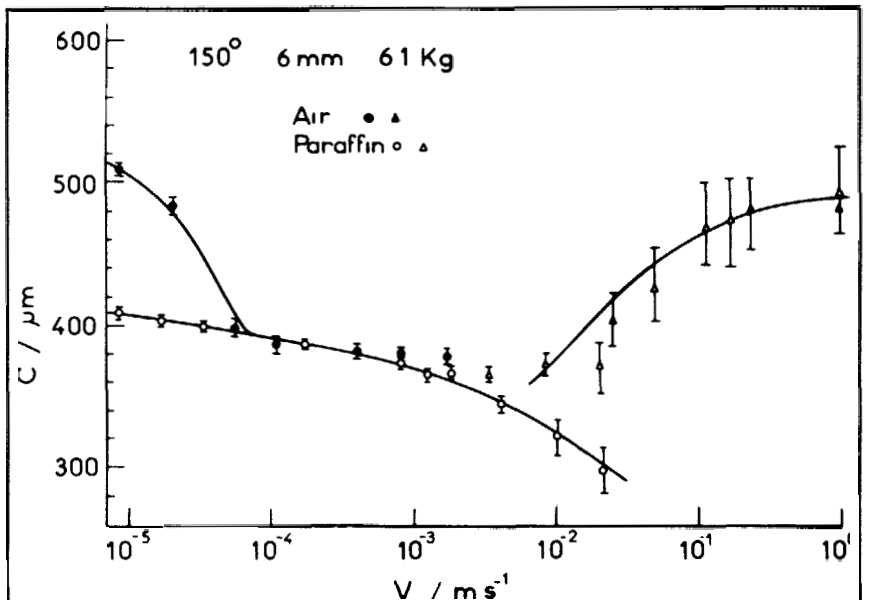
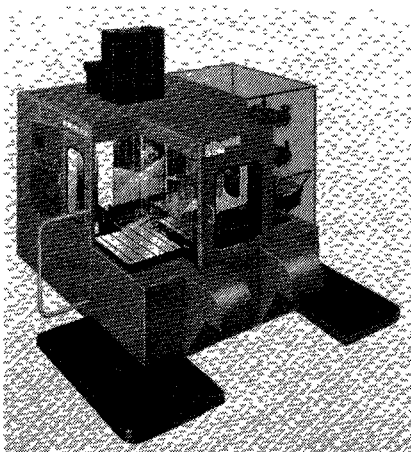


Fig. 11 De mediane barstlengte als functie van de snijnsnelheid. Snijhoek 150°, 6 mm diam., 61 kg

- J. Mater. Sci.* **14**, 2001
13. Hara, M & Nakayama, J (1956). *Asahi Glass Co Res Lab Rep.* **6**, 1 (Also in *Ind Diam. Rev.* (1959), **19**, 26)
 14. DeTorre, R.P. (1975) *Canadian Patent* No 971475
 15. Lawn, B R & Evans, A.G. (1977) *J Mater Sci.* **12**, 2195
 16. Hill, R (1950) *The mathematical theory of plasticity* Clarendon Press. Oxford.
 17. Johnson, K L (1970) *J. Mech. Phys. Solids* **18**, 115
 18. Sneddon, I N. (1948). *Proc. Camb. phil. Soc. math. phys. Sci.* **44**, 492
 19. Sih, G C (1973) *Handbook of stress-intensity factors.* Lehigh Univ. Press, Bethlehem.
 20. Puttick, K E (1978) *J Phys D* **11**, 595
 21. Mencik, J. (1977). *Proc. Xlth Int. Congr. Glass.* Vol. 2 p. 459.
 22. Metras, J (1977) *Saint Gobain Report* No 3279
 23. Swain, M.V. & Lawn, B.R. (1976). *Int J. Rock Mech. Min. Sci.* **13**, 311
 24. Veldkamp, J D B , Hattu, N. & Snijders, V.A.C. (1978). *Fracture mechanics of ceramics.* Vol 3 p 273 Ed R C Bradt, D.P.H. Hasselman & F.F. Lange. Plenum Press, N.Y.
 25. Litvinov, V.Q , Majstrenko, I A , Tarasov, E A & Grinberg, F B (1972). *Steklo Keram.* **12**, 15.
 26. Swain, M.V. (1979). *Proc. R. Soc.* **A366**, 575
 27. Wiederhorn, S M. (1967). *J. Am. Ceram. Soc.* **52**, 99.

Olivetti-bewerkingscentra

Olivetti Controllo Numerico uit het Italiaanse San Bernardo d'Ivrea voert een uitgebreid programma horizontale bewerkingscentra onder de typeaanduiding Horizon, met als basiseenheden de modellen 100, 400, 800 en 1000. Binnen deze series zijn weer diverse ondermodellen. De getallen hebben in het algemeen betrekking op het werkbereik, met name in de Y-as en Z-as. Zo heeft type 400 een langsverplaatsing (X-as) van 500 mm, Y-as = 400 mm en een dwarsverplaatsing (Z-as) van 400 mm. De positioneernauwkeurigheid van dit model is voor de X-as en Y-as 0,0125 mm, voor de Z-as 0,02 mm bij een repeteernauwkeurigheid van 0,006 mm. Het vermogen onder continubelasting is 7 kW. Het gereedschapmagazijn bevat 30 gereedschappen. Het wisselen duurt 14 seconden en de ijlgang is 12 m/min.

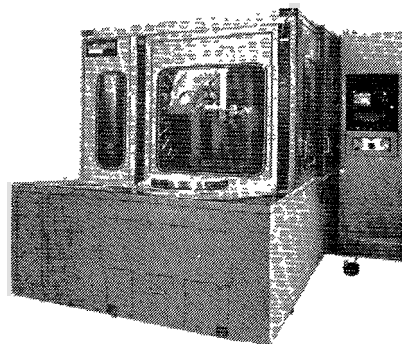


Horizon 800

1001, 1002, 1003 en 1005 met bereiken in X, Y en Z van respectievelijk 900 x 900 x 900, 1400 x 1400 x 900, 1400 x 1400 x 900, 1900 x 1400 x 1400 mm. De ijlgang is 15 m/min. De positioneer- en repeteernauwkeurigheden zijn respectievelijk 0,01 en 0,005 mm.

De machines zijn uit te rusten met werkstukwisselpallets in de afmetingen 1000 x 840, 1000 x 1250 en 1000 x 1500 mm. Het vermogen aan de spil is

nieuwste loot in deze serie is de Horizon 110N, die in een aantal zaken van het uitgangsmodel verschilt, met name in de nauwkeurigheden en vermogens. Het 110-model heeft een bereik van 500 mm in de X-as, 450 mm in de Y-as en 350 mm in de Z-as. De positioneernauwkeurigheid van het N-type is iets hoger dan het basistype, namelijk 0,01 mm (tegen 0,015). Dit geldt ook voor de repeteernauwkeurigheid: 0,005 tegen 0,007 mm. De ijlgang bij deze machine is 12 m/min, het spiltoerental maximaal 5000

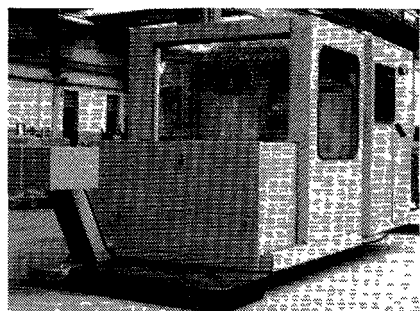


Horizon 110N

omw/min en het vermogen aan de spil 12 kW

De aanzetsnelheid is maximaal 10 m/min. De gereedschapopname is ISO 45. De diameter van de rondtafel is 600 mm, die maximaal 600 kg werkstukgewicht kan dragen. Het gereedschapmagazijn kan 32 gereedschappen opnemen met een maximale diameter van 125 mm, een lengte van 175 mm en een gewicht van 15 kg. De besturing is Olivetti's Vector. Men kan in ISO- of EIA-code ingeven. De drie assen worden gelijktijdig bestuurd. De kleinste in te geven waarde is 0,0001 mm.

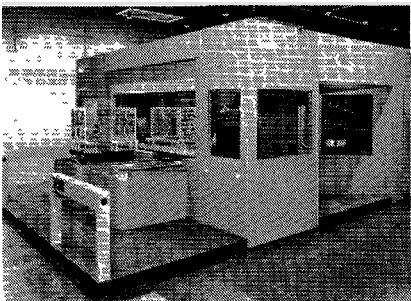
Vert. Olivetti OCN. Rotterdam



Horizon 400

Type 800 heeft een bereik van 1000 x 800 x 800 mm en een positioneernauwkeurigheid van 0,01 mm, een repeteernauwkeurigheid van 0,005 mm, een vermogen van 14 kW en eveneens 30 gereedschappen. Hier duurt het gereedschapwisselen 10 seconden. De ijlgang is 12,5 m/min.

Type 1000 omvat een viertal modellen



Horizon 1000

hier 18 kW, de spilsnelheid maximaal 4000 omw/min.

Apart, in nummering althans, is het 110-model, dat al langer op de markt is. De