

Harmonic drive als UHV-draaidoorvoer

E. de Haas

FOM-Instituut voor Atoom- en Molecuulfysica, Kruislaan 407, Amsterdam

Het principe van de harmonic drive blijkt zich te lenen voor een nieuw soort ultrahogvacuum (UHV)-draaidoorvoer, met de volgende voordelen ten opzichte van de baldraaidoorvoeren:

- grotere nauwkeurigheid ($\pm 0,2^\circ$) bij een hoog koppel in de vacuümruimte (5 Nm),
- een ingebouwde vertraging van 1 op 111,
- een hoog ingaand toerental, tot 700 omw/min.

Inleiding.

Veel fysische onderzoeken kunnen alleen met voldoende nauwkeurigheid plaats vinden in een absoluut vacuüm, waarin geen storende gasmoleculen meer rond zweven. Door speciale pomptechnieken wordt een zeer lage vacuümdruk ($< 10^{-7}$ Pascal) bereikt. Dit lukt echter alleen wanneer de bewegende doorvoeren van de in het vacuüm aanwezige manipulatoren absoluut dicht zijn. Absolute afdichting wordt bereikt door het toepassen van metaalbalgen. Beperking hierbij is de geringe slag bij lineaire bewegingen, of de geringe asdiameter (geringe torsiestijfheid) bij roterende (zwaai) bewegingen.

Door een bijzondere constructie toe te passen heeft de auteur kansgezien een stijve nauwkeurige roterende vacuümdoorvoer te realiseren.

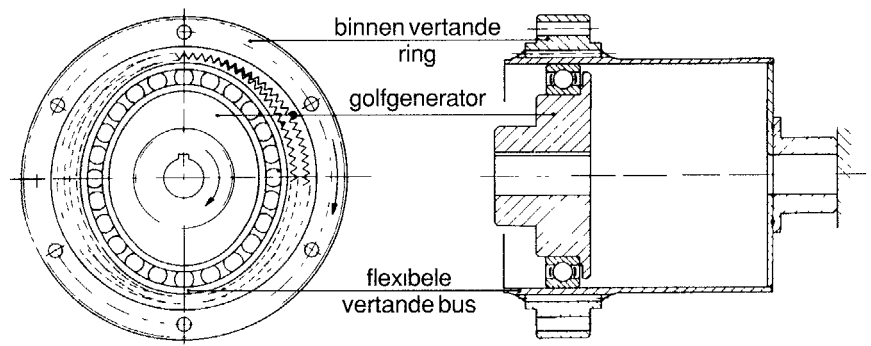
Principe van de harmonic drive

Zoals in figuur 1 is te zien, bestaat de harmonic drive uit drie basisonderdelen:

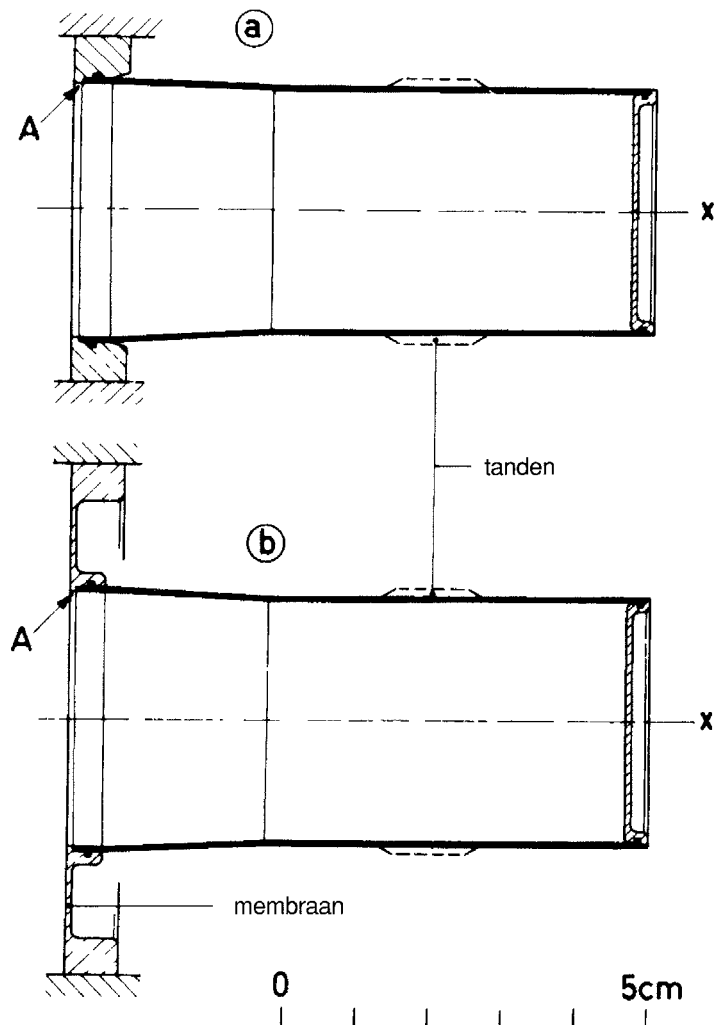
- de golfgenerator (WG), een elliptische schijf met daaromheen een kogellager dat zich elastisch aanpast,
- de flexibele vertande bus (FS), een elastische bus die zich aan de vorm van de golfgenerator aanpast en 220 tanden aan de buitenkant heeft;
- de binnenvertande ring (CS), een stevige ring met een binnenvertanding van 222 tanden.

Gelijktijdig zijn 15% van de tanden in ingrijping, zodat ondanks de kleine tanden een hoog koppel kan worden overgebracht.

De werking is in het aparte kader verklaard. De vertraging is in de getekende toestand van figuur 1 gelijk aan 1 op 111. Zetten we



Figuur 1. Harmonic drive. Duidelijk herkenbaar zijn de binnenvertande ring (Circular Spline), de golfgenerator (Wave Generator) en de flexibele vertande bus (Flexible Spline).



Figuur 2. De twee voorgaande versies van de flexibele vertande bus.

Harmonic drive als UHV-draaidoorvoer

Harmonic drives zijn zeer compacte vertrageningen met grote reductie en een aantal bijzondere eigenschappen. De toerenreductie ligt tussen 80 tot 320 op 1. De kleinste modellen hebben een diameter van 20 mm en zijn daarmee niet groter dan een stuiver. Andere voordelen ontstaan door de symmetrische bouw en het feit dat de ingaande en uitgaande as exact in elkaars verlengde liggen. Voor de fijnmechanische industrie en apparatenbouw zijn ze bijzonder interessant vanwege de geringe massastraagheid, de hoge stijfheid en de geringe speling. Desgewenst kunnen ook spelingarme harmonic drives worden geleverd. Sommige modellen hebben een extra grote stijfheid als gevolg van een bijzondere vertanding, waarbij tweemaal zoveel tanden gelijktijdig in aangrijping zijn. Daardoor is dit type harmonic drive bestand tegen hogere piekbelastingen.

De kleinste harmonic drive (diameter 20 mm) verdraagt maximaal 4500 omw/min aan de ingaande as, heeft slechts een reductie van 80 op 1 en kan aan de uitgaande as tot 0,3 Nm worden belast. Met iets grotere harmonic drives kunnen koppels tot 8 Nm worden overgebracht. In combinatie met gelijkstroommotoren worden zeer nauwkeurige servo-aandrijvingen door de leverancier samengesteld. In een zeer klein volume kunnen zo koppels van 0,3 tot 4 Nm gerealiseerd worden, wat o.a. in diverse meetapparaten zijn toepassing vindt. Ook in de lucht- en ruimtevaart worden deze aandrijvingen toegepast wanneer eisen worden gesteld aan een combinatie van eigenschappen als: geringe massa, geringe ruimte, spelingvrij, grote betrouwbaarheid en een lange levensduur.

Werking

De werking van de harmonic drive berust op slechts drie onderdelen, de golfgenerator, de flexibele vertande bus en de binnenvertande ring. Welke van de laatste twee als uitgaande as wordt gebruikt, wordt aan de constructeur overgelaten. Voor het bereiken van toerenreductie wordt de golfgenerator aangedreven. Deze bestaat uit een elliptisch gevormde nok met daaromheen een kogellager met zeer dunne ringen die mak-

kelijk elastisch vervormen. Beide passen in de dunwandige flexibele vertande bus die aan de buitenkant van een vertanding is voorzien en die op zijn beurt weer in de vertanding van de binnenvertande ring past. De binnenvertande ring is een stijve ring, in tegenstelling tot de flexibele vertande bus die elastisch de vorm van de golfgenerator overneemt.

De flexibele vertande bus heeft twee tanden minder dan de binnenvertande ring en is op twee precies tegenover elkaar gelegen lokaties in ingrijping. Dit laatste zorgt voor een overbrenging van het koppel zonder resulterende dwarskrachten. Het merendeel van de tanden is echter niet met elkaar in contact.

De werking valt op te maken uit de bijgaande vier figuren, waarbij de golfgenerator steeds een kwartslag gedraaid is getekend. De binnenvertande ring is met de vaste wereld verbonden, zodat de uitgaande as met de flexibele vertande bus wordt verbonden. Na één omwenteling van de golfgenerator heeft de flexibele vertande bus zich op de vertanding van de binnenvertande ring afgewikkeld en blijft twee tanden achter, zodat de flexibele vertande bus een vertraagde beweging in tegengestelde richting maakt. De grootte van de vertraging wordt bepaald door het aantal tanden $z_{\text{binnenvertande ring}}$ en $z_{\text{flexibele vertande bus}}$ in de binnenvertande ring en de flexibele vertande bus.

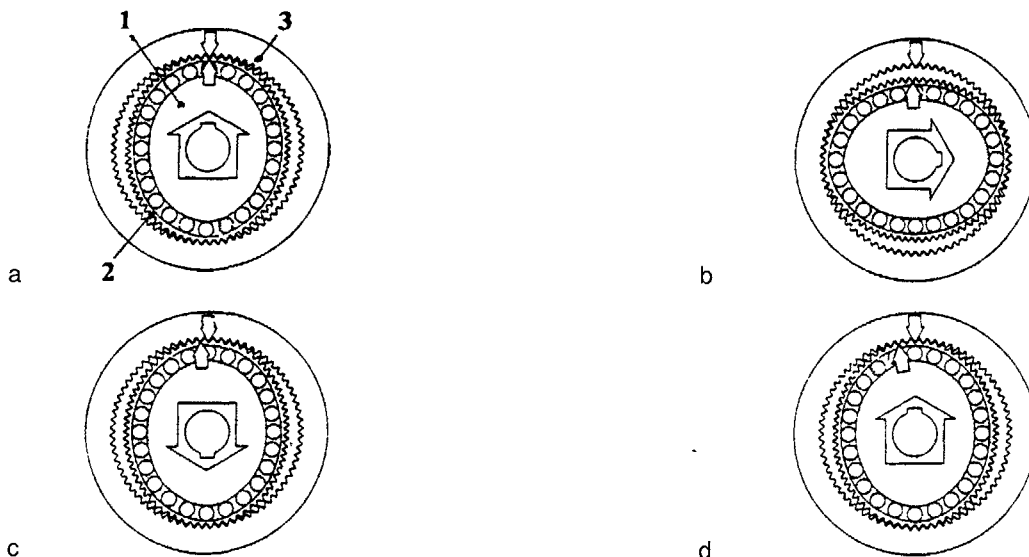
De reductie is nu $(z_{\text{flexibele vertande bus}} - z_{\text{binnenvertande ring}}) /$

$$z_{\text{flexibele vertande bus}} = -2/z_{\text{flexibele vertande bus}}$$

Wanneer de flexibele vertande bus met de vaste wereld wordt verbonden, dan draait de binnenvertande ring dezelfde kant op als de golfgenerator. Omdat de binnenvertande ring meer tanden heeft, loopt de uitgaande as iets langzamer dan in het vorige geval.

De reductie is dan $(z_{\text{binnenvertande ring}} - z_{\text{flexibele vertande bus}}) /$

$$z_{\text{binnenvertande ring}} = 2/(z_{\text{flexibele vertande bus}} + 2)$$



Werkingsprincipe van de harmonic drive.

1: golfgenerator; 2: flexibele vertande ring; 3: binnen vertande ring.

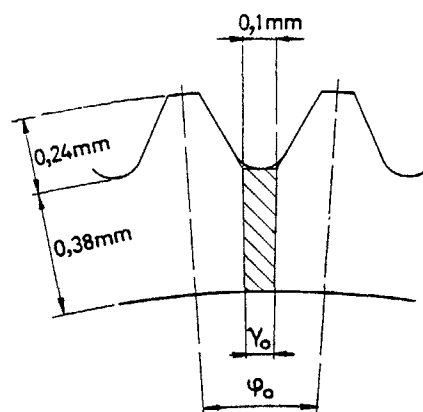
a: beginstand; b: na 90° draaiing van de aandrijving; c: na 180° draaiing; d: na een volle omwenteling.

de binnenvertande ring vast, dan is de vertraging gelijk aan -1 op 110.

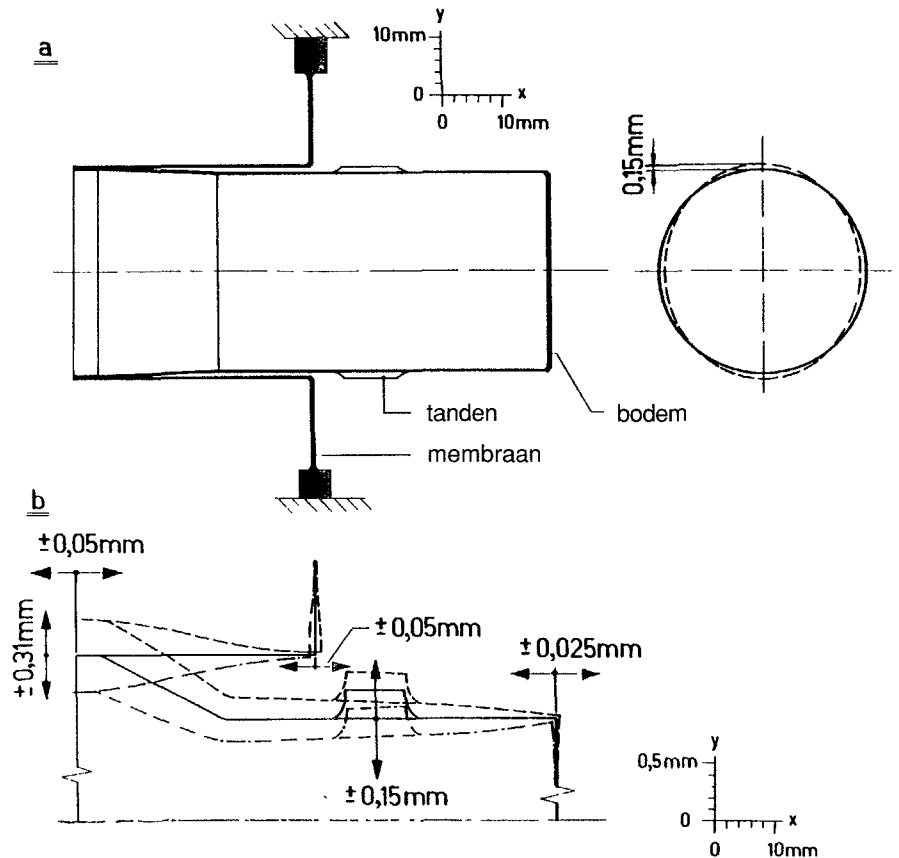
Principe van de draaidoorvoer

Het idee rijpte bij ons om de flexibele vertande bus zodanig te construeren, dat deze als vacuum-"wand" dienst kon doen. De golfgenerator bevindt zich dan in de atmosfeer en de binnenvertande ring in het vacuüm. De eerste stap was een proefbus te maken zoals aangegeven in figuur 2a. De schijf van de golfgenerator had een korte as van 34,2 mm en een lange as van 33,6 mm, zodat slechts een radiale vervorming van de flexibele vertande bus van $\pm 0,15$ mm optrad. De constructie bleek niet te voldoen, omdat punt A in x-richting circa 0,05 mm heen en weer bewoog zolang de bus niet aan de flens vast zat. Na hardsolderen (brazen), wat nodig was om een goede vacuumafdichting te verkrijgen, ontstond een stijve constructie die te weinig vervorming toeliet. Ook bleek de golfgenerator heel moeilijk voorbij de conische overgang in het rechte deel onder de vertanding te schuiven. Dit ging met zodanig grote vervorming van de wand gepaard dat er kans op beschadiging was.

De volgende stap was de stugge ring te vervangen door een membraan, zie figuur 2b. Dit model bleek te werken, maar was toch nog zodanig stijf, dat het inschuiven van de golfgenerator nog veel kracht en overleg vergde.



Figuur 4. Doorsnede van de flexibele vertande bus ter plaatse van de vertanding. Als gevolg van het grote verschil in doorsnede, buigt de flexibele vertande bus alleen ter plaatse van de tandkuil.



Figuur 3. a) De uiteindelijke versie van de flexibele vertande bus b) Vervormingen gemeten aan de flexibele vertande bus tijdens een rotatie van de golfgenerator. De flexibele vertande bus is uit twee delen gemaakt die met een micro-plasma laserlasapparaat aan elkaar zijn gelast.

Uiteindelijk zijn we tot een constructie gekomen die nog meer vervormingsvrijheid aan de flexibele vertande bus toestond, zoals aangegeven in figuur 3a. Aan dit model zijn enige metingen verricht om inzicht te krijgen in de optredende vervormingen (zie figuur 3b) en de dienengevolge optredende materiaalspanningen in de flexibele vertande bus. De wanddikte van het buisvormige deel van de flexibele vertande bus waarin de tanden gesneden zijn was 0,3 mm om de "grote" ($\pm 0,31$ mm) vervormingen in y-richting soepel te kunnen opvangen. De bodem en het membraan waren 0,5 mm dik om de kleinere, resp. $\pm 0,025$ en $\pm 0,05$ mm, verplaatsingen in x-richting soepel en elastisch op te vangen.

Materiaalkeuze

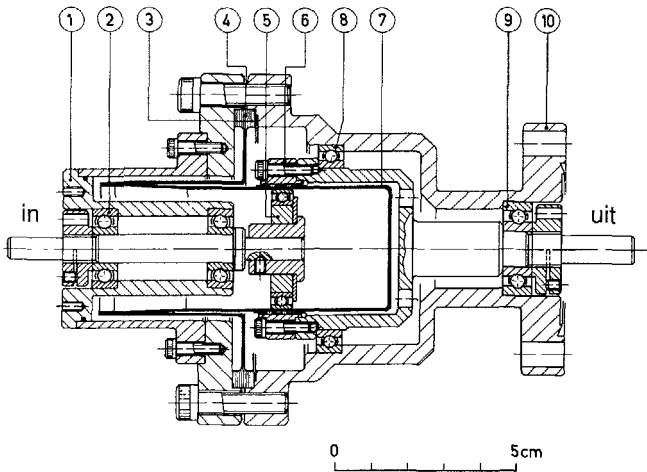
Bekijken we de tanden op de flexibele vertande bus in figuur 4, dan is de doorsnede ter plaatse van de tand veel stijver dan die ter plaatse van de tandkuil. Dit heeft tot gevolg dat de verandering in

de hoek φ_0 , als gevolg van de elliptische vervorming van de flexibele vertande bus, alleen terplaatse van de tandkuil wordt opgenomen.

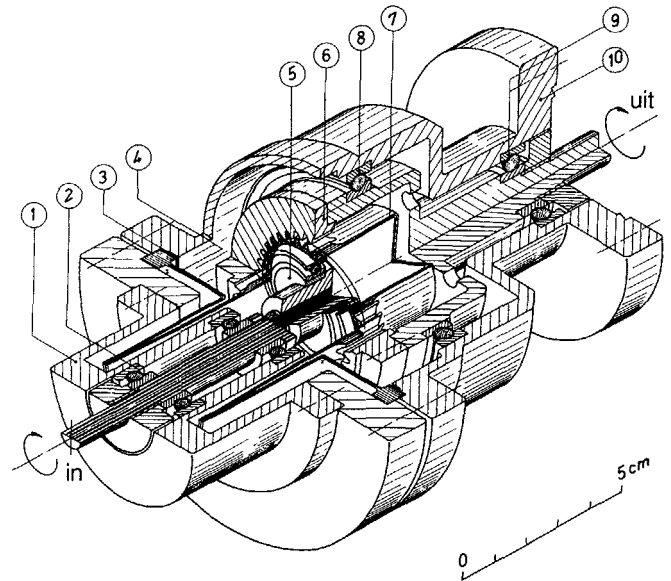
Uitgaande van deze veronderstelling kan de rek berekend worden op 0,00780. Rekening houdend met de buigwisselsterkte en een kerffactor (1,4) voor de vertanding levert dit een buigwisselspanning van 240 N/mm². Loodrecht op deze doorsnede is eveneens een buigwisselspanning (50 N/mm²) aanwezig als gevolg van buiging van de tand in lengterichting. Beide spanningen vectorieel samengevoegd geven als resultaat dat het materiaal tenminste een vermoeiings-buigwisselsterkte van 250 N/mm² moet hebben.

Zowel voor de flexibele vertande bus als voor het membraan hebben we gekozen voor diepgetrokken en gegloeid roestvaststaal AISI-304L (Werkstoffnummer 1.4306).

Harmonic drive als UHV-draaidoervoer



Figuur 5. De complete draaidoervoer.
1) lagerbus, 2) kogellager, 3) goudpakking, 4) membraan, 5) golfgenerator, 6) binnenvertande ring, 7) flexibele vertande bus, 8,9) UHV-kogellager 10) conflat flens $2\frac{3}{4}$ ".



Figuur 6. De complete draaidoervoer in perspectief getekend.

Constructieve uitvoering

In de figuren 5 en 6 is duidelijk de constructie van de doorvoer zichtbaar. De enig mogelijke verbindingen waar lekkage naar de UHV-ruimte zou kunnen optreden zijn de goudpakking (pos 3) en de lasnaad tussen de membraan (pos 4) en de flexibele vertande bus (pos 7).

De golfgenerator (pos 5) en de binnenvertande ring (pos 6) zijn afkomstig uit een commercieel verkrijgbare harmonic drive. De lagers (pos 8 en 9) in het UHV worden gesmeerd met molybdeensulfide en de tanden van de flexibele vertande bus en binnenvertande ring met glijlak (Dow Corning Molycote 321 R). Het lager (pos 2) en het lager van de golfgenerator worden gesmeerd met siliconenvet (Dow Corning 41 grease)

Als resultaat van de gekozen materialen en smeermiddelen is de doorvoer uitstookbaar tot een temperatuur van 250°C , zonder dat onderdelen gedemonteerd hoeven te worden. Dit zogenaamde uitstoken gebeurt voor of tijdens de ingebruikname van een vacuümopstelling. Door de hogere temperatuur is er een grotere bewegelijkheid van de gasmoleculen, zodat sneller de vereiste lage vacuümdruk bereikt wordt

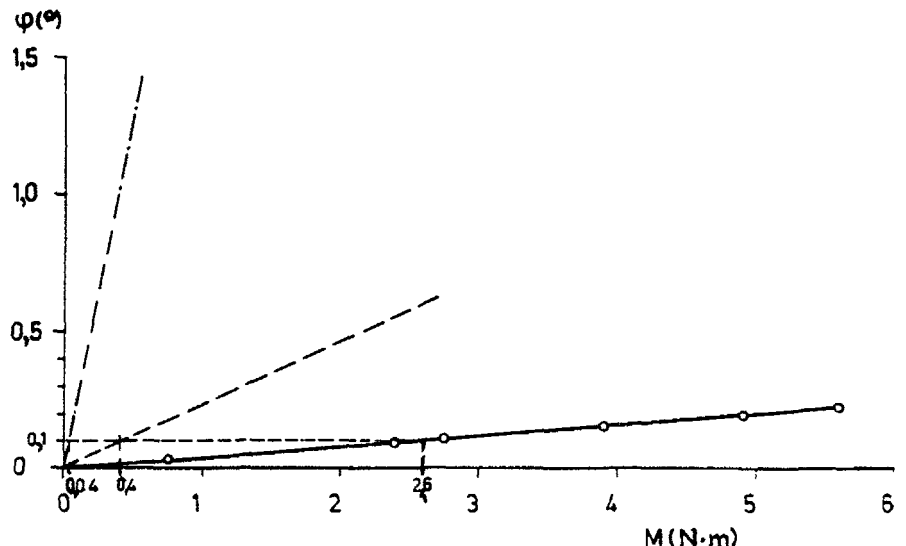
Beproevingresultaten**Duurproef**

De doorvoer is op een draaibank bij verschillende condities aan een duurproef van telkens 500.000 omwentelingen onder-

worpen. Na beproeving in de lucht bij 255, 425 en 700 omw/min aan de golfgenerator werd de doorvoer beproefd bij 300 omw/min bij een druk van $7 \cdot 10^{-7}$ Pa. Na totaal $2 \cdot 10^6$ omwentelingen, hetgeen overeenkomt met 4 miljoen lastwisselingen kon met een heliumlektester (helium is het kleinste molecuul) geen lek worden aangetoond. Daaruit kan geconcludeerd worden dat geen onzichtbare haarscheuren zijn ontstaan als gevolg van de vermoeingsbelasting

Stijfheid

De stijfheid tussen de in- en uitgaande as is gemeten door de ingaande as te blokkeren en de uitgaande as te belasten met koppels van verschillende grootte. De stijfheid is 2500 Ncm° . De resultaten zijn uitgezet in figuur 7 samen met de gegevens van twee met een metaalbalg uitgeruste draaidoervoeren. Speling was niet waarneembaar bij het omkeren van de belastingsrichting, zodat deze kleiner is dan $0,05^{\circ}$



Figuur 7. De stijfheid van de behandelde draaidoervoer (de getrokken lijn) in vergelijking met twee met een metaalbalg uitgevoerde draaidoervoeren.

Wrijvingskoppel

Omdat de constructie niet zelfremmend is, maar wel wrijving heeft, is het gedrag bij stilstand nagegaan. Wanneer we de uitgaande as met een koppel van 500 Ncm belasten, dan wordt evenwicht (= stilstand) bereikt bij een koppel van 3,3 Ncm aan de ingaande as. Uit berekening volgt dat dit

koppel bij een reductie van 1 op 111 gelijk aan 4,5 Ncm zou moeten zijn. Het wrijvingsmoment wordt daarmee bepaald op 1,2 Ncm. Voor de motor betekent dit dat voor het in beweging brengen tenminste 5,7 Ncm (4,5 + 1,2) nodig is om op gang te komen, terwijl het houdkoppel tenminste 3,3 Ncm zou moeten zijn.

Deze draaidoervoer is eerder gepubliceerd in.

- Nuclear Instruments and Methods 137 (1976) 435-439
- Nederlands tijdschrift voor Vacuumtechniek 14 (1976) 60-62

Actueel

Nieuw project van Nederlands Instituut voor Lastechniek (NIL)

Verbinden van "technische" kunststoffen (lassen, lijmen, mechanisch verbinden)

In de Nederlandse kunststof producerende en verwerkende industrie is er een grote belangstelling voor het verbinden van kunststoffen.

Er is een fors groeiende afzetmarkt voor kunststoffen en het is voor de verwerker noodzakelijk om snel en betrouwbaar verbindingen in kunststofproducten te kunnen maken. Van "conventionele" kunststoffen is inmiddels in redelijke mate bekend hoe deze te verbinden zijn. De laatste jaren zijn er echter vele nieuwe typen kunststof geïntroduceerd. Daaronder nemen de zogenoemde "technische" kunststoffen een belangrijke plaats in.

Deze kunststoffen zijn inmiddels de ontwikkelingsfase ontgroeid en de markt is in een stroomversnelling gekomen. Het aantal toepassingen neemt snel toe en er worden groeipercentages van 10-15% per jaar genoemd.

De groep "technische" kunststoffen is nog niet nauw omschreven. In dit project worden onder "technische" kunststoffen verstaan de hoogwaardige thermoplasten met een hoge treksterkte (>50 MPa, 1 MPa = 1N/mm²), hoge slagsterkte en veelal hoge gebruikstemperatuur (>150°C), aangevuld met de kunststoffen waar het "technische" bij de toepassing tot uitdrukking komt zoals: ABS, PC, PA en glasmatversterkt PP. Het gaat dan onder andere om toepassingen in de automobiel-, vliegtuig-, elektrotechnische- en medische industrie.

De doelstellingen van het project zijn:

- Het verbeteren van de proces- en kwaliteitsbeheersing bij het lassen van "technische" kunststoffen.
- Het inventariseren/ontwikkelen van betrouwbare destructieve resp niet-destructieve inspectiemethoden om de kwaliteit van lasverbindingen te beoordelen.
- Het verbeteren van voorbehandelingsmethoden voor de (duurzame) hechting van lijmen aan "technische" kunststoffen.
- Het vaststellen van geschikte lijmsorten voor het "verlijmen" van "technische" kunststoffen.
- Het inventariseren van de bestaande, in de praktijk toegepaste mechanische verbindingstechnieken.

Het programma richt zich in ieder geval op de volgende materialen:

- PP (glasmat)
- ABS
- PA6, PA6 6 en PA4.6
- PPO (Noryl)
- PC
- PET
- PEI
- PEEK

De invloed van de wijze van fabricage (spuitgieten, extruderen, persen) zal eveneens in het onderzoek worden betrokken. Daar waar relevant zal aan de invloed van de vulling (bijvoorbeeld glas of koolstofvezels) aandacht worden besteed.

Het lasonderzoek richt zich op de volgende technieken:

- ultrasoonlassen,
- wrijvingslassen,
- inductielassen,
- spiegellassen,
- lassen met elektrische weerstandsdraad.

Het lijmonderzoek richt zich op het vinden van geschikte lijmen resp geschikte

voorbehandelingsmethoden (mechanisch, plasma, corona, UV-ozon, primer). Bij het lijmonderzoek wordt uitgegaan van een aantal veel gebruikte lijmtypen (acrylaat-, cyanoacrylaat-, epoxy-, polyurethaan-, siliconen- en smeltlijmen), met een accent op snelle lijmen. De duurzaamheid van de lijmverbinding vormt een belangrijk onderzoeksaspect.

Voor wat betreft de mechanische verbindingstechnieken beperkt het onderzoek zich tot een literatuurinventarisatie (studie)

De resultaten van het onderzoek zullen richtlijnen geven, waarmee de gebruiker zelf op de meest efficiënte wijze kan nagaan welke de optimale las- en lijmparameters zijn die voor het verbinden van de gekozen "technische" kunststof een optimaal resultaat geven.

Het project moet leiden tot uitbreiding in de toepassing van technische kunststoffen. Het verbeteren van de proces- en kwaliteitsbeheersing zal leiden tot het verminderen of zelfs het voorkomen van onnodige reparaties en daardoor een gunstige uitwerking hebben op de produktkosten.

De aan het project deelnemende bedrijven en instellingen zijn: AKZO, Branson, CPM-TNO, DAF-Trucks, Dow Chemical, DSM, Dienst voor het Stoomwezen, Ericsson Telecommunicatie, Fokker, GE-Plastics, Helvoet Rubber & Kunststoffen, Holec, KEMA, KMF, Nedap, NLR, Philips, Polynorm, Shell/Billiton, Simson.

Nadere informatie betreffende voorwaarden voor deelname aan het project kan worden verstrekt door het NIL-bureau. Contactpersoon: ir. G.H.G. Vaessen, tel 055-493 642.