

## DE MECHANISCHE EN CHEMISCHE ASPECTEN VAN GLASVERBINDINGEN

Marcus P. Borom  
Metallurgy and Ceramics Laboratory  
General Electric Co.

Met toestemming overgenomen uit *The Glass Industry*, maart 1978

### Inleiding

Elektronenbuizen, verlichtingsartikelen, omhulsels voor halfgeleiders en veel wetenschappelijk glaswerk hebben gemeen, dat zij een omhulsel bezitten waarin zich een atmosfeer bevindt die nodig is voor een doelmatige werking van de onderdelen, die zich daarin bevinden. Of deze atmosfeer er een is met hoogvacuum (in het geval van elektronenbuizen), dan wel een met een hoge druk (zoals bij ontladingslampen of fotoflitslampjes), een gemeenschappelijke eis is, dat het omhulsel wordt voorzien van elektrische aansluitingen die (hermetisch) worden afgedicht.

Het omhulsel zelf kan samengesteld zijn of uit glas, dan wel uit een kristallijne keramiek, of uit een metaal, afhankelijk van het specifieke gebruik van het produkt. Daarom kunnen deze afdichtingen nodig zijn tussen ongelijksoortige glazen, glazen en keramische materialen, glazen en metalen of metalen en keramische materialen. Behalve de laatste zullen alle in dit artikel worden besproken.

De strekking van dit artikel is allereerst het verschaffen van inzicht in de fysische parameters, die aanleiding geven tot spanningen in de glasverbinding en vervolgens het invoeren van de chemische aspecten verbonden met de ontwikkeling van de hechting over de lasvlakken. Deze informatie kan bijvoorbeeld in aanzienlijke mate de analyse vergemakkelijken van mislukkingen, die het gevolg kunnen zijn van geringe en vaak over het hoofd geziene afwijkingen in de standaard bewerkingsmethode. Met een wetenschappelijke basis kan de lezer beter gebruik maken van bestaande tabellen, recepten en standaard methoden bij de behandeling van nieuwe materialen of bij de ontwikkeling van nieuwe procédés.

Het doel van dit artikel is niet de lezer de details bij te brengen van de technologie van de glasverbindingen. Voor informatie omtrent het maken van specifieke verbindingen of specifieke lasmaterialen wordt de lezer verwezen naar de boeken van Barr en Anhorn<sup>1</sup>, Partridge<sup>2</sup> en Kohl<sup>3</sup>.

Mechanische aspecten van het lassen

De geaardheid van glas.

Er ontwikkelen zich permanente spanningen in glaslassen als zij worden afgekoeld vanaf de lastemperatuur. Om de ontwikkeling van permanente spanningen te kunnen begrijpen is het nodig om de geaardheid van glas na te gaan. Allereerst: is glas werkelijk uniek? Zijn zijn eigenschappen zo verschillend van die van metalen of kristallijne keramieken dat een speciale behandeling vereist is?

Volgens de regels van Zachariasen stelt men, dat glazen ongeordende ketenstructuren bezitten, maar dit is nauwelijks een afdoende definitie. Andere parameters, zoals samenstelling, optische of thermische eigenschappen schieten eveneens tekort als definitie.

Glassamenstellingen worden zowel in organische als anorganische systemen aangetroffen. Gewone glasvormers omvatten: in oxydesystemen de silicaten, boraten en fosfaten, en in niet-oxydesystemen (chalcogene = uit erts afkomstige seleniden en telluriden). Organische glazen omvatten polymeren zoals polymethylmethacrylaat (= perspex, enz.) en zelfs rubber (indien tot een voldoende lage temperatuur afgekoeld).

Optische eigenschappen strekken zich uit van transparant tot ondoorzichtig.

Thermische eigenschappen, zoals verwekingspunt, ontspanningstemperaturen en uitzettingscoëfficiënten verschillen in hoge mate van glas tot glas. De enige thermische eigenschap echter, die alle glassamenstellingen gemeen hebben en die dient als een basis voor definitie van glas is de viscositeit. Zoals gedefinieerd door Morey: 'Glas is een materiaal in een toestand analoog aan en continu met de vloeibare fase, maar dat, ten gevolge van afkoeling uit een vloeibare toestand, wordt gekenmerkt door zulk een hoge graad van viscositeit, dat het voor alle praktische doeleinden kan worden beschouwd als een vaste stof.'

Morey's definitie van glas houdt de eis in van een procédé: dat van afkoeling uit een vloeibare toestand. De vervaardiging van glasachtige materialen met andere middelen, zoals het neerslaan van chemische dampen, heeft dit voorbehoud van een 'procédé minder strikt gemaakt. Morey's definitie kan niettemin worden verduidelijkt door de uitzettingskarakteristiek van een kristallijne vaste stof met een glas van dezelfde samenstelling te vergelijken (Fig. 1).

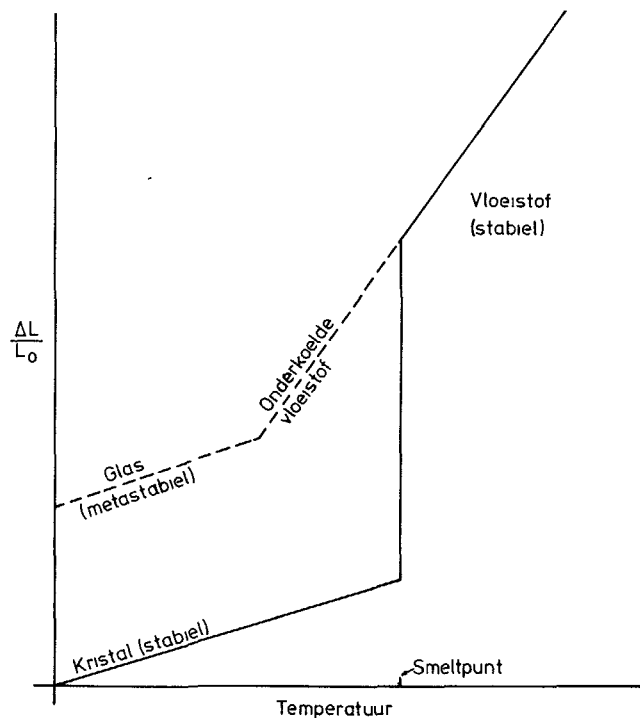


Fig. 1 - Verhouding tussen de thermodynamisch stabiele kristallijne en vloeibare toestanden en de metastabiele toestanden van de onderkoelde vloeistof en het glas, geschetst m.b.v. de waarden van de warmte-uitzetting

Als een thermodynamisch stabiele vaste stof wordt verhit, zet deze uit ten gevolge van de toenemende roostertrillingen, totdat het smeltpunt wordt bereikt en de stof in de vloeibare toestand overgaat. De overgang van vast naar vloeibaar gaat vergezeld van een plotselinge verandering in viscositeit en een uitzetting uitsluitend ten gevolge van een structurele herschikking. Als de verhitting wordt voortgezet zal de vloeistof uitzetten in een grotere mate dan de vaste stof door de combinatie van zowel een voortgezette toename van de amplitude van interatomaire trillingen als de bijkomende structurele herschikkingen in de vloeistof. Als een materiaal in staat is om een glas te vormen dan zal het volgende plaatsvinden. Bij koeling zal de vloeistof het thermodynamische smeltpunt passeren zonder over te gaan in een kristallijne vaste stof.

Het materiaal is nu een metastabiele of onderkoelde vloeistof en ondergaat alleen geleidelijke veranderingen in viscositeit bij temperatuurveranderingen. Bij afkoeling zal de vloeistof krimpen door zowel een verandering in de interatomaire trilling als door een structurele herschikking.

In een glasvormend materiaal brengt de structurele herschikking een dichtere configuratie van de atomen tot stand. De structurele herschikking, in tegenstelling tot het krimpen ten gevolge van veranderingen in roostertrillingen, brengt viskeuze vloeï met zich mee en het maken en verbreken van chemische bindingen in de vloeistof. De mate waarin structurele veranderingen optreden, neemt af met de toename van de viscositeit, of, met andere woorden, de snelheid van verandering neemt af bij afnemende temperatuur.

Bij langzame afkoeling zal een temperatuur worden bereikt beneden welke geen verdere verandering in de vloeistofstructuur meer kan optreden binnen een 'redelijke' tijd. De temperatuur waarbij de herschikking van de ketens in de vloeistofstructuur ophoudt staat bekend als het transformatiepunt of de 'fictieve temperatuur' en vindt plaats bij een viscositeit van ongeveer  $10^{14}$  poise.

De transformatietemperatuur van het glas is te onderkennen door een abrupte verandering in helling van de theoretische uitzettingskromme van Fig. 1. Doordat de omzetting van een beweeglijke vloeibare structuur in een onbeweeglijke glasstructuur een herschikking inhoudt, die een viskeuze vloeï vereist, is deze ook tijdsafhankelijk. Bijgevolg zal een snellere koeling resulteren in een hogere transformatietemperatuur. Beneden de transformatietemperatuur  $T_g$  krimpt het materiaal – nu een glas – verder uitsluitend door de afname van de roostertrillingen en blijft de structuur die past bij de transformatietemperatuur behouden voor alle lagere temperaturen.

De details van een dilatometerkromme, van belang voor glaslassen, zijn te zien in Fig. 2, waarin het lage ontspanningspunt, het transformatiepunt en het hoge ontspanningspunt zijn geschetst met respectievelijk de symbolen  $T_s$ ,  $T_g$  en  $T_a$ . De viscositeiten behorende bij deze temperaturen zijn voor alle glazen resp.  $10^{14,6}$ , ca.  $10^{14}$  en  $10^{13,4}$  poise.

Belangrijke punten m.b.t. lassen zijn: (1) boven  $T_a$  is het materiaal plastisch en vervormt in korte tijd waardoor iedere aanwezige spanning opgeheven wordt; (2) beneden  $T_s$  is het glas vast en kan geen spanning weggenomen worden door inwendige vloeï; en (3) het glas hecht zich aan het vaste materiaal waaraan het wordt gelast bij een temperatuur, die in het algemeen ligt tussen  $T_g$  en  $T_a$ .

Nadat het glas verstart, kan er geen opheffing van inwendige spanningen meer plaatsvinden door inwendige vloeï. Spanningen, veroorzaakt door verschillen in U.C. van de aaneengelaste materialen, worden permanent. Voor praktische lasbewerkingen kan het verstartingspunt aangenomen worden te liggen bij  $T_a$ . Hoewel enige opheffing van spanningen kan plaatsvinden tussen  $T_a$  en  $T_g$ , zijn de spanningen veroorzaakt door verschillen in U.C. in dit gebied in het algemeen klein en is de tijd nodig voor de opheffing daarvan onaantvaardbaar lang.

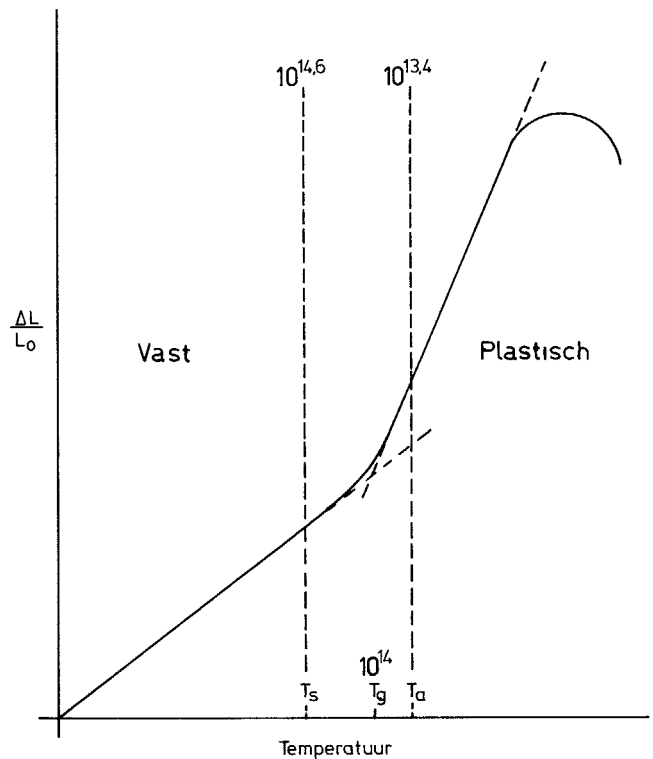


Fig. 2 – Schematische dilatometerkromme voor een glas, waarin zijn aangegeven het spanningspunt  $T_s$ , het temperpunt  $T_a$  en de gebieden, waarin het materiaal geacht kan worden plastisch of vast te zijn.

### Verband tussen uitzettingseigenschappen in de ontwikkeling van spanningen in glas-glas- en glas-metaalverbindingen.

De spanningen die optreden bij het maken van een glas-glas-, glas-keramiek- of glas-metaalverbinding kunnen verdeeld worden in twee categorieën: tijdelijke en blijvende.

#### 1. Tijdelijke spanningen.

Deze worden veroorzaakt door het optreden van temperatuurgradiënten in een produkt ten gevolge van plotselinge veranderingen van de omgevingstemperatuur. De materiaalparameters die het vermogen bepalen van het materiaal om een tijdelijke thermische schok te overleven zijn vooral sterkte en duktiliteit, warmtegeleidingsvermogen en uitzettingscoëfficiënt.<sup>6</sup>

De mechanische sterkte van glas is gering. Deze geringe sterkte is niet te wijten aan een lage theoretische sterkte, integendeel, deze is in de orde van honderdduizenden  $kg/cm^2$ , maar spruiten voort uit het broze karakter van gala en zijn gevoeligheid voor oppervlaktebeschadigingen. Hierdoor wordt de praktische sterkte verlaagd tot een waarde van enkele honderden  $kg/cm^2$ . Voor de voorliggende bespreking is het voldoende om vast te stellen, dat glas bros is, wezenlijk zwak en dat het altijd bezwijkt onder trekspanning.

Hoge uitzettingscoëfficiënten kunnen rampzalige tijdelijke spanningen veroorzaken. De lage uitzettingscoëfficiënt van kwartsglas verleent aan dit materiaal zijn uitmuntende weerstand tegen warmteschokken. Warmtegeleidingsvermogen (of meer toepasselijk, voor tijdelijke condities, de warmtevereffeningscoëfficiënt is het vermogen van een materiaal om warmte op te nemen en warmtegradiënten te elimineren. Nogmaals, glas is slecht in dit opzicht, in het bijzonder in vergelijking met metalen.

Een positieve zijde is, dat tijdelijke spanningen worden opgeheven door het wegnemen van de temperatuurgradiënt en tot een minimum kunnen worden beperkt door een beheerste verhitting en koeling van het produkt. Hoewel voorbijgaande spanningen

zo ernstig kunnen worden dat breuk optreedt, beschouwt men hen van sekundair belang bij het maken van een verbinding doordat zij zowel sterk beperkt als opgeheven kunnen worden.

**2. Permanente spanningen in een glas van gelijkmatige samenstelling.**

Deze kunnen zijn veroorzaakt tijdens de afkoeling, maar kunnen door ontspanning, worden weggenomen. Thermisch ingeleide spanningen in glas kunnen voortkomen uit een combinatie van mechanismen, afhankelijk van de methode volgens welke het glas afgekoeld is van boven het hoge ontspanningspunt.

Wanneer een glas afgekoeld wordt met een normale snelheid van een temperatuur  $T_0$ , die voldoende boven het ontspanningspunt ligt, waardoor viskeuze vloeï kan optreden om de tijdelijke thermische spanningen weg te nemen, kan men een temperatuurgradiënt  $\Delta T$  realiseren, die geen spanning in het produkt te weeg zal brengen. Een structurele gradiënt die verbonden is met de temperatuurgradiënt zal echter bestaan in het glas, waarbij aan het oppervlak gemiddeld een kleinere atoomafstand zal voorkomen dan in het neutrale (midden) vlak. Als het materiaal de glas transformatietemperatuur  $T_g$  passeert, verstart het en kan er geen verdere viskeuze vloeï optreden om de structuurveranderingen op te vangen. Elastische spanningen kunnen dan blijven bestaan. Opheffing van de thermische gradiënt bij kamertemperatuur geeft aanleiding tot de vorming van drukspanningen in het glas aan het oppervlak en van trekspanningen in het binnenste.

De temperaturen waarbij spanningen tot ontwikkeling komen kunnen worden begrepen door te verwijzen naar de hypothetische uitzettingskrommen van Fig. 3(a). Beschouw eerst de beide uitersten, voorgesteld door de krommen 1 en 3 van figuur 3(a). Als de onderkoelde vloeïstof het punt  $T_g$  lineair volgens kromme 1 zou passeren zou zich geen spanning in het glas ontwikkelen totdat de thermische gradiënt  $\Delta T$  begint te verdwijnen bij kamertemperatuur. De resulterende elastische rek is gelijk aan de lijn DE in Fig. 3(a), (d.i.  $\epsilon = \alpha_1 \cdot \Delta T$ ).

Als de onderkoelde vloeïstof overgaat in een glas met een uitzettingscoëfficiënt nul (zie kromme 3 van Fig. 3(a) begint zich spanning te ontwikkelen zodra het oppervlak  $T_g$  passeert, omdat het starre oppervlak nu het volume bepaalt, dat alle krimpverschillen tussen de onderkoelde vloeïstof en het glas moet opvangen. Wanneer de middenzone de temperatuur  $T_g$  bereikt zal het systeem zijn maximum spanningsnivo bereikt hebben, overeenkomend met de rek  $AC = DE$  (d.i.  $\epsilon = \alpha_1 \cdot \Delta T$ ). Opheffing van de warmtegradiënt voor het geval van kromme 3 veroorzaakt geen verdere spanning doordat de glasstructuur beneden  $T_g$  zowel uniform als thermisch onveranderlijk is.

De feitelijke samentrekking van een glas volgt een weg aangegeven door kromme 2 van Fig. 3(a). Langs kromme 2 begint een elastische spanning zich te ontwikkelen zodra de oppervlakte-temperatuur daalt beneden  $T_g$  t.g.v. krimpverschillen. Deze spanning bouwt zich op totdat het midden vlak de temperatuur  $T_g$  bereikt, op welk punt de elastische rek in het systeem gelijk is aan de lijn AB van Fig. 3(a) (d.i.  $\epsilon = (\alpha_1 - \alpha_2) \cdot \Delta T$ ). De spanning in het systeem zal konstant blijven tot dat het oppervlak de eindtemperatuur bereikt. Het wegvallen van de thermische gradiënt wekt een ekstra spanning op,  $FG = BC$  (d.i.  $\epsilon = \alpha_2 \cdot \Delta T$ ), zodat de totale spanning, gelijk is aan die, welke verbonden is met koeling langs kromme 1.

De ontwikkeling van spanning in het systeem voor elk van de kontraktiekrommen die worden besproken, wordt schematisch getoond in Fig. 3(b), voor het geval van een konstante koelsnelheid vanuit een spanningsloze toestand met een aanvankelijke thermische gradiënt  $\Delta T$ . Het blijkt, dat de totale spanning enkel afhankelijk van de uitzettingseigenschappen van de onderkoelde vloeïstof en de grootte van  $\Delta T$  in de spanningsloze toestand. De vorm van de uitzettingskromme beïnvloedt echter wel het punt waar de spanning zich bij koeling begint te ontwikkelen.

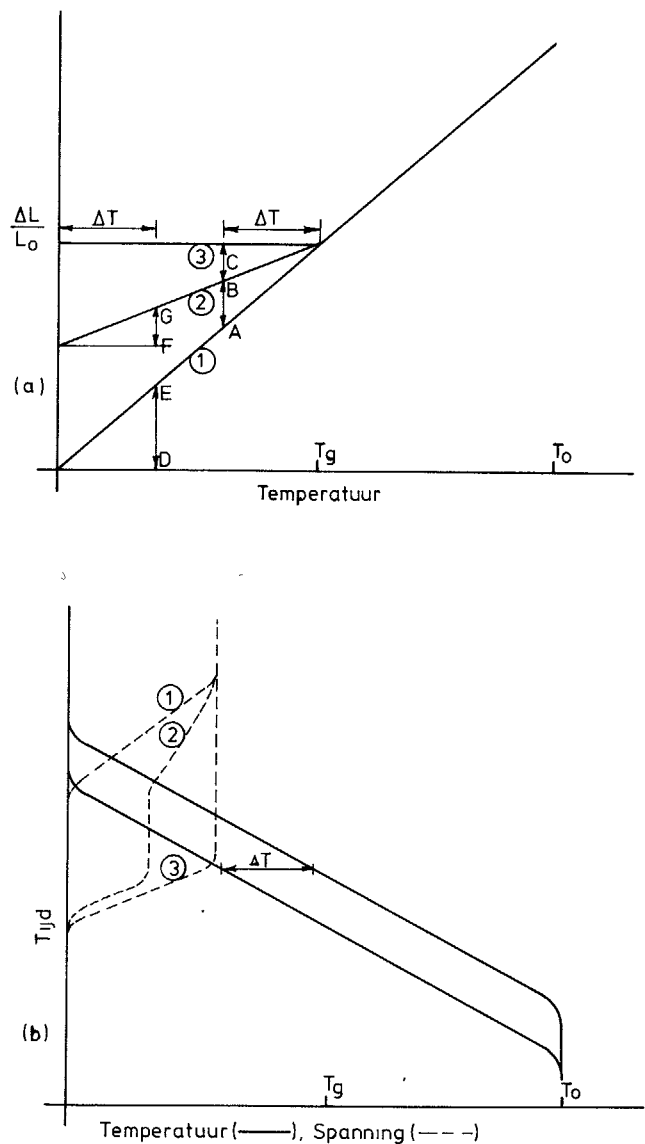


Fig. 3 - (a) Hypothetische kontraktiekrommen voor drie verschillende glazen om de ontwikkeling aan te geven van permanente spanning door het opwekken van een thermische gradiënt boven  $T_g$  zonder spanning en koeling tot kamertemperatuur. (b) Krommen die de snelheid van koeling en de ontwikkeling aangeven van permanente spanning in samenhang met de kontraktiekrommen van Fig. 3 (a).

Naast het hierboven besprokene zullen spanningen gaan optreden in een glasprodukt dat wordt gekoeld vanuit een punt boven de ontspanningstemperatuur indien de snelheid van afkoeling ongelijkmatig is. Als het oppervlak het glastransformatiegebied sneller passeert dan het gehele voorwerp dan zal het oppervlak een hogere  $T_g$  bezitten en zal een geringere totale kontraktie ondergaan dan het gehele voorwerp. Hierdoor treden drukspanningen op in het oppervlak, terwijl het binnenste trekspanningen ervaart. Zij vergroten dus de spanningen die voortkomen uit het wegvallen van de thermische gradiënten.

Een snel 'afschrikken' kan daardoor in het produkt een gebied van onderling verschillende overgangstemperaturen in het glas doen ontstaan, of m.a.w. een verscheidenheid van glasstructuren, waarvan elk een verschillend bedrag aan kontraktie ondergaat.

De ontwikkeling van spanningen in een 'afgeschrikt' glassysteem van uniforme samenstelling door het doen ontstaan van een variabele structuur is uitgebeeld in fig. 4. Gardon<sup>8</sup> en Gardon en Narayanaswamy<sup>9</sup> geven gedetailleerde beschouwingen over spanningen, die worden opgewekt in glazen door 'afschrikken'. Permanente spanningen in glas bij omgevingstemperatuur, die ontstaan door 'afschrikmethoden' kunnen worden opgeheven door ontlaten. In het ontlaatproces wordt het glazen artikel zolang op de hoge ontspanningstemperatuur gehouden totdat de spanningsvrije toestand bereikt is zonder thermische gradiënt. Het produkt wordt daarna langzaam afgekoeld door het transformatiegebied om een ongelijkmatige afkoeling, die een gradiënt in  $T_g$  zou veroorzaken, te voorkomen, en tevens het optreden van een grote thermische gradiënt te verhinderen in een temperatuurgebied waar vloeï kan optreden.

Fig. 3 en 4 verduidelijken ook de vuistregel dat: 'het glas dat het laatste afkoelt onder trekspanning staat'. Vlakglas, dat aan beide zijden wordt afgeschrikt door een luchtstroom of een oliebad koelt het laatst af in het midden. Het resultaat is drukspanningen aan het oppervlak en trekspanningen binnenin. Anderzijds koelt buismateriaal in het algemeen het eerste af aan de buitenzijde, waardoor drukspanningen optreden aan de buitendiameter en trekspanningen aan de binnendiameter.

Veel glasverbindingen zijn buisvormig. Laten wij nagaan in hoeverre de gebruikelijke praktijk van het 'koelen in de vlam van zulk een verbinding is aan te raden, voordat deze beneden de ontspanningstemperatuur wordt gebracht. Als het 'koelen in de vlam' niet wordt toegepast moet de verbinding weer worden verhit (aannemende dat die het koelproces heeft overleefd) om de permanente spanningen, drukspanning aan de buitenzijde en trekspanning aan de binnenzijde, op te heffen. De thermische gradiënt, die bij herverhitten optreedt, met de hoogste temperatuur aan de buitenzijde, heeft tot gevolg, dat beide spanningen worden vergroot, waarbij de trekspanning aan de binnenzijde gemakkelijk de technologische breeksterkte van het glas kan overschrijden.

### 3. De kontraktiecoëfficiënt en permanente spanningen – Uitgebalanceerde verbindingen.

Meer verwant aan de praktijk van de glasverbindingen zijn echter de permanente spanningen die ontstaan bij het lassen van ongelijksoortige glazen, glas-metaal- of glas-keramiekverbindingen. Permanente spanningen vormen een eigenschap die eigen is aan glas-glas, glas-metaal- en glas-keramiek-verbindingen en kunnen niet worden opgeheven door het wegnemen van temperatuurgradiënten of andere tijd-afhankelijke veranderingen. Het warmtevereffeningsvermogen van de diverse materialen dat belangrijk is bij de ontwikkeling van voorbijgaande spanningen, speelt hier geen rol, omdat permanente spanningen bestaan in afwezigheid van een thermische gradiënt. De in het oog springende parameters zijn de elasticiteitsmodulen, de poissonconstante, de dikteverhouding van de twee materialen en het verschil tussen de uitzettingscoëfficiënten en ook tussen de lastemperatuur en de bewerkingstemperatuur.<sup>10, 11</sup>

Voor een gedetailleerde bespreking van de ontwikkeling, de berekening en meting van permanente spanningen in cilindrische glas-draadverbindingen wordt de lezer verwezen naar de klassieke inleiding van Hull en Burger<sup>12</sup>, of voor een meer algemene behandeling naar het boek 'Technical Glasses' door Volf.<sup>13</sup>

Voor het merendeel kunnen de uitzetting en inkrimping van metalen en kristallijne keramische materialen worden beschouwd als een lineaire funktie van de temperatuur en worden gedefinieerd door een enkele uitzettingscoëfficiënt (aannemende dat er geen fase-omzettingen optreden in het beschouwde temperatuurinterval). Fig. 2 toont echter aan, dat glas niet op een lineaire wijze uitzet en niet kan worden gedefinieerd door een enkele coëfficiënt. Voor lasdoeleinden kan worden aangehouden dat glas verstart even onder de ontspanningstemperatuur.

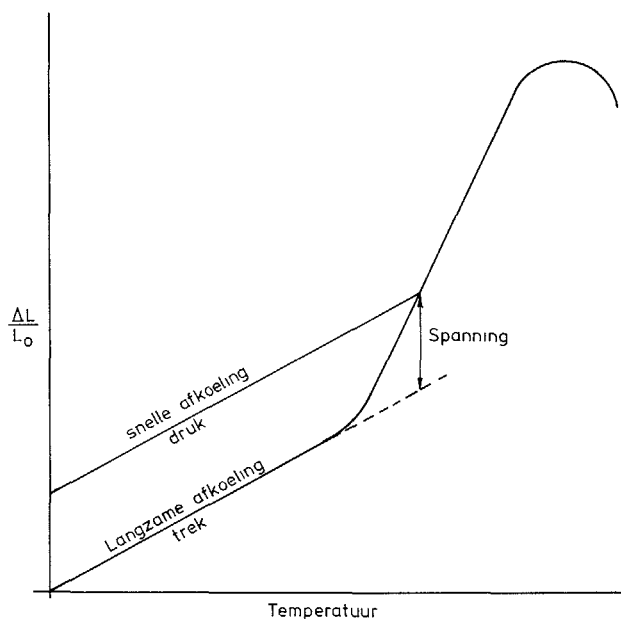


Fig. 4 – Schematische dilatometerkromme die de ontwikkeling van spanning in een glas met een uniforme samenstelling aangeeft ten gevolge van ongelijke koelsnelheden.

Ten gevolge daarvan is de feitelijke kontraktie die optreedt in het glasgedeelte van de glasmetaalverbinding hoger dan die, voorspeld door de lineaire uitzettingscoëfficiënt, voor temperaturen beneden het ontspanningspunt. De gehele kontraktiekromme van het verstarringspunt tot kamertemperatuur moet daarom in ogenschouw worden genomen bij de bepaling van het resulterende spanningsnivo in de las.

De feitelijke spanning die zal optreden in de las beneden de verstarringstemperatuur zal niet alleen afhangen van het verschil in krimp en de elastische constanten van de materialen, maar ook van de geometrie van de las. Gedetailleerde uitdrukkingen voor de berekening van de driedimensionale spanningen in buisvormige lassen<sup>14</sup>, kompressielassen<sup>11, 15</sup>, glasovergangen of stomplassen<sup>16, 17</sup> komen voor in de literatuur. Hoewel de spanningsberekeningen verschillen naar gelang de geometrie, kan men een laskombinatie aanmerken als bevredigend indien de uitzettingskrommen van het glas en het metaal niet meer verschillen dan 100 tot 500 ppm bij het verstarringspunt van het glas. De basis voor deze laatste regel is de wet van Hooke, die de betrekking aangeeft tussen de spanning  $\sigma$  en de rek  $\epsilon$  in het systeem door de elasticiteitsmodulus  $E$  en de poissonconstante  $\mu$ .

In het geval van stompe lassen van buisglas geeft Rawson<sup>16</sup> als een vereenvoudigde formule voor de maximum tangentiële spanning in de las:

$$\sigma = E \frac{\delta}{2} (1)$$

waar de rek  $\epsilon$  gelijk is aan de helft van het verschil in uitzetting  $\delta$ . Dezelfde uitdrukking voor de spanning gaat op voor de maximum spanning in symmetrische parallellassen van vlak glas<sup>14</sup> en is de basis voor de relatieve uitzettingstabellen van Hagy<sup>19</sup>. De relatieve uitzetting in de las bij een temperatuur  $T$  kan worden berekend uit de uitzettingscoëfficiënten en temperatuurverschillen, daar  $\delta = (\alpha_1 - \alpha_2)(T_{\text{verstarringspunt}} - T)(2)$ , waarin  $\alpha$  voor het glas de feitelijke kontraktiecoëfficiënt is vanaf het verstarringspunt en niet de lineaire uitzettingscoëfficiënt.

Hull en Burger<sup>12</sup> geven ongeveer 400 kg/cm<sup>2</sup> aan als de minimale technologische sterkte van glas. Verder laten zij een veiligheidsfactor twee toe en een verdere faktor twee voor spanningsconcentratie aan de rand van de las. Het resultaat is een maximaal toelaatbare belasting van 100 kg/cm<sup>2</sup> voor een 'veilige' las berekend volgens formule (1). Neemt men voor glas  $E \approx 65 \cdot 10^4$  kg/cm<sup>2</sup> en de breukbelasting van 100 kg/cm<sup>2</sup> volgens Hull en Burger<sup>12</sup>, dan kan men het maximaal toelaatbare uitzettingsverschil berekenen op 300 ppm. Er bestaan tabellen voor uitzettingsverschillen voor standaard materialen, maar de onderzoeker en de praktijkman dienen gebruik te maken van hun kennis van materiaalparameters om problemen in niet-standaardgevallen op te lossen.

Fig. 5 licht de vervaardiging toe van een slechte glas-metaalverbinding wanneer de lineaire uitzettingscoëfficiënten in overeenstemming gebracht zijn en het maken van een goede las als de effectieve kontraktiecoëfficiënten onderling zijn aangepast. Op dit punt moet worden vermeld, dat, alhoewel de kontraktiekrommen van de meeste metalen, hoogstens kunnen worden aangepast aan die van glazen bij het verstarringspunt en bij kamertemperatuur, er enkele uitzonderingen bestaan die vermeldenswaard zijn. De in zeer ruime mate in gebruik zijnde legeringen Kovar en Fernico bezitten uitzettingskrommen die door een ferromagnetische omzetting zeer nauw overeenkomen met de totale kontraktiekromme van verscheidene specifieke glazen en die goede, spanningvrije lassen opleveren bij elke temperatuur.

**Klassifikatie van lassen volgens het nivo van permanente spanning - Kompressie-, folie- en Housekeeper-lassen.**

In de voorgaande besprekingen hebben wij ons in de eerste plaats bezig gehouden met de vervaardiging van aangepaste lassen, dit zijn lassen met een laag spanningsnivo ten gevolge van een goede thermische aanpassing tussen de te lassen materialen. Goed aangepaste glaslassen kunnen worden gemaakt in combinatie met metalen, keramiek en andere glazen. Een laag spanningsnivo is natuurlijk niet de enige eis die moet worden gesteld aan het maken van een goede las. In het geval van een las met een geringe spanning moet er ook een goede chemische binding tot stand worden gebracht tussen de te lassen materialen. De ontwikkeling van deze chemische binding wordt in het volgende gedeelte besproken. Onaangepaste lassen in de categorie glas-metaal omvatten twee basistypen: kompressie en duktiele metaal- of Housekeeper-lassen. Kompressielassen worden vaak gebruikt bij hermetisch dichte doorvoeringen van elektrische geleiders in een metalen huis.

Men kan zich een kompressielas voorstellen als een stelsel van concentrische cilinders met de elektrische geleiddraad in de hartlijn, omgeven door het glas van de las en dat weer omsloten door een beperkende metalen 'kraag'. De kompressiekrachten worden in het glas opgewekt door gebruik van een metalen kraag met een hogere kontraktiecoëfficiënt dan die van de andere onderdelen van de las. De elektrische draad kan een kontraktiecoëfficiënt bezitten die gelijk is aan of een weinig kleiner is dan die van het glas om zodoende de kompressiespanningen op peil te houden of te versterken. Anderzijds mag de draad alleen een kontraktiecoëfficiënt bezitten, die groter is dan die van het glas als de metalen kraag voldoende drukspanning veroorzaakt in het glas ter plaatse van de draad om de kontraktiedifferentie te neutraliseren.

Ook meervoudige geleiddraden kunnen worden opgenomen in een enkele kompressielas. In doorvoeren met een hoge kompressie kan de mechanische hechting voldoende worden geacht voor een goed produkt, hoewel het ontstaan van een chemische hechting altijd wenselijk is. Er zijn wiskundige betrekkingen ontwikkeld voor de berekening van de spanningsverdeling in kompressielassen. Deze zijn in de literatuur te vinden.

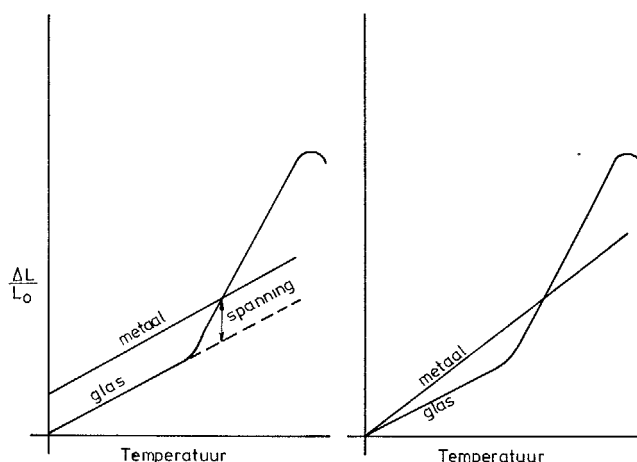


Fig. 5 - Vergelijking van de vorming van een slechte las door het in overeenstemming brengen van de lineaire uitzettingscoëfficiënten en een goede las door het aanpassen van de kontraktiecoëfficiënten.

In het begin van deze eeuw waren de gebruikelijke metalen voor glasmetaalverbindingen, t.w. wolfram en molybdeen, slechts verkrijgbaar in de vorm van draad en staf. Koper kon door zijn hoge uitzettingscoëfficiënt (ca.  $180 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$ ) niet aan de beschikbare glazen worden gelast, maar kon wel gevormd worden tot grote buisvormige afmetingen. De invoering door W. G. Housekeeper<sup>21</sup> van een lastechniek van buisvormig koper aan een grote verscheidenheid van glazen maakte het voor het eerst mogelijk om grote watergekoelde zendbuizen voor de radio-industrie te produceren, die gedeeltelijk uit koper waren opgebouwd.

Het succes van de onaangepaste Housekeeperlas berust op aanbrengen van een zeer dun uitlopende rand aan het einde van de koperen buis, waaraan vervolgens het glas gelast wordt. De grote spanning voortvloeiende uit de foutieve aanpassing tussen glas en koper wordt opgevangen door het meegeven van het duktiele metaal. In tegenstelling tot de kompressielas vereist de onaangepaste koperlas tevens de ontwikkeling van een chemische hechting tussen het glas en het metaal.

Met behulp van de Housekeeperstechniek zijn glasinstrumentmakers in staat geweest om koper te lassen aan glazen met uitzettingscoëfficiënten die zo laag zijn als  $32,5 \cdot 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$  (t.w. Pyrex, Corning Code 7740). Bezien uit een mechanisch oogpunt zou men tevens een Housekeeperlas kunnen maken met kwartsglas met een uitzettingscoëfficiënt van  $5 \cdot 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$  aan koper, maar de materialen verdragen zich onderling niet doordat koper smelt beneden de bewerkingstemperatuur van kwartsglas. De invoering van de legeringen Kovar en Fernico en de ontwikkeling van aan ijzer en later van de aan koper lasbare glazen, die alle de produktie van aangepaste buisvormige glasmetaalverbindingen mogelijk maken, hebben de Housekeeperlas nagenoeg in onbruik doen geraken. Wel bestaan er nog speciale omstandigheden, die het gebruik van niet-magnetische materialen vereisen en waarin het beste de Housekeeperlas aan koper dan wel aan austenitische roestvaste stalen kunnen worden toegepast.

Kwartsglas is door zijn doorzichtigheid en hittebestendigheid het aangewezen materiaal voor omhulsels van ontladingslampen met hoge intensiteit. De lage uitzettingscoëfficiënt van kwartsglas sluit de mogelijkheid uit van een aangepaste las direkt aan

het metaal en de hoge bedrijfstemperatuur verhindert de toepassing van een aangepaste glasovergang. Doorvoeren door kwartsglas worden gerealiseerd d.m.v. dunne folies van wolfram of molybdeen. De hittebestendige metalen in de vorm van dunne folies geven mee zoals ook gebeurt bij de Housekeeperlassen en vangen zo de spanningen op, die ontstaan door de grove thermische misaanpassing tussen de materialen. Het gebruik van ductiele folies voor doorvoer door kwartsglas brengt gewoonlijk een kneepbewerking mee, waarbij het kwartsglas bij zijn bewerkingstemperatuur mechanisch op beide zijden van de folie wordt aangedrukt. Een bepaalde graad van chemische binding is ook belangrijk bij het maken van doorvoeren van foliestrips door kwartsglas.

N.B. De chemische aspecten van glasverbindingen zullen besproken worden in het volgend nummer.

#### Referenties

- (1) W. E. Barr and V. J. Anhorn, 'Scientific and Industrial Glass Blowing and Laboratory Techniques Instruments Pub. Co., Pittsburgh (1949).
- (2) J. H. Partridge, 'Glass-to-Metal Seals,' *The Society of Glass Technology, Sheffield* (1949).
- (3) W. H. Kohl, 'Materials and Techniques for Electron Tubes, Reinhold Pub. Corp., New York (1960).
- (4) W. H. Zachariasen, 'Atomic Arrangement in Glass,' *J. Am. Chem. Soc.* 54, 3841-3851 (1932).
- (5) G. W. Morey, 'The Properties of Glass,' 2<sup>nd</sup> ed., Reinhold Pub. Corp., New York (1954), p. 28.
- (6) W. D. Kingery, 'Introduction to Ceramics,' John Wiley and Sons, Inc., New York (1960), Chap. 18.
- (7) W. B. Hillig, 'Sources of Weakness and the Ultimate Strength of Brittle Amorphous Solids,' In 'Modern Aspects of the Vitreous State,' Vol. 2, J. D. Mackenzie, ed., Butterworths, Inc., Washington (1962).

- (8) R. Gardon, 'The Tempering of Flat Glass by Forced Convection,' Paper No. 79 (in English), in 'Proc. VIIth International Congress on Glass,' Vol. I. Brussels, 1965; Institut National du Verre, Charleroi, Belgium.
- (9) R. Gardon and O. S. Narayanaswamy, 'Stress and Volume Relaxation in Annealing Flat Glass,' *J. Am. Ceram. Soc.* 53 (7), 380-385 (1970).
- (10) H. Poritsky, 'Analysis of Thermal Stresses in Sealed Cylinders and the Effect of Viscous Flow During Anneal,' *Physics* 5, 406-411 (1934).
- (11) H. Adam, 'Compressed Glass-to-Metal Seals,' *J. Soc. Glass Technol.* 32, 285r-296T (1954).
- (12) A. W. Hull and E. E. Burger, 'Glass-to-Metal Seals,' *Physics* 3, 384-405 (1934).
- (12) M. B. Volf, *Technical Glasses, Pitman and Sons, Ltd., London* (1961), Chap. 15.
- (14) H. Rawson, 'The Theory of Stresses in Two-Component Glass to Metal Tube Seals,' *J. Sc. Instr.* 26, 25-27 (1949).
- (15) H. Adam, 'The Theoretical Foundations of Glass Compression Seals and Their Practical Consequences' (in German), *Feinwerktech.* 56, 29-40 (1952).
- (16) H. Rawson, 'A Theory of Stresses in Glass Butt Seals,' *Brit J. Appl. Phys.* 2, 151-156 (1951).
- (17) G. Lewis and R. Mark, 'The Theory of Dissimilar Tubular Seals of Glass, Ceramics, and Metals for Critical Applications,' *Trans, 5th National Symp. Vac. Technique*, 44-49 (1958).
- (18) S. Timoshenko, 'Analysis of Bi-metal Thermostats,' *J. Opt. Soc. Amer.* 11, 233-255 (1925)
- (19) H. E. Hagy, 'Thermal Expansion Differential Tables - 1962 Revision,' from *Corning Glass Works Res. and Dev. Div., Corning, N.Y.*
- (20) A. W. Hull, E. E. Burger, and L. Navias, 'Glass-to-Metal Seals II,' *J. Appl. Phys.* 12, 698-707 (1941).
- (21) W. G. Housekeeper, 'The Art of Sealing Base Metals Through Glass,' *J. Am. Inst. Elec. Engrs.* 42, 270-278 (1923).

#### Instrumentenbouw



UNICAWEEK

1980

24 t/m 28 November in het Mikrocentrum in Eindhoven.

Het programma van de UnicawEEK '80 ziet er globaal als volgt uit:

- **Maandag** 24 november: inrichten van de expositie.
- **Dinsdag**: lezingen over: aerostatische lageringen en constructie-elementen t.b.v. microverplaatsingen. In de loop van de middag jaarvergadering van de Sektie Experimentele Instrumentenbouw.
- **Woensdag**: lezingen geconcentreerd op de toepassing van elastische scharnieren in fijnmechanische constructies t.b.v. staphoogte-metingen aan kristalvlakken. Aansluitend een excursie naar de TH-Eindhoven.
- **Donderdag** zullen enige speciale technologieën onderwerp vormen voor de voordrachten. Aansluitend ook op deze dag een excursie, waarbij het Variabel Bouwstelsel gepresenteerd zal worden.
- **Vrijdagmorgen**: expositie nog geopend, in het bijzonder voor onderwijsinstellingen.

Vooraanmelding voor deelname aan de lezingen en excursies zal verlopen via het Mikrocentrum. Leden van Mikron zullen tevoren een persoonlijke uitnodiging ontvangen. In september a.s. worden aan alle SEI-leden de aanmeldingsformulieren gezonden. De kosten voor deelname aan een volledig dagprogramma (lezingen, bezoek aan de expositie, de excursie en de lunch) bedragen voor leden van de Sektie EI f 30,—, voor niet-leden f 50,—. Verzocht wordt zo vroeg mogelijk het aanmeldingsformulier ingevuld te retourneren, uiterlijk voor 1 November a.s. In het septemnummer zal een algemene samenvatting van de te houden voordrachten gepresenteerd worden.

Het UNICA '80 comité.