

Thermisch harden van glas

Citation for published version (APA):

Faber, A. J. (1994). Thermisch harden van glas. *KGK, Tijdschrift voor Klei, Glas en Keramiek*, 15(6-7), 125-130.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/1994

Document Version:

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

Please check the document version of this publication:

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

www.tue.nl/taverne

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

openaccess@tue.nl

providing details and we will investigate your claim.



Drs. A.J. Faber
TNO-Technisch Fysische
Dienst TU-Delft
Postbus 595,
5600 AN Eindhoven
tel. 040-656400/fax 040-449350

Samenvatting:

In dit artikel zal in het kort een elementaire beschrijving worden gegeven van het hardingsproces van vlakglas met een aantal mogelijke verfijningen in de theorie. Vervolgens zal, gebruikmakend van deze theorie, het effect van de verschillende glaseigenschappen en procesparameters op voorspanningsgraad en -profiel worden verduidelijkt. Tevens wordt aandacht besteed aan enkele praktische aspecten van gehard glas, waaronder toepassingsmogelijkheden, breukgedrag en meetmethoden.

Abstract:

In this article an elementary description will be given of the thermal tempering process of flat glass, together with possible refinements in the theory. Using this theory, the effect of different glass properties and process parameters on the stress-level and -profile of a tempered glass plate will be explained. Finally, some practical aspects of thermally toughened glass will be discussed, including applications, fracture behaviour and measuring methods.

Auteur

De auteur studeerde experimentele natuurkunde in Utrechts en is sinds 1987 werkzaam als projectleider bij de afdeling Glas van TNO-TPD. De volgende artikelen zijn gebaseerd op 2 voordrachten die in 1993 en 1994 zijn gehouden tijdens 2 workshops in het kader van het EZ-TNO KMO-programma (Kleine en Middelgrote Ondernemingen) voor de vlakglasbranche.

1. Inleiding

Het thermisch 'harden' of beter gezegd het thermisch voorspannen van vlakglas is een economisch belangrijk proces in de glastechnologie. Dit wordt geïllustreerd aan de hand van de volgende cijfers: De totale vlakglasproductie in Europa (EU) bedroeg in 1990 ruim 5.7 miljoen ton [1]. Ca. 17% van de vlakglasproductie in Europa wordt afgezet in de automobiellindustrie, d.w.z. betreft gehard of gelaagd glas. Daarbij komt het aandeel gehard glas dat als veiligheidsglas wordt toegepast in de bouw, dat naar schatting 10% bedraagt. In totaal wordt het totale aandeel gehard glas in de vlakglasproductie in Europa geschat op 25% (in Japan bedroeg dit percentage in 1991 zelfs 66%!), dat wil zeggen ca. 1 - 1.5 miljoen ton gehard glas per jaar.

Bij het thermisch hardingsproces wordt aan het oppervlak van een glasplaat een drukspanning aangebracht door het glas tot ca. 100°C boven de glastransformatie-temperatuur T_g te verhitten (tot ca. 630°C) en vervolgens gelijkmatig en onder goed gecontroleerde omstandigheden, geforceerd af te koelen (te temperen). De drukspanning die zo aan het glasoppervlak ontstaat, bedraagt typisch 100 - 150 MPa. Hierdoor wordt de praktische sterkte van het glas ca. een factor 4 groter (van 40 - 50

MPa naar 150 - 200 MPa). Voor een goede beschrijving van het hardingsproces is het noodzakelijk de temperatuur- en tijdafhankelijke eigenschappen van het glas te kennen.

In deze bijdrage zal in het kort een elementaire beschrijving worden gegeven van het glas-temperproces met een aantal mogelijke verfijningen in de theorie. Vervolgens zal, gebruikmakend van deze theorie, het effect van de verschillende glaseigenschappen en procesparameters op voorspanningsgraad en -profiel worden verduidelijkt.

In een derde deel zullen enkele praktische aspecten van gehard glas aan de orde komen, waaronder toepassingsmogelijkheden, breukgedrag en meetmethoden. De presentatie wordt besloten met enkele konkluderende opmerkingen.

2. Fysische beschrijving van het thermisch voorspannen van glas

2.1 Elementaire beschrijving

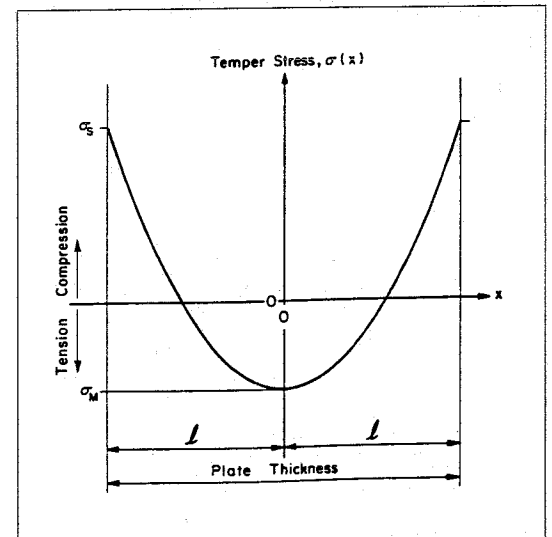
De mogelijkheid om glas thermisch voor te spannen is gebaseerd op het fysische gedrag van glas rondom de glastransformatie-temperatuur T_g , d.i. het temperatuurtraject waarbij glas overgaat van een viskeuze vloeistof in een elastisch materiaal.

In de meest elementaire beschrijving van het ontstaan van een drukspanning aan het glasoppervlak bij temperen, wordt een glasplaat beschouwd als een volledig elastisch materiaal, zodra de temperatuur van het midden van de plaat, T_m , tot onder T_g is gedaald.

Tijdens het verdere afkoelen ontwikkelen zich in de glasplaat interne spanningen, doordat de krimp van het relatief warme midden van de glasplaat wordt tegengegaan door de koelere oppervlaktelagen.

Het spanningsprofiel kan in deze elementaire beschrijving op thermo-elastische wijze worden berekend uit het nagenoeg parabolische temperatuurprofiel op het moment dat het midden van de glasplaat T_g heeft bereikt (zie fig. 1).

Figuur 1:>>
Spanningsprofiel $\sigma(x)$ van
thermische geharde glasplaat



Bij benadering wordt de permanente drukspanning (σ_p) aan het oppervlak gegeven door de volgende formule [4]:

$$\sigma_p = \alpha \cdot E \cdot \Delta T_{MO} / (1 - \mu) = \alpha \cdot E / (1 - \mu) \cdot (1 + 2\lambda / hd)^{-1} \cdot T_E = \phi \cdot (1 + 2\lambda / hd)^{-1} \cdot T_E \quad (1)$$

waarin:
 α = thermische uitzettingscoëfficiënt ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)
 E = Young's elasticiteitsmodulus (MPa)
 μ = Poisson verhouding
 λ = thermische geleiding ($\text{W}/\text{m}^2, ^{\circ}\text{C}$)
 h = warmte-overdrachtscoëfficiënt ($\text{W}/\text{m}^2, ^{\circ}\text{C}$)
 ΔT_{MO} = $T_{\text{M}} - T_{\text{O}}$ = temperatuur midden -
 temperatuur oppervlak ($^{\circ}\text{C}$)
 T_{E} = invriestemperatuur $\approx T_{\text{g}}$ ($^{\circ}\text{C}$)
 d = dikte van de glasplaat (m)
 ϕ = $\alpha \cdot E / (1 - \mu)$ = specifieke thermische
 spanning (MPa/ $^{\circ}\text{C}$)

Als in bovenstaande formule de volgende typische waarden voor floatglas worden ingevuld:

ϕ = $\alpha \cdot E / (1 - \mu) = 0.8 \text{ MPa}/^{\circ}\text{C}$;
 λ = $1.45 \text{ W}/\text{m}^2, ^{\circ}\text{C}$;
 T_{g} = 530°C

en als voor de procesparameter h een typische waarde van $h = 200 \text{ W}/\text{m}^2, ^{\circ}\text{C}$ wordt aangenomen, dan volgt voor de drukspanning aan het oppervlak van een 6 mm geharde glasplaat:

$\sigma_{\text{p}} = 124 \text{ MPa}$, wat inderdaad een gangbare waarde in de praktijk is.

De trekspanning in het midden van de glasplaat heeft een grootte van ca. de helft van de drukspanning aan het oppervlak.

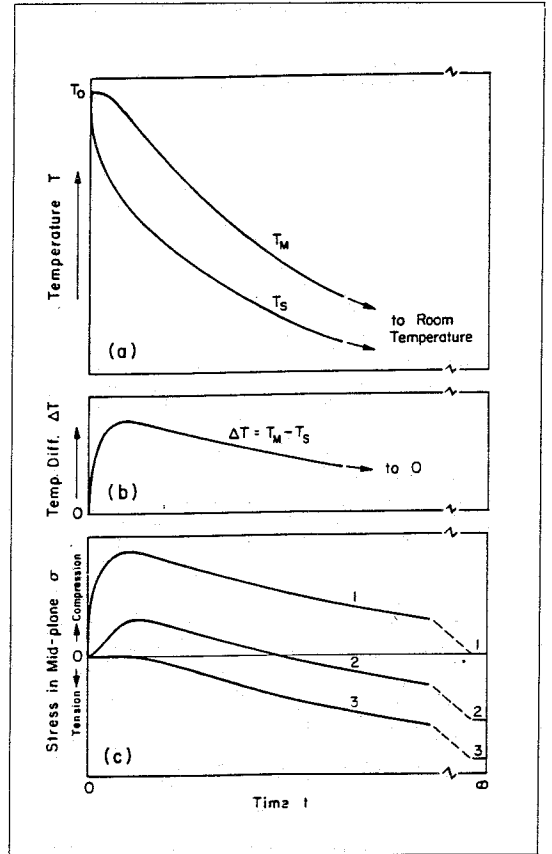
2.2 Verfijningen

In een eerste verfijning van de theorie wordt rekening gehouden met de feitelijk geleidelijke overgang van de glasplaat naar een elastisch materiaal tijdens het afkoelen:

Doordat tijdens de eerste fase van het afkoelen de "T_g-isotherm" als het ware vanaf het oppervlak naar het midden van de glasplaat beweegt, vertonen de delen van de glasplaat van buiten naar binnen, achtereenvolgens een overgang naar een ideaal elastisch gedrag ("instant freezing theory", zie fig.2).

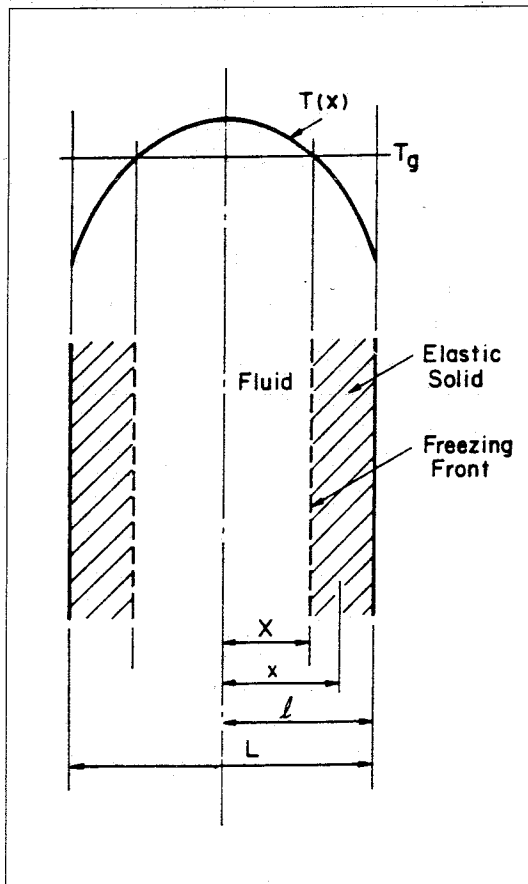
Figuur 3: >> Temperatuur-en voorspanningsverloop gedurende het temperen van een glasplaat. In grafiek worden 3 gevallen vergeleken
 1: T_i (begintemperatuur) << ontspanningstemp. (elastische plaat)
 2: T_i > anneal temp. (te laag voor harden)
 3: T_i >> anneal temp. (goed voor harden)

Een fysisch meer realistische beschrijving van het voorspannen van glas is gebaseerd op het visko-elastische (dus niet puur elastische) gedrag van glas in de buurt van de glastransformatie-temperatuur. Voor een uitgebreide beschrijving van deze visko-elastische theorie van het thermisch voorspannen van glas wordt verwezen naar referenties [2] en [6]. In het volgende wordt alleen een kwalitatief beeld van deze visko-elastische theorie geschetst: In figuur 3 [2] worden schematisch de temperatuur-tijd en spanning-tijd curves van het oppervlak en van het midden van een glasplaat (en van het verschil ΔT) tijdens temperen gegeven. Voor het geval van een zuiver elastisch materiaal, zouden de (tijdelijke) thermische spanningen het verloop van ΔT exact volgen: de relatief koudere gedeeltes (aan de beide oppervlakken) krimpen meer dan het warmere gedeelte (het midden van de glasplaat), maar worden daarin beperkt door dit war-



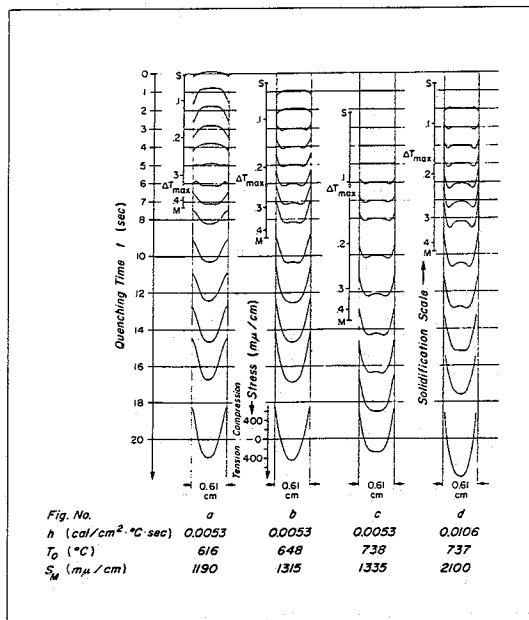
Figuur 2: >

"Instant freezing model."



mere midden. Hierdoor komen de relatief koelere gedeeltes aan de beide oppervlakken onder (tijdelijke) trek te staan en het relatief warmere gedeelte in het midden van de plaat onder (tijdelijke) drukspanning (zie figuur 4).

De permanente spanningen die in de glasplaat ontstaan, zijn een gevolg van de viskeuze relaxatie (vloeistofgedrag) van de zojuist beschreven thermo-elastische spanningen, vlak na het begin van het afkoelen [3]. Zodra het midden van de glasplaat tot beneden het glas-transformatiegebied is afgekoeld, stopt de spanningsrelaxatie en worden variaties in het spanningsprofiel in de glasplaat volledig bepaald door veranderingen in de temperatuurverdeling (puur elastisch materiaal). Als de glasplaat bij kamertemperatuur volledig in temperatuurevenwicht is gekomen, zijn de tijdelijke thermo-elastische spanningen verdwenen en heeft zich een spanningsprofiel over de glasplaat ontwikkeld, met aan het oppervlak een permanente drukspanning en in het midden een permanente trekspanning, die wordt bepaald door de (viskeuze) spanningsrelaxatie in de eerste fase van het afkoelproces.



Figuur 4: >

Tijdelijke spanningsverdelingen in een glasplaat gedurende temperen.

Een verdere verfijning wordt gegeven door de "strukturele theorie", waarin rekening wordt gehouden met de structuur-afhankelijke veranderingen in viscositeit en dichtheid in het glastransformatie-trajekt. In deze theorie worden de fysische glaseigenschappen temperatuur- en tijdafhanke-lijk beschreven [2].

In Tabel 1 zijn de verschillende theoretische beschrijvingen van het glas-voorspanningsproces samengevat.

Tabel 1: >

Overzicht van theoretische beschrijvingen van het thermisch voorspannen van glas, volgens [2] en [3]

Theorieën die alleen de permanente spanningen verklaren	Voorveronderstellingen, karakteristieken
- Elementaire beschrijving op basis van enkel thermo-elastische spanningen	ideaal elastisch gedrag als $T_{\text{midden}} < T_g$
- "Instant freezing theorie"	ideaal elastisch gedrag als T_g -isotherm beweegt van oppervlak naar midden
Theorieën die zowel tijdelijke als permanente spanningen verklaren	
- Visko-elastische theorie	- glas:visko-elastisch materiaal rondom T_g , - viskeuze spanningsrelaxatie rondom T_g , - tijdafhanke-lijk gedrag
- Strukturele theorie	- strukturele relaxatie - temperatuur-en tijd-afhankelijke glaseigenschappen

3. Effecten van glaseigenschappen en procesparameters op voorspanning

3.1 Effekt glaseigenschappen:

$$\alpha(T, dT/dt), \eta(dT/dt), \rho(T, dT/dt)$$

In de eenvoudigste beschrijving van het thermisch voorspannen van glas is de thermische uitzettingscoëfficiënt α (of $\phi = \alpha \cdot E / (1-\mu) =$ de specifieke thermische spanning) de belangrijkste glaseigenschap die de voorspanning bepaalt (zie formule (1)).

Hierbij is het van belang te bedenken dat α bij T_g een grote sprong maakt:

$$\alpha_{\text{liq}}(T > T_g) \approx 3\alpha_{\text{sol}}(T < T_g).$$

In Tabel 2 worden de waarden van α (onder T_g) en van ϕ voor 2 verschillende glassamenstellingen

Glastype	α (°C ⁻¹)	ϕ (N/mm ² K)	T_g (°C)	λ (W/m ² K)
natronkalk	9×10^{-6}	0.8	530	1.45
borosilikaat	3×10^{-6}	0.25	530	1.45

Tabel 2: >

Relevante fysische eigenschappen van twee glassamenstellingen
15e Jaargang, nummer 6/7

(natronkalk en borosilikaat) vergeleken. Uit deze tabel wordt direct duidelijk dat, bij dezelfde procescondities, in borosilikaat glas een aanzienlijk lagere voorspanningsgraad zal ontstaan dan in natronkalk (float)glas.

In de visko-elastische theorie worden de optredende spanningsprofielen in grote mate bepaald door het viscositeitsverloop, $\eta(dT/dt)$, rondom T_g , in het bijzonder door de grootte van de viscositeit bij de begintemperatuur T_i van het hardingsproces. Bij temperaturen rondom T_g , vertoont het glas een visko-elastisch gedrag, dat wil zeggen zowel de opbouw van elastische spanningen als viskeuze spanningsrelaxatie zijn van belang.

Naast de spanningen die worden veroorzaakt door thermo-elastische spanningen ontstaan er ook (permanente) spanningen als gevolg van strukturele effecten. De spanningen met een strukturele oorsprong worden veroorzaakt door plaats-afhankelijke variaties in de dichtheid $\rho(T, dT/dt)$, die ontstaan als tijdens het afkoelen de glasstruktuur aan de oppervlakken zich enigszins anders ontwikkelt dan in het midden van de glasplaat. Hierdoor is de dichtheid aan het oppervlak van een geharde glasplaat typisch 1.5 % lager dan in het midden [6].

3.2 Effekt procesparameters (T_i, h)

Voor een gegeven glas(samenstelling) wordt de verkregen voorspanning als gevolg van het hardingsproces praktisch volledig bepaald door de begintemperatuur T_i in de hardingsoven en de warmteoverdrachtscoëfficiënt h tijdens het afkoelen. Door een geschikte keuze van deze procespa-

rameters kan men de voorspanning dus in zekere mate beïnvloeden.

Hierbij gelden echter de volgende randvoorwaarden:

- begintemperatuur T_i :
De begintemperatuur T_i moet worden gekozen tussen twee grenswaarden: De maximale temperatuur wordt bepaald door de eis dat de glasplaat niet mag vervormen, de minimale temperatuur door de eis dat de glasplaat niet mag breken als gevolg van tijdelijke trekspanningen in het begin van het hardingsproces. Bij het harden van floatglas in de praktijk wordt T_i zodanig gekozen dat de viscositeit van de glasplaat bij T_i ligt tussen 10^8 en 10^9 Pa.s.

- warmteoverdrachtscoëfficiënt h :
De tijdelijke trekspanningen in het begin van het hardingsproces worden bepaald door T_i en h (zie fig. 4). Met behulp van de visko-elastische theorie kan een schatting worden gemaakt voor

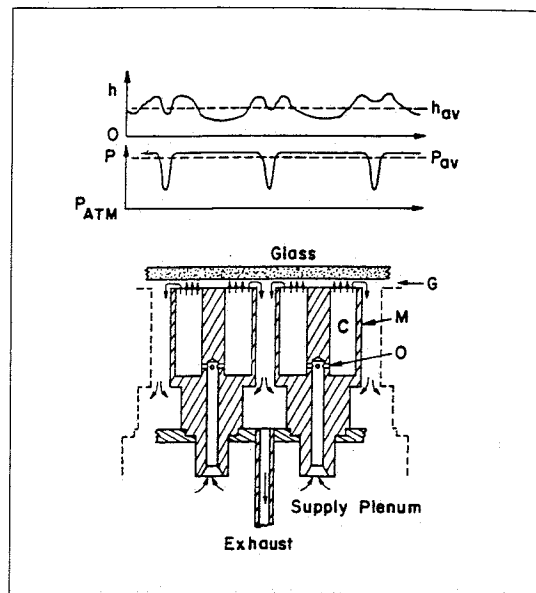
Figuur 5: >>
"Air float quenching"

de maximaal mogelijke warmteoverdrachtscoëfficiënt, h_{max} , als de tijdelijke trekspanningen aan het glasoppervlak bij het begin van het afkoelen een bepaalde kritische waarde, zeg 100 MPa, niet mogen overschrijden. (Voor de kritische trekspanning σ_k van warm glas geldt de empirische relatie: $\sigma_k = 4.8 \times 10^9 / \sqrt{T}$ (MPa), met T = temperatuur in K [7]).

Op grond van bovenbeschreven randvoorwaarden kunnen de maximaal bereikbare waarden voor de oppervlakte-drukspanning worden afgeschat. Deze waarden worden in Tabel 3 gegeven voor twee glastypen, voor natronkalk (float)glas en voor borosilikaatglas.

Zoals blijkt uit het voorgaande, is de warmteoverdrachtscoëfficiënt h een van de belangrijkste procesparameters om het hardingsproces te beïnvloeden. In de meeste hardingsbedrijven ligt h bij het harden van 6 mm glas met geforceerde luchtkoeling tussen 100 en 200 W/m^2K . De warmteoverdracht kan worden vergroot, bijv. door het toepassen van geforceerde koellucht in combinatie met het sprayen van water. Voor het harden van grote glasoppervlakken is dit echter een technisch moeilijk proces.

Het voordeel van een hogere warmte-overdracht is, naast een mogelijk hogere voorspanningsgraad, een efficiëntere (snellere) procesvoering en daardoor een mogelijke energiebesparing.



meeste landen wordt in de voorruit van auto's geen gehard glas meer gebruikt, maar gelaagd glas. Daarnaast wordt gehard glas toegepast in treinwagons en in de scheepsbouw en als veiligheidsglas of in brandwerend glas in de bouw. De maximale toepassingstemperatuur van thermisch

Tabel 3: >
Karakteristieke waarden voor de voorspanning van natronkalk- en borosilikaatglazen bij verschillende procescondities [5]

Glastype	h_{max} (W/m^2K)	T_i ($^{\circ}C$)	$\sigma_{max,midden}$ (MPa)	$\sigma_{max,oppervl.}$ (MPa)
η_i (begin-viskositeit) = 10^8 Pa.s				
natronkalk	4500	650	105 (100)	235 (230)
borosilikaat	>5000	730	32 (30)	70 (65)
η_i (begin-viskositeit) = 10^9 Pa.s				
natronkalk	470	630	65 (55)	135 (110)
borosilikaat	1500	680	25 (20)	50 (45)

In deze tabel is:

$\sigma_{max,midden}$ = maximale trekspanning in het midden van de glasplaat;

$\sigma_{max,oppervl.}$ = maximale drukspanning aan het oppervlak van de glasplaat.

De opgegeven waarden gelden voor een glasdikte van 8 mm (6 mm).

Bij het harden van borosilikaatglas (4 - 6 mm) is voor een voorspanningsgraad van 100 MPa een warmte-overdrachtscoëfficiënt vereist in de orde van 2000 - 4000 W/m^2K . Voor een dergelijke hoge warmte-overdracht is een zgn. "twin-bath" proces ontwikkeld. Bij dit proces wordt de glasplaat afgekoeld (gequenched) in een waterbad, dat bedekt is met een laagje olie. Dit laagje olie voorkomt dat de glasplaat te snel afkoelt als gevolg van het zgn. "bellen koken" van het water.

In Tabel 4 worden waarden voor h gegeven bij verschillende afkoelmethode.

gehard glas wordt beperkt door spanningsrelaxatie bij hoge temperaturen. De grenstemperatuur voor toepassing van gehard floatglas is 200 $^{\circ}C$ voor geval van langdurig gebruik en ca. 300 $^{\circ}C$ bij kortdurende omstandigheden.

De laatste tijd neemt het gebruik van gehard en half gehard (heat strengthened) glas in geëmailleerde panelen of in anderszins gecoate borstweringpanelen sterk toe. Een specialy is het gebruik van gehard glas in brilleglazen. Al met al wordt geschat dat het aandeel gehard glas in de totale vlakglasproductie in Europa ca. 25% bedraagt.

Tabel 4: >
Vergelijking verschillende afkoelmethode

Afkoelmethode	Typische waarde voor h (W/m^2K)
1. natuurlijke konvektie en straling	10 - 15
2. geforceerde luchtkoeling	100 - 200
3. koeling op luchtkussen (air float quenching) met steeds vernieuwende grenslaag (zie fig.5)	800 - 900
4. dompeling in zoutsmelten of organische vloeistoffen (olie)	800 - 1000
5. geforceerde luchtkoeling in combinatie met water sproeien	2000
6. Twin bath: water bedekt met olie	2000 - 4000

4. Praktische aspecten

4.1 Toepassingen

Wereldwijd gezien wordt het meeste geharde glas toegepast in autoruiten (zij- en achtruiten). In de

4.2 Breukgedrag, gehard/half gehard

Het breukgedrag van een thermisch geharde glasplaat wordt bepaald door zowel de breukoorzaak als door de mate van voorspanning (gehard/half gehard).

Breuk van thermisch gehard glas kan op twee manieren worden veroorzaakt:

- Het aanbrengen van een trekspanning aan het glasoppervlak die groter is dan de som van de voorspanning en de 'eigen' sterkte van de glasplaat, bijv. bij een 4-punts buig-breekproef;
- Een lokale inhomogeniteit of crack die de trekspanningszone in het midden van de glasplaat bereikt, bijv. breuk door toepassing van een scherpe metalen punt of breuk als gevolg van een nikkelsulfide insluitel in het glas.

In geval a. wordt een grote hoeveelheid extra elastische energie in de glasplaat 'opgeslagen' voordat breuk optreedt. Deze extra hoeveelheid energie beïnvloedt het breukpatroon. Het breukpatroon is in dit geval vergelijkbaar met dat van een ander bros materiaal met dezelfde mechanische sterkte, bijv. dat van chemisch gehard glas.

Geval b. geeft het typische breukpatroon van thermisch gehard glas. In dit geval wordt niet of nauwelijks extra elastische energie aan de glasplaat toegevoerd. Zodra de inhomogeniteit of crack de inwendige trekspanningszone van de glasplaat bereikt en onder voorwaarde dat deze trekspanning hoog genoeg is om breuk te veroorzaken, komt de opgeslagen elastische energie spontaan vrij en worden nieuwe oppervlakken gevormd. Dit betekent dat de glasplaat in kleine fragmenten uiteenspat. Het totaal aan nieuwe gevormde oppervlakken is direct afhankelijk van de beschikbare hoeveelheid elastische energie in de glasplaat, ofwel: het aantal scherfjes per oppervlakte-eenheid is evenredig met het kwadraat van de ingevroren spanningen.

In figuur 6 wordt een experimenteel bepaalde grafiek getoond [5] van de gemiddelde grootte van de scherven als functie van de oppervlakte-drukspanning, voor 4 verschillende glasdiktes. Dergelijke curves hebben een groot praktisch belang met het oog op toepassing van thermisch gehard glas in hoge gevelds. In deze toepassing is een hoge mechanische sterkte vereist, maar tegelijkertijd moet vermeden worden dat er glasscherven naar beneden kunnen vallen, m.a.w. bij breuk moet de glasplaat in de sponning blijven. Voor deze toepassingen wordt soms 'half-gehard' oftewel heat-strengthened glas gebruikt, dat een lagere voorspanning heeft (ca. de helft). Dit type glas heeft een breukpatroon dat meer lijkt op dat van normaal annealed floatglas.

Voorzover bekend bestaan er geen Europese normen die de voorspanningsgraad voorschrijven van heat-strengthened glas. Er bestaan echter wel Japanse en Amerikaanse normen, die de oppervlakte-drukspanning van heat-strengthened glas voorschrijven (zie Tabel 5).

Norm	Oppervlakte-drukspanning (MPa)	Drukspanning aan hoeken (MPa)
ASTM C 1048	24 - 69	38 (minimaal)
JIS R 3222	20 - 60	-

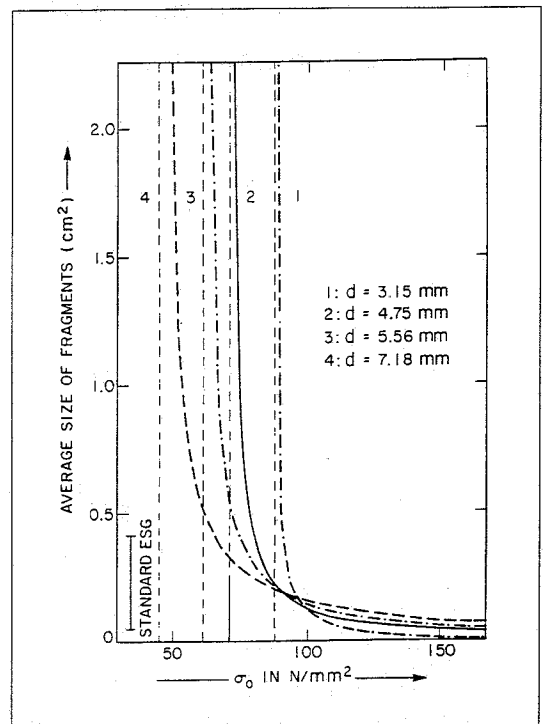
Een speciaal geval van spontane breuk volgens scenario b. kan optreden onder invloed van nikkelsulfide (NiS) insluitels. Deze insluitels, met typische afmetingen van 150 μm , kunnen tijdens de floatglasfabrikage in de smeltoven worden gevormd door chemische reacties tussen zwavelhoudende glaskomponenten, zoals Na_2SO_4 , en Ni (bijv. uit de stookolie), onder reducerende omstan-

digheden. Na verloop van tijd kan een NiS insluitel, bijv. onder invloed van hoge temperaturen, een kristalfase-transformatie ondergaan van $\alpha\text{-NiS}$ naar $\beta\text{-NiS}$ [9]. De daaraan gepaard gaande volumevergroting van 2 - 4% veroorzaakt een spanningsveld in het glas. Als de aldus opgewekte spanningen doordringen tot de trekspanningszone, zal er breuk optreden.

4.3 Meetmethoden

De voorspanningsgraad van een themisch voorgespannen glasplaat kan op twee manieren bepaald worden:

- Destrukatieve testen: bijv. het met een scherpe punt breken van de glasplaat en vervolgens het bepalen van de gemiddelde scherf afmeting/ hoeveelheid scherven per oppervlakte-eenheid (vgl. fig. 6);
- Fotoelastische meting van de drukspanning: De enige niet-destrukatieve methode om spanningen in glas te bepalen is een fotoelastische meting. De fotoelastische meting is gebaseerd op de dubbelbrekende eigenschappen van glas, d.w.z. dat de lichtsnelheid in glas in de ene polarisatie-richting anders wordt dan in de



andere polarisatie-richting als gevolg van aanwezige elastische spanningen. De dubbelbreking (of optische vertraging) per eenheid van weglengte van het licht is evenredig met het lokale verschil tussen de spanningen in beide polarisatie-richtingen, gemiddeld over de lichtweg. Op grond van dit principe kunnen spanningen in glas worden gemeten met behulp van een polariscope, bestaande uit een polarisator en analyzer. Voor spanningsmeting met een polariscope of polarisatiemicroscoop moet gemeten worden op een zijde van de glasplaat.

Voor (kwantitatieve) meting van de drukspanning in het oppervlak van een glasplaat zijn optische meetinstrumenten verkrijgbaar, die kunnen worden gebruikt voor kwaliteitscontrole en ook voor in-situ meting van de voorspanningsgraad. Bij zo'n instrument wordt een lichtstraal met behulp van een prisma onder de kritische hoek in het glasoppervlak gekoppeld. Hoe langer de weglengte van deze

Figuur 6: >>

Gemiddelde afmetingen van scherven vs. oppervlakte - drukspanning (ESG = Einscheiben - sicherheitsglas = gehard glas)

Tabel 5: >

Normen voor heat-strengthened (half gehard) glas [8].

lichtstraal door het glasoppervlak, hoe groter de optische vertaging van deze lichtstraal is t.o.v. een spekulair aan het glasoppervlak gereflekteerde lichtstraal. Dit effect wordt in een compensator omgezet in een rotatie van interferentie-lijnen. Door de rotatiehoek van de interferentie-lijnen te meten kan zodoende de drukspanning in het glasoppervlak worden bepaald

5. Konkluderende opmerkingen

Thermisch voorspannen is de belangrijkste beschikbare technologie om de mechanische sterkte van vlakglas te vergroten. In deze bijdrage is ingegaan op de achtergronden van het thermisch hardingsproces. Hierbij is de nadruk gelegd op begripsvorming van de fysische verschijnselen die bij dit proces een rol spelen.

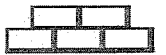
De achterliggende gedachte is dat de glastechnoloog op basis van een goede kennis van de relevante fysische achtergronden, het hardingsproces in de praktijk kan optimaliseren, en op systematische wijze noodzakelijk geachte wijzigingen kan doorvoeren.

Referenties

1. J.L. Barton en A. Merlín, The Glass Industry in Europe, Ceram. Eng. Sci. Proc. 14[3-4], p. 45 - 55 (1993)

2. R. Gardon, Thermal Tempering of Glass, in: "Glass: Science and Technology, Vol. 5, Elasticity and Strength in Glasses", Ed. D.R. Uhlmann, N.J. Kreidl, Ac. Press, NY, 1980, p. 145 - 216
3. H.A. Schaeffer, Thermal and chemical strenghtening of glass - review and outlook, in: C.R. Kurkjian ed., Strength of inorganic glass, Plenum Press NY (1985)
4. W.K. Kiefer and O. Lindig, Methods for thermal prestressing of glass, in: C.R. Kurkjian ed., Strength of inorganic glass, Plenum Press NY (1985)
5. K. Blank, Some practical aspects of thermally strenghtened glass, in: C.R. Kurkjian ed., Strength of inorganic glass, Plenum Press NY (1985)
6. K. Blank, Thermisch vorgespanntes Glas, Glas-techn. Ber. 52 (1979) Nr. 1, p 1 - 13 (Teil 1), p 51 - 54 (Teil 2)
7. M. Stekke, R. Brückner, "Heissbruch bei Ziehvorgängen von Glasschmelzen", Glastechn. Ber. 54 (1981), Nr.7, 205 - 215
8. V. Miihkinen, How heat strenghtening differs from tempering, Glass Digest / December 15, 1992, 48 - 50
9. O.O. Popoola, J.J. Cooper and W.M. Kriven, Microstructural investigation of fracture-initiating nickel sulfide inclusions in glass, 53rd Conference on Glass Problems, Ohio, November 17 - 18, 1992, 284 - 294

15e Jaargang, nummer 6/7



M C B

tevens gespecialiseerd in het maken van:

- luchtkanalen
- drogerijrekken
- drogerij- en tunnelovenwagens

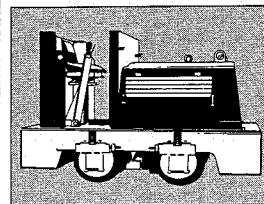
50 METER HOOG

TREKT ALS EEN LIER

Schoorsteenbouw is een van de vele specialisaties die M.C.B. in huis heeft.
Bel voor informatie.

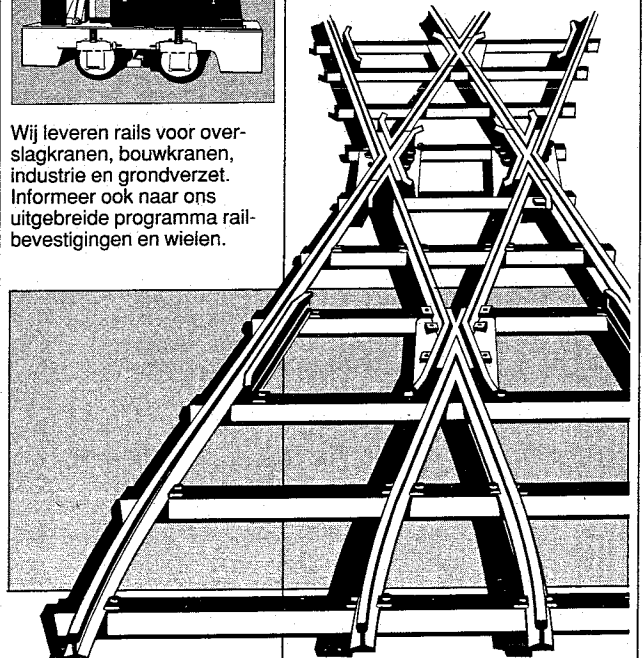
Moors Constructiebedrijf Bergharen
Breekwagen 6, Bergharen, Holland
☎ 08873-1487

RAILS EN WISSELS



Wij leveren rails voor over-slagkranen, bouwkransen, industrie en grondverzet. Informeer ook naar ons uitgebreide programma rail-bevestigingen en wielen.

uw wissel voor de toekomst



O D S SPOOR

Veerweg 65, Postbus 11, 3340 AA Hendrik Ido Ambacht,
Tel. 01858-14166, Fax 01858-18900