

Stefan Karlsson, RISE Glas
Maria Lang, RISE Glas
Anna-Lena Fransson, GFAB Sweden AB
Tomas Persson, GFAB Lindberg & Co AB



Spontangranulering av härdade glas

En litteraturstudie och en genomlysning av problemet
inom glasbranschen

Innehållsförteckning

Sammanfattning.....	2
Inledning	3
Sammanfattade resultat av enkäter	5
Resultat av litteraturstudien	6
Slutsatser.....	9
Fortsättning.....	10
Referenser	10
Innovationsmiljön drivs och finansieras av	13

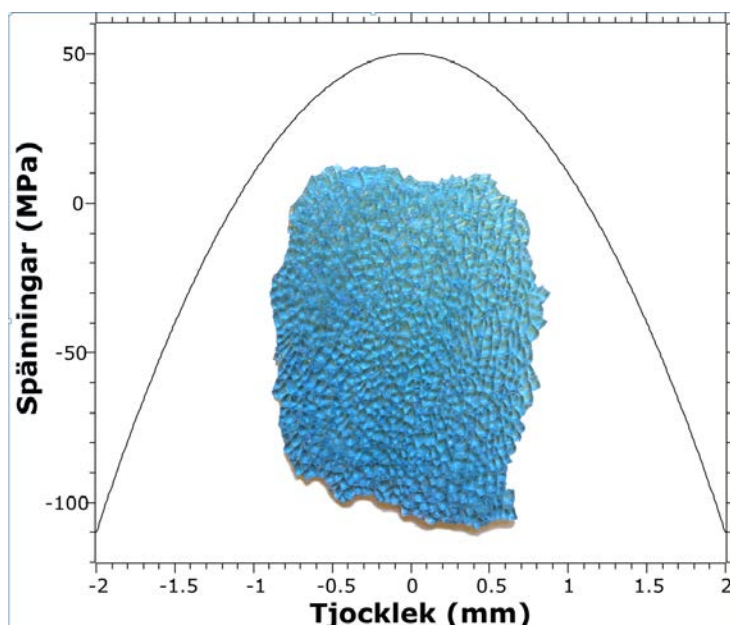
Sammanfattning

Härdat glas har många fördelar i flera avseenden bl a sprickmönstret, hållfastheten och ett överkomligt pris. Akilleshälen för termiskt härdat glas är spontangranulering som är ovanligt men som trots allt förekommer. Syftet med den här förstudien var att genomlysna hur vanligt förekommande det är genom enkäter till företag inom duschväggsbranschen samt göra en litteraturstudie med syftet att undersöka vilka metoder det finns att råda bot på problemet. Enkäterna visade att branschen inte direkt ser det som ett problem men endast en relativt liten andel för statistik på hur vanligt förekommande spontangranulering är. Litteraturstudien visade på en splittrad bransch varav en del förespråkar den standardiserade HST-metoden (heat soak test) medan andra kritiserar den. Oavsett har man lagt ner mest arbete på HST-metoden och det är den som fått störst genomslag, men den används inte i hela branschen. Metoden har sina brister men just nu pågår arbete med att uppdatera den befintliga standarden vilket kommer att göra den mer tillförlitlig. HST-metoden har dock fortfarande nackdelarna att den är relativt dyr och minskar härdningsgraden något. För alternativa metoder krävs tydliga satsningar som dock är osannolika eftersom problemet anses vara litet. De alternativ som identifierats som mest intressanta är metoder som ger ytterligare fördelar såsom t ex hållfasthessortering av planglas eller att man utvecklar en glassammansättning som lämpar sig för termisk härdning av glas.

Inledning

Härdat glas, mer korrekt benämnt termiskt härdat glas, är flera gånger starkare än vanligt glas [1]. Utan härdning är glas skört vid böjning eller vid andra typer av dragspänningar. Principen för termisk härdning är att glaset kyls snabbt men kontrollerat genom uniform kylning med luft [2]. Eftersom ytan kyls först så kommer den krympa mer än mitten på glaset, därmed är ytan i drag och mitten i tryck. Men när ytan börjar uppföra sig som ett fast elastiskt material så krymper mitten mer än ytan och därmed försätts istället glasytan i tryck, vilket ökar böjhållfastheten upp till ca tre gånger. De höga dragspänningarna i mitten på glaset ger upphov till karaktäristiska egenskaper för termiskt härdat glas, som gör att när det väl går sönder granulerar det i tusentals småbitar (se figur 1). Detta minimerar risken för allvarliga skärskador, men sker på ett sätt som kan upplevas explosionsartat. Oavsett orsak till bräckaget går glaset sönder på detta sätt. Vid tillräckligt hög påfrestning kan även härdat glas spricka av orsaker som [3]:

- Slag, stötar eller kraftig repning av glasytan (i synnerhet kanten) med vassa, hårda föremål
- hög mekanisk belastning som överskrider brottgränsen
- hög eller ojämn termisk belastning
- defekter/inneslutningar i glasmassan som sänker den normala hållfastheten
- kombinationer av ovanstående orsaker
- spänningskorrosion



Figur 1: Typisk parabolisk spänningsprofil i termiskt härdat glas, visad genom den matematiska funktionen $y=-40x^2+40$. Foto visar typisk granulering av termiskt härdat glas.

Den absolut vanligaste orsaken till att härdat glas spricker är yttre påverkan. Det finns dock även samband mellan kvalitet i glastillverkningen och risken för bräckage. Det som är tydligast kopplat till tillverkningen är ifall det finns defekter i glasmassan. Cirka 50 olika typer av inneslutningar eller föroreningar har identifierats, där de allra flesta är totalt harmlösa, men framför allt inneslutningar av nickelsulfider i planglas kan ge upphov till fördröjd granulering av termiskt härdade och värmeförstärkta glas [4]. Nickelsulfidpartiklar har förmåga att utvidgas med tiden och därmed spränga glaset inifrån - en välkänd orsak till spontangranulering av härdat glas [5, 6], något som man varit medveten om sedan 1960-talet [7] eller till och med 1940-talet [8]. Det har relativt nyligen kommit en studie som påstår att spontangranulering kan orsakas av kiselpartiklar i glas också [9], det krävs dock vidare studier.

Kvaliteten på glaskanten är viktig. En jämn och polerad kant minskar risken för spänningskoncentrationer som kan göra att glaset spricker vid ytterligare belastning. Planglas som ska härdas måste enligt standard ha en bearbetad kant, för att inte riskera att det spricker i härdugnen. För att minimera risken för bräckage ligger även ett ansvar på den tillverkare som använder glaset i en produkt. Generellt ska glaset monteras så att kanter skyddas, höga temperatur-gradienter undvikas, infästningar får inte orsaka spänningar, glaset ska inte komma i kontakt med hårda, vassa material, etc. Kvalitetssäkring av härdat glas görs enligt standard EN 12150, vilken fastställer att tillverkningsprocessen producerar härdade glas som uppfyller kraven på dimensionella toleranser, maximal pilhöjd (deformation pga härdningsprocessen), hållfasthet, kantbearbetning, optisk förvrängning etc. Termiskt härdat glas måste idag märkas att de uppfyller kraven enligt denna standard. Brandglas är i vissa fall också härdade och ska testas mot brand (EN 1363-1) och även uppfylla standarden EN 13501-2 där det finns två relevanta klassningar E30 och E60 (30 min respektive 60 min som de motstår brand) [10].

Bakgrunden till denna förstudie är att någon gång händer det att härdat glas till synes oförklarligt går sönder. I många fall, kan det dock härledas till att någon glaskant utsatts för alltför hög påfrestning, men i vissa fall handlar det om ren spontangranulering. Av förklarliga skäl finns det alltid en risk när detta händer att personer i närheten kanske blir både rädda och arga vilket kan ge mindre bra publicitet till glasbranschen. Därför initierades förstudien att undersöka hur vanligt förekommande det är och om det finns uppslag till metoder att identifiera och sortera ut glas som riskerar att spontangranulera framför allt med något alternativ till den konventionella heat-soak metoden. Inom projektet har man gjort en litteraturstudie och enkätintervjuer av företag inom främst badrumsbranschen. I projektgruppen har representanter ifrån RISE Glas och GFAB-koncernen ingått. Litteraturstudien som genomfördes inom projektet har publicerats i en vetenskaplig tidsskrift se ref [11].

Sammanfattade resultat av enkäter

Enkäten bestod av 11 frågor som skickades ut till olika företag som säljer duschväggar. I nedanstående tabell är resultat ifrån enkäten anonymiserade och sammanställda för att ge en så komplett bild som möjligt av branschens arbete i den här frågan.

Frågor i enkäten	Sammanställt svar	Kommentar
1. Hur många glas säljs per år?	Skiljer väldigt mycket men mellan ca 10 000 och ca 250 000 st av varierande tjocklekar.	
2. Hur många rapporteras som spontangranulerade per år	Skiljer mellan ca 0.02% till ca 0.5%.	De med lägre omsättning av glas har en något högre procentuell andel spontangranulering per år.
3. Hur många av de rapporterade fallen registreras som spontangranuleringar?	Varierar mellan 30% till 100%.	Ofta granulering vid montage.
4. För ni någon statistik över orsakerna till spontangranuleringar?	Ca 15% av företagen för statistik.	Ca 15% av företagen för statistik över granulering efter försiktig hantering.
5. Vad säger statistiken? A. När granulerade glasen? B. Hur länge hade glasen använts? C. Hur granulerade de?	De flesta företagen för inte statistik och därför förblev frågorna för de allra flesta obesvarade.	Oftast spontangranulerar glasen inom ett år.
6. Antal plana härdade glas som spontangranulerar	Varierar beroende om företag använder böjda eller inte.	
7. Antal böjda härdade glas som spontangranulerar?	Varierar beroende om företag sig av böjda eller inte.	Finns inga slutsatser att dra utifrån böjda/plana och teoretiskt bör det inte vara någon skillnad.
8. Ser ni att antalet rapporterade spontangranuleringar är ungefär det samma från år till år eller ser ni någon ökning/minskning?	Ungefär samma.	Med tanke på att företagen inte för statistik är svaren baserade mycket på känsla.

9. Ser ni någon skillnad beroende på vem som producerat de härdade glasen?	Företagen ser ingen skillnad.	Man bör notera att man inte vet något om det följs upp eller om företagen svarat på magkänsla.
10. Ser ni andra skillnader på glas som spontangranulerar?	Nej	Håltagning ger överrepresentation i spontangranuleringsstatistiken.
11. Övrig information.	Ovanligt att granulerade glas levereras ifrån leverantör.	Tyder på att det är ovanligt att glas går sönder i transport.

Resultat av litteraturstudien

Litteraturstudien visade på flera olika mått på frekvens och tidsaspekter av spontangranulering till följd av nickelsulfidineslutningar. Uppskattningsvis sker spontangranulering med en på femhundra glasskivor av genomsnittlig storlek. Det kan ske inom några dagar eller efter flera årtionden. De flesta spontangranuleringar sker inom 2-7 år från det att glaset tillverkades [12] eller 2-4 år därefter linjärt proportionellt mot logaritmen av tiden. En anledning till fördröjningen i tid är ett mellanrum mellan NiS partikeln och glaset på grund av skillnaderna i termisk utvidgningskoefficient, vilket ger lite plats för partikeln att expandera innan den börjar trycka mot glaset. Tiden till brott på grund av NiS beror av flera olika faktorer, t ex renhet av partikeln, placering av partikeln, härdningsgraden, storleken på hålet som partikeln befinner sig i, yttre faktorer såsom temperatur och vindlast samt storleken på glaspanelen [3]. Hur många inneslutningar som produceras beror även av glastillverkarens kvalitetsstyrning för att minimera föroreningar av nickel i glaset. Det finns inga riktlinjer i EN 12150 standard för hur man kan minimera inneslutningar av nickelsulfid, av den enkla anledningen att man idag inte kan spåra den exakta orsaken till varför dessa inneslutningar bildas i smältan. Generellt sett kan man minimera antalet NiS genom noggrann kontroll av råvaror, regelbundet underhåll av smältugnar, kylugnar och härdugnar, renlighet i härdugnen, varsam hantering av glaset vid transport och montering i produkter. Regelbundna kontroller av råmaterialen till glaset får genomgå en magnetisk separeringsteknik som tar bort alla metalliska material som sedan kan analyseras kemiskt. Liknande scanning av metalliska varor kan göras vid inmatning av råvaror i smältvannan. Förbättrade optiska kvalitetssystem i floatlinan kan även det sortera bort glas med defekter, som större NiS-partiklar, men de mindre är fortfarande för små för att detekteras. På grund av omöjligheten att detektera så små partiklar i glaset kan ingen glastillverkare garantera att glasen är fria ifrån NiS-partiklar [13]. Möjligheten finns också att använda planglas som har genomgått Heat-Soak Test (HST) som är en standardiserad metod EN 14179. Enstaka planglas som har genomgått HST sägs dock kunna spontangranulera men just nu pågår en genomsynning för att uppdatera EN 14179 vilket kommer att göra den mer detaljerad och mer tillförlitlig. Dock, på grund av den kontinuerliga

förbättringen av seriösa planglastillverkare, är NiS-partiklar ett ovanligt problem, men som i vissa batcher kan få ett stort genomslag då av en händelse en förorenad råmaterialsbatch slunkit igenom floatvannan. Helt och hållet har man inte kunnat komma undan NiS-problematiken men man har lyckats få ner antalet NiS-partiklar i glasen [14]. Reeves [15] har gjort en genomlysning av hur synen på spontangranulering har utvecklats genom historien och vilka åtgärder som har gjorts.

Planglasindustrin har genom åren försökt att förebygga spontangranulering i syfte att reducera risker men även kostnader genom olika åtgärder. Tre kriterier för en lämplig och effektiv metod är att den ska vara: i) kostnadseffektiv, ii) eliminera kostnaderna för ersättning av härdade glas vid spontangranulering (oftast den största kostnaden) och iii) förhindra personskador till personer som råkar vara i närheten när glas går sönder [12]. Än så länge har man inte kommit fram med någon lösning som uppfyller samtliga krav så därför är fortfarande alternativa metoder av intresse för industrin. Givetvis är det så att ju färre termiskt härdade glas man använder desto färre kommer spontangranuleringsproblemen att vara. Detta har man tagit fasta på i "Building envelope design guide" [16], som säger att man endast ska använda härdat glas där det är ett verkligt krav för hållfastheten samt att det är rekommenderat att använda sig av laminerat glas där det är möjligt. Lamineringen hjälper till att hålla glaset på plats om det går sönder och eliminerar i stort sett risken för personskador. En nackdel med laminering är förstås att det ökar vikten men också att det är betydligt dyrare och det ersätter inte kostnader att byta ut glas om det skulle gå sönder.

Det är väldigt svårt att kontrollera och eliminera nickel i glassmältan, svavel är antagligen ännu svårare. Den enkla anledning till att det är svårt att eliminera nickel är att det är så små mängder som behövs för att skapa kritiska inneslutningar som är en följd av att NiS är olösligt i glassmältan. Det är dock inte helt sant att NiS är olösligt i glassmältan men att det tar för lång tid för NiS att lösa sig [17]. Brungs och Sugeng föreslår att genom att förändra glassammansättningen (tillsätta oxidationsmedel) kunde man öka på hastigheten för NiS att lösa sig i glassmältan. Därmed skulle man principiellt standardisera en glassammansättning som lämpar sig för härdat glas. Än så länge finns ingen sådan standard och anledningen till det är att kostnaden är för hög. Det är varken praktiskt eller ekonomiskt försvarbart för industrin och fler studier behövs för att bevisa att det verkligen helt och hållet kommer att lösa NiS-problemen. Därmed är det osannolikt att industrin kommer att anta en metod som endast kommer att minska något som generellt sätt är mycket ovanligt. Nyligen har en annan studie publicerats [18] där man experimentellt simulerat NiS-partiklar genom olika tillsatser, bland annat med $ZnSO_4$ som oxidationsmedel vilket gjorde att NiS-partiklarna löste sig i glassmältan. Man har även studerat NiS-partiklar i borosilikat- och aluminosilikat-glas och visat att det inte finns risk för spontangranulering [19].

Det finns flera andra förslag på alternativa metoder till HST [12, 20, 21] t ex så kallad laser imaging , ultraljud eller kontrollerad mekanisk belastning. Laser och ultraljud är mer frekvent föreslagna på grund av att de är metoder som är icke-förstörande. Däremot är utrustningen som behövs relativt dyr och även om de kan automatiseras i processen krävs det fortfarande individuell testning av varje glasskiva. Det skulle avsevärt sänka produktionshastigheten i en härdningsfabrik vilket är

oacceptabelt. Dessutom ger dessa metoder ingen garanti att det inte finns några NiS-inneslutningar. Resultaten ifrån ultraljud och laser måste tydas av kompetent personal och felmarginalen är kanske ganska stor när man söker efter så små partiklar. Mekaniska belastningsmetoden har också sina brister, t ex så kan kalibreringsfel vad gäller den mekaniska lasten ge upphov till att större mängder glas går sönder än vad som egentligen behövs. I dagsläget är ingen av metoderna lämpade för storskalig produktion.

Ett annat problem som man behöver finna en lösning på är kontroll av övriga glas på t ex en byggnad där redan ett glas gått sönder. När glas går sönder ersätter man givetvis glaset men proaktiva intresseägare försöker även förhindra att det kommer att hända i framtiden [22]. Ett dyrt alternativ är att man tar bort samtliga glas och heat soak-testar dem såvida detta inte redan har gjorts innan de sattes upp. Alternativa metoder är inte heller billiga dels på grund av dyr utrustning men även kostnad för kompetent personal.

Ultraljud är en metod som använder ljudvågor och korresponderande eko för att få fram en bild av glaset. Resultaten kräver erfarna tekniker eftersom de ofta är svåra att tolka. Att använda ultraljud på större glas är tidskrävande och har inte heller ett hundraprocentigt utfall eftersom man letar efter så små partiklar. Varje gång man hittar en partikeln används mikroskop för att avgöra om partikeln är av kritisk storlek så det motiverar att byta glaset. Varje glas och varje inneslutning undersöks för sig vilket gör att det inte är en tidseffektiv process.

Laser imaging använder sig av ljusets förmåga att spridas när det träffar en partikel. Det innebär att man skickar laser genom glaset och detekterar spridningen på andra sidan. Laser används på grund av att det är koncentrerat och monokromt ljus vilket gör det lättare att detektera ljusspridningen. Förmågan att förutspå hur ljusspridningen påverkas av partiklars olika storlek är avgörande för att resultaten ska visa rätt storlek på inneslutningar. Liket ultraljud måste dock mikroskop användas för en kompetent person att avgöra om glaset bör bytas ut eller inte. Metoden är marginellt bättre än ultraljud eftersom man kan dra vissa slutsatser om hur liten partikeln är. Ett krav är dock att båda sidorna av glaset måste vara åtkomliga och transparenta. Laser imaging liknar ljusspridningsmetoden (scattered light method) som kan användas för att mäta spänningar i härdat glas också [23]. Det har testats för identifiering av NiS-partiklar [24]. Utifrån 1135 stycken testade glas hittades 17 som hade defekter större än 60 μm , för att sedan ta reda på om det är NiS behöver man använda någon ytterligare metod. Genom analys med EDS (energi-dispersiv röntgenspektroskopi) kunde man bestämma att endast en av dessa 17 var NiS, de flesta var bubblor. Utan att ta reda på vilka defekterna är skulle man däremot kunna sortera ut dessa för användning på ställen som inte är så kritiska för spontangranulering.

Fotometoden kom till genom ett samarbete mellan University of Queensland och företaget Resolve Engineering P/L. Metoden beskrivs mer i detalj i ref [25]. Metoden är indelad i tre steg där första steget innebär att man fotograferar glaset i en viss vinkel (högupplöst foto). På grund av vinkeln så kommer inneslutningen att visa sig som ett karakteristiskt punktpar. I andra steget söks fotot

systematiskt igenom med hjälp av mikrofiche (en typ av mikrofilm). Punktparen måste identifieras och avståndet mellan punkterna kan användas för att bestämma var inneslutningen befinner sig i glaset, de som befinner sig i dragspänningszonen undersöks i tredje steget med förstoringsslupp (10x) eller mikroskop. Färgen och ytstrukturen på NiS är speciell och kan därför lätt sorteras bort från andra typer av inneslutningar. Metoden är tidskrävande och beroende av kompetent personal som både fotograferar och granskar fotografierna. Det är också en speciell utrustning som krävs vilket gör att det blir relativt dyrt. Det är dock en mer tillförlitlig metod än andra; ett exempel är att man testade 4194 glas i en byggnad och identifierade 53 594 inneslutningar varav 291 st var NiS i den kritiska dragspänningszonen. Det testet genomfördes 1995 och med dagens moderniserade digitala kamera system så skulle det säkert kunna effektiviseras. Man bör dock vara medveten om att kravet åtminstone är 35 μm i pixelstorlek för att kunna urskilja en partikel av storleken 70 μm . Att undersöka 3 m² med den upplösningen skulle uppta 3 GB data [25]. Testet som gjordes 1995 hade behövt 5 TB för data som skulle samlas in, sparas och processas, det är en betydande mängd som de flesta företag skulle ha problem med att lösa rent tekniskt. Bildanalys är ett kraftigt verktyg som på senare år har blivit ett omfattande forskningsområde och som kan ha en mängd olika applikationer för glas exempelvis homogenitet [26], nötning [27] och formning [28]. Kravet för bildanalys är givetvis att man har en tillräcklig hög upplösning för den defekt som en algoritm ska identifiera.

En annan metod kombinerar fotoglasmetoden och laser imaging. Den beskrivs i detalj i ref [22]. Precis som är nämnt tidigare så sprids ljus när det träffar partiklar. Till skillnad från laser imaging som arbetar i transmissionsform så arbetar den här metoden i reflektionsform. När ljus transporteras in i glas bryts det lite eftersom glas har ett annat brytningsindex än luft men om det är introducerat in i glaset så att det bryts exakt så mycket att det blir totalreflektion kan ljuset fångas in i glaset. Ett problem är dock att ljus absorberas på vägen och till slut blir för svagt för att detekteras. Ref [22] beskriver hur utrustning kan fästas mot glaset via vakuum och att ljuset skickas in i glaset så att man uppnår vinkeln för TIR (total internal reflection). Inneslutningar skiner då upp som ljuspunkter på grund av att de sprider ljuset i alla riktningar. Det verkar smidigt men för att avgöra om inneslutningarna är kritiska måste man inspektera dem i mikroskop vilket gör att metoden blir lika oattraktiv som de andra metoderna. Ref [22] föreslår att man skulle kunna använda sig av fotometoden dvs. en vinklad kamera och därmed kunna bestämma djupet av inneslutningen.

Slutsatser

Nickelsulfid inneslutningar är alltså ett problem för glasindustrin, man har dock kunnat minimera att spontangranuleringar sker till mindre än 1% av alla härdade planglas. När termiskt härdat glas går sönder splittras det i små trubbiga bitar men kan givetvis ge mindre skärskador till nära stående personer eller djur. I och med spänningar i glaset blir glaset starkare och ger trubbiga bitar men de höga dragspänningarna i mitten av glaset orsakar även ett explosionsartat sprickförlopp. Trots att man genom åren studerar NiS-partiklar och spontangranulering och hur man kan minimera dessa har

man ännu inte kommit fram med en metod som är fulländad. Heat-soak-metoden har genererat mest genomslag i och med att den blivit en standard som håller på att uppdateras men det har fortsatt en rad nackdelar som t ex att den är dyr och att den minskar härdningsgraden, samt att den tidigare även visat sig vara statistiskt osäker. Flera av de alternativa metoderna kräver utveckling innan de kan visa att de är dugliga att ersätta HST-metoden men det krävs att industrin satsar de ekonomiska resurser som krävs, vilket är dock osannolik med tanke på hur ovanlig spontangranulering är. Men kan man identifiera en metod som även detekterar andra saker som t ex härdningsgraden eller kan sortera ut hållfasthetsförsvagade glas då blir det genast mer intressant för industrin. Alternativt att man arbetar fram en glassammansättning som lämpar sig för termiskt härdat glas där riskfyllda NiS-partiklar inte bildas utan löser sig i glassmältan. Glassammansättningen som används i de allra flesta glas är framförallt optimerad för floatprocessen och för att hålla nere priset, inte för optimerade egenskaper i förhållande till vad som är ekonomiskt försvarbart.

Fortsättning

Resultaten visar på att problemet med nickelsulfidpartiklar och spontangranulering är ett litet men viktigt problem. Det finns dock inte mycket som tyder på att industrin idag har ett tillräckligt starkt incitament att undersöka lösningar på NiS-bekymret och spontangranulering som en isolerad företeelse. Det skulle krävas en metod som ger andra kvalitetshöjande fördelar på köpet. HST-metoden undersöks just nu vidare med resultat som tidigare varit konfidentiella men som snart kommer att kunna publiceras. Samtidigt pågår en uppdatering av standarden för HST vilket kanske återupprättar förtroendet för metoden. Förmodligen kommer dock forskare även att driva utvecklingen i riktning mot nya glassammansättningar med optimerade egenskaper och som dessutom inte har problem med kritiska nickelsulfidpartiklar. Den utvecklingen skulle påskyndas väsentligt av att industrin visar sig villig att haka på tåget och bidra till utveckling och implementering.

Referenser

1. Karlsson, S., B. Jonson, and C. Stålhandske, *The Technology of Chemical Glass Strengthening - a Review*. Glass Technology - European Journal of Glass Science and Technology Part A, 2010. 51(2): p. 41-54.
2. Gardon, R., *Thermal Tempering of Glass*, in *Glass Science and Technology vol 5 Elasticity and Strength in Glasses*, D.R. Uhlmann and N.J. Kreidl, Editors. 1980, Academic Press, New York. p. 145-216.
3. Jacob, L. *Factors that Influence Spontaneous Failure in Thermally Treated Glass – Nickel Sulphide*. in *Glass Processing Days*. 1997. Tampere, Finland.
4. Johnson, R.R., *Managing the Problems Inherent in Tempered Glass*. US Glass Magazine, 2008. 43(6).

5. Yi-Wang, B. and L. Zheng-Quan, *Mechanism and Criterion of Spontaneous Breakage of Tempered Glass*. Journal of Inorganic Materials, 2016. **31**(4): p. 401-406. 10.15541/jim20150444
6. Stachel, D., *Nickel sulphidic inclusions with heterogenous structure*. Glass Science and Technology, 2000. **73**: p. 331-340.
7. Ballantyne, E., *Fracture of Toughened Glass Wall Cladding, ICI House, Melbourne*1961: Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Division of Building Research.
8. Jacob, L. *A Review of the Nickel Sulphide Induced Fracture in Tempered Glass*. in *Glass Performance Days*. 2001. Tampere, Finland.
9. Bao, Y., L. Liu, S. Han, X. Shi, and J. Yang, *A new mechanism of spontaneous breakage of tempered glass-monomolithic silicon particles*. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2007. **35**(9): p. 1273.
10. Gelderie, U. and A. Kasper, *How to prevent spontaneous breakage of thermally toughened alkaline earth silicate glass*. Glass Technology - European Journal of Glass Science and Technology Part A, 2008. **49**(3): p. 126-132.
11. Karlsson, S., *Spontaneous Fracture in Thermally Strengthened Glass - A Review and Outlook*. Ceramics-Silikáty, 2017. **61**(3): p. 188-201. 10.13168/cs.2017.0016
12. Gromovski, K., *Glass Breakage - Nickel Sulfide Inclusions*, 2010, Pennsylvania State University.
13. *Spontaneous Breakage of Tempered Glass*, in *NSG Pilkington Technical Bulletin*, 2013.
14. Yousfi, O., P. Donnadiou, Y. Bréchet, F. Robaut, F. Charlot, A. Kasper, and F. Serruys, *Phase transformations in nickel sulphide: Microstructures and mechanisms*. Acta Materialia, 2010. **58**(9): p. 3367-3380. <http://dx.doi.org/10.1016/j.actamat.2010.02.011>
15. Reeves, J., *Nickel Sulphide inclusions - A report on the phenomena of spontaneous breakage in fully tempered glass*, 2004, Gulf Glass Industries U.A.E.
16. Vignier, N. and M. Brown, *Building Envelope Design Guide—Glazing*. Whole Building Design Guide, National Institute of Building Science, 2009.
17. Brungs, M. and X. Sugeng, *Some solutions to the nickel sulphide problem in toughened glass*. Glass Technology, 1995. **36**(4): p. 107-110.
18. Wasylak, J., M. Reben, and S. Bielecki, *Behaviour of nickel sulphide inclusions in glass melts*. Materiały Ceramiczne, 2011. **63**(1): p. 48-53.
19. Tölke, T., A. Barz, and D. Stachel, *Behaviour and phase transformations of nickel sulphide inclusions in glass melts*. Journal of Physics and Chemistry of Solids, 2007. **68**(5–6): p. 830-834. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpcs.2007.03.042>
20. Ford, T.J. *Spontaneous fracture of glass due to nickel sulfide inclusions: risk management and development of a non destructive testing system*. in *Proceedings of International Conference on Building Envelope Systems and Technology (ICBEST), CWCT Services, Bath, UK*. 1997.
21. Solinov, V.F., *Effect of nickel sulfide inclusions on the spontaneous failure of toughened glasses*. Glass and Ceramics, 2007. **64**(5): p. 149-152. 10.1007/s10717-007-0038-z
22. Li, X., Z.P. Fang, I. Reading, L. Zhao, and S.L. Chow. *In situ inspection of inclusions in toughened glass panels of high-rise buildings*. in *Microtechnologies for the New Millennium 2005*. 2005. International Society for Optics and Photonics.
23. Aben, H., J. Anton, and A. Errapart, *Modern Photoelasticity for Residual Stress Measurement in Glass*. Strain, 2008. **44**(1): p. 40-48. 10.1111/j.1475-1305.2008.00422.x
24. Li, X., Z.P. Fang, F.L. Ng, L.P. Zhao, and L. Zhao. *Inspection and Image Analysis of Nickel Sulphide Inclusions in Toughened Glass Panels*. in *2006 9th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision*. 2006.
25. Barry, J., *The Achilles Heel of a Wonderful Material: Toughened Glass*, in *Glass on Web*, 2006.

26. Jensen, M., R. Keding, and Y. Yue, *Quantification of Chemical Striae in Inorganic Melts and Glasses through Picture Processing*. Journal of the American Ceramic Society, 2010. **93**(9): p. 2705-2712. 10.1111/j.1551-2916.2010.03784.x
27. Nielsen, K.H., S. Karlsson, R. Limbach, and L. Wondraczek, *Quantitative image analysis for evaluating the abrasion resistance of nanoporous silica films on glass*. Scientific Reports, 2015. **5**: p. 17708. 10.1038/srep17708
28. Hotar, V., F. Novotny, and H. Reinischova, *Objective evaluation of the corrugation test for sheet glass surfaces*. Glass Technology - European Journal of Glass Science and Technology Part A, 2011. **52**(6): p. 197-202.

Innovationsmiljön drivs och finansieras av

