

Lasin karkaisun laatuongelmat

Antti Aronen

Tiivistelmä. Karkaistulta lasilta vaaditaan hyvää lujuutta sekä visuaalista laatua. Näihin voidaan vaikuttaa lasin karkaisuprosessin lämmönsiirron hallinnalla. Karkaisuprosessin tärkeimmät parametrit ovat karkaisulämpötila sekä lämmönsiirron voimakkuus jäädytyksessä, jotka vaikuttavat jäännösjännityksiin. Prosessituntemus sekä lasin käyttäytymisen ymmärtäminen ovat edellytyksiä sille, että karkaistun lasin laatua voidaan parantaa ja prosessin energiankulutusta pienentää. Numeerinen simulointi tuottaa tietoa lasin käyttäytymisestä erilaisissa tilanteissa sekä parametrien vaikutuksesta lopputuotteeseen.

Avainsanat: lasi, karkaisu, relaxoituminen, numeerinen simulointi

Johdanto

Karkaistu lasi on hyvin yleinen rakennusmateriaali. Monet julkisivut tai ikkunat on rakennettu karkaistusta lasista sen hyvän lujuuden johdosta. Laseilta vaaditaan hyvää lujuutta sekä läpinäkyvyyttä, joten lasin karkaisu sekä visuaalinen laatu ovat tärkeitä tekijöitä. Karkaisulaatuun eli lasin jännitysprofiliin voidaan vaikuttaa lasin lämmönsiirron hallinnalla. Visuaaliseen laatuun vaikuttaa lämmönsiirron hallinnan lisäksi myös lasiin vaikuttava tuenta.

Tasolasin valmistusprosessissa lasi pyritään jäädyttämään hitaasti, jotta lasiin ei syntyisi suuria jäännösjännityksiä. Näin toimitaan, jotta lasilevyä voidaan jatkokäsitellä esimerkiksi leikkaamalla. Lasi on kuitenkin hauras materiaali, jonka kestävyys vedossa on heikko, mutta puristuksessa hyvä. Lasin käytön kannalta voidaan tarvita parempaa kestävyyttä, joten lasia karkaistaan lämpökäsittelyllä. Lämpökäsittelyssä, jossa lasi ensin lämmitetään yli transitiolämpötilan ja tämän jälkeen jäädytetään riittävän nopeasti, saadaan lasin pintaan kestävyyttä parantava puristusjännitys.

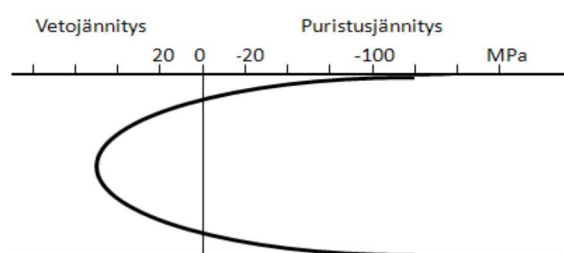
Lasin karkaisussa syntyvien jännitysten teoreettisista perusteista on julkaistu useita papereita [1-5]. Näissä on keskitytty karkaisun aikaiseen jännitysjakautumaan sekä jäännösjännityksiin. Jännityslaskentaa voidaan käyttää myös muodonmuutosten tutkimiseen. Karkaistun lasin muodonmuutoksista ja kokeellisista mittauksista on myös julkaistu [6-7].

Tämän artikkelin tarkoituksena on esittää teoreettinen tausta karkaistun lasin jännityksille ja muodonmuutoksille. Artikkelissa esitellään simuloinnin avulla tuloksia lämpötilan ja lämmönsiirron vaikutuksista lasin jännitysprofiliin sekä lämpötilan ja ajan vaikutuksista lasin muodonmuutoksiin. Lämpötilakenttä on jännitysten laskennan lähtötietona. Lämmönsiirron laskennan teoria on esitetty vain lyhyesti, mutta lisätietoa löytyy lähteistä [8-9].

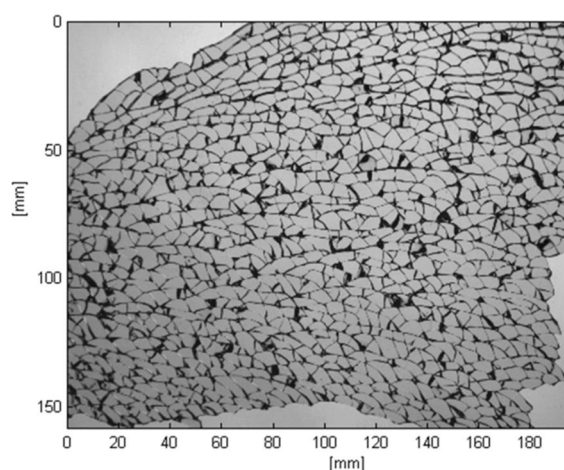
Lasinkarkaisun laatuongelmat

Karkaistun lasin suurin vaatimus on riittävä lujuus. Tämä saadaan lämpökäsittelyllä tuotetun pinnan puristusjännityksen avulla. Jännitystasoon vaikuttavat karkaisulämpötila sekä lämmönsiirron voimakkuus jäähdytyksessä. Liian matalan lämpötilan johdosta lasi käyttäytyy elastisesti, eikä pysyviä muodonmuutoksia synny. Sitä vastoin liian korkea lämpötila lisää lasin virumisnopeutta ja kasvattaa näin lasin muodonmuutoksia, mutta samalla helpottaa jäännösjännitysten syntyä. Liian heikko lämmönsiirto ei pysty tuottamaan vaadittavaa lämpötilaeroa pinnan ja keskustan välille jäähdytyksen alkuvaiheen aikana. Liian voimakas lämmönsiirto aiheuttaa pinnan kutistuessa suuren vetojännityksen pintaan ja aiheuttaa lasin särkyminen.

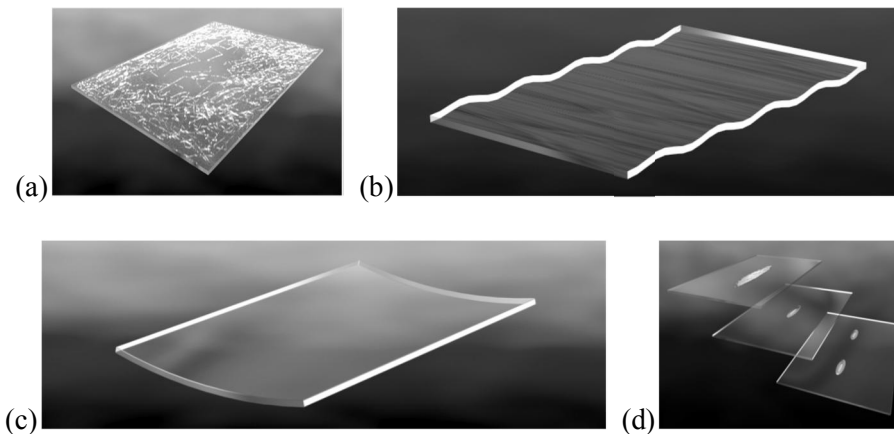
Karkaistun lasin vaatimukseen kuuluu riittävän pieni sirpalekoko lasin särkyessä. Sirpalekokoon vaikuttaa lasin jännitysjaakauma. Lämpökäsittelyllä muodostettu jännitysjaakauma on lähes parabolinen pinnan puristusjännityksen ja keskustan vetojännitysten suhteen ollessa 1,4 – 2,8 (kuva 1). Lasiin sitoutuneen energian jäädessä pieneksi lasin sirpalekoko on suuri (kuva 3a). Kuvassa 2 on esitetty standardit täyttävän lasin sirpalejakauma.



Kuva 1. Lasin jännitysjaakauma paksuuden yli.



Kuva 2. Rikotun lasin sirpalejakauma. Lasin paksuus 4 mm. [10]



Kuva 3. Lasin laatuvirheitä. (a) Suuri tai epätasainen sirpalekoko, (b) tela-aaltoilu, (c) kaareutuminen ja (d) juovat.

Keskitason suhteen epäsymmetrinen lämmönsiirto ja lämpötilakenttä aiheuttavat lasin muodonmuutoksia. Lämmityksen aikana muodostunut lasin kaareutuminen aiheuttaa lasin massan muodostaman paineen vaikutusalueen pientymisen. Tällöin lasiin painuu jälki kontaktikohtaan ja muodostuu juovia (kuva 3d). Jäähdytyksen aikana muodostuva epäsymmetrinen lämpötilakenttä aiheuttaa lasin kaareutumisen ja se näkyy siten, että lopputuloksena on kaareva lasi (kuva 3c).

Lasinkarkaisuprosessissa yleinen menetelmä on, että lasia siirretään telojen avulla ja telat kannattavat koko prosessin ajan lasia. Telat aiheuttavat lasille tuennan, joka muuttuu koko prosessin ajan. Koska tuennan aiheuttama painejakauma ei ole tasainen, lasiin syntyy taipumia. Syntyneitä taipumia kutsutaan tela-aalloiksi, jotka korostuvat korkeissa lämpötiloissa ja lasin päissä (kuva 3b).

Laadun tarkkailu

Karkaistun lasin laadun kannalta tärkeintä on kestävyys ja särkymisessä syntyvä sirpalekoko. Standardin EN-12150 [11] mukaan karkaistulle lasille tulee tehdä mekaaninen lujuuden mittausta sekä rikkoutumistestaus. Karkaistun lasin lujuus taivutustestissä tulee olla vähintään 120 MPa. Lujuuden ja rikkoutumisen lisäksi lasin laatuun vaikuttaa optinen laatu kuten muodonmuutokset. Standardi määrittää myös lasin suoruuden. Lasin jännitysten mittaamiseen on kehitetty myös optisia mittalaitteita. Näiden avulla saadaan testattua jännitystila ja kestävyys ilman lasin rikkomista [12].

Teoreettinen laskentamalli

Lämmönsiirto

Lasin karkaisun jännitysten laskennassa lähtötietona on lasin lämpötilakenttä ajan funktiona. Lasin lämmönsiirto tapahtuu säteilemällä, konvektiolla, johtumalla sekä kosketuslämmönsiirtona. Lämmityksessä lämmönsiirto on suurimmaksi osaksi säteilyä, mutta jäähdytyksessä pakotettu konvektio on pääasiallinen lämmönsiirtomuoto lasin ja ympäristön välillä.

Jätettäessä reunan lämmönsiirto huomioimatta lasin lämmönsiirtoa paksuuden yli hallitsee energiayhtälö,

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + S \quad (1)$$

jonka avulla voidaan laskea lasin lämpötilakenttä mekaniikan laskennan lähtötiedoksi. Yhtälössä ρ on tiheys, c on ominaislämpö, T on lämpötila, t on aika, k on lämmönjohtavuus ja S on säteilyn lähdetermi. [13]

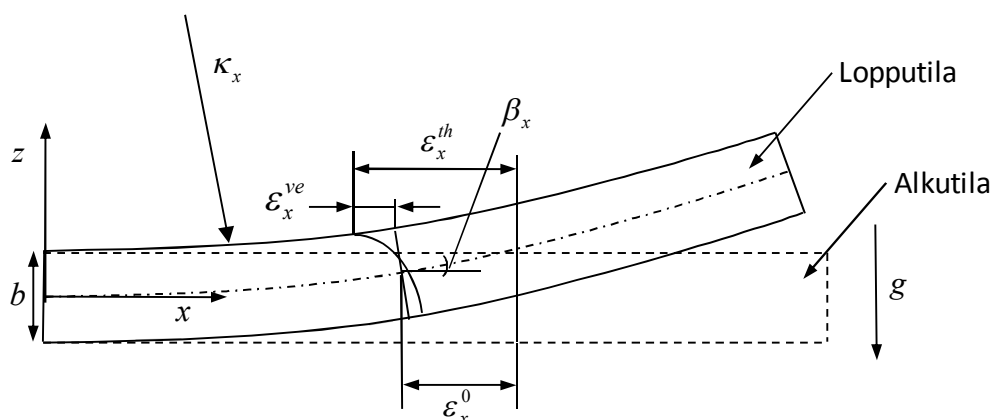
Energiayhtälön ratkaisemiseksi tarvitaan reunaehdot. Pinnasta siirtyvä lämpövirta q voidaan laskea määritellyn lämmönsiirtokertoimen h sekä pinnan lämpötilan ja ympäristön lämpötilan T_∞ välisen eron avulla. [13]

$$q = -k \frac{\partial T(b/2, t)}{\partial z} = h(T(b/2, t) - T_\infty) \quad (2)$$

Säteily on riippuvainen lasin ja säteilevän pinnan lämpötiloista sekä säteilyn aallonpituudesta. Lasi on säteilyä ajatellen puoliläpäisevä materiaali, joten kaikki säteilylämmönsiirto ei kohdistu pintaan vaan myös syvemmälle. Jäähdytyksessä säteilyn vaikutus on pieni verrattuna pakotetun konvektion aiheuttamaan lämmönsiirtoon ympäristön lämpötilasta johtuen. Lasin lämmityksessä säteilyn merkitys korostuu. [8]

Jännitykset ja venymät

Lasilevy on yleensä ohut verrattuna piteuteen ja leveyteen. Tällöin levyn jännitykset voidaan käsitellä tasojännitystilana, kun tarkasteltava piste on kaukana levyn reunoilta. Lämpötilakentän voidaan olettaa muuttuvan vain paksuussuunnassa. Lasi voi taipua joko lämpötilakentän epäsymmetrisyyden tai omasta massasta johtuvan momentin johdosta. Levyn käyttäytymisessä sovelletaan Kirchhoffin hypoteesia, eli geometrista keskitasoa kohtisuorassa olevat tasot säilyvät aina kohtisuorina tasoina keskitasoon nähden muodonmuutosten jälkeen [14]. Kuvassa 4 on esitetty levyyn syntyvät venymät ja kaarevuus x-suunnassa.



Kuva 4. Periaatekuva muodonmuutoksista levyssä.

$$\sigma_z(x, y, z, t) = 0 \quad (3)$$

$$\varepsilon_i^{tot} = \varepsilon_i^{th} + \varepsilon_i^{ve} \quad (4)$$

$$\varepsilon_i^{th}(x, y, z, t) = \varepsilon_i^{th}(z, t) = \alpha(z, t)\Delta T(z, t) \quad (5)$$

$$\varepsilon_x^{tot}(x, y, z, t) = \varepsilon_x^0(t) + \kappa_x(t)z \quad (6)$$

$$\varepsilon_y^{tot}(x, y, z, t) = \varepsilon_y^0(t) + \kappa_y(t)z \quad (7)$$

$$\varepsilon_z^{tot}(x, y, z, t) = \varepsilon_z^0(t) \quad (8)$$

Yhtälöissä (3)-(8) σ ja ε ovat normaalit jännitykset ja venymät. Yläindeksi 'th' vastaa lämpötilan vaikutusta, 've' viskoelastista vaikutusta ja 'tot' kokonaisvenymää. Leikkausjännityksiä ja liukumia ei oleteta syntyvän. Lämpövenymät riippuvat lämpötilan muutoksesta ja lämpölaajenemiskertoimesta α . Vaikuttava lämpölaajenemiskerroin on aika- ja lämpötilariippuvainen ja tämän vuoksi myös paikkariippuvainen. Tarkemmin lämpövenymä esitetään yhtälössä (31). Kokonaisvenymässä huomioidaan keskitason venymä ε_x^0 sekä kaarevuus κ_x .

$$\kappa_x = \frac{\partial \beta_x}{\partial x} = \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \quad (9)$$

Jännitys jakauman tulee toteuttaa voiman ja momentin tasapainoyhtälöt [15]

$$\int_{-b/2}^{b/2} \sigma_x(z, t) dz = N_x \quad (10)$$

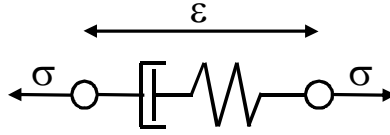
$$\int_{-b/2}^{b/2} \sigma_x(z, t) z dz = M_x \quad (11)$$

$$\int_{-b/2}^{b/2} \sigma_y(z, t) dz = N_y \quad (12)$$

$$\int_{-b/2}^{b/2} \sigma_y(z, t) z dz = M_y \quad (13)$$

Kun ainoastaan maan vetovoimasta aiheutuvat voimat otetaan huomioon normaalivoimat N_x ja N_y ovat nolliä, mutta momentit M_x ja M_y riippuvat paikasta ja tuennasta. Momentti M_x kuvaa x-suunnan paikasta riippuvaa levyn oman massan aiheuttamaa momenttia. Vastaavasti M_y riippuu y-suunnan paikasta. Laskennassa tulee olettaa alussa oleva jännityskenttä tunnetuksi, esimerkiksi kaikki jännitykset voidaan olettaa alussa nolliksi.

Prosessissa lasin lämpötila tulee nostaa transitiolämpötilan yläpuolelle, jotta lasin viskoosit ominaisuudet esiintyvät. Lasin käyttäytymistä korkeassa lämpötilassa voidaan kuvata viskoelastisena ilmiönä Maxwellin mallin avulla, jossa jousi kuvaa elastista käyttäytymistä ja vaimennin viskoosia käyttäytymistä (kuva 5).



Kuva 5. Maxwellin jousi-vaimennin malli.

Yleinen konstitutiivinen yhtälö Maxwellin mallin käyttäytymiselle on [16]

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\dot{\sigma}}{E} + \frac{\sigma}{\eta} \quad (14)$$

Yhtälössä E on kimmomoduuli, η on viskositeetti sekä ε ja σ ovat kuvassa 5 esitetyt venymä ja jännitys.

Yhtälön (14) avulla saatu yhteys jännitysten ja venymien välille on

$$\sigma(t) = E \exp\left(-\frac{E}{\eta}t\right) \varepsilon \quad (15)$$

Tässä yhtälössä venymän kerroin on relaksaatiofunktio $G(t)$, joka kuvaa jännityksen muutosta ajan suhteen vakiovenymällä ε .

Lämpökäsittelyssä tulee huomioida venymiä tarkasteltaessa myös lämpövenymät ε^{th} , joten jännityksiä laskettaessa tulee käyttää viskoelastista venymää ε^{ve} , joka on kokonaisvenymän ε^{tot} ja lämpövenymän ε^{th} erotus

$$\varepsilon^{ve} = \varepsilon^{tot} - \varepsilon^{th} \quad (16)$$

$$\sigma(t) = G(t) \varepsilon^{ve} \quad (17)$$

Koska ajan mukana venymät ja lämpötila saattavat muuttua, tulee laskennassa huomioida koko aikahistoria [6]

$$\sigma = \int_0^t G(t-t') \frac{\partial \varepsilon^{ve}}{\partial t'} dt' \quad (18)$$

Yhtälössä (17) tulee huomioida, että $0 < t' < t$. Relaksaatiofunktio $G(t)$ voidaan esittää Pronyn sarjana painokertoimen w_i ja siihen liittyvän relaksoitumisajan τ_i avulla [1]

$$G(t) = E_\infty + (E_0 - E_\infty) \sum_{i=1}^n w_i \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) \quad (19)$$

Yleensä relaksoitumisfunktio on annettu puristus- ja leikkausjännitysten relaksoitumisena. Venymät ja jännitykset tulee näin ollen jakaa hydrostaattiseen ($\bar{\varepsilon}$ ja $\bar{\sigma}$) ja deviaattoriseen osaan (e ja s)

$$\bar{\varepsilon}^{ve} = \varepsilon_{xx}^{ve} + \varepsilon_{yy}^{ve} + \varepsilon_{zz}^{ve} \quad (20)$$

$$\varepsilon_{ij}^{ve} = e_{ij}^{ve} + \delta_{ij} \frac{1}{3} \bar{\varepsilon}^{ve} \quad (21)$$

$$\bar{\sigma} = \sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz} \quad (22)$$

$$\sigma_{ij} = s_{ij} + \delta_{ij} \frac{1}{3} \bar{\sigma} \quad (23)$$

Vastefunktiot venymien ja jännitysten välille tulevat muotoon

$$s = \int_0^t G_1(t-t') \frac{\partial e^{ve}}{\partial t'} dt' \quad (24)$$

$$\bar{\sigma} = \int_0^t G_2(t-t') \frac{\partial \bar{\varepsilon}^{ve}}{\partial t'} dt' \quad (25)$$

Yhtälössä (24) G_1 on leikkausjännityksen relaksoitumisfunktio ja yhtälössä (25) G_2 on puristusjännityksen relaksoitumisfunktio.

Rakenteellinen relaksoituminen

Rakenteellinen relaksoituminen ottaa huomioon materiaalin mikrorakenteellisen järjestyksen muutoksen ajan suhteen. Samalla rakenteellinen relaksoituminen kuvaa aineominaisuuksien muutosta ajan suhteen, erityisesti tilavuuden muutosta. Rakenteellista relaksoitumista kuvataan usein fiktiivisen lämpötilan avulla. Vastefunktio aineominaisuuksien muutokselle ajan suhteen voidaan kuvata myös lämpötilan muutoksena. [2,16]

$$M_p(t) = \frac{p(t) - p_2(\infty)}{p_2(0) - p_2(\infty)} = \frac{T_f(t) - T_2}{T_1 - T_2} \quad (26)$$

Yhtälössä alaindeksi 1 kuvaa ennen muutosta olevaa tilaa ja 2 muutoksen jälkeistä tilaa, lisäksi p on jokin laskettava suure, kuten tilavuus. Yhtälön (26) avulla voidaan laskea fiktiivinen lämpötila T_f ajan hetkellä t . Laskennassa tulee ottaa huomioon koko aikahistoria. [2]

$$T_f(t) = T(t) - \int_0^t M_p(t-t') \frac{dT(t')}{dt'} dt' \quad (27)$$

Rakenteellisen relaksoitumisen vastefunktio $M_p(t)$ voidaan esittää analogisesti jännitysten relaksoitumisen kanssa [2]. Vastefunktion kuvataan Pronyn sarjaa käyttäen painokertoimen C_i ja relaksoitumisajan λ_i avulla.

$$M_p(t) = \sum_{i=1}^n C_i \exp\left(-\frac{t}{\lambda_i}\right) \quad (28)$$

Jännitysten ja rakenteellisen relaksoitumisen ajat τ ja λ ovat riippuvaisia lämpötilasta. Näiden lämpötilariippuvuutta voidaan kuvata Arrheniuksen yhtälön tyylisellä siirtofunktiolla $\Phi(t)$ [2]

$$\Phi(t) = \frac{\tau}{\tau_{ref}} = \exp\left[\frac{H}{R} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T(t)} \right)\right] \quad (29)$$

Kun huomioidaan lämpötilan muutos sekä mikrorakenteellisesta järjestyksestä johtuva muutos, tulee käyttää fiktiivistä lämpötilaa [17]

$$\Phi(t) = \exp\left[\frac{H_g}{R}\left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T(t)}\right) + \frac{H_s}{R}\left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_f(t)}\right)\right] = \exp\left[\frac{H}{R}\left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{x}{T(t)} - \frac{1-x}{T_f(t)}\right)\right] \quad (30)$$

Yhtälössä (30) aktivoitumisenergia H on ensimmäisessä kohdassa jaettu kahteen osaan. Lämpötilan muutoksesta riippuvaan H_g :hen ja rakenteelliseen järjestyksen muutoksesta riippuvaan H_s :ään. Jälkimmäisessä termissä $H = H_g + H_s$ ja $x = H_g/H$. Yhtälössä R on yleinen kaasuvakio.

Lasin lämpöpiteneiskerroin on riippuvainen lämpötilasta. Korkeassa lämpötilassa tulee huomioida myös mikrorakenteen järjestyksestä johtuva tilavuuden muutos. Lämpövenymää laskettaessa tuleekin huomioida todellinen lämpötilan muutos sekä fiktiivisen lämpötilan muutos. [2]

$$\Delta\varepsilon^{th}(t) = \alpha_l \Delta T(t) + (\alpha_l - \alpha_g) \Delta T_f(t) \quad (31)$$

Lämpöpiteneiskerroin nestemäiselle lasille α_l on noin kolminkertainen kiinteän lasin lämpöpiteneiskertoimeen α_g nähden.

Relaksoitumista laskettaessa käytetään ajan paikalla redusoitua aikaa ξ . Tämä ottaa huomioon lämpötilan muutoksesta aiheutuvan relaksoitumisajan muutoksen sekä koko aikahistorian. [2]

$$\xi(t) = \int_0^t \Phi(t') dt' \quad (32)$$

Numeerinen simulointi

Numeerinen simulointi voidaan jakaa eri vaiheisiin. Ensin tulee laskea lämpötilakenttä. Lämpötilakentän avulla saadaan laskettua siirtofunktio sekä fiktiivinen lämpötila, jotka ovat riippuvaisia toisistaan. Siirtofunktiota ja fiktiivistä lämpötilaa tarvitaan lämpövenymien, redusoidun ajan sekä puristus- ja leikkausmodulin määrittämiseen. Kun aineominaisuudet eri ajanhetkillä tunnetaan, voidaan laskea venymät ja jännitykset. Jännityskentän tulee toteuttaa voima ja momentti reunaehdot. Seuraavaksi esitellään eri laskennan vaiheiden periaatteita.

Lämmönsiirto

Lämpötilakenttä on lähtökohtana mekaniikan laskennalle. Materiaalin aineominaisuudet riippuvat lämpötilasta ja lämpövenymät lämpötilan muutoksesta. Lämpötilakentän laskennassa käytetään energiayhtälöä yhdessä reunaehtojen kanssa. Laskennassa tulee huomioida aineominaisuuksien muutokset, jotka ovat riippuvaisia lämpötilasta [1].

Fiktiivinen lämpötila ja redusoitu aika

Fiktiivinen lämpötila voidaan laskea yhtälöitä (26)-(30) soveltaen [18].

$$T_{fi}(t) = \frac{\lambda_i T_{fi}(t - \Delta t) + \Delta t T(t) \Phi(t)}{\lambda_i + \Delta t \Phi(t)} \quad (33)$$

$$T_f(t) = \sum_{i=1}^n C_i T_{fi}(t) \quad (34)$$

Aika-askeleen ollessa lyhyt, siirtofunktio ajan hetkellä t voidaan laskea eksplisiittisenä tapauksena muuttujan T_f osalta

$$\ln \Phi(t) = \frac{H}{R} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{x}{T(t)} - \frac{(1-x)}{T_f(t - \Delta t)} \right) \quad (35)$$

Jännitykset ja venymät

Jännitysten ja venymien välinen vastefunktio (relaksoitumisfunktio) $G(t)$ tulee laskennassa esittää redusoidun ajan $\xi(t)$ funktiona [1]

$$G(\xi(t)) = G_\infty + (G_0 - G_\infty) \sum_{i=1}^n w_i \exp\left(-\frac{\xi(t)}{\tau_{refi}}\right) \quad (36)$$

Tämä tulee huomioida yhtälön (18) laskennassa

$$\sigma(t) = \int_0^t G(\xi(t) - \xi(t')) \frac{d(\varepsilon(t') - \varepsilon^{th}(t'))}{dt'} dt' \quad (37)$$

Integraali tulee jakaa laskentaa varten kahteen osaan, joista ensimmäisessä osassa huomioidaan edellisen aika-askeleen tulokseksi saadun jännityksen relaksoituminen ajan Δt aikana ja toisessa osassa huomioidaan nykyisen aika-askeleen aikana muodostuneet uudet venymät ja tämän venymän muodostaman jännityksen relaksoituminen. Lisäksi laskennassa tulee käsitellä hydrostaattinen ja deviaattorinen osa erikseen. [19]

$$\sigma_{ij}(z, t_n) = \delta_{ij} \left[\frac{G_2(\xi(z, t_n) - \xi(z, t_{n-1}))}{G_2^0} \bar{\sigma}_{ij}(z, t_{n-1}) + \int_{t_{n-1}}^{t_n} G_2(\xi(z, t) - \xi(z, t')) \frac{d(\bar{\varepsilon}(z, t') - 3\varepsilon^{th}(z, t'))}{dt'} dt' \right] + 2 \left[\frac{G_1(\xi(z, t_n) - \xi(z, t_{n-1}))}{G_1^0} s_{ij}(z, t_{n-1}) + \int_{t_{n-1}}^{t_n} G_1(\xi(z, t) - \xi(z, t')) \frac{d(e_{ij}(z, t'))}{dt'} dt' \right] + \delta_{ij} G_2^\infty (\bar{\varepsilon}(z, t_n) - 3\varepsilon^{th}(z, t_{n-1})) \quad (38)$$

Yhtälössä G_1 on leikkausmoduuli ja G_2 on puristusmoduuli. G_2^∞ on puristusmoduulin loppuarvo sekä G_1^0 ja G_2^0 leikkausmoduulin ja puristusmoduulin alkuarvo.

Yhtälössä (38) esiintyvä integraali muutetaan muotoon [19]

$$\begin{aligned}
& \int_{t_{n-1}}^{t_n} G(\xi(z, t) - \xi(z, t')) \frac{d\varepsilon(z, t')}{dt'} dt' \\
&= \frac{\varepsilon(z, t_n) - \varepsilon(z, t_{n-1})}{\Delta t} \int_{t_{n-1}}^{t_n} G^0 \exp[-(\xi(z, t_n) - \xi(z, t'))/\tau_{ref}] dt' \\
&= \frac{\varepsilon(z, t_n) - \varepsilon(z, t_{n-1})}{\Delta t} G^0 \{1 - \exp[-(\xi(z, t_n) - \xi(z, t_{n-1}))/\tau_{ref}]\}
\end{aligned} \tag{39}$$

Muodonmuutokset

Lasiin syntyvät muodonmuutokset voidaan laskea venymien ja kaarevuuksien avulla [15].

$$u(x, z, t) = \int_0^x (\varepsilon_x^0(t) + \kappa_x(t)z) dx \tag{40}$$

$$v(y, z, t) = \int_0^y (\varepsilon_y^0(t) + \kappa_y(t)z) dy \tag{41}$$

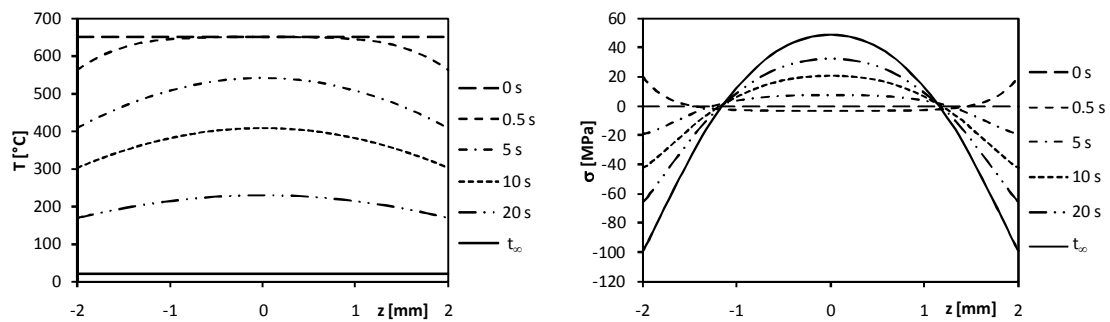
$$w(x, y, z, t) = \int_0^x \left(\int_0^x \kappa_x(x, t) dx \right) dx + \int_0^y \left(\int_0^y \kappa_y(t) dy \right) dy + \int_0^z \varepsilon_z^0 dz \tag{42}$$

Laskentatuloksia

Numeerisen laskennan avulla voidaan tutkia eri parametrien vaikutusta karkaisutulokseen. Lämpötila- sekä jännitys- ja muodonmuutoskentät on laskettu omalla edellä esitettyyn teoriaan perustuvalla 1D laskentaohjelmalla. Liikkuvan lasin tapauksessa on käytetty ANSYS elementtimenetelmäohjelmalla. Laskennassa on käytetty lähteessä [1] esitettyjä aineominaisuuksia ja säteily on jätetty huomioimatta.

Jännitysprofiili

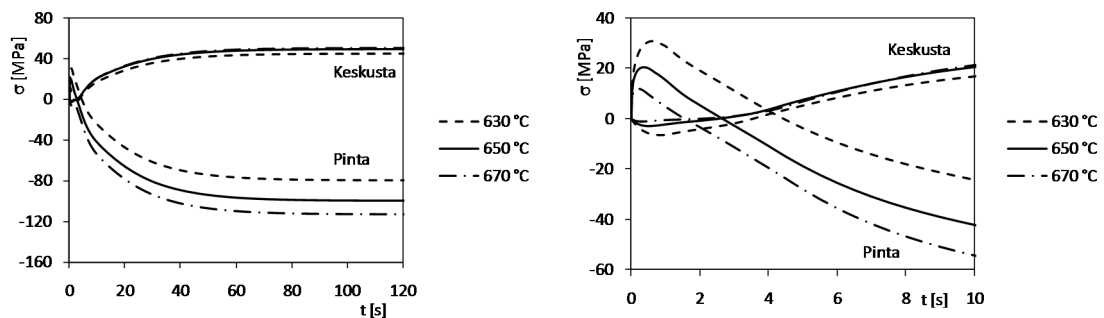
Lasin jännitysprofiili muodostuu jäähtytyksen aikana. Jäähtytyksen aluksi pinta jäähtyy nopeammin kuin keskusta, ja pintaan muodostuu vetojännitys. Keskusta puristuu kasaan, ja samalla jännitykset relaxoituvat. Kun pinnan lämpötila laskee alle transitiolämpötilan, sen käyttäytyminen muuttuu elastiseksi. Keskusta on kuitenkin tässä vaiheessa kuumempi kuin pinta, joten keskusta kutistuu jäähtytyksen loppuvaiheessa enemmän kuin pinta ja muodostaa näin lasin keskustaan vetojännityksen ja pintaan puristusjännityksen. Kuvassa 6 on esitetty jäähtytyksessä syntyvä lämpötila- ja jännitys jakauma.



Kuva 6. Lämpötila- ja jännitys jakauma lasin paksuuden yli jäädytyksen aikana. $T_0 = 650 \text{ }^\circ\text{C}$, $h = 450 \text{ W/m}^2\text{K}$ ja $b = 4 \text{ mm}$.

Lämmönsiirron ja lämpötilan vaikutus

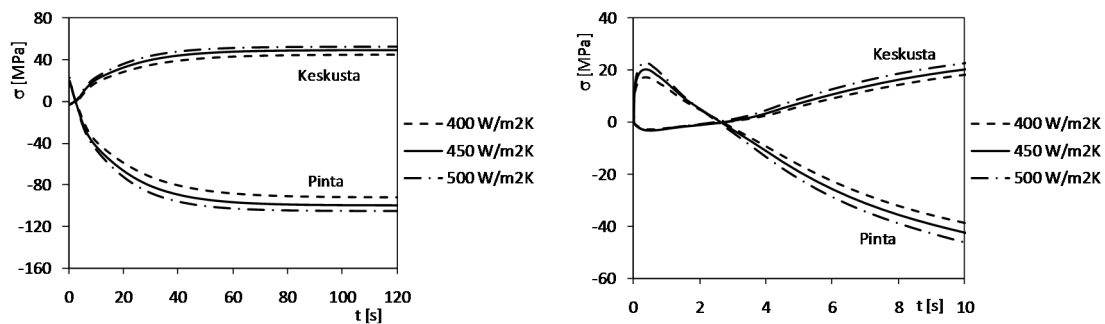
Simulointien avulla voidaan tutkia lämmönsiirron tai karkaisulämpötilan vaikutusta karkaisun aikana syntyviin jännityksiin sekä jäännösjännityksiin. Esimerkkinä on tutkittu 4 mm paksun lasin jäädytyksessä syntyviä jännityksiä pintaan ja keskusta. Kuvassa 7 on karkaisulämpötilaa T_0 muutettu lämmönsiirtokertoimen ollessa vakio $450 \text{ W/m}^2\text{K}$.



Kuva 7. Karkaisulämpötilan vaikutus jäännösjännityksiin. Oikeanpuoleisessa kuvassa tarkennettu 0-10 s alussa syntyvän jännityksen vertailemiseksi.

Kuvan 7 tuloksista nähdään, että karkaisulämpötilan nostaminen kasvattaa jäännösjännityksiä. Lämpötilan nostaminen helpottaa myös lasin pysymistä ehjänä karkaisun alussa, kun pintaan muodostuva vetojännitys on pienempi. Lasin kestävyys vedossa on noin 30-50 MPa [12].

Kuvassa 8 on lämmönsiirtokerrointa muutettu karkaisulämpötilan ollessa vakio $650 \text{ }^\circ\text{C}$.

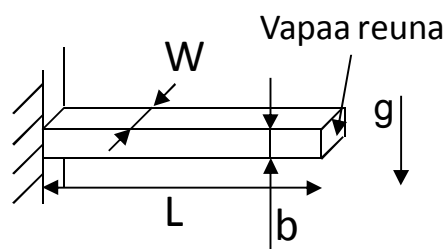


Kuva 8. Lämmönsiirtokertoimen vaikutus jäännösjännityksiin. Oikeanpuoleisessa kuvassa tarkennettu 0-10 s alussa syntyvän jännityksen vertailemiseksi.

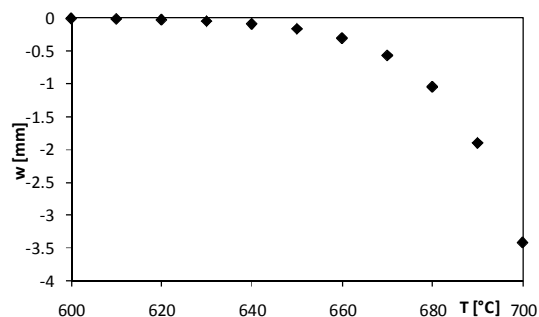
Kuvan 8 tuloksista nähdään, että lämmönsiirron vahvistaminen kasvattaa jäännösjännityksiä. Lämmönsiirron kasvattamisessa ongelmaksi muodostuu jäähtymisen alkuvaiheessa syntyvä pinnan vetojännitys, joka rikkoo lasin.

Tela-aaltoilu

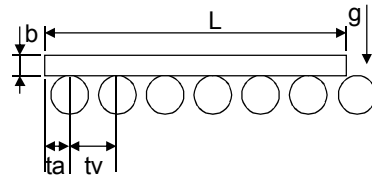
Kuvassa 9 esitettyjen tulosten avulla huomataan lämpötilan vaikutus lasin virumisnopeuteen. Lämpötilan nostaminen helpottaa karkaisua (kuva 7), mutta samalla se lisää muodonmuutoksia. Lasinkarkaisuprosessissa lasi liikkuu yleensä telojen päällä, jolloin lasi on viivamaisesti tuettu. Erityisesti lasin päihin muodostuu yhdestä reunasta täysin tuettua levyä vastaava tilanne, jossa vapaan pään pituus ja samalla levyn oman massan aiheuttama momentti riippuu lasin paikasta teloihin nähden.



Kuva 9. Yhdestä reunasta täysin tuettu levy.

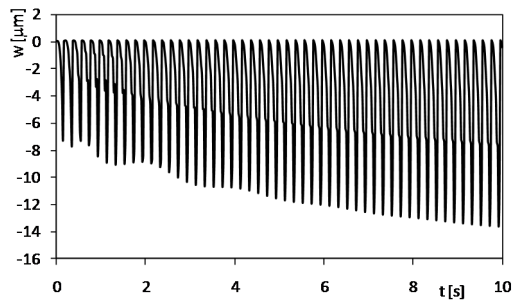


Kuva 10. Kapean yhdestä reunasta täysin tuetun levyn vapaan reunan taipuma 1 s aikana eri lämpötiloilla. Levyn pituus $L = 10$ cm ja paksuus $b = 4$ mm.

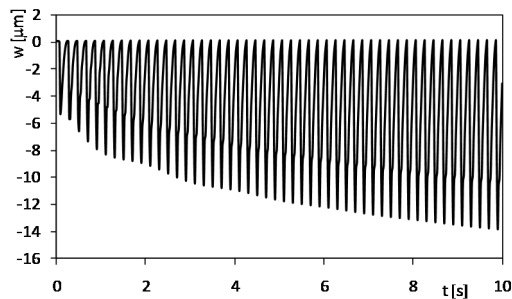


Kuva 11. Telatuettu lasi.

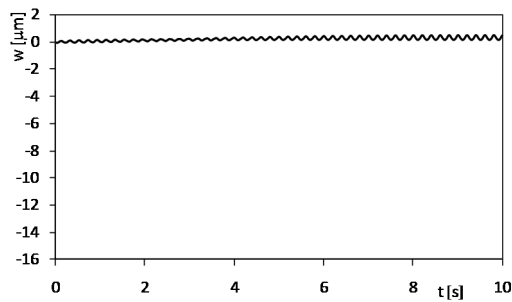
Kuvissa 12 - 14 on esitetty liikkuvan telatuetun lasin (kuva 11) taipumia eri kohdissa. Lasi, jonka paksuus on $b = 4$ mm ja pituus $L = 0,75$ m, liikkuu nopeudella $0,5$ m/s. Telaväli $t_v = 100$ mm ja alkutilassa lasi on molemmista päistä $t_a = 25$ mm telan yli. Lasin lämpötila laskennassa on 630 °C.



Kuva 12. Lasin etureunan taipuma.



Kuva 13. Lasin takareunan taipuma.



Kuva 14. Lasin keskikohdan taipuma.

Tuloksista nähdään, että lasin etu- ja takareuna käyttäytyvät lähes samoin tavoin. Lasin keskellä käyttäytyminen on merkittävästi erilaista ja taipumat merkittävästi pienempiä. Tuloksista nähdään myös, että siirtymän amplitudi kasvaa ajan kuluessa. Lasin tulee olla kuumana mahdollisimman lyhyen aikaa.

Laskennan arviointi

Laskentaongelmat

Lasin jännitysten ja muodonmuutosten laskenta on hyvin epälineaarista. Jännitysten laskemiseksi tulee tietää lämpötilakenttä. Lämpötilakentän laskennassa muodostuu suuria gradientteja, erityisesti ohuella lasilla, jolloin pinnan lämpötilan laskenta vaatii pientä laskentaelementin kokoa ja lyhyttä aika-askelta. Lasin aineominaisuudet ovat lisäksi riippuvaisia lämpötilasta.

Lämpötilakentän ollessa tunnettu voidaan laskea jännitys- ja muodonmuutoskenttä. Jännitysten laskennassa tulee samoja ongelmia kuin lämpötilakentän laskennassa. Laskentaelementin tulee olla pieni ja laskennan aika-askeleen lyhyt. Aika-askeleen pituus korostuu erityisesti relaxoitumisajan lyhentyessä korkeissa lämpötiloissa ($\tau < 10^{-5}$ s). Liikkuvan lasin laskennassa lyhyt aika-askel muodostuu ongelmaksi, kun lasi nousee uudelle telalle. Aika-askeleen ollessa lyhyt ($t < 0,01$ s) pakkosiirtymästä syntyvä nopeus aiheuttaa laskentaan konvergoitumisongelman.

Jännitysten ja muodonmuutosten laskentaan liittyen on tehty yksiulotteinen laskentaohjelma, jonka avulla voidaan tutkia yksinkertaisissa tapauksissa parametrien vaikutusta karkaisutulokseen sekä muodonmuutoksiin. Ohjelmalla saadut tulokset vastaavat hyvin ANSYS ohjelmalla saatuja tuloksia, joten voidaan olettaa käytettyjen teorioiden olevan samanlaisia.

Verifiointiongelma

Laskennan verifioimiseksi ongelmana on kokeellisten tulosten puute. Ensimmäinen ongelma on aineominaisuuksien määrittäminen. Karkaistavana lasina käytettävän perinteisen ikkunalasin (sooda-kalkkilasi) koostumus on määritelty prosenttirajoina [20], jolloin eri valmistajien tuotteiden ominaisuudet saattavat poiketa [3,4].

Muuttuvan lämpötilakentän mittaamiseksi tarvitaan käänteistä lämmönsiirron laskentaa [21]. Pinnan pakotetun konvektion mittaamisessa on huomattu, että lämmönsiirron tehokkuus riippuu tarkasteltavan pisteen sijainnista suihkun patopisteeseen nähden. Vaihteleva lämmönsiirron voimakkuus saattaa vaikuttaa myös jännitysten muodostumiseen.

Jännösjännitysten määrittämisessä käytetään metalleilla menetelmää, jossa tarkastellaan poratun reiän muotoa tai pinnan venymiä porauksen jälkeen. Karkaistun lasin tapauksessa tämä ei kuitenkaan ole mahdollista, koska lasi särkyi reiän poraamisen johdosta. Jännitysprofiilin mittaamiseen mahdollinen tapa on optinen mittaaminen. Mittausten luotettavuudessa on vielä kuitenkin ongelmia.

Muodonmuutosten mittaamisen avulla voidaan tutkia mallin toimivuutta. Tällöin materiaalin tulee kuitenkin olla vakio lämpötilassa, koska muuten tulee ongelmaksi

lämpötilakentän tunteminen. Muodonmuutokset ovat kuitenkin melko pieniä (10-100 μm), joten tarkkuuden kanssa tulee ongelmia.

Yhteenveto

Numeerista laskentaa voidaan käyttää apuna lasin karkaisun parametrien vaikutusten arvioinnissa. Jännitysten laskentaan liittyvä teoria on tunnettu. Laskennassa tulee kuitenkin ongelmia esimerkiksi aineominaisuuksien poikkeavuudesta sekä laskennan tarkkuudesta johtuen. Numeerisen laskennan avulla saadaan kuitenkin käsitys siitä, miten jännitykset ja muodonmuutokset syntyvät sekä miten haluttuja vaikutuksia saadaan prosessia muuttamalla vahvistettua tai pienennettyä. Laskennassa saataviin absoluuttisiin arvoihin tulee kuitenkin suhtautua varauksella.

Lämpötilan ja lämmönsiirron hallinnalla voidaan vaikuttaa myös energian kulutukseen. Karkaisulämpötilaa laskemalla tai lämmönsiirtoa heikentämällä säästetään energiaa, mutta rajoittavana tekijänä kaikessa on vaadittavan jännitystason saavuttaminen.

Kiitokset

Tekijä haluaa kiittää CSC:tä mahdollisuudesta Ansys-ohjelman käyttöön. Lisäksi kiitos Glastonin R&D -osastolle neuvoista ja kuvista.

Viitteet

- [1] Daudeville, L., Carré, H., Thermal Tempering Simulation of Glass Plates: Inner and Edge Residual Stresses, *Journal of Thermal Stresses*, 21(6):667-689, 1998.
- [2] Narayanaswamy, O. S., Stress and Structural Relaxation in Tempering Glass, *Journal of the American Ceramic Society*, 61(3-4):146-152, 1978.
- [3] Schneider, J., Glass Strength in the Borehole Area of Annealed Float Glass and Tempered Float Glass, *International Journal of Forming Processes*, 7(4):523-541, 2004.
- [4] Aronen, A., Karvinen, R., How to Affect Residual Stresses in Glass Tempering, *Challenging Glass, Conference on Architectural and Structural Applications of Glass*, Bos, F. et. al. (toim.), May 2008, Delft University of Technology, the Netherlands, pp. 303-312.
- [5] Gardon, R., The Tempering of Flat Glass by Forced Convection, *Proceedings VIIth International Congress on Glass*, Bryssel, Belgium, 1965.
- [6] Abbott, M., Madocks, J., Roller Wave Distortion - Definition, Causes and a Novel Approach to Accurate, On-line Measurement. *Proceedings of Glass Processing Days 2001*, 18-21 June 2001, Tampere, Finland, pp. 226-230.
- [7] Henriksen, T., Leosson, K., Anisotropy and Optical Distortion in architectural glass, can it be controlled, *Proceedings of Glass Performance Days 2009*, June 2009, Tampere, Finland, pp. 834-839.

- [8] Karvinen, R., Rantala, M., Pesonen, T., Heat Transfer in Glass Tempering and Forming Process, *Advanced in Heat Transfer Engineering*, Sundén, B. & Vilemas, J. (toim.), 4th Baltic Heat Transfer Conference, 2003, pp. 217-225.
- [9] Rantala, M., Karvinen, R., Heat Transfer Under an Impinging Jet at Long Nozzle-to-Surface Distances, *Proceedings of 13th International Heat Transfer Conference*, August 2006, Sydney, Australia, 12 p.
- [10] Honkanen, M., Marjanen, K., Eloranta, H., Development of High-Speed Imaging and Image Analysis Techniques to Measure Extremely Fast Mechanical Processes, *Proceedings of the 10th Finnish Mechanical Days*, Mäkinen, R. et. al. (toim.), 3 - 4 December 2009, Jyväskylä, Finland, pp. 245-253.
- [11] EN 12150-1, *Rakennuslasit – Lämpökarkaistu Soda Lime-silikaattilasi – Osa 1: Määritelmä ja kuvaus*, CEN, 2000.
- [12] Le Bourhis, E., *Glass: Mechanics and Technology*, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co, Weinheim, 2008.
- [13] Bejan, A., *Heat Transfer*, John Wiley & Sons, New York, 1993.
- [14] Hyer, M.W., *Stress Analysis of Fiber-Reinforced Composite Materials*, McGraw-Hill, 1998.
- [15] Boley, B., Weiner, J., *Theory of Thermal Stresses*, Dover, Mineola (NY), 1997.
- [16] Scherer, G., *Relaxation in Glass and Composites*, John Wiley & Sons, Inc., USA, 1986.
- [17] Narayanaswamy, O. S., A Model of Structural Relaxation in Glass, *Journal of the American Ceramic Society*, 54(10):491-498, 1971.
- [18] Markovskiy, A., Soules, T., An Efficient and Stable Algorithm for Calculating Fictive Temperature, *Journal of the American Ceramic Society*, 67(4):C56-C57, 1984.
- [19] Chambers, R.S., Numerical Integration of the Hereditary Integrals in a Viscoelastic Model for Glass, *Journal of the American Ceramic Society*, 75(8):2213-2218, 1992.
- [20] EN 572-2, *Rakennuslasit – Perustuotteet. Soodakalkkisilikaattilasi – Osa 2: Float-lasi*, CEN, 2005.
- [21] Karvinen, R., Ovaskainen, O., Aronen, A., Water Mist Heat Transfer from Glass Surface, *Proceedings of 7th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, ExHFT-7*, Szmyd, J.S. et. al. (toim.), 29 June - 3 July 2009, Krakow, Poland, pp. 1297-1304.

Antti Aronen
 Tampereen teknillinen yliopisto
 Energia- ja prosessitekniiikan laitos
 PL 589, 33101 Tampere
 antti.aronen@tut.fi