

PVC - MUOVIN VIRUMISKOKEET JA PITKÄAIKAISLUJUUDEN ENNUSTAMINEN

Pentti Mäkeläinen, Hannu Sinisalo
ja Heikki Järvinen

Rakenteiden Mekaniikka Vol. 10
No. 2 1977 s. 1...12

YHTEENVETO: Artikkelissa selostetaan pehmittämättömän PVC-muovin virumiskokeita, joita on tehty Htkk:n rakennusinsinööriosastossa useiden vuosien aikana. Paitsi virumiskokeita varten kehitettyjä koelaitteita ja mittausvälineitä sekä niiden toimintaa artikkelissa on selvitelty myös koejärjestelyihin sisältyviä virhelähteitä ja epätarkkuuksia sekä koetulosten käsitteelyyn ja niiden esittämiseen liittyviä eri vaiheita. Tämän lisäksi on käsitelty muovien ja erityisesti PVC-muovin pitkäaikaiskäyttäytymisen kuvaamismalleja sekä niiden yleistä fenomenologista taustaa. Artikkelin lopussa on käsitelty aiempiin muovikokeisiin liittyneessä tutkimustyössä kehitettyä PVC:n pitkäaikaislujuuden ennustamismallia ja sen soveltamismahdollisuuksia.

MUOVIEEN MEKAANISEN KÄYTTÄYTYMISEN PERUSPIIRTEET

Muovien lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksien ja yleensä niiden mekaanisen käyttäytymisen tarkastelu poikkeaa olennaisesti perinteisten konstruktiomateriaalien lujuustarkasteluista. Muovien makromolekyylirakenne ja siinä esiintyvät sekä molekyylien sisäiset että molekyyliketjujen ja -verkkojen väliset sidosvoimat ovat perustekijöinä niiden mekaanisen käyttäytymisen voimakkaassa aika- ja lämpötilariippuvuudessa. Muoveilla tämä ajan ja lämpötilan vaikutus tulee esiin päinvastoin kuin esimerkiksi metalleilla ja normaaleissa käyttöolosuhteissa ja -lämpötiloissa.

Muovien ajasta riippuvaa käyttäytymistä, viskoelastista käyttäytymistä, voidaan periaatteessa selvittää kahdella vaihtoehtoisella tavalla: joko mittaamalla muodonmuutoksen muuttumista ajan mukana, kun muoviin on aiheutettu vakiosuuruinen tai säännöllinen ajan mukana sinimuotoisesti vaihteleva kuormitus tai mittaamalla jännityksen muuttumista ajan mukana, kun muoviin on aiheutettu vakiona pysyvä tai ajan mukana sinimuotoisesti vaihteleva muodonmuutos. Edellisessä tapauksessa on kyse virumisesta ja jälkimmäisessä relaksaatiosta. Vakiokuormitukseen perustuvia virumiskokeita ja vakiomuodonmuutokseen perustuvia relaksaatiokokeita kutsutaan yhteisellä nimellä kvasi-staattisiksi kokeiksi erotukseksi nk. dynaamisille kokeille, joissa herätteenä käytetään ajan mukana sinimuotoisesti vaihtelevaa kuormitusta tai muodonmuutosta ja materiaalin vasteena saatavasta sinimuotoisesta muodonmuutosta tai jännitysvaihtelusta mitataan sen amplitudi ja vaihekulma herätteeseen nähden.

Koesauvan aksiaaliseen vetoon perustuva virumiskoe on ehkä eniten käytetty kokeellinen menetelmä muovien viskoelastisen käyttäytymisen tutkimisessa. Siinä mitataan ajan funktiona standardimittaisen ja -muotoisen koesauvan keskikohdan venymää $\epsilon_0(t)$ vakiovetovoimasta syntyvän vakiojännityksen σ_0 alaisena. Koetuloksista voidaan määrittää ajasta riippuva suure nimeltään virumisjoustokerroin $D(t)$ (engl. creep compliance)

$$D(t) = \epsilon(t)/\sigma_0 \quad (1)$$

Tätä virumisjoustokerrointa voidaan käyttää muovin lineaarisen viskoelastisen käyttäytymisen kuvaamiseen mielivaltaisesta ajan mukana vaihtelevissa kuormituksissa soveltamalla ns. Boltzmannin superpositioperiaatetta kaavamuodossa

$$\epsilon(t) = \int_{-\infty}^t D(t-\tau) \frac{d\sigma(\tau)}{d\tau} d\tau \quad (2)$$

Muovin nk. staattisen pitkäaikaiskäyttäytymisen eli sen jännitys-venymäyhteyden näennäisen aikariippuvuuden selvittämiseksi virumiskoetuloksista määritetään usein eräänlaiseksi "ajasta riippuvaksi kimmokertoimeksi" suure $E_c(t)$:

$$E_c(t) = 1/D(t) = \sigma_0/\epsilon(t) \quad (3)$$

E_c on nimeltään virumismoduuli (engl. creep modulus, saksal. Kriechmodul). Viskoelastisuusteorian kannalta katsoen virumismoduuli E_c on tulkittavissa "ajasta riippuvan kimmokertoimen" yläliikiarvoksi. Lineaarisen teorian peruskaavasta (2) ja sen käänteisesityksestä

$$\sigma(t) = \int_{-\infty}^t E(t-\tau) \frac{d\epsilon(\tau)}{d\tau} d\tau \quad (4)$$

voidaan johtaa integraalimuunnoksia (mm. Laplace-muunnosta) käyttäen yhteys $E(t) \leq 1/D(t) = E_c(t)$ (5)

virumisjoustokertoimen $D(t)$ ja relaksaatiomoduulin $E(t)$ ($= \sigma(t)/\epsilon_0$) välille. Kaavassa (5) yhtäläisyysmerkki on voimassa vain ajan arvoilla $t = -\infty$ ja $t = +\infty$, joten virumismoduuli E_c on todella näennäisen "ajasta riippuvan kimmokertoimen" yläraja.

Virumiskoetulosten esittämiseen virumisjoustokertoimen D tai -moduulin E_c avulla liittyy hankaluuksia, mitkä aiheutuvat muovien käyttäytymiseen kuuluvasta epälineaarisuudesta. Tämä epälineaarisuus tulee näkyviin siten, että eri jännitystasoilla määritetyt $D(t)$:n tai $E_c(t)$:n kuvaajakäyrät alkavat jännitystason noustessa erota toisistaan. Käyrien erkaneminen eli epälineaarisuus voimistuu vielä kaiken lisäksi paitsi jännitystason myös erikseen ajan mukana jokaisessa virumiskäyrässä. Esimerkiksi pehmittämättömällä PVC-muovilla tämä muutos epälineaarisuuteen tai täsmällisemmin ilmaistuna muutosalue epälineaarisuuteen siirtymisessä vastaa huoneenlämpötilan virumiskäyrien alkuosilla likimain jännitystasoja 17-20 MPa (vastaavat veny-

mät n. $5-6^{\circ}/\text{oo}$) ja käyrien loppuosilla n. $10^3 \dots 10^4$ tunnin kohdilla enää jännitystasoja 5-8 MPa.

Lämpötilalla on hyvin merkittävä vaikutus muovien epälineaariseen käyttäytymiseen. Muovien mekaanisen käyttäytymisen ja yleensä niiden lujuusominaisuuksien tarkastelun eräänä kiintopisteenä on kullekin muovilaadulle ominainen lämpötila (tai lämpötila-alue) nimeltään lasiutumislämpötila T_g eli ns. lasipiste. Lasiutumislämpötila T_g ilmaisee kullekin muovilaadulle sen noin $10-15^{\circ}\text{C}$:n lämpötila-alueen keskikohdan arvon, jonka sisällä muovin olomuoto muuttuu sitä jäädytettäessä kumimaisesta lasimaiseksi tai kuumennettaessa lasimaisesta kumimaiseksi. Siten ne muovilaadut, joiden T_g on reilusti huoneenlämpötilan yläpuolella, ovat käyttölämpötiloissaan lasimaisia muoveja. Elastomeerit, joiden T_g -arvot jäävät reilusti alle 0°C :n, ovat puolestaan normaalilämpötiloissa kumimaisia aineita.

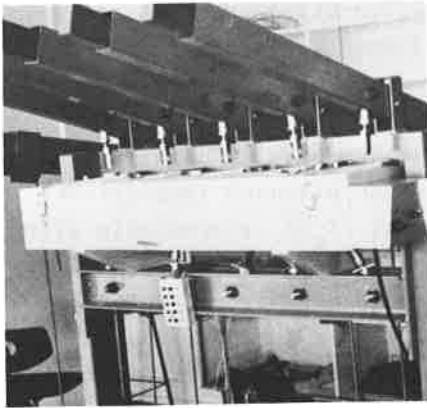
Lasitransition kohdalla muovin ominaisuuksissa tapahtuu jyrkkiä muutoksia. Muovin tilavuuden lämpötilakerroin ja siten myös sen pituuden lämpötilakerroin kasvaa lasitransition aikana hyppäyksellisesti T_g :n yläpuolelle siirryttäessä. Niinikään muovin sisäisessä mekaanisessa väimennuksessa on lasitransition kohdalla selvä "vaimennuspiikki". Muovin virumis- ja relaksaatiofunktioiden arvoissa tapahtuu T_g :n kohdalla rajuja kahden kolmen dekadin suuruusluokkaa olevia muutoksia. Lasitilan aluetta vastaavissa lämpötiloissa muovin jännitys-muodonmuutosyhteys säilyy suhteellisen pitkään lineaarisena. Lämpötilan noustessa lähelle lasitransition alkamislämpötiloja jännitys-muodonmuutoskäyrä alkaa taipua jo suhteellisen pienillä jännityksillä voimakkaasti kohti muodonmuutosakselia. Tämä epälineaarisuus tulee luonnollisesti esiin myös virumiskäyrissä; eri jännitystasolla määritetyt virumisjoustokertoimen D tai -moduulin E_c käyrät alkavat erota toisistaan yhä alemmilla jännitystasoilta lähtien.

Kovan eli pehmittämättömän PVC-muovin lasiutumislämpötila T_g on keskimäärin $+80^{\circ}\text{C}$. Sen lyhytaikaisen virumismoduulin E_c arvo (esim. $E_c(100\text{s})$) on huoneenlämpötilassa suuruusluokkaa 3200-3500 MPa. Lämpötilan kohotessa lyhytaikaisen E_c :n arvo laskee lähes suoraviivaisesti aina $+50^{\circ}\text{C}$:n kohdalle saakka, missä se on noin 2500-2700 MPa. Suunnilleen lämpötila-arvojen $+60^{\circ}\text{C} \dots +65^{\circ}\text{C}$ yläpuolella lyhytaikaisen virumismoduulin E_c arvo alkaa pudota hyvin jyrkästi niin, että se on $+100^{\circ}\text{C}$:n kohdalla enää 10-20 MPa ja lasku tasaantuu noin $+120^{\circ}\text{C}$:n kohdalle tultaessa E_c :n arvoon 4-6 MPa. Näihin kovan PVC:n virumismoduulin keskimääräisarvoihin nähden on vielä syytä korostaa, että ne pätevät vain lineaarisen käyttäytymisen alueella. Lineaarisen käyttäytymisen rajajännitysarvot riippuvat puolestaan voimakkaasti lämpötilasta. Nämä lineaarisuuden rajajännitysarvot laskevat lämpötilan noustessa samansuuntaisesti virumis- tai relaksaatiomoduulin laskun kanssa.

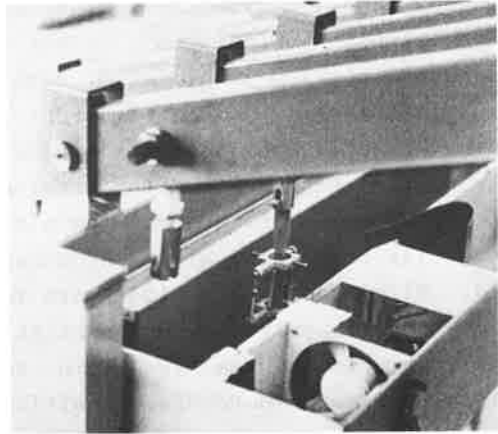
PVC-MUOVIKOKEIDEN SUORITUS

Aksiaalinen vetokoe

Virumiskokeissa käytetty koelaite on esitetty kuvassa 1a. Koelaitteeseen sopii kerrallaan viisi nivelellisesti kiinnitettyä koekappaletta, kuva 1b. Koekappaleiden mitat ovat standardin DIN 53455 mukaisia, kuva 2. Ne ovat joko valettu kappaletyönä raaka-aineesta tai työstetty valmisteesta standardimittoihin.

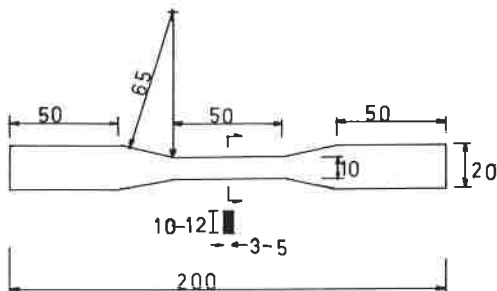


Kuva 1a Koelaite.

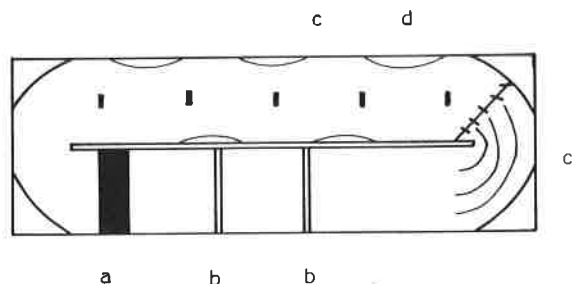


Kuva 1b Paikoilleen asennettu koekappale.

Vakiolämpötilan saamiseksi koekappaleet asetetaan umpinaiseen lämpöeristettyyn laatikkoon (kuva 1b). Lämmitetty kiertävä ilma pitää lämpötilan laatikossa $\pm 0,15^{\circ}\text{C}$ rajoissa. Lämmitys suoritetaan kahdella erillisellä vasu-
tuksella, joista toinen lämmittää jatkuvasti (peruslämpötila) ja toinen jak-
sollisesti automaattisen lämpötilakontrollin alaisena (hienosäätö). Virtaus
on pyritty saamaan pääosin laminaariseksi. Paikoillaan seisovat pyörteet ja
laatikon reunoilla seisova ilma on pyritty eliminoimaan. Kuvassa 3 on pe-
riaattellinen kuva lämpölaatikosta. Laitteiston on suunnitellut DI Ilpo Salo.



Kuva 2 Standardoitu koekappale.



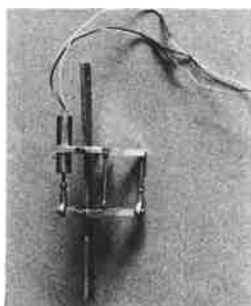
Kuva 3 Koekappaleiden lämmityslaatikon periaatepiirros.

Suoritetuilla kokeilla on pyritty määrittämään muodonmuutokset ajan, jän-
nityksen ja lämpötilan funktiona sekä näiden avulla ennustamaan käyttäyty-
mi-

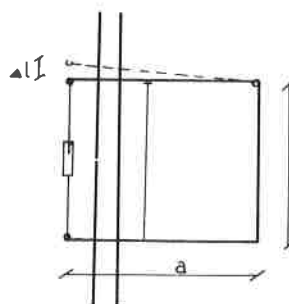
nen jopa 50 vuoden kuluttua. Koska PVC-muovien viruminen on sekä lämpötilan että jännityksen suhteen epälineaarista, nämä on pyritty pitämään vakioina kokeen ajan, jotta muodonmuutos $\epsilon = \epsilon(t; \sigma, T)$ hallittaisiin paremmin. Suoritettujen kokeiden tuloksia on julkaistu aiemmin lähteissä /3/ ja /4/.

Venymien mittaus ja rekisteröinti

Venymien mittaukseen on käytetty venymäliuskoja tai induktiivisia antureita. Venymäliuskoista ollaan kuitenkin siirrytty pelkästään induktiivisiin antureihin. Induktiiviset anturit koostuvat kahdesta kelasta ja ferromagneettisesta sydäimestä. Sydämen aseman muuttuminen aiheuttaa keloissa jännitteen muutoksen, joka mitataan ja rekisteröidään. Anturi ja sen toimintaperiaate on esitetty kuvissa 4a ja 4b. Kuvan 4b merkinnöin voidaan muodonmuutos las-



Kuva 4a Venymän mittauslaite.



Kuva 4b Venymämittauslaitteen toimintaperiaate.

kea kaavojen 6a ja 6b avulla.

$$\epsilon = \frac{(a-b) \Delta l}{a l} \quad (6a)$$

missä

$$\Delta l = k(u_t - u_0)$$

k = muuntovakio

u_t = jännite-ero hetkellä t

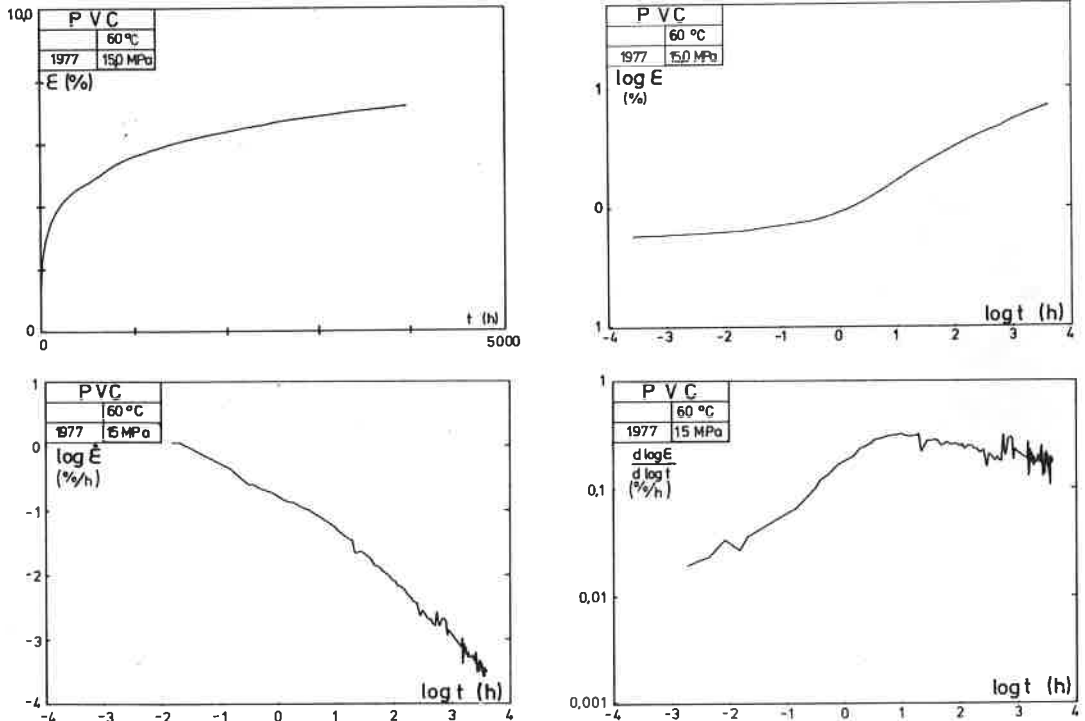
(6b)

u_0 = jännite-ero kuormittamattomassa tilassa

Jännite-erot tulostetaan digitaalimuotoon muunnettuna reikänauhalle, joka jatkokäsitellään HTKK:n HP2000 Acces tietokoneella. Käsitteilyn nopeuttamiseksi on tarkoitus siirtyä reikänauhoista magneettikasetteihin. Tulostusväli on valittu siten, että mittapisteet sijoittuvat logaritmiasteikolla likimain tasaisesti. Esimerkiksi 1000 h kokeessa tulostetaan n. 180 aika-venymä paria koekappaletta kohti. Tarkemmat ohjeet kokeiden järjestelyistä ja suorituksesta löytyvät lähteistä /6/ ja /7/;

KOETULOSTEN KÄSITTELY JA ANALYSOINTI

Koetulosten suuren määrän takia on niiden käsittely siirretty tietokoneelle. Pelkän numeerisen tulostuksen lisäksi piirretään kukin virumiskäyrä HP:n piirturilla muodonmuutoksen visualisoimiseksi. Kuvissa 5a, b, c ja d on esitetty eri tapoja kuvata muodonmuutos. Kuvassa 5a on viruminen esitetty normaaliasteikossa. Muoveilla on kuitenkin täyslogaritminen esitystapa to-
dettu havainnollisemmaksi; tällöin saadaan esiin "käännepiste" (kuva 5b).



Kuva 5 60°C:n virumiskoe piirrettynä a) normaaliasteikolle b) kokologaritmiasteikolle ja vastaavat derivaattakuvaajat c) ja d) näiden alla.

Kuvan 5a käyrän derivaatta logaritmiasteikossa on kuvassa 5c ja kuvassa 5b esitetyn käyrän derivaatta (huomaa "käännepiste") on kuvassa 5d.

Virumisilmiölle on pyritty esittämään erilaisia malleja. Kaava 7a esittää nk. Findleyn mallia, 7b Voigtin mallia, 7c lineaarisen standardiaineen mallia ja 7d Mäkeläisen mallia. Mallin

$$\epsilon = A + B t^C \quad (7a)$$

$$\epsilon = A + B e^{-Ct} \quad (7b)$$

$$\epsilon = A + B e^{-Ct} + D e^{-Et} \quad \text{tai} \quad (7c)$$

$$\log(\epsilon) = A + B \operatorname{arsinh}(\log(Ct)) \quad (7d)$$

sovittaminen datajoukkoon tapahtuu pienimmän neliösumman menetelmällä, eli

minimoidaan lauseke

$$\sum_{i=1}^n (y_i - \epsilon(t_i))^2 = \min! \quad (8)$$

kertoimien A, B ja D suhteen. Kertoimien C ja E optimiarvo haetaan hilamenetelmällä, joka linearisoi minimoitavan funktion. Lopetuskriteerinä on kaavan 9 mukaisen suhteellisen hajonnan (s) minimi.

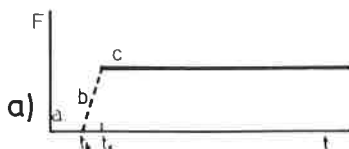
$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n ((\bar{x}_i - x_i)/x_i)^2}{n - 1}} \quad (9)$$

Parhaiten PVC:n virumista kuvaavaksi on osoittautunut Mäkeläisen malli (kaava 7d). Mallin parametreille A, B ja C voidaan esittää geometrinen tulkinta: vakiot A ja C määrittävät täyslogaritmiasteikolla esitetyn virumiskäyrän käännepisteen ja vakio B kulmakertoimen arvon kyseisessä pisteessä.

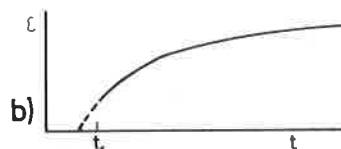
Virhelähteet

Käytännön koelaitteissa ja suoritustavoissa on aina virheitä, joita ei pystytä eliminoimaan. Yleisperiaatteena on, että koelaitteet ja -olosuhteet tulee luoda sellaisiksi, että niistä johtuvat virheet ovat riittävän pieniä. Riittävä pienenä voidaan tulkita siten, että kaikki muut virheet ovat pienempiä kuin materiaalivaihteluista aiheutuvat virheet. Materiaalin sisäinen hajonta on valmistusmenetelmästä riippuvaa ja siihen vaikuttaminen on vaikeaa. Koekappaleissa on aina muotovirheitä ja sisäisiä jännityksiä. Mikäli koekappale tehdään valmiista tuotteesta, sisäiset jännitykset purkautuvat muotovirheiksi. Sisäisiä jännityksiä ja niistä aiheutuvia muotovirheitä voidaan tehokkaasti poistaa "hehkutuksella" ja sitä seuraavalla hitaalla jäähdytyksellä.

Kuva 6a esittää kuorman päälleasettamisen kulkua ja kuva 6b muodonmuutosta ajan funktiona. Koekappaleelle valitaan jännite-eron nolla-arvo (u_0 kaavassa 6b) kuvan 6a aikavälillä $t_a - t_b$. Aikaväli $t_b - t_c$ on kuorman asettamiseen kuluva aika ja t_c virumisilmiön alkuhetki, jolloin kuorma on kokonaisuudessaan vaikuttamassa ja ajasta riippumaton kimmoinen muodonmuutos on tapahtunut. Näin määritellyn kokeen alkamishetken epätarkkuudeksi tulee



Kuva 6a Kuorma-aikakuvaaja.

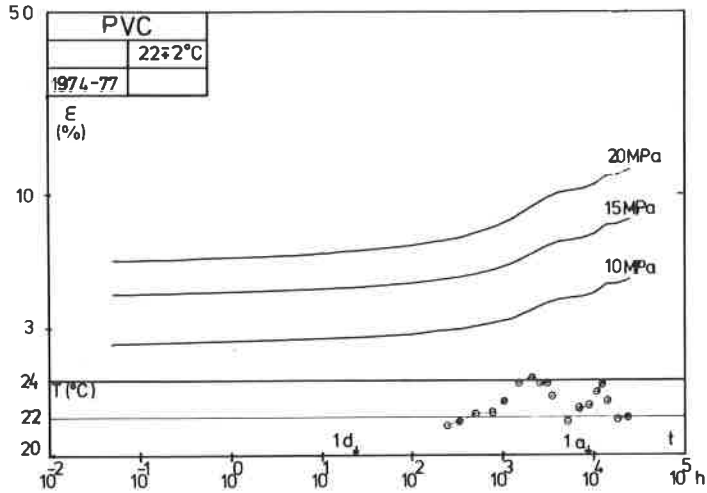


Kuva 6b Muodonmuutos-aikakuvaaja.

noin 1 sekunti. Kuormaa ei voida laskea äkillisesti, koska tällöin kokeeseen tulisi dynaamista vaikutusta mukaan.

Vakiolämpötilakokeissa on havaittu lämpötilan tarkalla vakioisuudella olevan sitä suurempi merkitys, mitä korkeampi lämpötila on. Tämä johtuu viskoelastisen materiaalin muistiominaisuuksista. Lämpölaatikon sisällä on

havaittu noin $\pm 0,15^{\circ}\text{C}$ vaihtelua. Tästä aiheutuu virhettä lämpölaajenemisen muodossa (PVC:n lämpölaajenemiskerroin $\alpha_T \approx 8 \times 10^{-5} \text{ 1/}^{\circ}\text{C}$). Lämpötilavaihtelun vaikutuksesta on esimerkkinä pitkäaikaiskoe (kuva 7). Koe on tehty normaalihuoneilmaston olosuhteissa lämpötilan ollessa $T = 22 \pm 2^{\circ}\text{C}$. Lämpötilavaihtelu näkyy kuvan alaosassa - kesän ja talven aiheuttama lämpötilan vaihtelu ja tämän vaikutus virumaan erottuu selvästi.



Kuva 7 PVC:n kolmen vuoden virumiskäyrät.

Jännitystason poikkeama oletetusta aiheuttaa systemaattista, kasvavaa virhettä suppeuman vaikutuksesta. Suppeumalla ei ole merkitystä pienillä muodonmuutoksen arvoilla. Poikkipinnan suppeuman suuruus lasketaan kaavasta 10

$$A_t = A_0 (1 - \epsilon_t \nu)^2, \quad (10)$$

missä

A_0 = poikkileikkausalan alkuarvo

A_t = poikkileikkausala hetkellä t

ϵ_t = aksiaalinen muodonmuutos hetkellä t

ν = Poissonin vakio

PVC:n Poissonin vakio muuttuu kokeen aikana arvosta 0,38 arvoon 0,5. Arvoa 0,5 voidaan käyttää kuroutumisvaiheessa. Poikkileikkausala 10 %:n muodonmuutoksella pienenee edellä mainituilla ν :n arvoilla arvoon $0,93 A_0 = 0,9 A_0$, mistä seuraa jännityksen kasvu 1,080...1,108-kertaiseksi. Tästä syystä tulee tehdä selvä ero vakiojännitys- ja vakiokuormakokeille.

Kaavoissa (11-13) on muodonmuutoksen erilaisia laskentatapoja.

$$\epsilon_0 = \frac{l_t - l_0}{l_0}, \quad (11)$$

$$\epsilon_m = \frac{l_t - l_0}{l_t} \quad (12)$$

$$\epsilon_{tod} = \ln(l_t) - \ln(l_0) \quad (13)$$

l_t = mittapisteiden väli hetkellä t

l_0 = mittapisteiden väli hetkellä $t = 0$

ϵ_0 = muodonmuutos alkutilan suhteen

ϵ_m = muodonmuutos mittaushetken (lopputilan) suhteen

ϵ_{tod} = muodonmuutoksen teoreettinen (todellinen) arvo

Esimerkiksi 10 %:n pituudenmuutoksella muodonmuutoksen arvot poikkeavat vakiokuormakokeessa seuraavasti:

$$\begin{aligned} \epsilon_0 &= 0,1 \\ \epsilon_m &= 0,909 \\ \epsilon_{tod} &= 0,953 \end{aligned} \quad (14)$$

Mikäli jännityksen muutoksen muistivaikutus jätetään huomioon ottamatta, niin suppeuman ja epälineaarisuuden vaikutukset kumoavat toisensa suhteellisen hyvin redusoidessa koe vakiojännityskokeeksi. Vakiokuormakokeen muodonmuutos (ϵ_{σ_0}) vakiojännityksestä voidaan laskea kaavasta 15:

$$\epsilon_{\sigma_0} = \frac{F_0}{A_t E} = \frac{F_0}{A_0 E (1-\epsilon v)^2} = \frac{\sigma_0}{E (1-\epsilon v)^2} = \frac{\epsilon}{(1-\epsilon v)^2} \quad (15)$$

Kun $\epsilon = 10\%$, saadaan

$$\epsilon_{\sigma_0} = 0,1026 \quad (v = 0,38)$$

$$\epsilon_{\sigma_0} = 0,1051 \quad (v = 0,50)$$

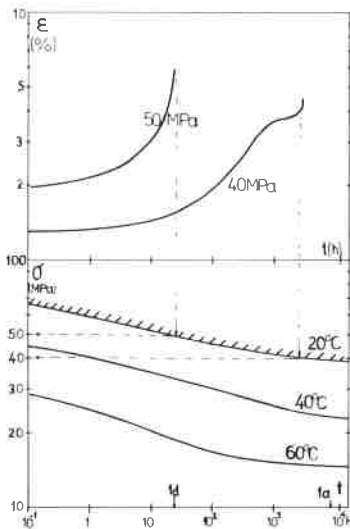
Verrattaessa näitä vakiokuormakokeiden muodonmuutoksiin (kaavat 11-14) havaitaan niiden lähinnä vastaavan muodonmuutosta alkutilan suhteen (ϵ_0).

PVC-MUOVIN PITKÄAIKAISLUJUUDEN ENNUSTAMINEN

PVC-muovin kuten muidenkin muovilaatujen viskoelastisen käyttäytymisen kuvaamisessa on edullista ja samalla realistista ottaa tarkastelun pohjaksi todelliset virumis- tai relaksaatiokokeista saadut käyrät. Nämä käyrät on vielä lisäksi edullista esittää täyslogaritmiasteikoilla. Silloin tarkastelun lähtökohdaksi saadaan esimerkiksi virumiskokeista kuvien 5 ja 7 mukaisia "vemmelkäyriä". Näissä vemmelkäyrissä on erotettavissa kolme selvää viskoelastisen käyttäytymisen vaihetta: lyhytaikaiskäyttäytymisen lasimainen vaihe, sitä seuraava transitiovaihe käyrän nousevalla osalla sekä käyrän tasaantuvaa loppuosaa vastaava kumimaisen käyttäytymisen vaihe. Kun jännitystaso ja/tai lämpötila nousevat, käyrien loppuosien kumimaisen vaiheen osuus alkaa pienentyä ja samalla sen jatkeeksi tulee neljäs vaihe, viskoosin virtauksen vaihe. Viskoosin virtausvaiheen alkaminen näkyy käyrässä

sen loppuosan jyrkkänä kaartumisena kohti pystysuoraa.

Viskoosin virtauksen alkamiseen kuluva aika eri jännitystasoilla ja eri vakiolämpötiloissa tapahtuvassa virumisessa on yksi PVC-muovin käytännön lujuustarkasteluihin sopiva rajasuure. Se voitaisiin esittää logaritmiasteikolla nk. viskoosin virtauksen aikarajakäyränä käyttämällä oordinaattana jännitystasoa ja abskissa-akselina aikaa (kuva 8). Jokaista peruslämpötilaa varten tulisi määrittää oma aikarajakäyränsä. Näiden käyrien määrittäminen vaatisi tosin erittäin laajat PVC-muovin virumiskoesarjat. Viskoosin virtauksen alkamisaikankohdan hakeminen vaatisi esityisesti suhteellisen alhaisilla jännitystasoilla monien kuukausien, jopa vuosien mittaisia virumiskokeita. Myös rajakäyrien alkuosien määrittämiseen liittyy vaikeuksia, mitkä aiheutuvat kumimaisen vaiheen asteittaisesta häviämisestä virumiskäyristä korkeilla jännitystasoilla. Viskoosin virtausvaiheen alkamishetken määrittäminen on erityisen vaikea sellaisista virumiskoetuloksista, jotka on saatu ns. vakiokuormakokeista vakiojännityskokeiden sijasta. Tämä johtuu siitä, että suurilla vakiokuorman arvoilla koesauvan poikkipinnan suppeuma aiheuttaa todellisen jännitystason kohoamisen sauvassa muutamalla prosentilla. Tämä puolestaan kiihdyttää virumista niin, että viskoosin virtauksen vaihe tulee esiin nopeammin kuin vakiojännityksen mukainen viruminen edellyttäisi.



Kuva 8 PVC-muovin viskoosin virtauksen aikarajakäyrät.

Sopivan kuvaamismallin kehittäminen PVC-muovin pitkäaikaiskäyttäytymiselle on osoittanut vaikeaksi tehtäväksi. Vaikeutena on ollut erityisesti sellaisen pitkäaikaismallin kehittäminen, joka kuvaisi samalla kertaa kaikki kolme tai neljä eri viskoelastisen käyttäytymisen vaihetta. Virumismalli, mikä kuvaa PVC-muovin virumista aina viskoosin virtauksen vaiheeseen saakka, on tutkimustyössä /3/ esitetty nk. arsinh-malli:

$$\log \frac{\epsilon(t)}{\epsilon^0(\sigma, T)} = A(\sigma, T) \operatorname{arsinh} \log \left(\frac{t}{t^0(\sigma, T)} \right) \quad (16)$$

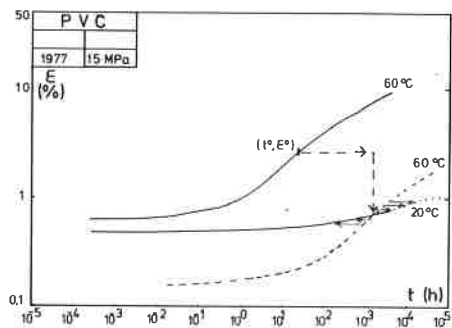
Mallin (16) parametrit t^0 ja ϵ^0 ilmaisevat täyslogaritmiasteikolla esitetyn virumiskäyrän käännepisteen koordinaattiarvot ja parametri A käyrän maksimikaltevuuden käännepisteen kohdalla. Näiden parametrien jännitys- (σ) ja lämpötila- (T) riippuvuuksien selvittämisen jälkeen päästään tähänastisen pelkästään periaatteellisen ja joskus jopa itsetarkoituksellisesti vaikean matemaattisen tarkastelun sijasta todella kuvaamaan muovin epälineaarista käyttäytymistä.

Muovien viskoelastiseen käyttäytymiseen sisältyvä aika- ja lämpötilariippuvuus on yleisesti ottaen hyvin mutkikas ja moniselitteinen. Tietyillä

makromolekyyliarakenteilla muovin käyttäytyminen sen oman lasiutumislämpötila-alueen lämpötiloissa ja niiden yläpuolella kumimaisessa tilassa noudattaa yksinkertaista säännönmukaisuutta, jota kutsutaan aika-lämpötilasuperpositioksi. Tämä aika-lämpötilasuperpositio merkitsee mm. sitä, että logaritmiasteikolla esitettyjen virumiskäyrien eri vaiheet säilyvät samanmuotoisina lämpötilan muuttumisesta huolimatta. Lämpötilan vaikutus viskoelastiseen käyttäytymiseen ilmenee tällöin pelkästään käyrien translatorisena siirtymisenä aika-akselin ja oordinaatta-akselin suunnissa.

Aika-lämpötilasuperposition soveltaminen on onnistunut laajalle ryhmälle amorfis-elastomeerisia muoveja /1/ niiden lasitransition lämpötiloissa ja näiden yläpuolella kumimaisessa tilassa. Sen sijaan lasitilassa oleville muoveille aika-lämpötilasuperposition soveltuvuus on osoittautunut useimmissa tapauksissa hyvin rajoittuneeksi. Pehmittämätön eli kova PVC-muovi on yksi esimerkki muoveista, joiden makromolekyyliarakenteessa lasitilan muodonmuutosten aikana tapahtuvat ilmiöt riippuvat lämpötilasta mutkikkaampien sääntöjen mukaan kuin aika-lämpötilasuperpositiossa. PVC-muovin logaritmiasteikolla esitetyt virumiskäyrät eivät säily lasitransition alapuolella eri lämpötiloissa samanmuotoisina, vaan niiden maksimikaltevuus esimerkiksi muuttuu voimakkaasti vemmekäyrän (16) parametrin A lämpötilariippuvuuden mukaisesti.

Kuvassa 9 on esitetty täyslogaritmiasteikolla kaksi PVC-muovikokeista saatua virumiskäyrää lämpötiloissa +20°C ja +60°C jännitystasolla 15 MPa. Käyrät vastaavat 4000 tunnin eli lähes puolen vuoden pituista virumista, jolloin niissä on jo vemmelmuoto näkyvässä. Käyristä voi havaita jo silmämääräisesti, että niitä ei saa sovitetuksi translatorisilla siirroksilla yhteen yhdeksi johtokäyräksi (engl. master curve), kuten tapahtuisi, jos aika-lämpötilasuperpositio olisi voimassa.



Kuva 9 Esimerkki PVC:n pitkäaikaisvirumisen ennustamismallin soveltamisesta.

Erityisesti käyrien transitiovaiheen laajuudessa ja sen kaltevuudessa on selvä mittakaavaero. Soveltamalla virumiskäyriin vemmelmuotoa (16), mikä on osoittautunut parhaaksi PVC:n virumismalliksi /3/, nämä erot käyrien muodossa voidaan kuvata mallin lämpötilasta ja jännitystasosta riippuvien parametrien t^0 , e^0 ja A avulla.

Aika-lämpötilasuperposition ollessa voimassa sen mukaista siirrosproseduuria eri lämpötiloja vastaaville virumiskäyriille voidaan käyttää tehokkaasti hyväksi muovien pitkäaikaiskäyttämisen ja -lujuuden ennustamisessa. Kuten edellä on todettu, tämä menettely ei sovellu sellaisenaan PVC-muoville. PVC:n kohotettuja lämpötiloja vastaavista virumiskäyristä voidaan kuitenkin

ennustaa käyttölämpötilaa vastaava pitkäaikaiskäyttäytyminen soveltamalla nk. stretch-hypoteesia, joka on esitetty aiemmin mainitussa tutkimustyössä /3/. Kuvassa 9 on näytetty tämän hypoteesin mukainen menettely $+60^{\circ}\text{C}$:n käyrän sovittamiseksi $+20^{\circ}\text{C}$:n käyrälle: ensin vaaka- ja pystysiiirros käyrien parametriarvojen t° ja ϵ° mukaisesti sekä lopuksi parametrin A arvojen erosta johtuva lineaarinen "venytys" käännepisteen eri puolilla. Soveltamalla siirrosmenettelyä pelkästään käyrien käännepisteisiin asti kuvasta nähdään, että vuorokauden pituisella virumiskokeella $+60^{\circ}\text{C}$:ssa pystytään ennustamaan $+20^{\circ}\text{C}$:ssa tapahtuva viruminen noin puoleentoista kuukautteen asti.

LÄHDEKIRJALLISUUS

- [1] Ferry, John, D., Viscoelastic Properties of Polymers. (2nd Edition). John Wiley and Sons, New York, 1970.
- [2] Schreyer, G., Konstruieren mit Kunststoffen. Teil 1. Carl Hanser Verlag, München, 1972.
- [3] Mäkeläinen, P., On the Modelling of Long-Term Thermoviscoelastic Behaviour of Glassy Polymers. Helsinki University of Technology. Research Papers 56, Espoo, 1976.
- [4] Jumppanen, P. ja Mäkeläinen, P., Aika-lämpötilasuperpositioperiaatteen soveltaminen muovien käyttäytymiseen. Rakenteiden Mekaniikka 7 (1974)3.
- [5] Urzhumtsev, Yu.S., Prediction of the deformation and fracture of polymeric materials. Polymer Mechanics, A translation of Mekhanika Polimerov 8(1972)3.
- [6] Schmitz, J.V., Testing of polymers. Volume 2. Interscience publishers, New York, 1966.
- [7] Salo, I., Kokeellisten menetelmien luennot. Htkk 1975.
- [8] Reinsch, C.H., Smoothing by Spline Functions. Numerische Mathematik 10 (1967), 177-183.
- [9] Berghaus, D.G. and Cannon, J.P., Obtaining Derivatives from Experimental Data Using Smoothed-spline Functions. Experimental mechanics 13(1973)1, 38-42.

Pentti Mäkeläinen, tekn.tri, Valtion teknistieteellisen toimikunnan vs. nuorempi tutkija, Espoo Otaniemi

Hannu Sinisalo, tekn.yo., Espoo Otaniemi

Heikki Järvinen, tekn.yo., Espoo Otaniemi