

MUOVIPUTKEN ALKUMUODONMUUTOSTILAN MÄÄRITTÄMINEN PINTAKERROSMENETELMÄLLÄ

A.I. Popov ja L. Koski

Rakenteiden Mekaniikka Vol. 13
No 4.1980 s. 1...7

YHTEENVETO: Artikkelissa ehdotetaan pintakerrosmenettelyä (optiset anturit) käytettäväksi muoviputken valmistuksessa syntyvien haitallisten muodonmuutosten määrittämiseen. Mittausmenetelmä perustuu näiden putkessa olevien muodonmuutoksien poistamiseen kuumentamalla. Menetelmää valaistaan esimerkillä.

JOHDANTO

Muoviputkea valmistettaessa syntyy muodonmuutoksia, jotka putken pituus-akselin (z) suunnassa saattavat ylittää jopa 3 %. Putken valmistus tapahtuu korkeassa lämpötilassa, jolloin muovi on juoksevassa plastisessa tilassa. Putkea jäädytettäessä tuotteeseen jää haitallisia muodonmuutoksia. Lämpötilaa uudelleen kohotettaessa nämä muodonmuutokset palautuvat. Näiden muodonmuutosten määrittämiseksi mekaanisesti, esimerkiksi polyvinyylidikloridi (PVC)-muovista, kuumennetaan putkinäytettä lämpötila-alueella 80...150 °C ja mitataan muodonmuutos (Δl_z) 100 mm:n mittaväliltä. Monimuotoisilla pinnoilla, kuten putkiyhteissä, tämä menettely antaa kuitenkin epätarkkoja tuloksia.

MITTAUSMENETELMÄT

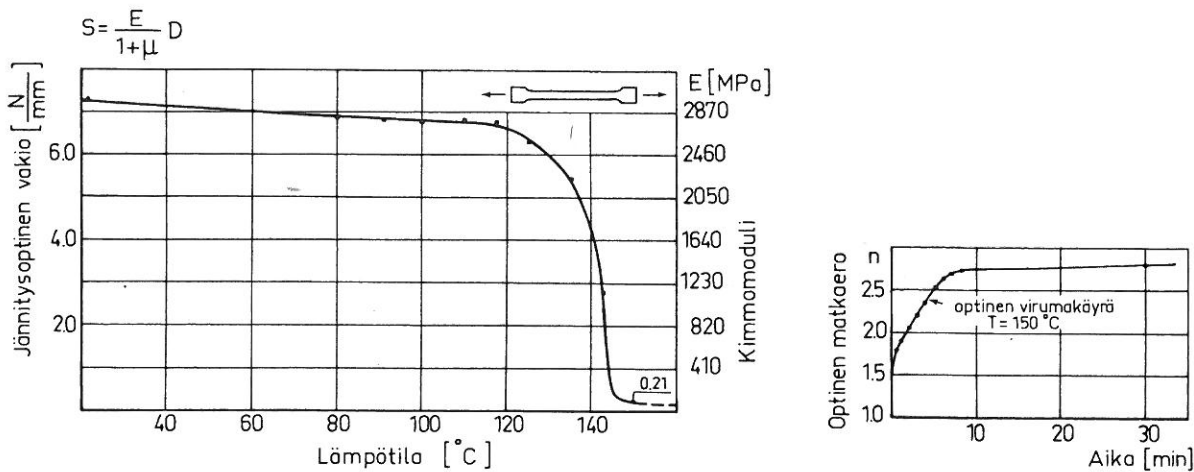
Tässä artikkelissa ehdotetaan jännitysoptiikan, erityisesti pintakerrosmenetelmän käyttöä valmistuksessa syntyvien alkuvenymien määrittämiseen muoviputkista [1,2]. Kuumennettaessa putkea syntyy jännitysoptisesti aktiivisessa pintakerroksessa optinen matkaero. Tämä optinen efekti aiheutuu kolmesta syystä: alkuvenymistä, putken ja anturiaineen pituuden lämpötilakertoimien erosta sekä liimauskutistumisesta. Ennestään tiedetään [1,2], että optisen kalvon päävenymien erotuksella ($\epsilon_1 - \epsilon_2$) ja monikertoina n ilmoitetulla optisella matkaerolla on seuraava riippuvuus

$$\epsilon_1 - \epsilon_2 = n \frac{D}{2t}, \quad (1)$$

missä D on jännitysoptinen vakio, joka määritetään kalibrointikokeella ja t on anturiaineen kalvon paksuus.

Jännitysoptisilla aineilla on lämpötila-alueella 20...150 °C kolme fysikaalista tilaa: lasimainen tila, kumikimmainen tila ja juoksevuuden transiititila. Näissä eri tiloissa myös mekaaniset (E, μ) ja optiset (D, S, joka on anturiaineen jännitysoptinen vakio) ominaisuudet muuttuvat. Tämän seurauksena voidaan muoviputken alkuvienymät määrittää seuraavassa kuvattavalla tavalla.

Kun putkea kuumennetaan muodonmuutosten palauttamiseksi lämpötilassa, joka on jännitysoptisen anturiaineen kumikimmoisen tilan yläpuolella, niin uudelleen jäädytettäessä venymät ja vastaava optinen efekti jäävät jännitysoptisesti aktiiviseen kalvoon. Putken jäädytysvaiheen aikana optiseen anturiin syntyvä matkaero aiheutuu muutoksista kumikimmoisessa tilassa ja pituuden lämpötilakertoimien erotuksesta ($\alpha_r - \alpha_g$), joka on lämpötilan funktio. Tässä tapauksessa optismekaaniset suureet D(T), E(T), μ(T) ovat lämpötilasta riippuvaisia (kuva 1) ja anturin päävenymien erotuksen määrittämiseen on käy-



Kuva 1. Optismekaanisten suureiden S(T) ja E(T) lämpötilariippuvuus jännitysoptisesti aktiivisella aineella, jonka lasittumislämpötila on 150 °C:n alapuolella.

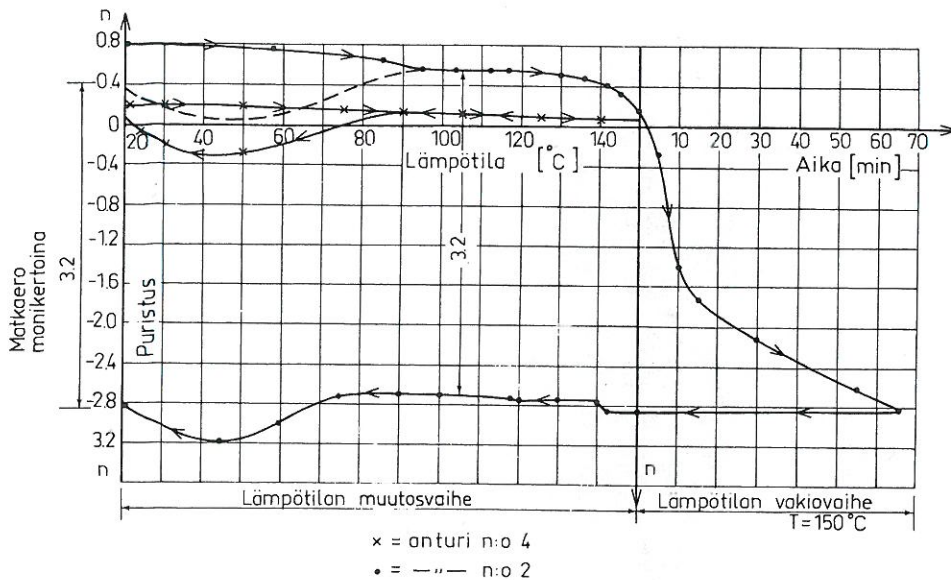
tettävä seuraavaa kaavaa [3]

$$(\epsilon_1 - \epsilon_2)_{T_i}^g = \frac{1}{2t} \left(n_{h,e} \cdot D_{h,e} + \int_{T_i}^{\Delta T = T_{max} - T_i} \frac{dn(T)}{dT} D(T) dT \right), \quad (2)$$

kun $n_{h,e}$ ja $D_{h,e}$ ovat anturin optinen matkaero ja jännitysoptinen arvo kumikimmoisessa tilassa. Vastaavasti $n(T)$ ja $D(T)$ kuvaavat edellä mainittujen suureiden lämpötilariippuvuutta (kuva 1,2). Yhtälön (2) yksinkertaistamiseksi integraali voidaan diskretoida, jolloin saadaan

$$(\epsilon_1 - \epsilon_2)_{T_i}^g = \frac{1}{2t} \left(n_{h,e} \cdot D_{h,e} + \sum_{i=1}^K \Delta n_i \cdot D_i \right), \quad (2^1)$$

missä K on summattavien portaiden lukumäärä ja D_i lämpötilaporrasta T_i vastaava jännitysoptinen arvo. Siirtyminen kaavaa 1 hyväksikäyttäen anturin



Kuva 2. Antureille 2 ja 4 mitatut kineettiset käyrät $n_{2,4}(T)$, joista näkyy venymien muodostumisprosessi putken jäähtymisen aikana.

venymistä $(\epsilon_1 - \epsilon_2)^g$ putken venymiin $(\epsilon_1 - \epsilon_2)^r$ tapahtuu kaavan 3 avulla

$$(\epsilon_1 - \epsilon_2)^r = \frac{1}{C} (\epsilon_1 - \epsilon_2)^g = \frac{n(1 + \mu_g)S}{C E_g 2t}, \quad (3)$$

missä

$$S = \frac{E_g}{1 + \mu_g} \cdot D \left[\frac{N}{\text{mm}} \right] \quad \text{on jännitysoptinen vakio ja}$$

$$\frac{1}{C} = 1 + \frac{t_g}{t_r} \cdot \frac{E_g(1 + \mu_r)}{E_r(1 + \mu_g)} \quad \text{on anturin kiinnityksen vaikutuksen huomioonot-$$

tava kerroin [2], jossa t_g on kalvon paksuus ja t_r putken seinämän paksuus. Pääjännitysten erotus putkessa määräytyy kaavasta

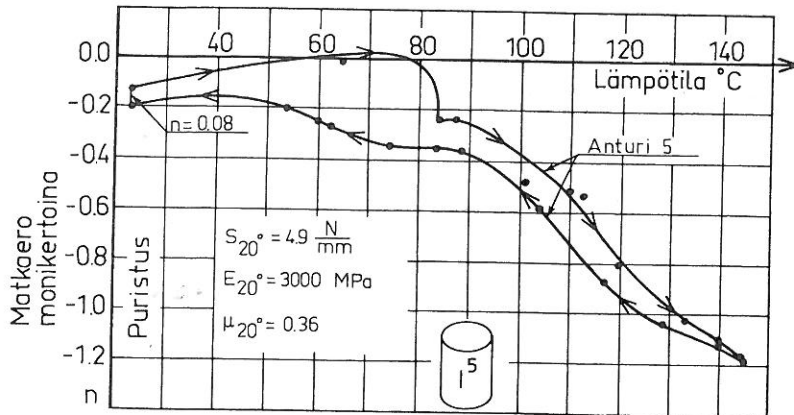
$$(\sigma_1 - \sigma_2)^r = \frac{n E_r(1 + \mu_g)}{C E_g(1 + \mu_r)} \cdot \frac{S}{2t}. \quad (4)$$

Kaavassa 4 on mekaanisten ominaisuuksien (E, μ) riippuvuus ajasta jätetty huomiotta ja käytetty ainoastaan lämpötilasta riippuvaa arvoa. Kaavaa pyritään tulevaisuudessa kehittämään, jotta myös materiaalin viruminen tulisi huomioonotetuksi.

Yksittäisten päävenymien ϵ_1 ja ϵ_2 tai pääjännitysten σ_1 ja σ_2 määrittämiseksi on julkaistu useita menetelmiä [1,2,4]. Erityisen käyttökelpoiseksi on havaittu pintakerrosmenettelyssä käytettävä vino läpivalaisu [1,2,4].

Kun putkea kuumennetaan lämpötila-alueella, joka on anturiaineen kumikimmoisen tilan alapuolella, niin alkuvienymät eivät säily anturissa ja kaava 1 on käytettävä yhdessä huoneen lämpötilaa vastaavan jännitysoptisen vakion S

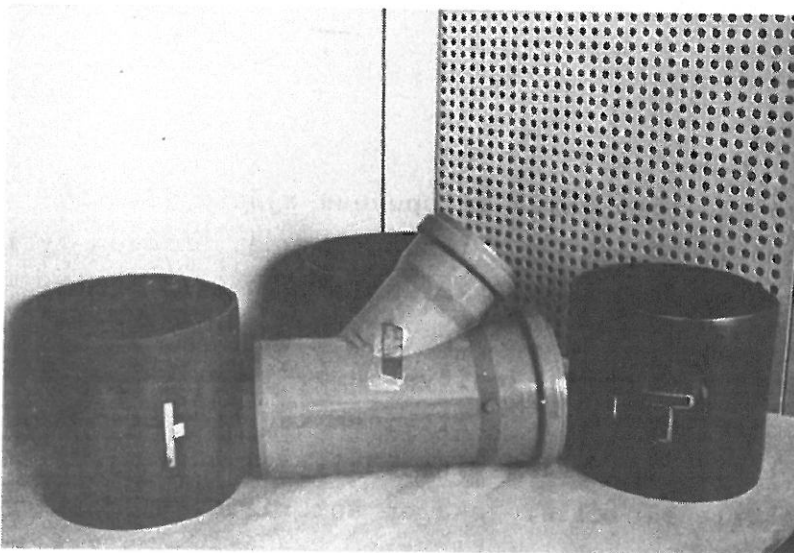
kanssa. Putkea lämmitettäessä anturissa kehittyä tässä tapauksessa optinen efekti, joka on peräisin materiaalien pituuden lämpötilakertoimien erilaisuudesta eli erotuksesta ($\alpha_r - \alpha_g$), alkuvenymistä ja liimauskutistumisesta. Jäähdytettäessä jää kuitenkin jäljelle vain optinen efekti, joka on peräisin alkuvenymistä ja liimauskutistumisesta (kuva 3). Viimemainittu määritetään mittauksista huoneenlämpötilassa.



Kuva 3. Kineettinen käyrä $n_5(T)$ on mitattu anturille 5, jonka jännitys-optisesti aktiiviseen aineeseen ei ole 'jäätynyt' venymiä lämpötila-alueella 150 °C:en alapuolella.

KOKEIDEN SUORITUS JA KOETULOKSET

Putken ulkopinnalle liimattiin neljä putken pituusakselin suuntaista optista anturia 90°:en välein pitkin kehää (kuva 4). Kuvassa 1 on esitetty näiden anturien optis-mekaaniset ominaisuudet. Kolme anturia (numerot 1, 2 ja 3) on tarkoitettu alkuvenymän epätasaisuuden selvittämiseen pitkin putken kehää. Neljäs anturi liimataan vasta putken kuumentamisen jälkeen, jolloin sen avulla pystytään tarkastelemaan erotuksesta ($\alpha_r - \alpha_g$) aiheutuvaa optista



Kuva 4. Valokuva putkista ja niihin liimatuista optisista antureista.

efektiä ja määrittämään n_4 ja edelleen optisesta kokonaismatkaerosta $n_2(T)$ vähentämään lauseke $n_4(T)$. Kuvassa 2 on antuteille 2 ja 4 esitetty optinen matkaero $n_2(T)$ ja $n_4(T)$ lämpötilan funktiona. Huoneen lämpötilassa on havaittavissa liimauskutistumisesta aiheutuvaa venymää vastaava matkaero ($n = 0,8$). Lämpötilan noustessa matkaero pienenee ensin hitaasti alueella $20 \dots 130 \text{ }^\circ\text{C}$ ja muuttuu sitten nopeasti. Lämpötilassa $150 \text{ }^\circ\text{C}$ on havaittavissa optista ryömintää, joka aiheutuu alkuvienymien palautumisesta ja optisesti aktiivisen aineen ryöminnäst. Alkuperäiset puristumat kompensoivat liimauskutistumisesta aiheutuvat venymät. Jäähdytettäessä putkea alueella $80 \dots 20 \text{ }^\circ\text{C}$ on antureilla 2 ja 4 havaittu jotain muutoksia n :ssä, jotka ovat selitettävissä aineiden pituuden lämpötilakerrointen α_r ja α_g välisen eron muutoksilla.

Pituuden lämpötilakertoimien erilaisuus lämmitettäessä ja jäähdytettäessä on havaittu aikaisemminkin [5]. Koska optinen efekti, jonka erotuksen $\alpha_r - \alpha_g$ muutos aiheuttaa, syntyy lasimaisessa tilassa, niin se häviää antureiden 2 ja 4 osalta jäähdytettäessä putki liimauslämpötilaan. Kineettisen käyttäytymisen $n_4(T)$ tunteminen anturille 4 antaa mahdollisuuden korjata käyrää $n_2(T)$ katkoviivaosuuden. Käyrä $n_2(T)$ osoittaa, että havaitulla optisella matkaerolla on huoneen lämpötilassa ja kumikummoisessa tilassa $T = 150 \text{ }^\circ\text{C}$ sama arvo ($n = 3,2$) (kuva 2). Se merkitsee, että tämä optinen matkaero syntyi kumikummoisessa tilassa ja että venymiä määritettäessä on käytettävä kaavaa 1 ja tätä tilaa vastaavaa jännitysoptista vakiota (kuva 1). Kuvassa 1 annettu suure S on saatu kalibrointikokeesta ja E-moduuli on määritetty optis-mekaanisen analogian avulla [6]. Näin saadaan

$$(\epsilon_1 - \epsilon_2)^g = \frac{(1 + \mu_g) n S}{E_g 2 t_g} = \frac{(1 + 0,5) \cdot 3,2 \cdot 0,21}{800 \cdot 2 \cdot 0,203} = 3 \cdot 10^{-3},$$

$$(\epsilon_1 - \epsilon_2)^r = \frac{1}{C} (\epsilon_1 - \epsilon_2)^g = 5,5 \cdot 10^{-2}$$

ja

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^r = 0,075 \text{ MPa}.$$

PVC-muovin kimmokertoimen arvo on kirjallisuuden [2, Bd 4.9] mukaan 2 GPa. Putken ja anturin suppeuskerroimella voidaan kumikummoisessa tilassa käyttää samaa arvoa $\mu_r = \mu_g = 0,5$. Putken seinämän paksuus ja anturin paksuus ovat vastaavasti $t_r = 4,7 \text{ mm}$ ja $t_g = 2,03 \text{ mm}$. Isokliineistä on nähtävissä, että päävenymä ϵ_2 on akselin z suuntainen. Jos oletetaan, että putki on kuormitettu aksiaalisesti, niin yksittäiset venymät voidaan määrittää helposti. Muussa tapauksessa on päävenymien ja pääjännitysten erottamiseksi käytettävä tavano- maista menettelyä [1, 2, 4]. Tällä olettamuksella ja arvolla $\mu_r = 0,5$ ovat venymät anturin 2 alueella $\epsilon_2^{(2)} = \epsilon_z^{(2)} = -3,6 \cdot 10^{-2}$ ja $\epsilon_1^{(2)} = 1,8 \cdot 10^{-2}$. Mekaanisilla mittauksilla saadaan puristumaksi $\epsilon_z^{(2)} = -3,4 \cdot 10^{-2}$. Antureista 1 ja 3 mitatut venymät ovat $\epsilon_z^{(1)} = -4,1 \cdot 10^{-2}$, $\epsilon_z^{(3)} = -2,3 \cdot 10^{-2}$. Mekaaniset mit-

taukset antavat vastaavasti $\epsilon_z^{(1)} = -3,5 \cdot 10^{-2}$ ja $\epsilon_z^{(3)} = -1,9 \cdot 10^{-2}$.

Kuvassa 3 on esitetty kineettinen käyrä lämpötilaan $T = 150^\circ\text{C}$ asti sellaisesta jännitysoptisesti aktiivisesta aineesta tehdylle anturille 5 (akselin suunnassa), jossa optinen efekti ei ole 'jäätynyt'. Venymiä laskettaessa on oletettava huoneen lämpötilaa vastaavat optis-mekaaniset arvot. Tälle optiselle aineelle liimausvaikutus putkessa on suuri ($E_{20}^g = 3000 \text{ MPa}$; $\frac{1}{C} = 617$) ja menetelmän tarkkuus on huonompi kuin pienemmän kimmokertoimen omaavilla aineilla.

Mittauksissa käytettiin heijastuspolariskooppia "Instruments Budd Division" Model LF/MV. Optisesti aktiivisen aineen valmistus ja liimaaminen putkien pinnalle on tehty kirjallisuudesta [7] saadun ohjeen mukaan.

LOPPUPÄÄTELMÄT

Saatujen tulosten perusteella pintakerrosmenetelmää voidaan käyttää muoviputkien alkuvenymien määrittämiseksi. Koeteknisesti on hyvä, jos käytettävällä jännitysoptisesti aktiivisella aineella on alhainen kimmokerroin ja liimaaminen vaikuttaa siihen mahdollisimman vähän. Saadut koetulokset osoittavat, että alkuvenymän suuruus vaihtelee pitken putken kehää eivätkä päävenymien suunnat aina ole yhdensuuntaiset putken akselien kanssa.

Mikäli anturiaineen pituuden lämpötilakertoimen riippuvuus lämpötilasta $\alpha_g(T)$ tunnetaan, niin kineettisen käyrän $n(T)$ avulla voidaan analysoida putkimateriaalin pituuden lämpötilakertoimen lämpötilariippuvuutta $\alpha_r(T)$.

Voidaan olettaa pintakerrosmenetelmän soveltuvan myös lasikuituvalmisteisten muoviputkien valmistuksessa syntyvien alkumuodonmuutosten määrittämiseen. Ehdotettua jännitysoptista menetelmää on vielä jatkossa kuitenkin kehitettävä, jotta aineiden reologiset ominaisuudet pystytään ottamaan huomioon.

KURZFASSUNG

In diesem Artikel wird die Anwendung des Oberflächenschichtverfahrens mit optischen Gebern zur Bestimmung von anfänglichen verfertigungstechnologischen Dehnungen in Kunststoffrohren besprochen. Die Grundlagen der Methode sind früher, teilweise von einem der Verfasser (A.I.P.), entwickelt und veröffentlicht [1,2,3,4] worden.

Die Anfangsdehnungen von Kunststoffrohren werden gewöhnlich durch Wärmebehandlung des Rohrstückes ausgelöst und mechanisch über eine Messtrecke gemessen. Diese Methode eignet sich nur für Rohre und Formstücke mit einfacher Geometrie. Die hier besprochene spannungsoptische Methode wird dagegen nicht durch die geometrische Form des Gegenstandes begrenzt.

In der spannungsoptischen Methode werden bei Raumtemperatur spannungsoptisch aktive Geber an die zu untersuchende Fläche des Prüfkörpers geklebt. Das System wird aufgeheizt, bis die Anfangsdehnungen im Prüfkörper ausgelöst sind und wieder bis auf Raumtemperatur abgekühlt, wobei die Dehnungen in die Geber übertragen werden. Gleichzeitig wird der in der spannungsoptisch aktiven Oberflächenschicht entstandene optische Gangunterschied gemessen. In der Regel durchläuft das spannungsoptisch aktive Gebermaterial im Temperaturbereich $20-160^\circ\text{C}$ drei physikalische Zustände, nämlich den glasartigen, den hochelastischen und den Übergangszustand, die alle eine eigene Wirkung auf

den Gangunterschied haben. Ausserdem wirkt sich noch die Differenz zwischen den Wärmeausdehnungskoeffizienten des zu messenden Materials und des Gebermaterials aus. Die Hauptdehnungsdifferenz im Geber kann entsprechend als eine Summe über die Teilbereiche ausgedrückt werden. Durch verschiedene Wärmebehandlungen können gewünschte Teilbereiche ausgeschlossen werden. Für die übrigen erforderlichen physikalischen wie für die mechanischen (E, μ) und optischen (D, S) Eigenschaften ist die Temperaturabhängigkeit zu bestimmen oder eine regelgebundene Abhängigkeit vor auszusetzen.

Die Messergebnisse mit einem PVC-Kunststoffrohr sind in den Bildern 1, 2, 3 angegeben. Die Werte für die einzelnen Hauptdehnungen, beide spannungs-optisch und mechanisch gemessen, sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt.

Tabelle. Die optischen und mechanischen Dehnungsergebnisse.

Dehnung	optische gemessen	mechanisch gemessen
$\epsilon_2^{(2)} = \epsilon_z^{(2)}$	$-3,6 \cdot 10^{-2}$	$-3,4 \cdot 10^{-2}$
$\epsilon_1^{(2)}$	$1,8 \cdot 10^{-2}$	
$\epsilon_z^{(1)}$	$-4,1 \cdot 10^{-2}$	$-3,5 \cdot 10^{-2}$
$\epsilon_z^{(3)}$	$-2,3 \cdot 10^{-2}$	$-1,9 \cdot 10^{-2}$

Der Unterschied zwischen den optischen und mechanischen Messresultaten für Dehnungen ist verhältnismässig klein. Das Oberflächenschichtverfahren eignet sich, wie die Resultate zeigen, zur Bestimmung von Anfangsdehnungen in den Kunststoffartikeln. Es ist experimentell von Vorteil, wenn der spannungsoptisch aktive Geberstoff einen niedrigen E-Modul hat und einen möglichst kleinen Armierungseffekt gibt.

Das deutschsprachige Original dieses Artikels ist bei der Schriftleitung erhältlich.

KIRJALLISUUTTA

- [1] Fotouprugost. Ed. G.L. Hesina. Strojizdat. Moskova, 1975.
- [2] Müller, R.K. Handbuch der Modellstatik. Springer Verlag. Berlin, Heidelberg, New York, 1971.
- [3] Popov, A.I., Naumow, A.A., Pascha, M.N. Untersuchung der Eigenspannungen in einachsig bewehrten Platten, Bauinformation, 12/73, DDR, Berlin 1973.
- [4] Wolf, H. Spannungsoptik, Berlin/Göttingen/Heidelberg: Springer, 1961.
- [5] Koleske, I.V., Wartman, L.H. Poly (Vinyl Chloride), MacDonald Technical Scientific, London.
- [6] Chesin, G.L., Wardanjan, G.S. und andere. Anwendung der Spannungsoptik zur Untersuchung des Spannungs-Dehnungsverhaltens von Konstruktionselementen bei Berücksichtigung des Kriechens. Bauinformation 12/73, DDR, Berlin, 1973.
- [7] Photolastic Inc. 67 Lincoln Highway, Malvern, Pa. 19355, Bulletin IB-P-310.

A.I. Popov, Dozent, Dr-ing. Technische Hochschule für Bauwesen in Moskau (UDSSR)
 L. Koski, Fil.lis., Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Rakennetekniikan laboratorio