

INTEGRAALNE FOTOELASTSUSMEETOD KLAASTOODETE KVALITEEDI KONTROLLIMISEKS

Hillar Aben, Leo Ainola, Johan Anton, Andrei Errayart

Tallinna Tehnikaülikooli Küberneetika Instituut

RESÜMEE

Artiklis kirjeldatakse lühidalt Küberneetika Instituudi fotoelastsuse laboratooriumis välja töötatud integraalset fotoelastsusmeetodit ja selle kasutamist klaastoodete jääkpingete mõõtmiseks.

SISSEJUHATUS

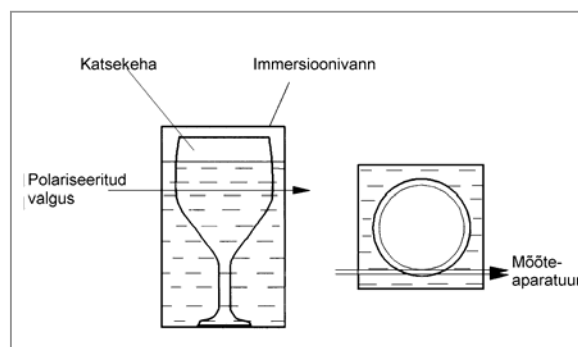
Klaastoodete kvaliteedi üheks oluliseks näitajaks on jääkpinged [1]. Soodsalt jaotatud jääksurvepinged võivad tõsta klaasi tugevust mitmeid kordi, samal ajal kui jääktõmbepinged klaastoote pinnal põhjustavad selle purunemise isegi õrna kriimustuse korral.

Fotoelastsusmeetodit, mis põhineb läbipaistvate materjalide muutmisel kaksikmurdvaks pingete mõjul, on kasutatud klaasi pingete mõõtmiseks juba üle poolteise sajandi. Kui klaasplaatide pingete mõõtmine on suhteliselt lihtne, siis keeruka kujuga klaastoodete puhul nagu joogiklaasid, kineskoobid, elektripirnid jne, on pingete määramine keerukas mitmel põhjusel (optiliste nähtuste keerukus, raskused mõõtmistulemuste interpreteerimisel). Viimasel aastakümnel on selleks uusi võimalusi avanud integraalne fotoelastsusmeetod.

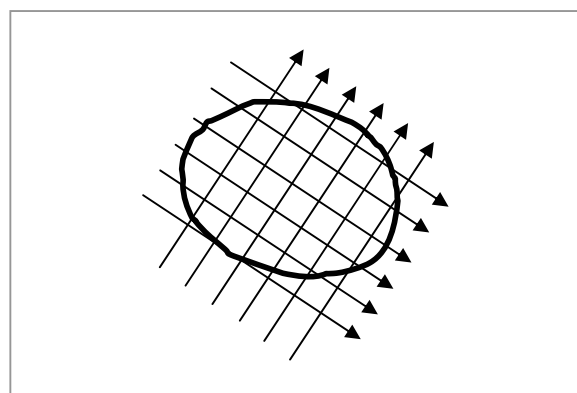
INTEGRAALNE FOTOELASTSUSMEETOD

Integraalse fotoelastsusmeetodi [2] kasutamisel asetatakse läbipaistev katsekeha immersioonivanni, et vältida valguse murdumist, ning suunatakse temast läbi polariseeritud valguse voog (joonis 1). Paljudel valguskiirtel mõõdetakse polarisatsiooni muutus, mis on tingitud katsekehas esinevast pingekaksikmurdvusest. Selle integraalse polarisatsioonoptilise informatsiooni põhjal on mitmetel juhtudel võimalik määrata katsekeha pingeolekut. Juhul kui katsekeha on telgsümmeetriline, piisab selle läbivalgustamisest ainult ühes suunas. Üldjuhul on vajalik katsekeha läbivalgustamine paljudes suundades (joonis 2).

Integraalse fotoelastsusmeetodi otseülesande lahendamiseks, st polarisatsiooni teisendamise määramiseks etteantud pingevälja puhul, võib kasutada Maxwelli võrranditest tuletatud fotoelastsusvõrrandeid [2].



Joonis 1.
Katseskeem.



Joonis 2.
Katsekeha läbivalgustamine paljudes suundades.

Integraalse fotoelastsusmeetodi pöördülesanne, mis seisneb mõõdetud polarisatsiooniteisenduste põhjal pingevälja arvutamises, on üldjuhul mittelineaarne. Selle põhjuseks on mittelineaarsed optilised nähtused, mis tekivad mittehomoogeense kaksikmurdva keskkonna läbivalgustamisel [3, 4].

Probleem lihtsustub, kui katsekeha kaksikmurdvus on nõrk (nt katsekeha on lõõmutatud klaasist) või peapingete suunad on valguskiirel ligikaudu konstantsed (nt silindrilise kujuga joogiklaasid). Sel juhul on võimalik igal valguskiirel määrata isokliini parameeter φ (annab ligikaudselt keskmise peapinge suuna) ning optiline faasinihe Δ . Need suurused avalduvad pingekomponentide integraalidena järgnevalt:

$$\Delta \cos 2\varphi = C \int (\sigma_z - \sigma_x) dy, \quad (1)$$

$$\Delta \sin 2\varphi = 2C \int \tau_{zx} dy, \quad (2)$$

kus C on fotoelastsuskonstant ning σ_z , σ_x ja τ_{zx} on pingekomponendid valguskiire risttasapinnas.

Asjaolu, et integraalses fotoelastsuses saab mõõta pingevälja komponentide integraale, näitab, et sisuliselt on meil tegemist tomograafiaga [5], mis samuti põhineb välja integraalide mõõtmisel. Kui nn traditsiooniline tomograafia on skalaarvälja tomograafia, kus välja igat punkti iseloomustab skalaar (nt röntgenkiirte neelduvuse tegur), siis integraalne fotoelastsusmeetod on tensorvälja tomograafia, sest igat välja punkti iseloomustab pingetensor. Seetõttu on pingevälja tomograafia oluliselt keerukam traditsioonilisest tomograafiast [6].

TELGSÜMMEETRILISE PINGEOLEKU MÄÄRAMINE

On võimalik näidata, et integraalvõrrandid (1) ja (2) lubavad määrata telgpinge σ_z ja nihkepinge τ_{rz} jaotuse telgsümmeetrilises katsekehas [7]. Et määrata ka radiaalpinge σ_r ja rõngaspinge σ_θ , on vajalikud kaks täiendavat võrrandit. Nendeks on tasakaaluvõrrand

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

ning nn üldistatud summareegel [8]

$$\sigma_r + \sigma_\theta = \sigma_z - 2 \int \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} dr + C. \quad (4)$$

Seega võib telgsümmeetrilise pingeoлеку määramist vaadelda hübriidmehaanika ülesandena, kus neljast

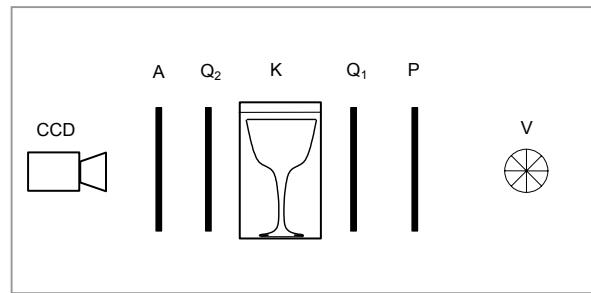
otsitavast pingekomponendist kaks määratakse otse katseandmetest ning kaks elastsusteooria seostest.

Kui võrd paljud klaastooted omavad telgsümmeetrilist kuju, siis käesolevas artiklis piirdumegi peamiselt selle juhu vaatlemisega.

MÕÕTEAPARATUUR

Integraalses fotoelastsuses kasutatava polariskoobi skeem on joonisel 3 ning Küberneetika Instituudi fotoelastsuse laboratooriumi konstrueeritud automaatpolariskoobi AP-03 SM foto joonisel 4.

Polarisaatorit P ja esimest veerandlaineplaati Q_1 saab pöörata samm-mootorite abil, mis võimaldab automaatselt teostada mõõtmisi faasisammude meetodil [9]. Katsekehaga immersioonivann asetatakse



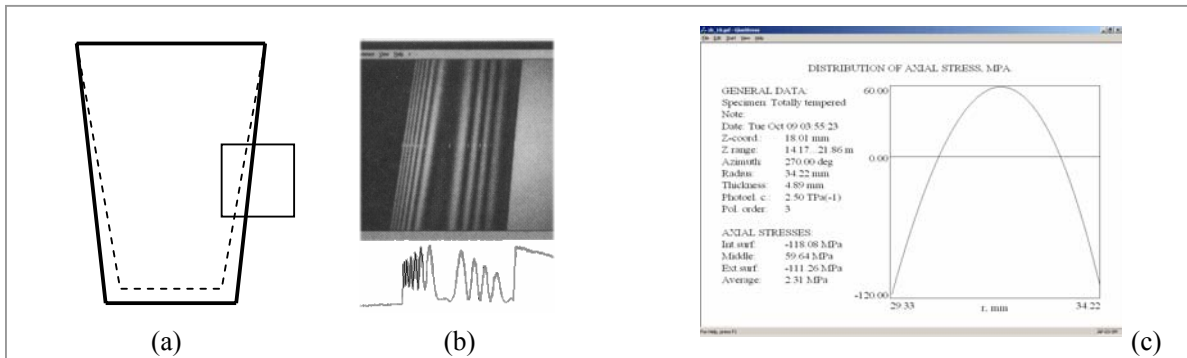
Joonis 3.

Polariskoobi skeem: V – valgusallikas, P – polarisaator, Q_1 , Q_2 – veerandlaineplaadid, K – katsekeha immersioonivannis, A – analüsaator, CCD – videokaamera.



Joonis 4.

Automaatpolariskoop AP-03 SM.



Joonis 5.

Karastatud joogiklaasi geometria (a), füüsikaline ja digiteeritud interferentsribade kujutis (b) ning telgpinge jaotus läbi klaasi paksuse (c).

koordinaatseadmesse, mis võimaldab teostada fotoelastsusmõõtmisi katsekeha erinevates piirkondades. Mõõtesüsteemi oluliseks osaks on tarkvara Glas-Stress. Selle abil leiab polariskoop automaatselt katsekeha pinnad, digiteerib interferentsribad ja määrab nende täpsed asukohad, nummerdab interferentsribad ning arvutab pingevälja [10, 11].

Polariskoobi käsitlemine ei eelda mingeid teadmisi fotoelastsusmeetodi kohta ning teda võib kasutada tehases tootmisliini vahetus läheduses.

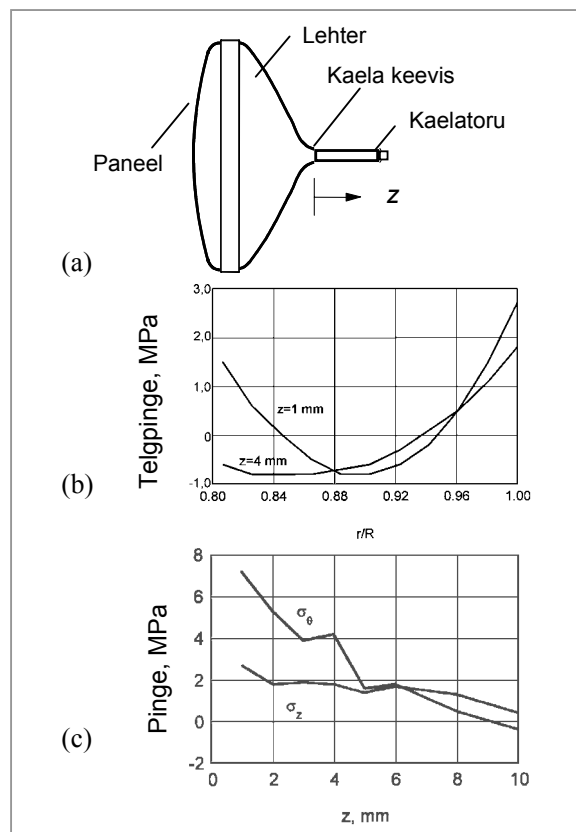
RAKENDUSNÄITED

KARASTATUD JOOGIKLAAS

Joogiklaaside purunemiskindluse tõstmiseks kasutatakse tänapäeval nende karastamist, millega luuakse klaasi pindadele suured survepinged (kuni 150 MPa). Vaadeldaval juhul on polariskoopi juhtiva arvuti kuvariekraanil näha interferentsribade pilt (joonis 5 b). Interferentsribad digiteeritakse ning selle informatsiooni põhjal arvutatakse pingajaotus (joonis 5 c).

KINESKOOBI KAELATORU

Kineskoop on keerukas klaastoode, mis koosneb kolmest osast (joonis 6 a): paneel, lehter ja kaelatoru. Need osad on ühendatud keevitamisega. Kuna kineskoobi osad on valmistatud erinevatest klaasidest, siis kaasnevad keevitamisega jääkpinged, mis on eriti kriitilised kaelatoru keevise lähedal. Joonisel 6 b ja c on toodud jääkpingete jaotus mõnedes kaelatoru lõigetes ja selle pinnal.



Joonis 6.

Kineskoobi konstruktsioon (a) ja pingajaotus mõnedes kaelatoru lõigetes (b) ning välispinnal (c).

ASTMELISELT MUUTUVA MURDUMISNÄITAJAGA KLAASKIU TOORIK

Jääkpingete jaotus klaaskiu toorikus lubab hinnata sellest valmistatava klaaskiu omadusi. Astmeliselt muutuva murdumisnäitaja puhul on pingejaotuse määramine seotud kolme probleemiga: 1) kuidas kirjeldada adekvaatselt pinge astmelist muutumist kihtide eralduspinnal, 2) kuidas arvestada valguse murdumist kihtides, 3) kuidas määrata kõiki pinge-komponente (integraalne fotoelastsusmeetod annab otseselt vaid telgpinge σ_z jaotuse). Neid probleeme arvestav pinge mõõtmise meetoodika on kirjeldatud töös [12].

Joonisel 7 a on näidatud ühe astmeliselt muutuva murdumisnäitajaga klaaskiu tooriku murdumisnäitaja profiil. Telgpinge jaotus, mis on määratud diskreetse Abeli inversiooni abil, on toodud joonisel 7 b. Joonisel 7 c näidatud telgpinge jaotus, mille puhul on kasutatud tükati polünoomiaalset aproksimeerimist, kirjeldab pinge astmelist muutumist adekvaatselt. Joonisel 7 d on toodud kõikide pingekomponentide jaotus, mis on määratud hübriidmehaanika algoritmi abil [12].

KIKILIPS-TÜÜPI KLAASKIU TOORIK

Kuna klaaskiu toorikus teljesuunaline pingegradient puudub, siis puuduvad selles ka nihkepinged ning valemi (1) võib kirjutada kujul ($\varphi = 0$)

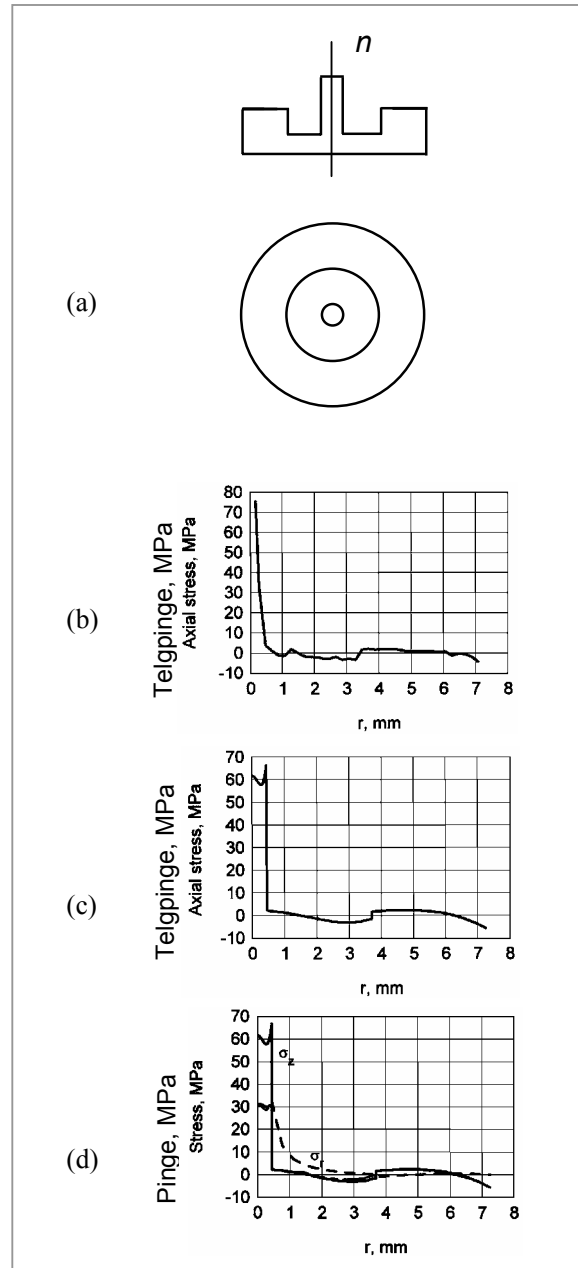
$$\Delta = C \int \sigma_z dy. \quad (5)$$

Seega vaadeldaval juhul taandub pingevälja tomograafiline määramine skalaarvälja tomograafia ülesandeks. Joonisel 8 on toodud kikilips-tüüpi (bow-tie) klaaskiu tooriku põiklõige ja telgpinge jaotus.

Vaadeldaval juhul kasutati tomograafilistel fotoelastsusmõõtmistel 60 erinevat läbivalgustamise suunda ning iga suuna puhul registreeriti optiline faasinihe 140 punktis.

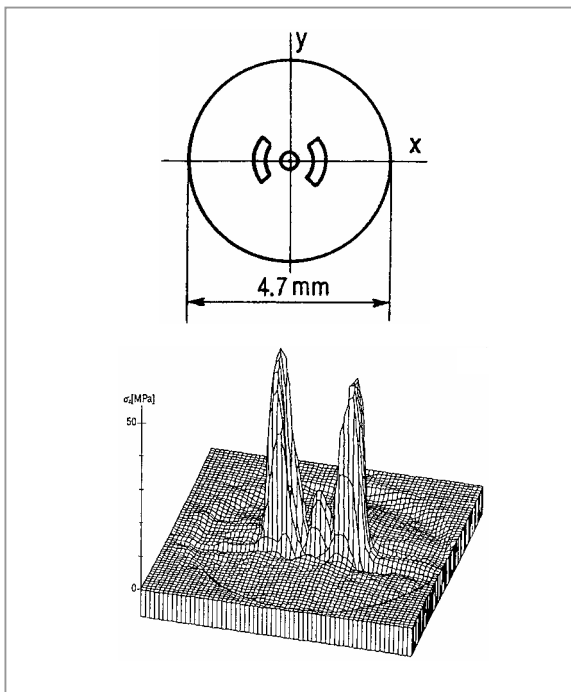
KOKKUVÕTE

Integraalne fotoelastsusmeetod on osutunud efektiivseks vahendiks jääkpingete mõõtmisel keeruka kujuga klaastoodetes. Küberneetika Instituudi fotoelastsuse laboratooriumis välja töötatud klaasi jääkpingete mõõtmise tehnoloogia (automaatpolariskoop koos tarkvaraga) on erinevate klaastoodete kvaliteedi kontrollimisel kasutusel mitmetes tuntud klaasifirmades Hollandis, Itaalias, Jaapanis, Prantsusmaal, Saksamaal, Türgis ja USA-s.



Joonis 7.

Astmeliselt muutuva murdumisnäitajaga klaaskiu tooriku murdumisnäitaja profiil (a), diskreetse Abeli inversiooni (b) ja tükati polünoomiaalse aproksimeerimisega (c) määratud telgpinge jaotus, ning kõigi pingekomponentide jaotus (d).



Joonis 8.

Telgpinge jaotus kivilips-tüüpi klaaskiu toorikus.

KASUTATUD KIRJANDUS

1. Scholze, H. Glass. Nature, Structure and Properties. Springer, New York, 1991.
2. Aben, H. Integrated Photoelasticity. McGraw-Hill, New York, 1979.
3. Aben, H., Josepson, J. Strange interference blots in the interferometry of inhomogeneous birefringent objects. *Appl. Optics*, 1997, 36, 7172-7179.
4. Aben, H., Ainola, L. Interference blots and fringe dislocations in optics of twisted birefringent media. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1998, 15, 2404-2411.
5. Herman, G. T. Image Reconstruction from Projections. Academic Press, New York, 1980.
6. Aben, H. Tomographie optique des champs de contraintes. *Rev. Franç. Méc.*, 1989, 1, 121-130.
7. Aben, H., Guillemet, C. Photoelasticity of Glass. Springer, Berlin, 1993.
8. Ainola, L., Aben, H. Hybrid mechanics for axisymmetric thermoelasticity problems. *J. Thermal Stresses*, 2000, 23, 685-697.
9. Aben, H., Ainola, L., Anton, J. Half-fringe phase-stepping with separation of the principal stress directions. *Proc. Eston. Acad. Sci. Eng.*, 1999, 5, 198-211.
10. Anton, J. Automatic measurement of residual stresses in tempered tumblers. *Proc. 18th International Congress on Glass*. San Francisco, 1998, vol. A 11, 9-13, CD-ROM.
11. Aben, H., Ainola, L., Anton, J. Integrated photoelasticity for nondestructive residual stress measurement in glass. *Opt. Lasers Eng.*, 2000, 33, 49-64.
12. Aben, H., Ainola, L., Anton, J. Errapart, A. Détermination des contraintes dans les préformes optiques à saut d'indice. *Colloque "Photomécanique 2001"*. Poitiers, 2001, 71-78.