

SZILIKÁTTECHNIKA

Feszültségmérési módszerek alkalmazása az üvegyártásban*

Horváth István – Szabó István

Veszprémi Egyetem

Bevezetés

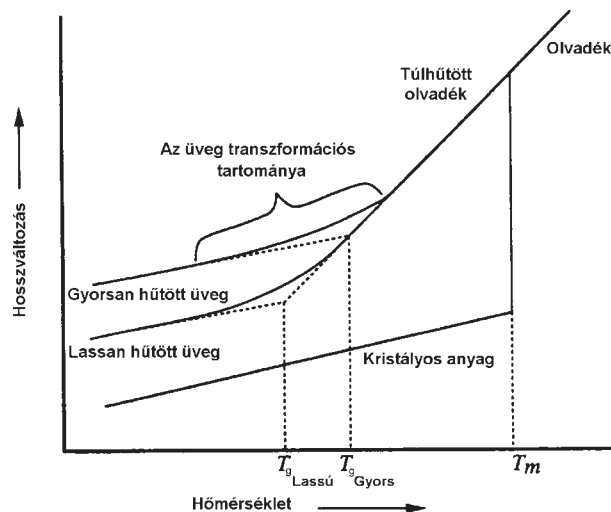
Az üvegyiparban gyártott termékek az üvegolvadék hűtésével, formázásával nyerik el végső alakjukat. A gyors hűtés eredményeként az üvegben termikus feszültségek keletkeznek, amelyek hatása befolyásolja az üvegtermékek mechanikai tulajdonságait (rugalmasság, szilárdság, feszültség, keménység), így általában a formázási eljárás befejezésekként a terméket feszültségmentesítik [1, 2]. Az üveg további megmunkálása, formázása, ragasztása, edzése az üvegben újabb feszültséget eredményez, amelynek ellenőrzése, kézben tartása fontos üvegyártás-technológiai követelmény.

A feszültség, azaz a felületegységre ható erő – függetlenül attól, hogy termikus vagy kémiai inhomogenitás eredménye – az üveg transzformációs tartománya alatti rugalmas, elasztikus vagy transzformációs, viszkoelasztikus tartományában jöhet létre. Az üvegben keletkező feszültség lehet átmeneti vagy maradó. Az átmeneti feszültségek létrejöhetnek külső mechanikai terhelés vagy hőmérséklet-inhomogenitás következtében. A maradó feszültségek körébe sorolhatók az utólagos hőkezeléssel megszüntethető, valamint a nem megszüntethető feszültségek. Ez utóbbi csoportba tartoznak az eltérő kémiai összetételből eredő, illetve különböző összetételű üvegek vagy azok fémmel, kerámiával való összeolvasztásakor létrejövő feszültségek [3].

Az üveg szilárdságának növelése érdekében létrehozott feszültség előnyös [4]. Az üveg szilárdságnövelésének három ismertebb módja a termikus, a kémiai és a szálerősítési eljárás [5]. Ezek közül a cikk csak a termikus úton létrehozott feszültségekkel és azok mérésével foglalkozik.

Az üvegtulajdonságok és a feszültség kapcsolata

A feszültségek kialakulásakor a fizikai tulajdonságok közül a viszkozitás, a hőtágulás, a rugalmasság és a hővezetés játszik fontos szerepet.



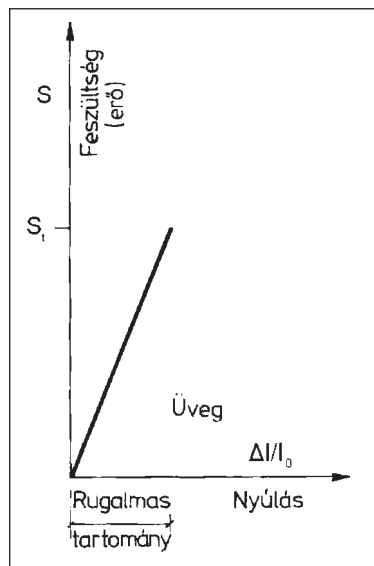
1. ábra. Az üveg dilatometres görbéje

Az olvadék hűtésekor a transzformációs hőmérséklet-tartomány feletti viszkózus állapotban feszültségek nem keletkezhetnek. Az üvegolvadék részecskéinek homogénitása nem teszi lehetővé feszültség kialakulását (1. ábra). A hőmérséklet csökkenésével növekszik az olvadék viszkozitása. Elérve a felső hűtési pontnak (annealing point) megfelelő hőmérsékletet, azaz az $\eta \sim 10^{13}$ dPas viszkozitást, az üvegben kialakul a viszkoelasztikus állapot. A hőmérséklet további csökkentésével elérhető az $\eta \sim 3,2 \times 10^{14}$ dPas viszkozitás, amely az alsó hűtési pontnak (strain point) felel meg. A viszkoelasztikus tartományban az üvegnek mind a viszkózus, mind a rugalmas jellemzői érvényesülnek, így lehetőség van feszültség kialakulására. Az üveg viszkozitása szobahőmérsékleten elérheti az $\eta \sim 10^{20}$ dPas értéket, az üveg gyakorlatilag szilárd.

A szilárd üveg erő hatására deformálódik. Az erő megszűnésével az üveg visszanyeri eredeti alakját, tehát ideálisan rugalmas tulajdonságokat mutat. A Hook-törvény szerint az alakváltozás vagy deformáció (D) arányos a terhelés hatására fellépő feszültséggel (S).

$$S = M \cdot D \quad (1)$$

* A 2003. június 3-án Budapesten rendezett Üvegyipari Konferencián elhangzott előadás nyomán



2. ábra. Az üveg alakváltozása és a külső erő hatására ébredő feszültség összefüggése [4]

Az egyenletben az M arányossági tényező az üveg kémiai összetételétől függő modulus. Húzófeszültség hatására kialakuló megnyúlás mértéke a tágulási vagy rugalmassági modulussal (E) jellemezhető (2. ábra). Az üveg rugalmassági modulusa 75 000 MPa. Az üveg törésig ideálisan rugalmas testként működik [4].

Az üveg mérete a hőmérséklet növekedésével növekszik. A dilatációs mérés segítségével a közepes lineáris hőtágulási együttható [6] és a transzformációs hőmérséklet [7] meghatározható.

Ha egy üveglapnak csak az egyik felét melegítjük, és a melegítés alatt az üveg hőmérséklete sehol sem éri el a transzformációs tartományt, a melegített rész igyekszik tágulni, a hideg rész azonban gátolja ebben. A melegített részben nyomó-, a hidegebb részben húzófeszültségek ébrednek. Az egész üvegmintát azonos hőmérsékletre melegítve a keletkezett átmeneti feszültségek megszűnnek.

Az üvegminta mérete a transzformációs tartományban ugrásszerűen megnő, jelezve, hogy ebben a hőmérséklet-tartományban alapvető szerkezeti átalakulás megy végbe. A méretnövekedés az eltérő hőmérsékletű üvegrészekben különböző, közöttük átmeneti termikus feszültségek ébrednek. Üvegcsövek darabolásának egyik módja, hogy a csövet forgás közben izzó huzallal vagy hegyes lánggal vékony sávban felmelegítik, majd hideg fémkoronggal megérintik. Az üvegcső külső rétege az érintés vonalában hirtelen lehül, és a keletkező axiális húzófeszültség hatására az üvegcső körbeped. A transzformációs tartomány fölötti hőmérsékleten a repesztés nem sikerül.

A transzformációs tartomány felett kialakuló hőmérséklet-különbségek maradó feszültséget keltenek, megszüntetésük csak utólagos hőkezeléssel oldható meg. A transzformációs tartomány hőmérséklete fölül melegített

üvegrész a vele szomszédos, viszonylag hidegebb üvegrészhez képest nagyobb mértékben húzódik össze hűlés hatására. A felső hűtési pontnál nagyobb hőmérsékletűről hűlő üvegrészt a hidegebb üvegrész gátolja összehúzódásában. A mintának szobahőmérsékletre való teljes lehülése után a transzformációs tartománynál nagyobb hőmérsékletűről hűtött üvegrészben húzó-, míg a transzformációs tartományt el nem ért részben nyomófeszültség alakul ki.

Edzés során az üveg felületét a transzformációs tartomány fölül melegítik. A minta belsejének hőmérséklete ugyanakkor nem lépi túl a transzformációs hőmérsékletet az üveg alaktartásának biztosítása érdekében. Az előző esettől eltérő gyors hűtés a felületi réteg gyors összehúzódását eredményezi, amelyet a viszkoelasztikus belső réteg enged. Végül a szobahőmérsékletre lehűlt minta belsejében húzó-, felületén nyomófeszültség alakul ki.

Az üvegben a hőátadás vezetéssel és sugárral történik. Kis hőmérsékleten a vezetés, nagyobb hőmérsékleten a sugárzás jelentősebb. Definíció szerint a hővezetést a következő egyenlet írja le:

$$\frac{dQ}{dt} = -\lambda_t \cdot F \cdot \frac{dT}{dx}, \quad (2)$$

ahol

λ_t a hővezetési tényező, W/(m·K),

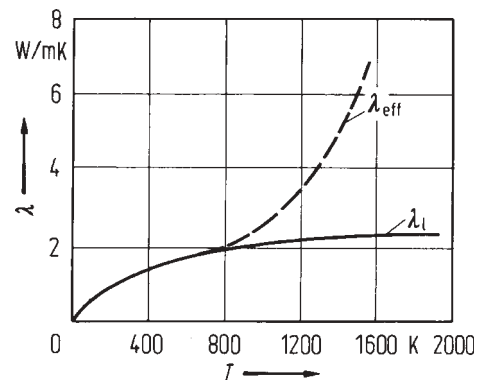
F a hőforgalom irányára merőleges felület,

$\frac{dQ}{dt}$ az időegység alatt az F felületen átadott hőmennyiség,

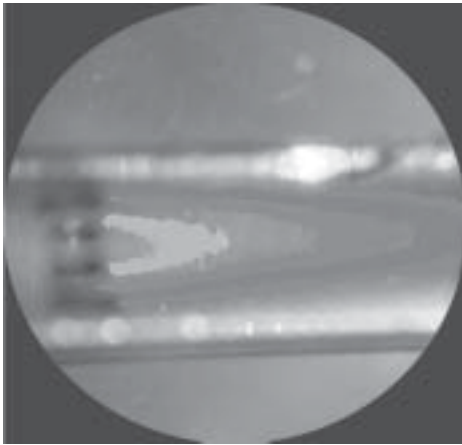
$\frac{dT}{dx}$ a hőmérséklet-gradiens.

Mérésnél az effektív hővezetési tényezővel (λ_{eff}) számolnak, amely a hővezetési tényező (λ_t) és a sugárral történő vezetési tényező (λ_{st}) összege.

Az effektív hővezetési tényezőt gyakran hővezető képességnek nevezik. Nagyobb hőmérsékleten a sugárral történő leadott hőmennyiség nagyságrenddel nagyobb a hővezetéssel leadott hőmennyiségnél [2]. Az üveg formázásánál vagy edzésénél a transzformációs tartományból vagy annál nagyobb hőmérsékletűről történő hűtésnél kezdetben



3. ábra. Az üveg effektív hővezetési tényezőjének változása a hőmérséklet függvényében ($T > T_g$ esetén $\lambda_{eff} = \lambda_t + \lambda_{st}$) [2]

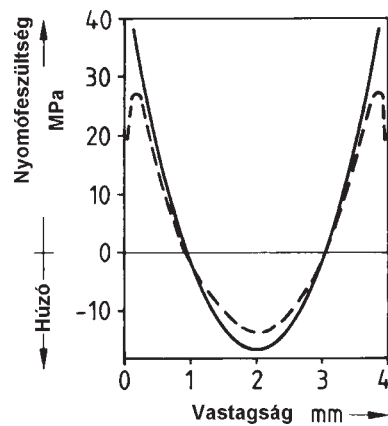


4. ábra. Az edzett üveg vastagságában fellépő parabolikus feszültségeloszlás

a sugárzás a döntő. Szobahőmérséklet felé haladva a hőmérséklet-gradiens csökken, így egyre inkább a hővezetés kerül előtérbe (3. ábra).

Az üveg termikus szilárdságnövelése hűtőlevegővel [8] vagy hűtőfolyadékkal [9] oldható meg. Az üveg felületi rétegében kialakuló nyomófeszültség összenyomja a felületi hibákat. Terhelés esetén a húzófeszültségnek elsőként a felületi nyomófeszültséget kell legyőznie, és csak a húzófeszültség további növekedése idézi elő az üveg törését. Állandó felületi nyomófeszültség kialakításához a hűtés a T_g hőmérséklet feletti T_0 hőmérsékletéről indul. Ha az üveg mindkét oldalán állandó a hűtés sebessége, az üveg keresztmetszete mentén parabolikus hőmérsékletprofil alakul ki (4. ábra). Mindaddig, amíg T_0 nagyobb, mint T_g , vagyis a viszkozitás kicsi, feszültség nem alakul ki. Amikor az üvegfelület T_a hőmérséklete T_g alá csökken, a felületi rétegek összehúzódnak. Ugyanakkor az üveg belső rétegeiben uralkodó T_i hőmérséklet még nagyobb T_g -nél, emiatt a feszültségprofil a megszilárdult külső réteg és a még viszkoelasztikus belső réteg között jön létre. A viszkoelasztikus T_g tartományban a megszilárdulás és a feszültségképző folyamat az idő, és ezzel együtt a hűtési sebesség függvénye. Utóbbit a feszültség-relaxációs idők eloszlásfüggvénye jellemzi. Ha a feszültségprofil kialakulásáról pontosabb képet akarunk kapni, figyelembe kell vennünk a T_g hőmérséklet-tartományban a viszkozitás, a sűrűség és a rugalmassági modulus szerkezetfüggő változását.

A gyors hűtéssel az üveg felületén létrehozott nyomófeszültség nem minden esetben akadályozza meg a felület sérüléséből adódó repedések tovaterjedését, növekedését. A felület alatti rétegben megfelelő hőkezeléssel kialakítható nyomófeszültség-maximum csökkenti a hibahelyeken a húzóerő támadási felületét. Így, ha a nyomófeszültség-profilnak a felületi réteg alatt alakul ki maximuma, a repedés terjedése gátolt, a nyomófeszültség tartományban a repedés töve összenyomódik (5. ábra). Ilyen feszültségállapot inverz hőkezeléssel (a felületi nyomófeszültség csökkentése fémolvadékban tör-



5. ábra. A feszültség vastagság menti eloszlása optimális esetben (—) és nyomófeszültség-maximum kialakítása az üveg felületi rétegében (- -) [5]

tendő gyors hőkezeléssel) vagy a T_g hőmérséklet alatti felületi ioncserével hozható létre [10].

Fény-üveg kölcsönhatás

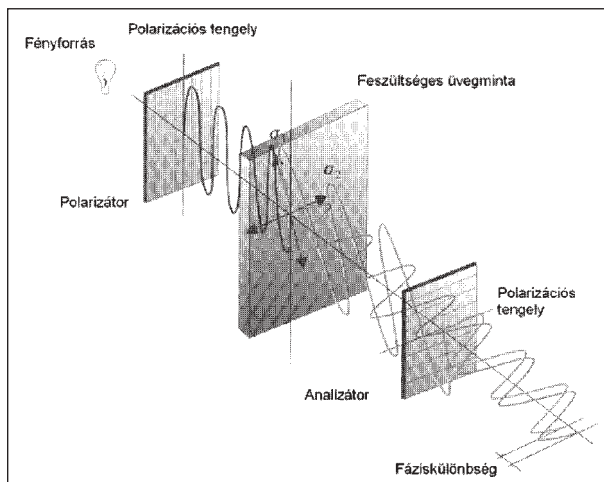
A feszültséganalízis optikai módszere, a fotoelasztikus analízis régóta ismert és alkalmazott technika. A fotoelasztikus eljárás olyan anyagokon végezhető, amelyek fényáteresztők és kettőtörők vagy kettőtörővé tehetők. A feszültséges üveg rendelkezik ezekkel a tulajdonságokkal, így ez a módszer alkalmas az üvegtermékekben jelen levő feszültségek meghatározására [11].

Síkpolárizáció

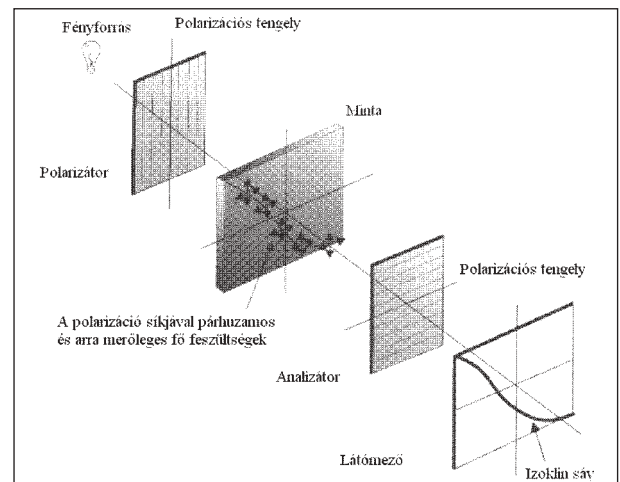
A fotoelasztikus eljárás alapja a síkpolárizáció, amelynek eredményeképpen a fény hullámkomponensei közül csak az egy síkban rezgő hullámok haladnak tovább. Síkpolárizációt úgy végezhetünk, hogy a fényt egy polarizáló lapon vezetjük keresztül. Az elem (*polarizátor*) olyan résnek tekinthető, amely csak a réssel párhuzamos irányú fényhullámokat engedi át. Ez az irány a *polarizációs irány*, tengelye a *polarizációs tengely*. Ha két polarizációs elemet keresztezett állásban helyezünk el egymás után, akkor az első elemet elhagyó polarizált fény nem jut át a második elemre. Ha a második polarizátort kis szögben ($0^\circ < \alpha < 90^\circ$) elforgatjuk, több fény jut át a második elemre. A maximális áteresztés akkor tapasztalható, ha a két elem polarizációs tengelye egymással párhuzamos. Ezt a második polarizációs elemet *analizátornak* nevezik, mivel alkalmas az első elemből jövő és a mintán áthaladó polarizált fény rezgési síkjának meghatározására [11].

Kettős törés

Az izotróp anyagok, mint például az üvegek, feszültségmentes állapotban nem mutatnak optikai anizotrópiát vagy kettős törést. A feszültséges üvegbe lépő polarizált



6. ábra. A síkpolarizáló elvi vázlata, a kettőtörés kialakulása [11]



7. ábra. Az izoklin sávok kialakulása [11]

fénysugár két olyan, síkban polarizált sugárra válik szét, amelyek polarizációs iránya egymásra merőleges. Ezek a polarizációs irányok – az üvegbe történő belépésnél – a fő feszültségirányoknak felelnek meg. A két hullám különböző sebességgel halad a feszültséges üvegben, egymáshoz viszonyítva az egyik késik. A késés az anizotróp anyagból kilépő hullámok közötti úthosszkülönbséget, retardációt (δ) jelenti. Ez a jelenség a *kettős törés* (6. ábra). Kristályos kettőtörő anyagokban a szerkezettől függően egy vagy esetleg két irány található, amelyekben nem észlelhető kettős törés. Ez az irány az *optikai tengely*, a kristály fő szimmetriatengelye [12].

Ha a kettőtörő anyagot monokromatikus fényvel világítjuk meg, kereszttezett polarizátorállás mellett két eltérő kioltási helyzet figyelhető meg: az izoklin és az izokróma sávok. Síkpolarizált fényben mindkét sáv típus észlelhető, ezzel szemben a körpolarizált fény esetén csak az izokróma sávok láthatók.

Izoklin sávok

Az izoklin sávok úgy definiálhatók, mint az üveg próbatess azon pontjainak összessége, amelyek fő feszültségirányai és nagyságai megegyeznek. Kialakulásuk azzal magyarázható, hogy a polarizátorból jövő, síkban polarizált fény olyan helyen halad át a feszültséges mintán, ahol a feszültség iránya és a polarizációsík párhuzamos egymással. Tehát nem alakul ki retardáció, a fény az eredeti polarizációs iránnyal lép ki a mintából, majd kioltódik a kereszttezett állású analizátoron. Emiatt fekete sávot kapunk (7. ábra).

Izokróma sávok

Fehér fény alkalmazásakor a feszültségmentes helyeket jelölő izoklin sávok mellett színes sávok is láthatók a látómezőben. Az azonos színű sávok azon pontok összességének tekinthetők, amelyek fő feszültségei között a kü-

lönbségek azonosak. Ezek az ún. izokróma sávok. Monokromatikus fényforrást alkalmazva sárga és fekete sávokat látunk. Egy felületi feszültséges mintában, melyben a feszültség a felületen, a terület mentén változik, de a minta vastagságán keresztül nem, a feszültség és fény közötti kapcsolat a következő:

$$(\sigma_1 - \sigma_2) = \frac{N \cdot \lambda}{C \cdot s} \quad (3)$$

ahol

$(\sigma_1 - \sigma_2)$ a területi főfeszültségek közötti különbség,

N az izokromatikus sáv rendje,

λ az alkalmazott fény hullámhossza,

C a feszültségoptikai együttható,

s a minta vastagsága.

Üvegtermékekben, a szabad éleket leszámítva, ez az összefüggés nem érvényes, mivel az üveggyártás során alkalmazott hőkezelés eredményeképpen a feszültség a vastagság mentén is változik (parabola szerint). Ennek megfelelően a fenti egyenlet a következőképpen módosítandó:

$$\int_0^s (\sigma_1 - \sigma_2) ds = \frac{N\lambda}{C} \quad (4)$$

$$\int_0^s \sigma_1 ds - \int_0^s \sigma_2 ds = \frac{N\lambda}{C} \quad (5)$$

A gyakorlatban C értékét Brewsterben adják meg ($1 \text{ Brewster} = 10^{-6} \text{ mm}^2/\text{N} = 10^{-12} \text{ Pa}^{-1}$). Így ha λ nm-ben és s mm-ben adott, akkor a feszültségkülönbség egysége a N/mm^2 (= MPa). Néhány üvegtípus feszültségoptikai állandóját mutatja az 1. táblázat.

A sötét látóterű, fehér fényvel megvilágított polariméterben (kereszttezett állású polarizátor és analizátor) látható színeket a 2. táblázat mutatja. Ha a fehér fény eléri a 400 nm-es hullámhosszt, akkor ($400 \text{ nm} < \lambda < 700 \text{ nm}$) már lesz elsőrendű komponense, amely nem jut át az analizátoron. Így ennek a színnek a kiegészítő, komplementer színe látható.

Az izokróma sávokat monokromatikus fényvel vizsgálva két különböző polariméter-állás lehetséges: sötét látóterű (keresztezett állású polarizátor és analizátor) és vi-

Feszültségmérési módszerek

Polariméterek

1. táblázat

Különböző üvegek feszültségoptikai együtthatói

Üveg típusa	C, Brewster ($\lambda = 514,5 \text{ nm}$)
Ólomüveg	0,84
Báriumüveg	1,73
Kvarcüveg	2,71
Floatüveg	2,72
Borosilikátüveg	2,93

lágos látóterű (párhuzamos állású polarizátor és analizátor). A sötét látóterű polariméterben az interferenciasávok teljes rendűek, azaz minden egyes sáv egy teljes főfeszültség-különbségnek felel meg, amely egy teljes hullámhossznak megfelelő retardációt okoz. A világos látóterű polarizátorban a sávok félrendűek ($N = 0,5; 1,5; 2,5, \dots$).

Fontos megjegyezni, hogy minden fotoelasztikus mérés főfeszültség-különbségeket szolgáltat, nem pedig önálló feszültségértékeket, hacsak nem tételezzük fel, hogy az egyik komponens értéke ismert vagy zérus, mint például szabad határfelületek esetén, szélvédők széleinél.

Legegyszerűbb fajtájuk fényforrást, polarizátort és analizátort, valamint a kettő közé helyezett vizsgálandó mintát tartalmaz. A fényforrásból jövő fényt egy lencsén szórják, majd polarizálják, a polarizált fény merőlegesen jut a minta felületére. A polariméterek típusától függően sík- vagy körpoláros fény előállítására alkalmasak.

A síkpolariméter fényforrásból, keresztezett állású polarizátorból és analizátorból áll. Ebben az elrendezésben mind az izokróma, mind az izoklin sávok láthatók. A körpolariméter annyiban különbözik az előzőtől, hogy a polarizátor és analizátor közé negyedhullámhossz lapo(ka)t helyeznek, és ennek eredményeképpen csak az izokróma sávok láthatók. Ha a retardáció értéke kicsi és emiatt nehezen mérhető, akkor célszerű kompenzátorokat használni.

Kompenzátorok

Ezeket az optikai eszközöket retardációk sorozatmérésére alkalmazzák. A kompenzátor retardációja a hossz mentén folyamatosan változik, ez megkönnyíti a vizsgált üveg retardációjának mérését. Több kompenzátortípus és megoldás létezik, a következőkben az üvegiparban használatos típusok kerülnek ismertetésre.

2. táblázat

Különböző retardációk esetén észlelhető színek

Rend	Retardáció (nm)	Szín	Rend	Retardáció (nm)	Szín
I	0	fekete	II	845	zöldessárga
	40	vasszürke		865	sárgászöld
	100	levendulaszürke		910	tiszta sárga
	1608	szürkés-kék		950	narancs
	220	szürke		1000	élénk narancsvörös
	235	zöldesfehér		1100	sötét ibolyavörös
	260	csaknem tiszta fehér	III	1130	világos ibolyakék
	270	sárgásfehér		1150	indigókék
	275	halvány szalmasárga		1260	zöldeskék
	280	szalmasárga		1335	tengerzöld
	305	világossárga		1375	ragyogózöld
	330	élénksárga		1425	zöldessárga
	430	barnássárga		1495	húsvörös
	505	vöröses narancs		1535	kárminvörös
	535	vörös		1620	fáradt bíbor
550	mélyvörös	1650		szürkésibolya	
II	565	bíbor	IV	1680	szürkés-kék
	575	ibolyakék		1710	fáradt tengerzöld
	590	indigókék		1745	kékeszöld
	665	égszínkék		1810	világoszöld
	730	zöldeskék		1930	enyhe zöldeskék
	750	zöld		2010	szürkésfehér
	825	világoszöld		2050	húsvörös

A kompenzátorok legegyszerűbb formája egy műanyag ék. Az ék egy epoxigyantából készült egyenletes húzófeszültségű próbatest, vastagsága a hossz mentén változik. Csúcsánál a retardáció nulla, attól távolodva több rendűségig növekszik. Ezért ha az éket fehér, körpoláros fényel világítjuk meg a polariméterben, színes, párhuzamos sávokból álló sorozatok láthatók. A nullarendű sáv, amely mindig fekete, az ék csúcsánál helyezkedik el, míg az elsőrendű sáv a sötét-kék/sötétvörös sávhatáron található. A másodrendű sáv a sötétzöld/rózsaszín fázishatárnak felel meg. Ahogy a sáv rendje növekszik, a színek intenzitása egyre csökken, a fázishatár egyre nehezebben határozható meg. Monokromatikus fény alkalmazása mellett fekete sávok sorozata látható, ekkor a magasabb rendű sávok is könnyebben kivehetők.

A húzófeszültségű ékkompensátort leginkább a szabad élek retardációjának mérésére alkalmazzák. Mivel az élre merőleges fő feszültség törvényszerűen zérus, az ék alkalmas annak meghatározására, hogy az üveg élével párhuzamos, nem zérus feszültségek nyomó- vagy húzófeszültségek-e. Ez a mérés a következőképpen végezhető el:

1. az üvegmintát fehér fényű körpolariméterbe helyezik;
2. az éket az élre merőlegesen az üvegmintára teszik, majd fő tengelye mentén felváltva ki- és betolják;
3. ha az üvegminta élén fekete sáv jelenik meg, akkor az él húzófeszültséges.

Az üvegen és az éken áthaladó fényt mindkét elembe lévő feszültség befolyásolja.

Ha az élen kialakult feszültséget σ_w -vel, az éllel párhuzamos feszültséget σ_1 -gyel, az élre merőleges feszültséget σ_2 -vel jelöljük, az élre merőleges teljes feszültség: $(\sigma_2 + \sigma_w) = \sigma_w$, mivel $\sigma_2 = 0$. Ezért a (3) feszültségoptikai egyenletet alkalmazva kapjuk:

$$(\sigma_1 - \sigma_w) = \frac{N \cdot \lambda}{C \cdot s} \quad (6)$$

Mivel fekete sáv látható, N értéke nulla, ezért:

$$\sigma_1 = \sigma_w \quad (7)$$

A σ_w húzófeszültség, tehát σ_1 -nek is húzófeszültségnek kell lennie.

Ha a fekete sávok az előbbi módon nem észlelhetők, az éket az éllel párhuzamosan kell elhelyezni és a hossz-tengelye mentén mozgatni. Ha az üvegminta élén fekete sáv látható, akkor ott nyomófeszültség van. Ebben az esetben az éllel párhuzamos teljes feszültség $(\sigma_1 + \sigma_w)$, míg az élre merőleges feszültség $\sigma_2 = 0$. A (3) összefüggést felhasználva:

$$(\sigma_1 + \sigma_w) = \frac{N \cdot \lambda}{C \cdot s} \quad (8)$$

N értéke itt is nulla, ezért:

$$\sigma_1 = -\sigma_w \quad (9)$$

Mivel σ_w húzó-, a negatív előjel azt jelenti, hogy σ_1 nyomófeszültség kell, hogy legyen.

A sávrendet az éleken úgy határozzák meg, hogy az éket az előbb ismertetett módon az üvegre helyezik, és megfigyelik, hol jelenik meg a fekete sáv, amely a legközelebbi, legkisebb egész sávértéknek felel meg. A sáv rendjét úgy adják meg, hogy a legkisebb egész értékhez hozzáadják azt a törtértéket, amelyet a megállapított és a következő, nagyobb egész sáv közötti különbség ad meg.

Poliuretán négyzetkompensátor

Az előzőhöz hasonló elven működik, de fotoelasztikus szempontból sokkal érzékenyebb. Ha a síknégyzetre átlós irányban terhelést adnak, annak hatására abban nyomófeszültség alakul ki. A húzó- és nyomófeszültségnek megfelelő irányok ellentétesek azokkal, mint amelyek a húzófeszültségű ékkompensáció esetén tapasztalhatók.

A kompenzátorok egy továbbfejlesztett változata a Babinet és a Babinet-Soleil kompenzátor, amely két éket tartalmaz.

Teljes-hullámhossz lap

Ez az elrendezés kis értékű retardációknál hatékonyan alkalmazható. A teljes-hullámhossz lap vagy színezett lap egy egész hullámhossznak megfelelő fáziskülönbséget hoz létre a rajta áthaladó fényen. Ha egy teljes-hullámhossz lapot helyezünk a körpolarizátorba úgy, hogy az a polarizátor és az analizátor polarizációs tengelyével 45° -os szöveget zár be, az analizátor felől nézve bíborvörös képet kapunk. Ha a mintatartóba helyezzük a vizsgálandó üvegmintát, az analizátoron keresztül látható mező képe megváltozik.

Megfelelő gyakorlat birtokában a feszültségek húzó vagy nyomó jellege megállapítható a színváltozásból, amelyet a húzófeszültség esetén az eredő retardáció növekedése, a nyomófeszültség esetén annak csökkenése eredményez.

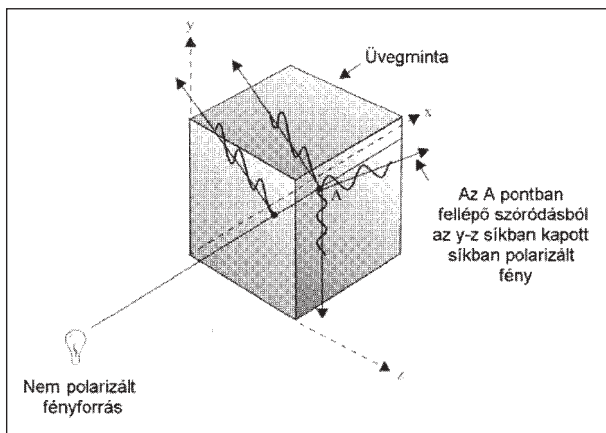
A teljes-hullámhossz lapok helyett gyakran alkalmaznak szabványos feszültségű körlemezeket. Míg az előbbi egy hullámhossznyi retardációt okoz a rajta áthaladó fényen, addig a körlemezek ennek töredékét vagy többszörösét is képesek kialakítani.

Edzett síküvegek fényáteresztéses módszerrel történő vizsgálata

A feszültségi sávok meghatározása és az eredő retardáció mérése az előbb tárgyalt pótelemek alkalmazása nélkül is elvégezhető. Ebbe a csoportba tartozik a Sénarmont kompenzációs módszer [13], amelyben negyedhullámhossz lap(ka)t alkalmaznak.

Sénarmont kompenzáció

A polarimétert először negyed-hullámhossz lap nélkül használjuk. A keresztezett állású polarizátort és analizátort együtt



8. ábra. Szórt fény az üvegmintában [11]

forogtatva fehér fény alkalmazása mellett izoklin sávot állítunk be az üveg minta kérdéses helyén. Így az adott ponton összehangoljuk a polarizátor és az analízátor polarizációs tengelyeit a σ_1, σ_2 fő feszültségi irányokkal. Ezután a két optikai elemet együtt 45° -kal továbbforogtatjuk. Ezáltal az izoklin sávok a legtávolabb kerülnek a mérési ponttól. A polarizátort és analízátort szétkapcsoljuk. Behelyezzük a negyed-hullámhossz lapot (ka), és az analízátort addig forogtatjuk, míg a kérdéses pontban teljes sötétedés nem lép fel. Ebben az állásban meghatározható a kérdéses pont rendűsége. A mérés ezen pontjáig fehér fényt használhatunk, a következő lépésekhez azonban monokromatikus fényforrásra van szükség. Az analízátort elforgatva a közeli sávok valamelyikét a mérési pontra mozdítjuk, majd az analízator elfordítási szögét feljegyezzük. A forgatás iránya általában az óramutató járásával egyező irányú, a forgatást azonban mindig abban az irányban kell végezni, amerre a minta környezete sötétedni kezd. Az analízator elfordítási szögéből a kérdéses pontban uralkodó feszültség kiszámítható, ha ismert az üveg feszültségoptikai együtthatója és vastagsága.

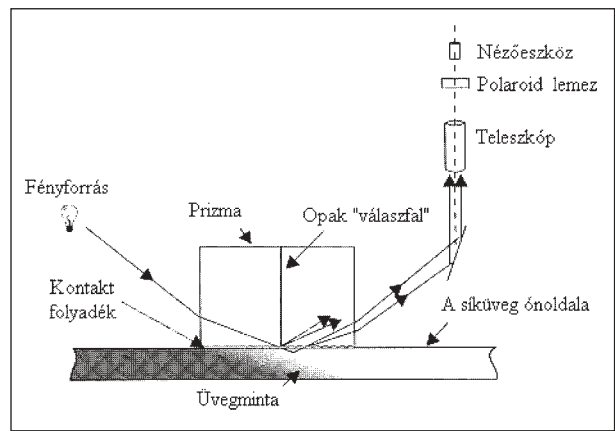
Edzett síküvegek fényvisszaveréses módszerrel történő vizsgálata

Szórtfény-módszer

Ha nem történik teljes fényáteresztés, a fénysugár saját hosszsa mentén szóródhat. Ez a szórt fény másodlagos rezgésnek tekinthető, amelyet a fő hullám hoz létre. A szórt fény iránya a fő terjedési irányra merőleges, sugárirányú. Bármely, a fő-irányra merőleges sugár irányából nézve a szórt fény síkban polarizáltnak látszik. Feltételezhetjük, hogy az ilyen szórt fénykomponensek száma végtelen (8. ábra).

A szórtfény-hatás kétféleképpen használható:

- természetes fényt alkalmaznak, polarizátorként a szóró közeg működik. A szórt fény megfigyelését egy külső analízator segítségével végzik;
- a fényforrás polarizált fény. A szórt fény szolgál analízatorként. A kapott sávokat telemikroszkóppal vizsgálják, vagy fénysokszorozóval érzékelik.



9. ábra. Felületi refraktométer [11]

Az utóbbi módszerrel könnyebb az információgyűjtés, ezért leggyakrabban ezt használják. A következőkben ezt a módszert ismertetjük. A síkban polarizált fénysugár a feszültséges mintába lépve két síkba hasad, a bemenetnél található fő feszültségeknek (σ_1, σ_2) megfelelően. Ahogy a fény áthalad az üvegen, a két komponens fázisa változik. Az eredő sugárirány mentén észlelhető szórt fény intenzitása ennek megfelelően alakul. Az intenzitás változása adja az interferenciasávokat. A sávok értékelése a következő összefüggés segítségével történik [14, 15]:

$$(\sigma_1 - \sigma_2) = \frac{\Delta N}{\Delta S} \frac{\lambda}{C} \quad (10)$$

ahol σ_1 és σ_2 a fő feszültségek a haladó fény irányára merőleges síkban, $\Delta N/\Delta S$ a [sáv száma, rendűsége versus éltől mért távolság] grafikon meredeksége a kérdéses pontban, λ az alkalmazott fény hullámhossza, C a feszültségoptikai együttható.

Síküveg esetén a felületre merőleges irányban a feszültség zérus ($\sigma_2 = 0$). Ebben az esetben a fenti egyenlet a következőképpen módosul:

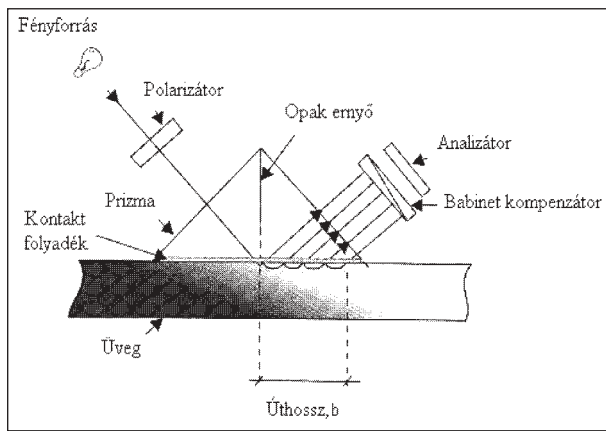
$$\sigma_1 = \frac{\Delta N}{\Delta S} \frac{\lambda}{C} \quad (11)$$

Edzett síküvegek feszültségmérése a felületi rétegekben

A termikus vagy kémiai edző eljárások hatékonyságának értékeléséhez gyakran mérik a feszültséget a felületen. Az erre alkalmas két berendezés a felületi refraktométer és a felületi polariméter.

Felületi refraktométer

A felületen mért feszültség egyenesen arányos a felület ket-tős törésével, ha a polarizált fénysugár felületre merőleges és azzal párhuzamos hullámokat tartalmaz. Ez az össze-



10. ábra. Felületi polariméter [11]

függés a feszültségoptikai egyenlet egy változatával szemléltethető:

$$\sigma = C(n_1 - n_2) \quad (12)$$

ahol σ a feszültség a beeső fény síkjára merőleges felületben, C az üveg feszültségoptikai együtthatója, n_1 és n_2 a beeső fény síkjára merőlegesen, illetve a síkkal párhuzamosan rezgő fény törésmutatója.

A pontos eredmények eléréséhez (öt tizedesjegy pontosság) differenciális felületi refraktométert (DSR) használnak. A DSR működésének elve, hogy a fényt egy, a mérendő üvegmintán fekvő prizma bocsátjuk át, így teljes reflexió történik az üveg felületében. A prizma törésmutatója nagyobb, mint a mérendő üvegé, ezért immerziós folyadékkal biztosítják az optikai érintkezést (9. ábra).

A prizma belépő és kilépő részét egy nem fényáteresztő réteg választja el egymástól. Ez megakadályozza, hogy a visszatükröződő fény bejuthasson a teleszkópba. Oda csak az a fény léphet be, amely n_1 és n_2 törésmutatóknak megfelelő kritikus szögek alatt esik az üveg felületére, a prizma kilépő felületéhez közel halad az üvegben, aztán a kritikus szöggel tér vissza a prizmába. Kilépéskor két fénysugár keletkezik. Ezeket a fénysugarakat a teleszkópban két fényes vonallá fókuszálják. Az egyik abból a polarizált fényből keletkezik, amely a minta felületével párhuzamos, a másik pedig abból, amelyik merőleges a minta felületére. A két vonal térköze egyenesen arányos a készülék tengelyére merőleges üvegfelület síkjában lévő felületi feszültséggel.

Mikrométer pontosságú mérőkészülékkel a térköz, d mérhető. A feszültség olyan felületen, amelynek iránya merőleges a prizma fő tengelyére:

$$\sigma = k \cdot d \quad (13)$$

ahol k konstans, értéke az üvegösszetételtől és berendezéstől függően eltérő [16, 17].

Felületi polariméter

Az analízis módszere olyan fény vizsgálatán alapul, amely kritikus szöggel esik az üveg felületére. Az eljárás a hullámvezető hatást használja ki, amelyet egy nagy óntartalmú síküveg alkalmazásával biztosítanak. A törésmutató eltérések ebben a rétegben akkorák, hogy a beeső sugár ívelt törést szenved. A keletkező sugarak felfelé, a prizma irányába haladnak, majd a kvarcéken vagy Babinet kompenzátoron áthaladva az analizátorba érnek (10. ábra).

A Babinet sávok feszültséges üveg esetén elfordulnak a feszültségmentes sávokhoz képest. Az elfordulás szögének tangense arányos azzal a felszíni feszültséggel, amely a prizma fő tengelyére merőleges. Felületi nyomófeszültségek esetén a sávok ellenkező irányba fordulnak, mint felületi húzófeszültségeknél. Így ezzel a módszerrel az üveg felületi rétegében található feszültség minősíthető.

A felületi refraktometria és a felületi polarimetria közötti legfontosabb különbség, hogy az utóbbi esetben a mérés eredménye a következő módon függ a b úthossztól:

$$\sigma = \delta / Cb \quad (14)$$

A polariméteres mérés könnyebben elvégezhető, mérési érzékenysége 5-10-szer nagyobb, mint a refraktométeresé. Ugyanakkor csak a síküvegek önoldali mérésére alkalmas, kémiai úton edzett üvegek vizsgálatára nem megfelelő [18].

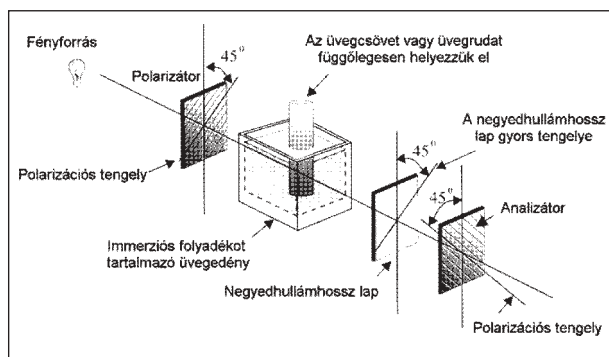
Laminált üvegek területi feszültségének mérése

A laminált üvegeket úgy állítják elő, hogy a két síküveg közé egy műanyag réteget helyeznek. Ez a réteg általában polivinil-butirál (PVB), amely ellenőrzött körülmények között nagy hő és nyomás esetén is alkalmazható. A laminált üvegekben lévő maradó területi feszültség mérése kompenzációval és goniometrikus kompenzációval végezhető. Ugyan a köztes réteg kettős törő, nem befolyásolja jelentős mértékben a bruttó retardáció értékét.

Figyelembe kell venni azt is, hogy a területi és vastagságbeli feszültségek mellett hajlítófeszültségek is felléphetnek, ha az üvegpárok íve egy kicsit is eltérő. Ilyen feszültségek fényáteresztésen alapuló módszerekkel nem mérhetők, mivel a megfigyelés irányában értékük nullához tart. Ezért a felületi polarimétert egy olyan segédeszközzel kell kiegészíteni, amely kimondottan kis mértékű maradó feszültségek vizsgálatára alkalmas.

Öblösüvegek feszültségének vizsgálata

Az edények többféle élt tartalmaznak mint a síküvegek, emiatt a maradó feszültség mérését jóval részletesebben kell elvégezni. Ennek ellenére egyszerű minőségi ellenőrzés is elvégezhető anélkül, hogy megkísérelnénk megállapítani a maradó feszültség abszolút értékét. Az üvegmintát polarizkóppal vizsgáljuk, teljes-hullámhosszú



11. ábra. Öblösüveg fotoelasztikus vizsgálata immerziós folyadék segítségével [11]

lemez vagy szabványos feszültségű körlemezek alkalmazásával.

Ha mégis részletes analízis a cél, az alábbi technikák egyikét kell elvégezni [19].

Immerziós folyadékok alkalmazása

Ha a fotoelasztikai analízis során a fény beesési szöge akkora, hogy refrakció következik be, az üveget olyan folyadékba kell meríteni, melynek törésmutatója a kérdéses üvegéhez nagyon közeli. Az eltérés legfeljebb 0,002 lehet. Meglehetősen nehéz azonban olyan folyadékot találni, melynek törésmutatója megfelelően közel van a kérdéses üvegéhez. Ezért két-, esetleg háromfajta folyadék összekeverésével állítják be a megfelelő törésmutató értéket. Közülük általában az egyik nagyobb, a másik (kettő) kisebb törésmutatóval rendelkezik, mint a vizsgált üveg. Ez a folyadék vagy folyadékelegy az ún. *immerziós folyadék*, amelyet olyan kádban tartanak, melynek oldalai fényáteresztők és feszültségmentesek (11. ábra). Ezek nagyon fontos feltételek, amelyek ha nem teljesülnek, akkor a kád anyaga is hozzájárul a fotoelasztikus sávok kialakulásához [20].

Gyűrűs metszet

Ahhoz, hogy megállapítsák az üveg feszültségének vastagság menti eloszlását, az üvegedényből gyűrűmetszetet készítenek. Az ilyen metszetek vizsgálatával megbecsülhető az üveg homogenitása, amely az üveghibák mennyiségéről is tájékoztat. Az analízishez körülbelül 10 mm magasságú gyűrűt kell készíteni, amelyet az edény oldalfalának felső harmadából vágunk. A metszetet egy megfelelő törésmutatójú fluidba merítik, és polarizálóval olyan irányban vizsgálják, amely párhuzamos az edény longitudinális tengelyével. A teljes-hullámhossz lemezt úgy állítják, hogy az 45°-os szöveget zárjon be a polarizátor és az analizátor tengelyével.

A vizsgálat a következőkre ad választ [19]:

a) az üveghibák mennyisége (finom szálszálrepedés, szélesebb repedések),

b) a szín intenzitása az üveghibákban,

c) az üveghiba nyomó- vagy húzófeszültséges,

d) a hiba helyzete a metszetben (belső vagy külső felületen van-e).

Üvegbotok és üvegsövek vizsgálata

A kialakuló maradó feszültség létrejöttét a termikus zsugorodás, a kis hőmérsékleten jelentkező elasztikuság, a nagy hőmérsékleten jelentkező viskoelasztikuság és a hűtés által létrehozott hőmérséklet-gradiens együttesen okozzák. Ezek a feszültségek (hossz mentén és keresztmetszetben) a külső felületen nyomófeszültségek, a belső felületen/a bot közepén pedig húzófeszültségek. A nyomófeszültségek az üveg szilárdsága szempontjából kívánatosak, ha akadályozzák a mikrorepedések növekedését. Egy adott érték felett azonban a nyomófeszültség káros hatású. Ezért jelentős a maradó feszültségek mérése és szabályozása.

A mérés egyik módszere a roncsolásos vizsgálat. Ekkor gyűrűt/körlemezt vágunk a mintából. Ez az eljárás azonban nem kivitelezhető, ha az üveg nagymértékben feszültséges. A mérést Sutton, Ritland és Read másképp valósították meg. A csövet, botot tangenciális irányból nézték olyan immerziós folyadékba merítve, melynek törésmutatója a vizsgált mintáéval egyezett. A mérésnél a polarizátor és az analizátor a függőleges irányhoz képest $\pm 45^\circ$ -os szögben áll. Az üvegső/üvegbot hosszmenti tengelye a függőleges tengellyel párhuzamos. A retardáció mérését elektromikroszkóp segítségével tangenciálisan végzik a külső felülettől befelé haladva, egyre növekedő távolságoknál. Kompenzációhoz a Sénarmont-technikát alkalmazzák. A retardációk mérése után a főfeszültségek értékelhetők [11].

Összefoglalás

Az üvegtermékek feszültségi állapotának minőségi és mennyiségi feszültségoptikai vizsgálatára alkalmas módszerek és eljárások ismertetése segítséget nyújt a sík- vagy öblösüveg termékekben lévő nem kívánt vagy szándékosan előidézett feszültségállapotok meghatározására. Az üveg összetételétől, gyártási feltételeitől és a továbbfeldolgozás jellemzőitől függő üvegfizikai tulajdonságok, mint a viszkozitás, hőtágulás, rugalmasság és hővezetés, együttesen határozzák meg az adott üveg feszültségállapotát.

Irodalom

- [1] West, A. R.: Solids State Chemistry and its Applications. John Wiley and Sons, Chichester, 1985.
- [2] Scholze, H.: Glas. Springer-Verlag, Berlin, 1988.
- [3] Knapp O. – Korányi Gy.: Üvegipari kézikönyv. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1964.
- [4] Klindt, L. B. – Klein, W.: Az üveg mint építőanyag. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1981.
- [5] Zarzycki, J.: Glasses and Amorphous Materials. In Materials

- Science and Technology, Volume 9, VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weimheim, 1991.
- [6] MSZ ISO 7991:1992 Lineáris hőtágulási együttható meghatározása
- [7] MSZ ISO 7884-8:1991 Transzformációs hőmérséklet meghatározása
- [8] *Gardon, R.*: in Glass: Science and Technology, Volume 5, Elasticity and Strength in Glasses. Uhlmann, D. R., Kreidl, N. J. (Eds.), Acad. Press, New York, 1980.
- [9] *Gora, P. – Kiefer, W. – Sack, W. – Seidel, H.*: Glastechn. Ber., 50, (1977), pp. 319-327.
- [10] *Dannheim, H. – Oel, H. J.*, in: Festigkeit keramischer Werkstoffe, DFG (Ed.), Deutscher Verband für Materialprüfung, e.V., Berlin, 1983.
- [11] *McKenzie, H. W. – Hand, R. J.*: Basic Optical Stress Measurement in Glass. Society of Glass Technology, Sheffield, 1999.
- [12] *Frocht, M. M.*: Photoelasticity. John Wiley and Sons, Volume 1-2, Chichester, 1948.
- [13] *Kuske, A – Robertson, G.*: Photoelastic Stress Analysis. John Wiley and Sons, Chichester, 1977.
- [14] *Holister, G. S.*: Experimental Stress Analysis. Cambridge University Press, Cambridge, 1967.
- [15] *Dally, J. W. – Riley, W. F.*: Experimental Stress Analysis. McGraw-Hill Book Co., London, 1965.
- [16] Anon: Stress Measuring Device (SMD) Technical Manual. Gaertner Scientific, 1985.
- [17] *Ansevin, R. W.*: The Non-Destructive Measurement of Surface Stresses in Glass. ISA Transactions, 1965.
- [18] *Redner, A. S.*: A Comparison of Stress Measurement Techniques. Glass, New York, 1993.
- [19] *Paul, A.*: Chemistry of Glasses. Chapman & Hall, London-New York, 1990.
- [20] *Smolik, O. – Bellow, D. G.*: On the Mixing of Photoelastic Immersion Fluids. Exp. Mech., 1974.

* * *

RENDEZVÉNYEK

Nemzetközi Betonkongresszus

A Dundee-i Egyetem (Nagy-Britannia) arról nevezetes, hogy háromévenként nemzetközi betontechnológiai és tervezési kongresszust rendez. A legközelebbi ilyen tudományos esemény **2005. július 5–7-én** lesz „Globális építkezés: végső lehetőségek a betonban” címmel (Global construction: Ultimate concrete opportunities).

A szervezőbizottság szerint a 2005-ös kongresszus különönböző fog az elődjeitől, amennyiben interaktív lesz. 10 fontos témát választottak ki, melyek a kongresszus címében jelzett célkitűzést valósítják meg:

- Cementfajták az időálló beton készítéséhez
- Szállítható, infrastruktúra készítésére alkalmas beton
- Tervezési és minőség-ellenőrzési szabványok
- Időállóság és betontervezés
- Betonszerkezetek javítása és felújítása
- Habbeton alkalmazása
- Adalékszerek
- Nanotechnológia alkalmazása a betonban
- Beton a nukleáris technológiában
- Fiatal kutatók fóruma

Látható, hogy a rendezőbizottság a betontechnológia és tervezés legfontosabb kérdéseit tűzte a kongresszus napirendjére. Remélhető, hogy sok szakember részt vesz ezen a fontos kongresszuson.

A szervezőbizottság kéri az előadókat az alábbi időpontok betartására:

- 2004. február 27. – kb. 300 szavas kivonat beküldése.
- 2004. március 15. – értesítés a kivonat elfogadásáról.
- 2004. július 30. – a nem végleges teljes kézirat beküldése.
- 2004. október 29. – a lektorok által javasolt változtatások közzlése.
- 2005. január 14. – a végleges kézirat beküldése.

Kérek mindenkit, aki ezen a fontos kongresszuson részt

kíván venni vagy előadást kíván tartani, az alábbi címre juttassa el kivonatát: Prof.R. K. Dhir, OBE, Director, Concrete Technology Unit, University of Dundee, Dundee, DD1 4HN, U. K. Dhir professzor e-mail címe: r.k.dhir@dundee.ac.uk; a kongresszusról a www.ctucongress.co.uk web-oldalon lehet olvasni.

Az a megtiszteltetés ért, hogy a kongresszus Tudományos Bizottságának tagjává választottak. Kérem a résztvevőket, szerzőket, hogy részvételi szándékukról, ill. kéziratukról engem is szíveskedjenek tájékoztatni. Postacímem: Veszprémi Egyetem, Szilikát- és Anyagmérnöki Tanszék, 8201 Veszprém, Pf. 158. E-mail címem: tamasf@almos.vein.hu

Dr. Tamás Ferenc

* * *

Szilikátipari Tudományos Egyesület képviselőit meghívták a Magyar Országgyűlés Gazdasági Bizottsága Infrastruktúrafejlesztési és Lakásügyi Albizottsága 2003. november 19-i ülésére.

A *Horváth Csaba* elnök – képviselő – vezette ülésen *Fegyverneki Sándor*, az Országos Lakás- és Építésügyi Hivatal elnöke mutatta be hivatalát, és ismertette jövőbeni feladatit.

Szervezeti felépítés szerint:

- az építésügyet elnökhelyettesként *Kovács Imre*,
- a lakásügyet elnökhelyettesként *Leitner József*,
- az építésgazdaság ügyét *dr. Juhász István* fogja irányítani.

A hivatal sokrétű feladataiban számít a tudományos egyesületek aktív közreműködésére is, amelyben az SZTE főleg az építőanyag-ipar nemzetközi versenyképességének javítása érdekében, valamint az EU-csatlakozással kapcsolatos feladatokban tud segítséget nyújtani.

Rendezvényeinken, szakmai kiállításainkon a magyar és nemzetközi kutatási és fejlesztési eredmények széles körű ismertetésével kívánjuk az építőipar szakmai fejlődését támogatni.

Dr. Rudnyánszky Pál