ANYAGTECHNOLÓGIA

A viszkozitás szerepe az üvegyártásban

Szemán József

jszeman@freemail.hu

Effect of viscosity by the glass production

This report shows the usable processing of tested glass viscosity and temperature. It uses examples for preferences and disadvantages

of graphic and no graphic methods. To determine the value of VFT constants first rearrange the VFT equation. Next adapts the linear regression method. It exhibits to practice the method using tested data and for the validity shows using DGG glass standard data.

Az üvegyártás minden fázisában: az olvasztás, az üvegpépződés, a tisztulás, a homogenizálódás, a kidolgozás, az alakítás, a fémekkel való összeolvasztás során a viszkozitásnak meghatározó befolyása van. A gazdaságos termeléshez, üzemvezetéshez, közben tartható minőségirányításhoz feltétlenül ismerni kell az üveg viszkozitásának hőmérsékletfüggését. A viszkozitás és a hőmérséklet kapcsolatát a több hőmérsékleten meghatározott viszkozitásértékkel, illetve az ebből szerkesztett viszkozitásgörbével jellemezzük.

Az irodalomban többféle mérésértékelési módszer található, melyekhez speciális vizsgálatokat kell elvégezni, vagy egyedi számítógépes programokra van szükség.

Az általam kidolgozott és bemutatandó eljárással viszonylag egyszerűen kezelhető és az üveg teljes viszkozitástartományára jellemző viszkozitási modellt kapunk. A továbbiakban bemutatom a korábbiakban alkalmazott viszkozitásértékeléseket, előnyeiket, hátrányaikat és az új, statisztikai feldolgozáson alapuló módszert.

A viszkozitás hőmérsékletfüggése

Az üveg viszkozitása a gyártás, a feldolgozás során 10^0 – 10^{16} dPas (poise) tartományban van, és a hőmérséklettel exponenciálisan, illetve hiperbolikusan változik.

A különböző folyadékok viszkozitásának hőmérsékletfüggésére Vogel [1] a következő összefüggést dolgozta ki:

$$\log \eta = A + B/(T - T_0)$$

ahol

η a viszkozitás,
A, B, T_0 konstansok és
T a hőmérséklet.

Kocsis Géza kimutatta [2], hogy az A, B üvegről üvegre

viszonylag kicsit változik, de T_0 rendkívül erősen változik a kémiai összetétellel.

Az üveg jellemző viszkozitási pontjai

Aggregációs pont: a 10^1 poise hőmérséklete, az üvegszerkezet kialakulásának határa.

Olvasztási pont: a 10^2 poise hőmérséklete, az üveg olvasztása e hőmérsékleten történik.

Likvidusz pont: a $10^{2.5}$ poise hőmérséklete, az üvegolvadékban a folyadék és a kristályos fázis egyensúlyban van.

Munkapont: a 10^3 poise hőmérséklete, az egyes üvegalkító technológiákra jellemző.

Kidolgozási pont: a 10^4 poise hőmérséklete, az üvegolvadék formálható, alakítható.

Folyási pont: a 10^5 poise hőmérséklete, az üvegolvadék folytni kezd.

Lágyulási (Littleton) pont: a $10^{7.65}$ poise hőmérséklete, az üveg meglágyul, hajlítható.

Felső hűtési pont: a 10^{13} poise hőmérséklete, az üveg szilárd, és a benne levő káros feszültségek 15 perc alatt megszűnnek, a kristályosodás itt befejeződik.

Alsó hűtési pont: a $10^{14.5}$ poise hőmérséklete, a szilárd üvegben a káros feszültségek 15 óra alatt értékük 10%-ára csökkennek le.

Üveghossz (kidolgozhatóság) ΔT : a 10^4 és $10^{7.65}$ poise hőmérsékletei közötti különbség.

Csepp-, alakítási, feeder-, gobhőmérséklet: az adott gépre, technikára jellemző helyen mért viszkozitáshoz tartozó hőmérséklet.

A felsorolt viszkozitási pontok részben szabványokban rögzítettek, részben egyes területek szakmai zsargonjában használatosak.

Viszkozitásmérések feldolgozása

Az üveg viszkozitálásának mérésére számos különböző elven működő módszert és műszert, berendezést használnak az óriási mérendő viszkozitástartomány miatt. A mért értékekből a korábban említett, adott technikához, technológiához szükséges viszkozitás-hőmérsékleteket kell meghatározni.

A mért értékek elemzésére szintén hatalmas számú értékelési módszert alkalmaznak. A módszereket két nagy csoportba lehet foglalni:

- a) adott hőmérséklet-tartomány jellemzése,
- b) teljes viszkozitástartomány leírása.

A lehetséges feldolgozásokat példaszerűen a gyakorlatban alkalmazott módszerekkel mutatom be.

A viszkozitásméréshez és a párhuzamos oxidos üvegösszetétel meghatározáshoz kéthetente vettünk mintát a feeder kifolyásnál a már homogén üvegből. A mintákat aprítottuk, feleztük, és az egyik adagból a viszkozitásméréshez használt platinatégelyben 1050 °C-on 16 órás homogenizáló olvasztást végeztünk. A viszkozitást golyóhúzásos viszkoziméterrel mértük 900, 950, 1000, 1150, és 1300 °C-on. Minden egyedi mérést háromszor ismételtük, és a mért értékek átlagát tekintettük eredménynek. A viszkozimétert DGG standard üveggel kalibráltuk.

A további feldolgozásokat a következő mérési eredményekkel mutatom be (1. táblázat).

Mért viszkozitásiértékek
Tested viscosity

T, °C	η_1 poise	η_2 poise	η_3 poise	η átlag poise
1300	73	85	56	71
1152	169	154	130	151
1002	867	726	738	777
950	1829	1655	1739	1741
901	5166	4641	4582	4796

1 táblázat

Grafikus feldolgozások

Lineáris ábrázolás

Módszer: az egyedi mérési pontok ábrázolása és összekötése flexibilis görbevonalzóval és a 10^2 , illetve 10^3 poise hőmérséklet kivetítése a T hőmérséklettengelyre (1. ábra).

Hátrányok:

- szubjektív görbeszerkesztés,
- hőmérséklet-leolvasás szubjektív,
- 10^1 – 10^4 poise tartományon túlra az extrapolálás megoldhatatlan,
- ΔT meghatározhatatlan.

1 ábra. Lineáris ábrázolás
Linear plotting of temperature and viscosity

Előny: gyorsan, egyszerűen végrehajtható, nem igényelt számítógépes háttérrel, sok számolást ('80-as évek).

Logaritmikus ábrázolás

Módszer: az egyedi viszkozitáspontok logaritmusának ábrázolása és összekötése flexibilis görbevonalzóval, és a 10^2 , 10^3 , 10^4 , illetve $10^{7.64}$ poise hőmérséklet kivetítése a T hőmérséklettengelyre (2. ábra).

2 ábra. Logaritmikus ábrázolás
Logarithmic plotting of temperature and viscosity

Hátrányok:

- szubjektív görbeszerkesztés,
- hőmérséklet-leolvasás szubjektív.

Előny:

- a kevésbé ívelő görbe biztosabban megszerkeszthető, gyorsan, egyszerűen végrehajtható, nem igényel számítógépes háttérrel,

- $10^{7,65}$ poise is ábrázolható, az extrapolálás megoldható, ΔT meghatározható.

Nem grafikus feldolgozások

VFT összefüggés alkalmazása

Módszer: a viszkozitás-hőmérsékletfüggést leíró VFT egyenlet állandóinak meghatározása összetartozó mért értékekkel:

$$\log \eta = A + B/(T - T_0)$$

Az irodalom [3] a következő 3 fix pontot javasolja az együtthatók meghatározásához:

- kidolgozási pont, viszkozitása 10^4 poise,
- lágyulási pont, viszkozitása $10^{7,65}$ poise,
- felső hűtési pont, viszkozitása 10^{13} poise.

A mért értékekkel megoldva az egyenletet, megkapjuk A, B, T_0 értékét.

Méréseink viszont a 10^1 – 10^4 poise tartományban helyezkednek el. Kérdés, hogy melyik 3 értéket célszerű felhasználni az 5 mérésből a konstansok meghatározásához?

A döntéshez a lehetséges hármas csoportosításokkal számítottuk az együtthatókat és a 10^3 , 10^4 , $10^{7,65}$ poise hőmérsékletét (2. táblázat).

2. táblázat

Számolt VFT állandók
Calculated VFT constants

Mérések	A	B	T_0	T_3	T_4	$T_{7,65}$
123	0,941	508,6	741	988		817
124	0,84	611,6	695,3	978		785
125	0,776	680,8	666,6	973		766
134	0,361	1081	574,6	984		723
135	0,381	1058	580,4	984		726
145	0,402	1037	584,9	984		728
234	-0,345	1722,1	469,8	985		685
235	-0,131	1472	514,9	985		704
345	0,516	960,1	597,6	984		732
Átlag	0,416	1015	602,8	983		741
Minimum	-0,345	508,6	469,8	973		685
Maximum	0,941	1722,1	741	988		817
Terjedelem	1,286	1213,5	271,2	15	41	132
Terj. hiba %	309,1	119,6	45	1,5	4,7	17,8

A VFT konstansait és a számított viszkozitás-hőmérsékleteket erősen determinálja a mérés hőmérséklet-tartománya, így megbízhatatlan (3. ábra).

A számolt konstansok periodikus ingadozást mutatnak, és különböző nagyságrendjeik ellenére jól megfigyelhető A és B ellentétes irányú mozgása. A számolt T_3 , T_4 , $T_{7,65}$

3. ábra. VFT állandók mérésfüggése
VFT constants correlate with temperature range

hőmérséklet tartományai elfogadhatatlanul szélesek. Összefoglalva: a három pont kijelölése önkényes, és ezzel az együtthatók is más-más, elfogadhatatlanul különböző értéket eredményeznek.

Lineáris regresszió használata a VFT konstansok meghatározására

„A regresszióanalízis változó mennyiségek közötti összefüggés ismeretlen állandóinak meghatározására is szolgál ... a legkisebb négyzetek elvének alkalmazásával. ... A lineáris regresszió alkalmazásának feltétele, hogy az elméleti összefüggést lineáris alakban kell felírni.” [4]

A VFT függvény linearizálása

Az erősen nemlineáris, hiperbola és exponenciális tulajdonságokkal is rendelkező összefüggés segédváltozók bevezetésével lineárisra alakítható:

$$\eta_i = \exp(A + B/(T_i - T_0)) \quad (1)$$

$$v_i = \log \eta_i = A + B/(T_i - T_0) \quad (2)$$

$$\text{átrendezve: } v_i - A = B/(T_i - T_0) \quad (3)$$

$$v_i T_i - v_i T_0 - A T_i + A T_0 = B \quad (4)$$

$$v_i T_i = A T_i + v_i T_0 - A T_0 + B \quad (5)$$

új változók bevezetésével legyen:

$$Z_i = v_i T_i \quad (6)$$

és

$$-A T_0 + B = D \quad (7)$$

a segédváltozókkal az új alakú függvény:

$$Z_i = \alpha T_i + \beta Z_i - D \quad (8)$$

Ez már lineáris kétismeretlenes összefüggés a T_i és v_i független és $Z_i = v_i T_i$ függő változóval, amiből A, B, T_0 meghatározható lineáris regresszióval. A mért értékekből a v_i és Z_i segédváltozók értékeit számítva az Excel lineáris regresszió programcsomagját használva a következő értékeket kapjuk.

Eredmények

A korábban ismertetett átalakításokba visszahelyettesítve a VFT egyenlet konstansai:

$$\alpha = 0,57005 = A$$

$$\beta = 628,1 = T_0$$

$$D = 497,95 = -AT_0 + B \Rightarrow B = D + AT_0 = 856,0$$

ahol:

$$A = 0,57005$$

$$B = 856,0$$

$$T_0 = 628,1$$

$$r^2 = 0,9993$$

A kapott eredmény megbízhatóságát a magas, 1 közeli r^2 is alátámasztja. Azaz a mérést leíró összefüggés:

$$\eta_i = 10^{[0,57005+856,0/(T_i-628,1)]}$$

A módszer validálása

A kidolgozott módszer validálását a viszkoziméter kalibrálásához használt DGG standard üvegünk közötti összetartozó hőmérséklet viszkozitásértékeivel végeztem el, a saját méréseknek megfelelő hőmérsékleti adatokkal (3. táblázat).

3. táblázat

60-937-1 jelű DGG üveg viszkozitásai
Viscosity of 60-937 DGG glass standard

Hőmérséklet °C	Közölt viszkozitás poise	Számolt viszkozitás poise	Hiba poise
1300	341	342	1
1150	16 67	1663	-4
1000	14 940	14 966	26
950	38 041	38 115	74
900	111 768	111 530	-238

A közölt adatokat az előzőekben leírt módszerrel feldolgozva a következő eredményeket kaptam a VFT egyenlet együtthatóira:

$$A = -1,69764$$

$$B = 4541,17$$

$$T_0 = 226,7$$

$$r^2 = 0,999998$$

A számolt és a közölt értékeket figyelembe véve a kidolgozott új módszer hibája + 0,13% és - 0,21% tartományban van, a gyakorlati felhasználás követelményeit messze kielégíti.

Az alkalmazott módszer előnye

Egyértelmű megoldást ad, nem iterációfüggő, minden mérési pontot figyelembe vesz, a megszerkesztett számológéptábla bármikor használható, mindig azonos viszkozitás-, illetve hőmérsékletértéket eredményez, egyszerűen kezelhető a mindennapi gyakorlatban. A lineáris regressziós módszerrel a nehezebben kezelhető boroszilikátüvegek viszkozitása is könnyedén feldolgozható, irányítható.

Irodalom

- [1] Vogel, H.: Physikalische Zeitschrift. 22 (1921) 645.
- [2] Kocsis Géza: Építőanyag. 1 (1980) 32.
- [3] Tamás Ferenc: Szilikátipari laboratóriumi vizsgálatok. MK (1970) 489-490.
- [4] Vincze István: Matematikai statisztika ipari alkalmazásokkal. MK (1968) 213-222.

MEGHÍVÓ

**A SZILIKÁTIPARI TUDOMÁNYOS
EGYESÜLET**
tisztelettel meghívja Önt
2006. május 17-én (szerdán) 10 órakor
tartandó
XXIX. KÜLDÖTTGYŰLÉSÉRE

Helye: MTESZ Budai Konferencia Központ
(Budapest II., Fő u. 68. VII. emelet 700-as terem)

PROGRAM

Szakmai előadás

Napirend:

Beszámoló az Egyesület múlt évi tevékenységéről.
Közhasznúsági jelentés.

Előadó: DR. SZÉPVÖLGYI JÁNOS elnök

Az Egyesület 2006. évi tervei.

Előadó: ASZTALOS ISTVÁN főtitkár

Az Ellenőrző Bizottság jelentése.

Előadó: DR. DANI SÁNDORNÉ,

az Ellenőrző Bizottság elnöke

Beszámoló és előterjesztés a 2005. évi költségvetés teljesítéséről és a 2006. évi költségvetési előirányzatról.

Előadó: KOSKA JÁNOS főtitkárhelyettes

Hozzászólások

A SZILIKÁTIPARÉRT emlékérmek átadása

ÖRÖKÖS TAGOK avatása

Elnöki zárszó

Határozatképtelenség esetén a küldöttgyűlést ugyanezen a helyen és napon a megjelölt napirendi pontokkal 11.00 órára összehívjuk.