Üvegszálás hőszigetelő anyagok, tendenciák, kapcsolatok, összefüggések

Szemán József

jszeman@freemail.hu

Glass fiber insulation, trends, relationships, connections

This report shows the connection of heat conductivity with the typical heat flows and the product parameters of the fiberglass heat

insulation products. It is examined how to increase the quantity of lambda value: cutting density and making thinner fiber diameter. Author researches connections among the fiber diameter and glass oxides and analyses this effects.

A hővezetés alaptörvénye

Fourier (1822) törvénye szerint egy homogén testben a hőáram a csökkenő hőmérsékletek irányába mutat, arányos a terjedési irányú, hosszegységenkénti hőmérséklet-változással és az erre az irányra merőleges keresztmetszettel:

$$Q = -\lambda \cdot F \cdot dt/dx$$

Q a hőáram, az F felületen időegységenként átáramlott energia, W;

λ a hővezetési tényező, az adott test anyagjellemzője, W/(m · K);

F a hővezető keresztmetszet, m²;

dt/dx a hőmérséklet-eloszlás hely szerinti differenciálhányadosa, azaz a hosszegységenkénti hőmérséklet-változás, K/m.

A Fourier-törvényben a hővezetési tényező az anyag fizikai jellemzője, és azt fejezi ki, hogy mekkora a hőáram-sűrűség 1 K/m hosszegységenkénti hőmérséklet-változás esetén, azaz a hővezetési tényező számértéke az adott anyag szerkezetétől és termodinamikai állapotától függ.

1. táblázat

Az építőiparban gyakran használt néhány anyag jellemzője
Some parameters of often used building material

Anyag	Sűrűség, kg/m ³	λ , W/(m·K)
Acél	7850	58,1
Bazalt	2800	3,5
Vasbeton	2400	1,55
Cementvakolat	1800	0,93
Kisméretű tömör égetett agyagtégla	1700	0,78
Soklyukú égetett agyagtégla	1280	0,5
Faforgácslap	650	0,16
Gázszilikát	550	0,22
Kőzetgyapottermék	150	0,044
Üveggyapot	20	0,032

A hőszigetelő anyagok természetes vagy gyakrabban mesterséges anyagokból gyártott, nagy pórustérfogatú, kis testsűrűségű, üreges vagy szálak szerkezetű termékek, amelyeket szilárd váz és levegővel vagy más gázokkal telített pórusok és kapillárisok rendszere alkot. Hőszigetelő anyagoknak azokat az anyagokat tekintjük, amelyek hővezetési tényezője kisebb 0,15 W/(m · K) értéknél.

Az 1. táblázat az építőiparban gyakran használt néhány anyag jellemzőjét mutatja.

Fontosabb hőszigetelő anyagok

Természetes alapanyagú hőszigetelő anyagok

Szilikátszálás hőszigetelő anyagok

Kőzetgyapot. Főként vulkanikus és üledékes kőzetek (pl. bazalt, diabáz, mészkő) keverékének olvadákból előállított, üveges szerkezetű szálakból, hőre keményedő kötőgyantával előállított termék. Testsűrűsége 40–220 kg/m³ közötti, hővezetési tényezője 0,032–0,042 W/(m · K).

Üveggyapot. Jó minőségű, finomra őrölt üvegnyersanyagok (pl. homok, földpát, szóda, nátrium-szulfát, egyéb adalékok) homogén keverékének olvasztásával és szálazásával előállított, üveges szerkezetű szálakból hőre keményedő műgyantakötéssel gyártott termék. Testsűrűsége 10–110 kg/m³ közötti, hővezetési tényezője 0,031–0,04 W/(m · K) értékek között van általában.

Szemcsés hőszigetelő anyagok (duzzasztott perlit)

A perlit kötött vizet tartalmazó, túlnyomórészt üveges fázisú, savanyú vulkáni kőzet, amely meghatározott hőmérsékleten, gyors hevítés hatására eredeti térfogatának többszörösére duzzad. A duzzadás következtében légzárványokat tartalmazó szemcsék keletkeznek. Halmazsűrűsége 100–200 kg/m³, hővezetési tényezője 0,045–0,065 W/(m · K).

Hőszigetelő habarcsok, vakolatok

A hőszigetelő habarcsok duzzasztott perlitből különböző kötőanyagok (cement, mészhidrát, gipsz stb.), valamint habosító és egyéb adalékszerkezt hozzáadásával előállított száraz keverékek. A felhasználás során víz adagolásával és keveréssel kell homogenizálni. Testsűrűségük kb. 450–550 kg/m³, hővezetési tényezőjük 0,1–0,18 W/(m · K).

Növényi alapanyagokból készített hőszigetelő anyagok

Különböző növényi rostokból, őrleményekből, forgácsokból kötőanyagokkal vagy anélkül, hőkezeléssel és préseléssel előállított termékek.

Mesterséges alapanyagú hőszigetelő anyagok

Polisztirolhabok

Az expandált polisztirolhabok (EPS) alapanyaga a kőolajból előállított, hajtógázt és speciális adalékokat tartalmazó „sztirolgyöngy”. A gyöngyöket szakaszos gőzöléssel duzzasztva sablonban tömbökké formázzák, és a kívánt méretre vágják. Az EPS-habok testsűrűsége 10–35 kg/m³, hővezetési tényezőjük 0,035–0,045 W/(m · K). Az extrudált polisztirolhabokat (XPS) speciális granulátumból készítik. A gyártás széles résű extruderben történik, a habosító adalék hatására az adott méretnek megfelelően habosodnak. Testsűrűségük 25–45 kg/m³, hővezetési tényezőjük 0,028–0,032 W/(m · K).

Polietilén hőszigetelő anyagok (PE-habok)

Kémiai úton habosítással előállított, zárt sejtszerkezetű lágyhab-termékek. Testsűrűségük 25–180 kg/m³, hővezetési tényezőjük 0,037–0,065 W/(m · K).

Szilikátbázisú szálal szigetelőanyagok

A dolgozatban a szilikátbázisú, szálal szigetelőanyagoknál fellelhető tendenciákkal, kapcsolatokkal, összefüggésekkel foglalkozom.

A hő- és hangszigetelésre használt szálal szigetelőanyagokat a XIX. század végétől állítják elő ipari méretekben. Kezdetben a nagy testsűrűségű, 10–20 µm szálalátmérőjű salakgyapotot (angyalhaj) a különböző ipari berendezések, kemencék, kazánok és más hőhasznosítók energiatakarékos működtetése tette szükségessé. Az 1960-as évek közepéig a salakgyapot és a Hager-eljárással gyártott üveggyapot volt a jellemző. A gyártástechnológia fejlődésével a testsűrűség csökkenése és a 3–10 µm szálalátmérőjű termékgyártás vált jellemzővé.

A szálal szigetelőanyagok gyártása

Az olvasztásra kerülő, általában üvegipari nyersanyagok: üvegcserep, mészkő, homok, dolomit, nátrium-karbonát,

földpát, bórax, szulfátok, foszfátok stb. keverékét egy adagoló juttat az üvegmosztó kemencébe. Az olvasztókemence gáz-, olaj- vagy villamos fűtésű. A szálképzést szálalozócentrifuga végzi. Az adagolócsatornából kilépő folyékony üveg egy kifolyón keresztül jut a forgó centrifugába. A centrifugális erő hatására a palást felületén lévő több ezer furaton keresztül képződik a néhány mikron átmérőjű üvegcsál. A kész üvegcsálát ventilátorok segítségével az ülepítőkamrában egy speciális szálalra viszik, közben a szálal hőre keményedő gyanta kötőanyaggal permetezik be, majd a polimerizációs kemencébe továbbítják. A gyanta biztosítja a szálal egymáshoz való tapadását. A polimerizációs kemencében a beporlasztott kötőanyaggal ellátott szálalalmazt a terméktípus szerinti testsűrűségnek megfelelő vastagságúra nyomják össze, és hőkezeléssel a kötőanyagot kikeményítik, majd méretre vágják és csomagolják.

A szálal szigetelőanyagok fontosabb termékjellemzői

Hővezetési tényező (λ), W/(m · K). Az anyag hővezető képességét jellemzi 10 °C-on (minél kisebb az érték, annál jobb). Az érték nedvességfelvétel hatására romlik (bővebben: *Wojnárovitsné*: Bazalt és üveggyapot víz és hő hatására lejátszódó korróziójának jellemzői. Bp., Szilikátipari Központi Kutató és Tervező Intézet, 1988).

Testsűrűség (r), kg/m³. Az anyagok egy m³-nyi mennyiségének súlya.

Nedvességfelvétel (w_n), m%. Az anyagok pórusaiba meghatározott körülmények között felvett nedvességmutató száma a térfogat %-ában (minél kisebb az érték, annál jobb).

Hőállóság, °C. Azon hőmérsékleti határ, ameddig az anyag eredeti tulajdonságait megtartja (minél nagyobb az érték, annál jobb).

A szálal szigetelőanyagok fontosabb trendjei

Az utóbbi évtizedek tendenciáit figyelembe véve a jó hőszigetelő kategóriába tartozó 0,05 W/(m · K) alatti hővezető képességű, szilikátbázisú, szálal szigetelőanyagok jellemző trendjei (1. ábra):

1980 előtt:	testsűrűség > 60 kg/m ³ , szálalátmérő > 10 µm;
1980-90-es évek:	testsűrűség < 30 kg/m ³ , szálalátmérő < 5 µm;
1990-es évek közepe:	testsűrűség > 25 kg/m ³ , szálalátmérő > 7 µm;
1990-es évek II. felétől:	testsűrűség < 20 kg/m ³ , szálalátmérő < 5 µm.

A tendenciákból egyértelműen kiolvasható a gyártási testsűrűség csökkenése és a szálalátmérő vékonyodása. Ez a gyártástechnológiák fejlődésével, illetve az alapanyag- és energiaárak emelkedéséből következő anyagtakarékosabb technikák térhódításával magyarázható. Szembetűnő azonban a 90-es évek közepét jellemző, a korábbinál vastagabb szálalátmérő alkalmazása. Ehhez az időszakhoz kapcsolódik

1. ábra. Trendek a szálalás hőszigetelő anyagoknál
Trends of the heat insulation material

a szálalás hőszigetelő anyagok gyártása, feldolgozása során a szervezetbe jutó szilikátszálak tumoros hatásának intenzív vizsgálata a német TRGS 905, 1994 alapján.

Erre a veszélyre a gyártók a szálak oxidos összetételének olyan változtatását végezték el, hogy azok a testnedvekben tumor okozása nélkül mielőbb lebomolhassanak, feloldódhassanak. Jellemző volt ekkor a csomagoláson is feltüntetett + KI 40 felirat.

A KI (calcinogen index) értékét az oxidos összetétel alapján (alkotó oxidok tömegszázalékban) a következőképpen kapjuk meg:

$$KI = Na_2O + K_2O + CaO + MgO + BaO + B_2O_3 - 2 \cdot Al_2O_3, m\%$$

Különböző irodalmi források arra utaltak, hogy $KI > 40$ érték esetén nincs statisztikailag bizonyított rákkeltő hatása a szálalnak (Environmental Health Perspectives 105, Supplement 5, September 1997).

A sok, esetenként egymásnak ellentmondó változás tisztázására elemeztem a szálalás szigetelőanyagok hőszigetelő képességét befolyásoló jellemzőket, azok egymásra hatását és a köztük fellelhető kapcsolatokat. A munkámhoz az elmúlt 2 évtized hazai piacán megjelent szigetelőanyaggyártók beszerezhető termékeit használtam fel. Meghatároztuk a termékek hővezető képességét, testsűrűségét, az elemi szálalák átmérőit, a szálalából beolvasztott üveg oxidos összetételét és a viszkozitását.

A szálalás hőszigetelő anyagok hővezetésének modellezése

A szálalás hőszigetelő anyagok különböző testsűrűségű elemi szilikátszálalak olyan halmazai, amelyekben a szálal viszonylag rendezetlenül helyezkednek el, és az állagtartásukat a különböző, de általában műgyantaalapú kötőanyag biztosítja.

Lehetséges hőáramok a szigetelőanyagban

Vezetés:

- vezetés az elemi szálalokban, üvegben (Q_{vs});
- vezetés a szálal közötti légtérben, levegőben (Q_{vl}).

A hő az anyagban részecskéről részecskére terjed, a melegebb részekről a hidegebbek felé.

Áramlás. A hőáramlás (konvekció) során a hő a mozgó térfogatelemek (levegő, gázok, folyadékok) közvetítik. Esetünkben a hőmérséklet-különbség hatására létrejövő „kéményhatás” okozza az áramlásos hőáramot (Q_k).

Sugárzás. Hősugárzás esetén a hő elektromágneses hullámok alakjában terjed, és a melegebb testről a sugarakat el nem nyelő közegeken keresztül jut a hidegebb testre. A szilárd anyagrészeket elválasztó levegő eközben rendszerint nem melegszik fel, tehát nincs közvetítő közeg.

Hősugárzással terjednek a napsugarak és részben a fűtőtestek hője. A felületek hőmérsékletüktől és minőségüktől függően állandóan sugároznak ki és nyelnek el hősugarakat, a fényes, csiszolt felületek hőelnyelő képessége kicsi.

Az összes hőáram tehát:

$$Q_{\sigma} = Q_{vs} + Q_{vl} + Q_k + Q_r$$

alakban írható fel.

Várható kapcsolatok a termékjellemzőkkel:

- az elemi szálalokban létrejövő hővezetés Q_{vs} arányos a szálal tömegével, azaz a testsűrűséggel;
- a szálal közötti térben nyugvó levegő hővezetése Q_{vl} várhatóan konstans $0,024 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ nagyságú;
- a szálal közötti térben elmozdulásra képes levegő hővezetése Q_k arányos a levegő mennyiségével, azaz fordítottan arányos a testsűrűséggel;
- a sugárzás okozta hővezetést Q_r a tükröként viselkedő szálal felület megakadályozza, tehát várhatóan az összes szálal felülettel fordítottan arányos.

A hővezetést leíró függvényt célszerűen a következő alakban kell keresni:

$$\lambda = K + A \cdot \text{sűrűség} + B \cdot 1/\text{sűrűség} + C \cdot 1/\text{össz-szálal felület}$$

Az összes szálal felület meghatározása, ahol:

s = testsűrűség, kg/m^3 ,

d = szálal átmérő, μm ,

h = az 1 m^3 szigetelőanyagban levő szál hossza, m ,

V = az 1 m^3 szigetelőanyagban levő szál térfogata, m^3 ,

F = az 1 m^3 szigetelőanyagban levő szál felülete, m^2 ,

ρ = a szálanyag (üveg) fajsúlya, kg/m^3 .

Így:

$$F = h \cdot d \cdot \pi$$

$$h = V/(d^2 \cdot \pi/4)$$

$$V = s/\rho \text{ és } V = h \cdot d^2 \cdot \pi/4$$

Ezek visszahelyettesítésével:

$$F \Rightarrow s/d, \text{ illetve } 1/F \Rightarrow d/s$$

A levezetett megfontolások alapján kiválasztott változók hatáserősségét korrelációs analízis felhasználásával

is minősítettük. A feldolgozáshoz 646 db összetartozó, 40 kg/m³ alatti testsűrűségű mérést dolgoztunk fel az EXCEL programcsomaggal és a 0,7-nél nagyobb korrelációs együttható négyzetértéket tekintettük szignifikánsnak. A kapott eredményeket a 2. táblázat tartalmazza.

2. táblázat

Hőáramok szignifikanciája
Significant level of heat flow

Hőáram fajtája	Változó	r ²	Megjegyzés
Konvekció	1/sűrűség	0,944	szignifikáns
Vezetés	sűrűség	0,757	szignifikáns
Sugárzás	d/sűrűség	0,761	szignifikáns
Nem magyarázott	?	0,077	nem szignifikáns

A kapcsolatok erőssége alapján megállapítható, hogy a feltételezett változók mind erősen meghatározók, szignifikánsak.

A leíró egyenlet meghatározásához több gyártó termékeinek mért értékeit használtuk fel. Így az összefüggés általános tendenciákat tartalmaz, és nem alkalmas egy konkrét termék elbírálásához, mivel a gyártók más-más olvasztási, szállépcsési és egyéb gyártási technológiákat alkalmaznak.

A leíró összefüggés

λ , mW/(m · K) = 24,0135 + 0,031822 · sűrűség + 5,41626 · 1/sűrűség + 32,44095 · d/sűrűség
a közelítés erőssége, r² = 0,90184, azaz határozottan jó a függvénykapcsolat, a közelítés hibája 1,8 mW/(m · K).

A szálak között nyugvó levegő hővezetése a várt 24 mW/(m · K) értékhez közeli 24,0135 mW/(m · K) lett.

Kiolvasható kapcsolatok:

- a konvenció hőáramot okozó rész, a szálak között elmozdulni képes levegő az alacsony testsűrűség tartományában jelentős;
- a szálakban létrejövő vezetés a magasabb testsűrűségnél lesz meghatározó;
- a sugárzásos hővezetés a kisebb testsűrűségnél és a magasabb szálmérőnél eredményez nagyobb értéket.

A testsűrűség és a szálmérő együttes hatását jól mutatja a leíró függvény további vizsgálata. A görbe általános alakja: meredeken csökken, minimummal rendelkezik, és kevésbé meredeken emelkedik a hővezető képesség a testsűrűség függvényében (2. ábra).

A számított minimumpont helyét a szálmérő erősen befolyásolja, ezt a 3. táblázat és 3. ábra mutatja:

A minimumpontok széles tartománya is azt sugallja, hogy a testsűrűség jelentősen csökkenthető kisebb szálmérő alkalmazásakor, ami összhangban van a korábban bemutatott trend tendenciájával.

Nagyon tanulságos a következő összehasonlítás, ahol azt vizsgáltam, hogy 5, illetve 6 µm szálmérővel

2. ábra. A hővezető képesség és testsűrűség függése 5 µm szálmérőnél
Dependent of heat conductivity by the density at 5 µm fiber diameter

3. táblázat

A hővezetőképesség-minimum és szálmérő függése
Dependent of heat conductivity by the fiber diameter

Szálmérő, µm	Testsűrűség, kg/m³ λ minimumhoz
4	65
5	72
6	78
7	85
8	91
9	95
10	101

3. ábra. A hővezetőképesség-minimum és szálmérő függése
Dependent of heat conductivity by the fiber diameter

meghatározott hővezető képesség elérhető-e úgy, hogy a testsűrűséget 10%-kal csökkentjük, és a szálmérőt a szükséges mértékben alacsonyabb értékre állítjuk be (4. ábra).

4. ábra. Azonos hővezető képességhez szükséges szálmérő-csökkentés 10% testsűrűség-redukciónál
Fiber diameter reduction to get same heat conductivity using 10% density cut

A két görbe párhuzamos lefutású, és az alacsonyabb testsűrűségénél csak nagyobb mértékű szálátmérő-csökkenéssel érhető el a kiindulási hővezető képesség.

A korábban bemutatott tendenciák alapján felmerül a kérdés, hogy a 90-es évek közepén gyártott magasabb szálátmérő és a KI 40 elv alapján változtatott oxidos üvegösszetétel mennyire van kapcsolatban egymással?

A fellelhető tendenciák, összefüggések meghatározása

A nem homogén, több gyártótól származó minták mérési eredményei alapján a különböző üvegalkotó oxidok (m%) függvényében ábrázoltam a szálátmérőt, és a kapott diagramokat elemeztem.

Első közelítésben közel véletlenszerű ábrákat kaptam, és ezekből tendenciát alig lehetett kiolvasni. A trendelemzés egyik elfogadott és gyakran alkalmazott módszere a mozgó átlagok alkalmazása a fő irányzatok meghatározására, az ingadozások lefedésére. Bár a mozgó átlagok módszerét az időbeni trendek kiszűréséhez használják, a vizsgálataim alapján megállapítható, hogy a nem időfüggő adatok elemzésénél is jól kiszűrhető tendenciák állapíthatók meg vele. A munkám során $n = 3...50$ elemű mozgó átlagokat számoltam és ábrázoltam. A feldolgozások közül az $n = 17$ elemű mozgó átlagok mutatták a legjobb kapcsolatot az oxidos összetételek és a szálátmérő között, ezért ezeket ismertetem.

A 4. táblázat a vizsgált szálak oxidos összetételét mutatja tömegszázalékban.

A KI érték és a szálátmérő kapcsolata (5. ábra). A KI érték a SiO_2 kivételével minden alkotó oxidot tartalmaz, így nem feltűnő a pontok jól követhető tendenciája. Alacsony és magas KI értéknél nagyobb szálátmérőértékek találhatók, és $\text{KI} = 31\text{--}33$ tartományban minimuma van a görbének. A pontokat másodfokú polinommal közelítettem, és ez erős tendenciát mutat $r^2 = 0,8231$ értékkel.

Jogosan vetődik fel a következő kérdés: az alkotó oxidok közül melyik, milyen mértékben és milyen irányban befolyásolja a szálátmérőt? Mivel egyedi minták mérésein alapulnak a megfigyelések, ezért csak az adott komponens hatása vizsgálható, a többi alkotó nagyságára nem tudunk következtetni.

A Na_2O és a szálátmérő kapcsolata (6. ábra). A Na_2O a vizsgált tartományban eleinte magas, majd folyamatosan csökkenő, majd állandósuló alacsony szálátmérőt ered-

5. ábra. A KI érték és a szálátmérő kapcsolata
Fiber diameter versus KI value

6. ábra. Na_2O és a szálátmérő kapcsolata
Fiber diameter versus Na_2O value

7. ábra. K_2O és a szálátmérő kapcsolata
 K_2O value fiber diameter

ményez. A vizsgált pontok harmadfokú polinommal jól közelíthetők, $r^2 = 0,9063$ értékkel.

A K_2O és a szálátmérő kapcsolata (7. ábra). A K_2O a vizsgált tartományban folyamatosan emelkedő, majd állandó magas szálátmérőt eredményez. A vizsgált pontok másodfokú polinommal jól közelíthetők, $r^2 = 0,9188$ értékkel.

A CaO és a szálátmérő kapcsolata (8. ábra). A CaO és a szálátmérő között a korábbiakhoz képest kevesebb tendencia fedezhető fel. A 7,0–7,4% CaO tartományban kissé emelkedő, majd a 7,4% CaO fölötti részben már kevés trend olvasható le, csupán a magasabb és inhomogénebb szálmérő állapot állapítható meg.

4. táblázat

Oxidok összetétel Oxide composition									
Oxid	Na_2O	K_2O	CaO	MgO	Al_2O_3	B_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	KI
Átlag	16,96	0,79	7,55	3,31	2,33	8,22	60,72	0,064	32,18
Minimum	11,68	0,02	5,99	1,74	0,77	4,61	52,98	0,024	23,19
Maximum	19,67	7,55	8,66	5,36	4,34	14,32	65,57	0,28	43,28

8. ábra. CaO és a szálátmérő kapcsolata
CaO value fiber diameter

11. ábra. B₂O₃ és a szálátmérő kapcsolata
B₂O₃ value fiber diameter

9. ábra. MgO és a szálátmérő kapcsolata
MgO value fiber diameter

12. ábra. Fe₂O₃ és a szálátmérő kapcsolata
Fe₂O₃ value fiber diameter

10. ábra. Al₂O₃ és a szálátmérő kapcsolata
Al₂O₃ value fiber diameter

13. ábra. SiO₂ és a szálátmérő kapcsolata
SiO₂ value fiber diameter

A MgO és a szálátmérő kapcsolata (9. ábra). A MgO és a szálátmérő között a CaO-hoz hasonlóan kevesebb tendencia fedezhető fel. A 3% alatti MgO tartományban kiugróan széles a szálátmérő szóródása, és 4% felett már jóval egyenletesebb képet mutat.

Az Al₂O₃ és a szálátmérő kapcsolata (10. ábra). Az Al₂O₃ erősen befolyásolja a szálátmérőt. 2% Al₂O₃ tartalomig drasztikusan csökkenti, majd kisebb ingadozásokkal stabilizálódik a hatása.

A B₂O₃ és a szálátmérő kapcsolata (11. ábra). A B₂O₃ 8% alatt csökkenti, majd stabilizálja a szálátmérő vastagságát. Hatása harmadfokú polinommal közelíthető, és a közelítés $r^2 = 0,9298$ értékkel erős kapcsolatot mutat.

A Fe₂O₃ és a szálátmérő kapcsolata (12. ábra). A Fe₂O₃ is az erősen befolyásoló alkotók közé tartozik. 0,06% alatt stabilan alacsony szálátmérőt eredményez. A vastartalom emelkedésével gyors mértékben vastagodik a szál, és kisebb-nagyobb ingadozásokkal magasabb értéken állandósul. Az alacsony szálátmérőhöz 0,05% alatti Fe₂O₃ érték a célra vezető.

A SiO₂ és a szálátmérő kapcsolata (13. ábra). A SiO₂ és a szálátmérő között alig fedezhető fel tendencia. Az

alacsonyabb SiO₂ értékhez kisebb szálátmérő tartozik, majd az emelkedésével a szálátmérő-tartomány egyre szélesebb lesz.

A viszkozitás szerepe

A viszkozitás a folyadék rétegek, esetünkben az üvegolvadék elmozdulásakor fellépő súrlódási erő. Egysége a Pa · s (pascal · másodperc), illetve a poise (1 poise = 0,1 Pa · s). Az üveg viszkozitása a hőmérséklet emelkedésekor csökken, ellenkező esetben növekszik.

Az irodalmi források, az elvégzett mérések és a gyakorlati tapasztalat is azt mutatja, hogy az üvegek oxidos összetételének változtatása erősen befolyásolja az üvegolvadék viszkozitását.

A különböző irodalmi források az üveg oxidos összetétele alapján egymástól eltérő összefüggéseket ajánlanak

A viszkozitást leíró összefüggés állandói
Constants of viscosity equation

B ₂ O ₃	MgO	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	a	b	k
-0,060	0,296	0,001	-0,224	-0,048	-0,431	0,123	-2,490	24567	0,009	-25,551

14. ábra. A szálmérő és 10³ poise kapcsolata
10³ poise value fiber diameter

15. ábra. A szálmérő és a ΔT kapcsolata
ΔT value fiber diameter

a viszkozitás számítására, attól függően, hogy milyen oxidokat és milyen intervallumot dolgoztak fel. Általában a $\eta_i = \Sigma C_i \cdot m_i + k$ alakú összefüggéseket ajánlják, ahol C_i az adott i -ik komponens együtthatója, az m_i -t, az adott oxidot általában tömegszázalékban adják meg.

A feldolgozott viszkozitásméréseket – ismételt megjegyzendő, hogy nem homogén adathalmazról van szó (lásd 4. táblázat) – $\Sigma C_i \cdot m_i + a/T + b \cdot T + k$ alakú polinommal közelítettük. A közelítés ereje: $r^2 = 0,857$, azaz a széles alkotó oxidintervallum és a nem homogén adatok miatt csak tendenciák bemutatására alkalmas az összefüggés (5. táblázat).

A viszkozitást csökkentő oxidok a hatáserősség szerint: $\text{Fe}_2\text{O}_3 > \text{CaO} > \text{MgO} > \text{Na}_2\text{O} > \text{B}_2\text{O}_3$. A viszkozitást növelő oxidok a hatáserősség szerint: $\text{MgO} > \text{SiO}_2 > \text{Al}_2\text{O}_3$.

Ebből adódik, hogy a különböző üvegviszkozitás más-más szálmérőt eredményez. Az üvegszál gyártásakor a szálaszótárcsába jutó üveg kifolyik a palást több ezer furatán, és a centrifugális erő hatására megnyúlik. Az üveg a kidolgozási hőmérséklet-tartományban jól alakítható. A

gyártás a 10³ poise és az üveghossz ΔT hőmérsékleteivel (10⁴ és 10^{7,65} poise hőmérsékletei közötti különbség) jellemezhető. A 10³ poise és az üveghossz ΔT hőmérsékleteket az ÉPÍTŐANYAG 2006/1. számában közölt módszeremmel határoztam meg.

A szálmérő és 10³ poise hőmérséklet kapcsolata (14. ábra). Az 1000 poise hőmérséklet és a szálmérő között közel függvényyszerű összefüggés van. A hőmérséklet növekedésével a szálmérő eleinte kevéssé, majd egy helyi minimum után meredeken emelkedik. A tendencia könnyen megérthető, hiszen a viszonylag alacsonyabb hőmérsékleten is alakítható üvegszál hosszú ideig képes megnyúlni, így vékonyabbá válni.

A szálmérő és a ΔT kapcsolata (15. ábra). Az üveghossz azt fejezi ki, hogy milyen hőmérséklet-tartományban alakítható az üveg. Az üveghossz egy minimum függvény szerint befolyásolja a szálmérőt.

Következtetések

Összességében megállapítható, hogy a hőszigetelő, szálás szigetelőanyagok hővezető képességét a testsűrűség mellett a szálméret is befolyásolja. A szálmérő csökkentésével a testsűrűség jelentősen csökkenthető. Az egyes üvegalkotók különböző mértékben hatnak az üveg viszkozitására, így a kialakuló szálvastagságra. Ezek hatáscsökkenő sorrendje a következő:

Megjegyzendő, hogy a B₂O₃ a szálméretcsökkentő hatások sorrendjében a viszkozitást változtató sorrenddel ellentétben itt az első helyen szerepel. Ez jól egybevág a B₂O₃ viszkozitást változtató tulajdonságával, hogy magas hőmérsékleten jelentősen csökkenti, illetve az alacsony hőmérsékleten cca. 15%-ig növeli, ettől nagyobb részarányánál viszont csökkenti az üveg viszkozitását.

Az 1000 poise hőmérsékletét minél alacsonyabb, az üveghosszt, ΔT-t pedig az adott üvegolvasztási, szálaszási technikától függő minimumértékre célszerű beállítani az alacsony szálmérő, a jó hőszigetelő termék érdekében.

A téma fontosságát jelzi, hogy az interneten található, ezzel kapcsolatos, szabadalmilag le védett üvegösszetételek, módszerek száma többezres nagyságrendű.