

# Az üvegszálgyártás optimalizálásának lehetséges módszerei

SZEMÁN JÓZSEF • jszeman@freemail.hu

Érkezett: 2010.08.31. • Received: 31.08.2010. <http://dx.doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2010.20>

SZEMÁN József

(1949) 1973-ban végzett a Veszprémi Vegyipari Egyetemen, nehézipari szak, folyamatszabályozás ágazaton. Munkahelyei: Salgótarjáni Kohászati Üzemek, Nógrádi Szénbányák, Salgótarjáni Üvegyaport Rt, jelenleg nyugdíjas. Publikációi: cikkek az ÉPÍTŐANYAG-ban.

## Possible methods of optimising glass fibre production

The paper presents the glass fibre production sketchily, the spinner deals with some components of a technique and his interactions in detail. Analyse the viscosity, the temperatures, the spinner forming, the bore diameter, the uptime, the conceptual and practical effects of the glass load, the rev. The glass fibre production formulates proposals optimising his possible methods.

Keywords: glassfiber, fiber diameter, spinner, velocity, viscosity, temperature

## Bevezetés

A szilikátszálás anyagok felhasználása napjainkban széles skálát ölel fel például hőszigetelés, hangszigetelés, szűrőtechnika, műszertechnika, száloptika, szálerősítésű műanyagtermékek stb. A különböző alkalmazások egységesen megkövetelik a stabil, homogén szerkezetű, közel azonos átmérőjű üvegszálakat. Dolgozatomban az üvegszálak gyártásával, azon belül is a spinner technika néhány összetevőjével és kölcsönhatásaival foglalkozom.

## Az üvegszálak gyártása

Alapvetően két technikája van az üvegszál előállításának a szálhúzásos és a centrifugás, azaz spinner módszer. Mindkét eljárásnál jól nyújtható, homogén üveget kell előkészíteni, olvasztani és azt eljuttatni a szálazóhoz. A szálhúzásos módszerrel az olvadt üveget vékony furatokon húzzák át, majd felcsévélik. Így általában hosszú szálakat gyártanak optikai és műszertechnikai célokra. A centrifugás eljárásnál az olvadt üveg az olvasztókemencéből a feederen át egy felül nyitott, forgó hengerbe, a spinnerbe folyik. A henger palástján több ezer 0,3–1 mm átmérőjű furaton préselődik át az üveg a centrifugális erő hatására. A képződött egyedi vastag üvegszálak olyan hőmérsékletűek, hogy még tovább nyúlnak, vékonyodnak. Ez a technika rövidebb, de vékony szálakat eredményez. Fő gyártási terület az üvegyapot, ásványgyapot és a natúr üvegszál előállítása. Az üvegyapot készítésénél a megolvasztott, homogenizált üveg a feeder végénél egy-egy megfelelő lyukátmérőjű platina testen folyik át a spinnerbe. Ezeket speciális gázégőkkel is melegítik, hűtik a megfelelő hőmérsékletek biztosítása céljából. Egy másik gázégő és terelőlevegő rendszer elősegíti a képződött, viszonylag vastag üvegszálak további nyújtását, a szálátmérő csökkentését, homogenizálását. A szálak felületére, hőre keményedő speciális ragasztót, úgynevezett kötőanyagot permeteznek. A képződött szálhalmazt egy alulról megszívott rácsos szerkezetű szállítószalagon gyűjtik össze, ami továbbítja azt a kikeményítő kemencébe, ahol a termék vastagsága is beállítható. Itt a korábban a szálra szórt kötőanyag a hő hatására polikondenzálódik, és rugalmasan rögzíti egymáshoz az elemi szálakat. Ezután automata vágórendszer eltávolítja a nem homogén széleket és a megfelelő hosszúságú egyedi darabokat alakítja ki. A terméket a gyártósor végén általában automata rendszer csomagolja.

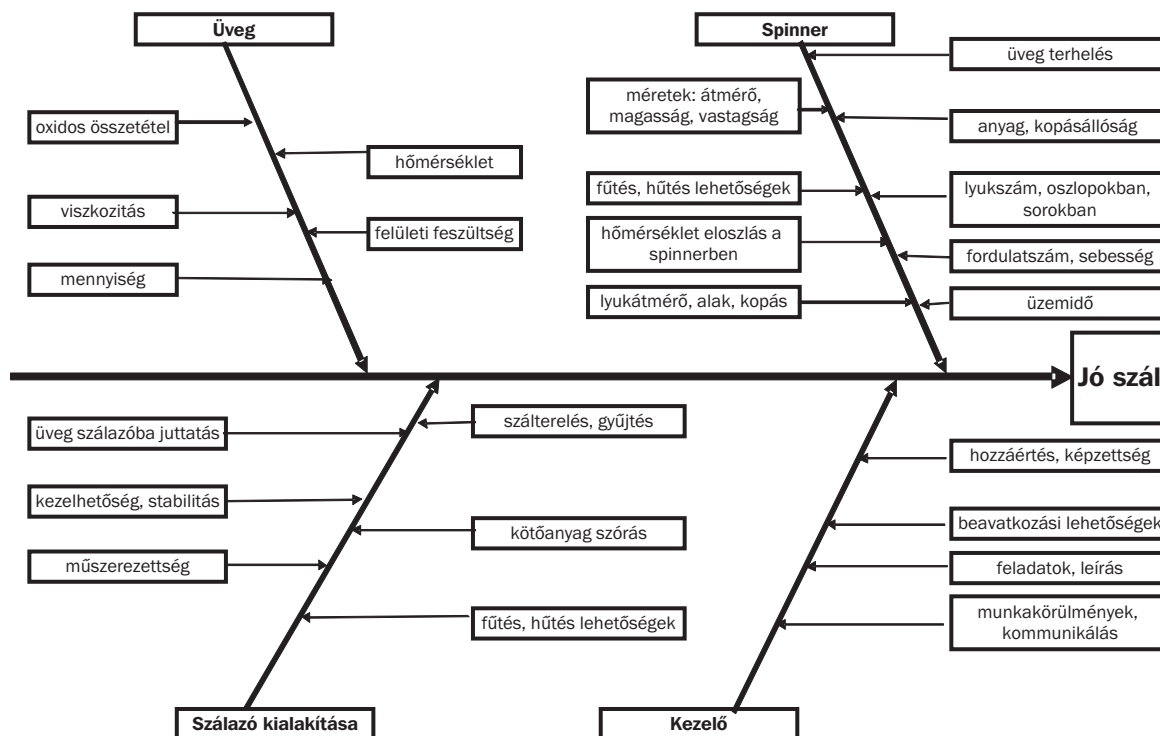
## A szálképzésről

Az olvadt üveg alkalmazott technológiától, üvegösszetételétől függő hőmérsékleten, a platina kifolyókon a szálazótárcsába csurog. Viskozitását az üvegalkotók, és a hőmérséklet határozza meg. A hőmérséklet emelkedésével exponenciálisan csökken az olvadék viszkozitása [1]. A 300–1500 mm átmérőjű és 30–100 mm palástmagasságú, palástján több ezer furattal ellátott forgó tárcsában, a spinnerben az üveget a centrifugális erő a palástra kényszeríti. Az alsó furatokon kifolyik az olvadék egy része, a maradék üveg felkúszik a paláston a következő lyuksorhoz is és ez a folyamat, addig ismétlődik, míg az összes üveg el nem távozik a lyukakon át. Tehát az alkalmazott feltételek hatására beáll egy egyensúly és elképzelhető, hogy a palást tetején található lyukakhoz már nem jut üveg, azokon nem folyik át, illetve kevesebb folyik ki az alsó lyukakon és a palást tetején felgyülemlik, és ott megdermed. Fontos megjegyezni, hogy a szálazótárcsa hőmérséklete lyuksorról lyuksorra változik. Ez azért jelentős tény, mert az üveg viszkozitása drasztikusan emelkedik a hőmérséklet csökkenésével [1] és a magas viszkozitás nagyobb ellenállást eredményez, azaz nehezebben folyik át a furatokon, kevésbé nyújtható, formázható. A lyukakon kijutott üveg a kifolyási sebesség, a viszkozitás és felületi feszültség hatására megnyúlik, vékonyodik, és rosszabb esetben elszakad, azaz aprózódik és üveggöbökké alakul. Az olvadt üveg spinner furataiból történő kifolyási sebességét a viszkozitás, a fordulatszámotól függő centrifugális erő és a lyukátmérő befolyásolja.

A magas hőmérsékletű (900–1100 °C) üvegolvadék természetesen idővel koptatja a spinner apró furatait, így azok kibővülnek és a nagyobb nyíláson több üveg jut át.

Az előző rövid ismertetőből is látszik, hogy a homogén megfelelően vékony szál előállítását számos paraméter befolyásolja, és ezeket esetenként más-más hatáserősséggel kell figyelembe venni. A befolyásoló tényezők jól szemléltethetők egy a minőségbiztosításban már klasszikusnak tekinthető eljárással az Ishikawa ok-hatás diagramos (1. ábra) feldolgozással [2]. A módszer közismert, már a középszintű képzésben is oktatják és előnye, hogy racionális összefüggések tárhatók fel vele a mindennapi gyakorlatban is.

A tapasztalati és logikai úton kapott, illetve ábrázolt befolyásoló tényezők, okok hatáserősségét XY típusú koordináta rendszerben ábrázolva a mérhető jellemzőknél egyszerűen szemlél-



1. ábra A szálképzést befolyásoló tényezők Ishikawa diagramja  
Fig. 1. Ishikawa diagram for fiber spinning

tethetjük. Ha a pontsereg valamilyen tendenciát követ, akkor azt számszerűsíthetjük is pl. regressziós elemzéssel. Az így nyert és bizonyított hatások már alkalmasak arra, hogy aktívan beavatkozzunk és irányítsuk a szálképzés folyamatát.

Munkámban a szálképzést befolyásoló, numerikus okozókat gyakorlati tapasztalatok és irodalmi hivatkozások alapján választottam ki.

A gyártó érdeke, hogy berendezéseit az optimális maximális hatékonyság közelében üzemeltesse. Ez az üvegterhelés, a gyártókapacitás és a gép üzemidejének minél nagyobb értékét követeli meg. Célszerűen ezek hatásait elemzem először.

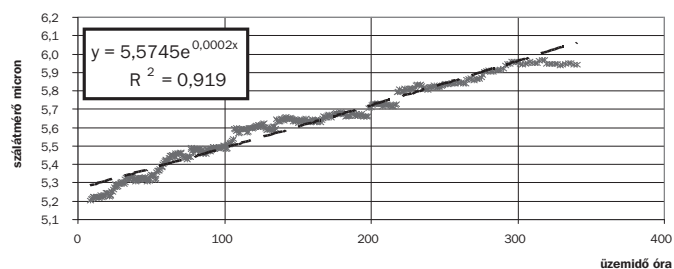
A feldolgozás során tendenciákat mutatok be, ehhez pedig az egyedi adatok okozta nagymértékű szóródást elkerülendő, a mozgátlag módszerrel nyert simított értékeket használom. A mozgátlag mintaszámát egyedi becslésekkel határoztam meg, általában  $n = 15 - 30$  értékű egyedi adatok mozgó adataival.

### Az üzemidő hatása

Az általános impresszió az, hogy a szálátmérő az üzemidővel arányosan emelkedik (2. ábra). Ez összhangban van azzal a szintén gyakorlati tapasztalattal, hogy a spinner furatai kopnak, bővülnek. A feldolgozott adatok hosszú, több hónapos időszak értékeit ölelik át, így egy-egy résztendencia is megfigyelhető. Ezek az üvegösszetevők s vele együtt a viszkozitás, a technológia, a spinnerok változásai, amelyek természetesen tendenciákat, pontsűrűségeket eredményeznek. Ezek néhány hatását a későbbiekben elemzem, mutatom be.

Összességében megállapítható, hogy a vizsgált ponthalmazra az exponenciális trend illeszkedik a legjobban. Ez egyúttal azt is sugallja, hogy a használati idő emelkedésével a szálátmérő is egyre drasztikusabban nő. Viszonylag egyenletes és alacsony

átmérőjű üvegszál gyártásánál tehát ügyelni kell arra, hogy a gyártósoron ne azonos, hanem különböző üzemidejű spinnernek legyenek használatban.



2. ábra Az üzemidő hatása a szálátmérőre  
Fig. 2. Effect of working time for fiber diameter

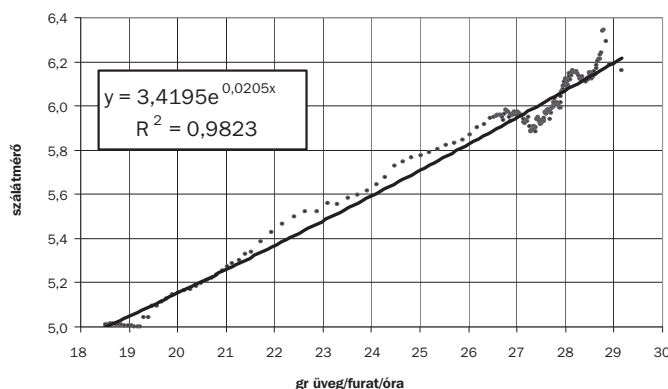
### Az üvegterhelés hatása a szálátmérőre

A különböző kialakítású spinnerok összehasonlításához be kell vezetni egy fajlagos terhelés mutatószámot. Ez a mutatószám célszerűen a furatokon átfolyó üveg átlagos mennyisége, mértéke: gr üveg/furat/óra. Az átfolyó üveg mennyiségét a furat átmérője, a furat hossza, azaz a palást vastagsága, a furat kiképzése, az üveg hőmérséklete és viszkozitása, azaz folyékonysága, az üveget a furaton áthajtó centrifugális erő nagysága, azaz a spinner fordulatszáma alapvetően befolyásolja. A vizsgált adatokat feldolgozva a 3. ábra mutatja be a kapcsolatot a szálátmérő és a fajlagos terhelés között.

A legkisebb terhelési tartományban közel független a terheléstől a gyártott üvegszál átmérője. A vizsgált tartomány (18–30 gr üveg/furat/óra) utolsó negyedében (27–30 gr üveg/furat/óra) már nagyobb ingadozásokkal követi a pontok elhelyezkedése az általános trendet, és itt már jelentősen inhomogén

az átmérő. A jellemző trend az exponenciális közelítéssel adja a legjobb illeszkedést a pontok között. A leíró függvény nagyon jól közelíti a mért értékeket,  $r^2 = 0,9823$ , szálmérő ( $\mu\text{m}$ ) =  $3,4195e^{0,0205x}$  ahol  $x$ : a fajlagos üvegterhelés gr üveg/furat/óra.

Összességében megállapítható, hogy 20–23 gr üveg/furat/óra értéknél kaphatunk 5,5  $\mu\text{m}$ -nél alacsonyabb szálmérőjű homogén terméket. Fontos tehát az optimális furatszám meghatározása az adott technológiához, üvegterheléshez.



3. ábra Az üvegterhelés hatása a szálmérőre  
Fig. 3. The effect of the glass load onto the diameter

### Spinner hőmérsékletek

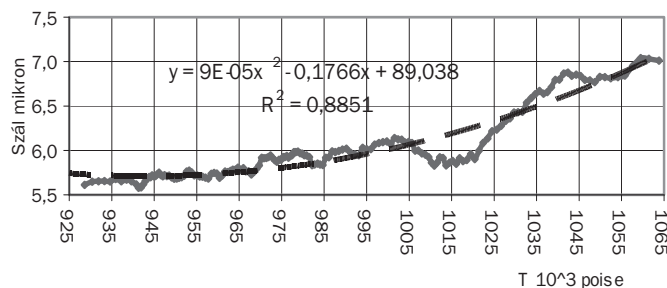
Beavatkozás nélkül a számozótárcsa hőmérséklete a palást mentén fölfelé csökken. Ennek hatására a viszkozitás meredeken emelkedik [3]. A magasabb viszkozitású folyadék, esetünkben az üvegolvadék sűrűdési ellenállása is nagyobb. A lyukakon való átfolyást előidéző nyomóerő a hidrosztatikus nyomás, a folyadékoszlop magasságával a forgó mozgásból eredő gyorsulással és a sűrűséggel arányos.

A folyadékoszlop magassága a palást mentén egyre csökken, hiszen az alsóbb furatokon eltávozik az üveg bizonyos hányada, így a nyomóerő is kisebb lesz (v.ö. 6. ábra). Két azonos hatást eredményező következmény összegződik és a magasabban elhelyezkedő furatokon egyre kevesebb üveg jut át. Az alsóbb furatok fajlagos üvegterhelése nagyobb, mint a fölötte levőké, itt magasabb az üveg furatbővítő koptató hatása, így inhomogén átmérőjű szálat nyerünk. Ezeket kiküszöbölendő a palást hőmérsékletprofilját egy speciális égőrendszerrel célszerű átalakítani úgy, hogy a hőmérséklet kissé emelkedjen a csökkenés helyett. Esetenként a gázégőket csak levegővel javasolt üzemeltetni, ha túl magas a hőmérséklet.

Viszkozitás hatása a szálmérőre: 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 viszkozitás hőmérséklet függésére Vogel [1] a következő összefüggést dolgozta ki:  $\log \eta = A+B/(T-T_0)$  ahol  $\eta$  a viszkozitás  $A$   $B$   $T_0$  konstansok, és  $T$  a hőmérséklet. Az alkalmazott üveg viszkozitását a mért értékekből a [3]-ban ismertetett módszerrel viszonylag egyszerű meghatározni.

A mindennapi gyakorlatból ismert, hogy az üvegtípus, az üvegösszetétel változtatás a szálmérő jelentős változásával, romlásával jár. Az adott üveg viszkozitását az 1000 poise hőmérsékletével és az üvegösszetétellel jellemezhetjük, ez a  $\Delta T$ : a  $10^4$  és  $10^{7,65}$  poise hőmérsékletei közötti különbség.

Az 1000 poise hőmérséklete  $T^{\Delta 3}$ : A különböző üvegösszetételhez tartozó adatokat ábrázolva a 4. ábrán bemutatott kapcsolat található a szálmérő és az 1000 poise hőmérséklete  $T^{\Delta 3}$  közt.

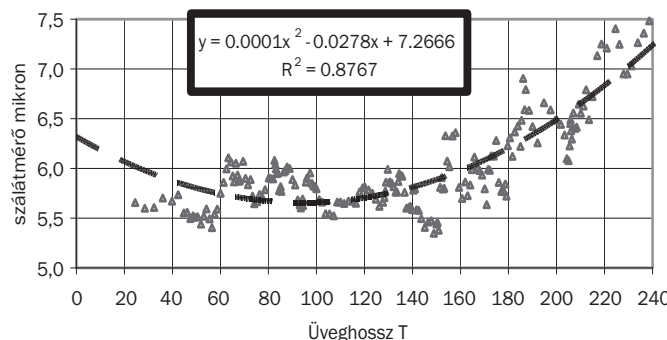


4. ábra A viszkozitás hatása a szálmérőre  
Fig. 4. Effect of viscosity for fiber diameter

Az adatpontokhoz a másodfokú polinom illeszthető a legjobban. Ezt felhasználva 950 °C-nál van az általános minimum, de a görbén 1015 °C-nál is találunk helyi minimumot.

### Az üvegösszetétel hatása

A számolt üvegösszetétel  $\Delta T$ : a  $10^4$  és  $10^{7,65}$  poise hőmérsékletei közötti különbség és szálmérő kapcsolatát az 5. ábra szemlélteti.



5. ábra Az üvegösszetétel hatása a szálmérőre  
Fig. 5. Effect of the glass length onto the fiber diameter

A mérési pontokhoz itt is a másodfokú polinom illeszthető a legjobban.

A diagram alapján a 80–130 °C között található a minimális szálmérőhöz tartozó optimális üvegösszetétel,  $\Delta T$  értéke.

### Viszkozitás hatása a szálmérőre

Jellemző	Hatása
$T^{\Delta 3}$ magas	üvegszál nem nyúlik, korán dermed $\rightarrow$ vastag szál
$T^{\Delta 3}$ alacsony	üvegszál túlzottan nyúlik, elszakad, a felületi feszültség összetartja az üveget $\rightarrow$ vastag szál, üveggöngyképződés
$\Delta T$ rövid	üvegszál hamar dermed $\rightarrow$ vastag szál, kristályosodási veszély a szálmérő tárcsában
$\Delta T$ hosszú	üvegszál sokáig alakítható, elszakadhat $\rightarrow$ üveggöngy képződés

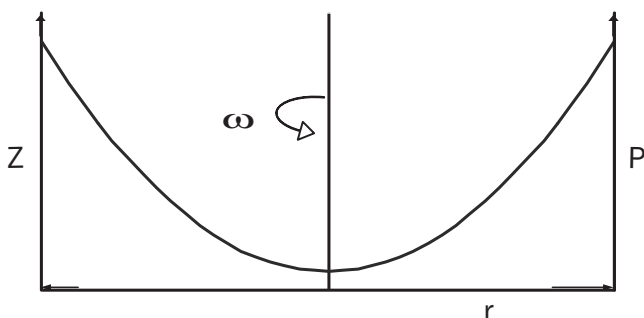
## A szálazótárcsa beavatkozás nélküli viselkedése, kialakuló tendenciák

A szálazótárcsa első közelítésben hasonló egy alul zárt forgó hengerhez, amiben a folyadék, esetünkben az olvadt üveg felszíne forgáspáreleloid alakot vesz fel a következő paraméterekkel  $r$  a henger sugara,  $\omega$  a forgó henger szögsebessége,  $n$  a fordulatszám,  $\rho$  az olvadt üveg sűrűsége,  $z$  a függőleges, palást irányú üveg magassága:

$$z = r^2\omega^2/2g + \text{konstans} = 2\pi^2r^2n^2/2g + \text{konstans} \quad (1)$$

A nyomáseloszlás pedig:

$$P = p_0 + \rho r^2\omega^2/2 - \rho gz = p_0 + \rho r^2 2\pi^2 n^2 - \rho gz \quad (2)$$



6. ábra Forgó folyadék felülete és nyomása  
Fig. 6. The surface and pressure of the rotating liquid

A forgó mozgás és a szálazótárcsa méreteinek hatása a közelítés szerint úgy összegezhető, hogy mindkét paraméter,  $r$  és  $n$  változtatása négyzetesen hat a  $z$  irányú folyadékmozdulásra. A forgó henger belső felületének minél nagyobb lefedéséhez a henger átmérőjét és a fordulatszámot is növelni kell az (1) összefüggés alapján. A palástra ható nyomás  $z = 0$  értéknél, azaz a henger alján a legnagyobb és  $z$  emelkedésével arányosan csökken, egyébként a henger átmérőjével és a fordulatszámmal is négyzetesen emelkedik a (2) összefüggés szerint.

Azonos furatátmérőket feltételezve és figyelembe véve azt, hogy a nagyobb nyomás több folyadék átfolyását eredményezi a szálazótárcsa furatain, megállapítható, hogy a spinner alsó lyuksorain magasabb az üvegterhelés, mint a fölötté elhelyezkedőkön. A nagyobb üvegterhelés vastagabb üvegszalát eredményez, tehát beavatkozás nélkül már eleve inhomogén az üvegszalát méter eloszlása.

## Furatkialakítások és hatásuk a szálazásra

A tényleges szálképzést a szálazótárcsa palástján több sorban elhelyezkedő 8000~40000 furat végzi. A szálazótárcsa extrém feltételeknek kell, hogy megfeleljen. 800–1000 °C üzemi hőmérséklet, az olvadt üveg korróziót okozó és koptató hatása, több ezres fordulatszám mellett is masszív, stabil legyen a furatok mechanikai, statikai gyöngítése ellenére. Természetes, hogy a tárcsagyártók féltett titokként őrzik, és általában szabadalommal védik a speciális ötvözetek összetételét és a lyukkiosztást. A furatok általában nem egy oszlopban, hanem különböző eltolásokkal helyezkednek el egymás fölött. A szálazótárcsa általános kialakítása a 7. ábrán látható.



7. ábra Szálazótárcsa kialakítása  
Fig. 7. Spinner disc

A szálazótárcsa teljesítményét egyéb feltételek mellett alapvetően a furatok száma határozza meg. A 3. ábrának megfelelően, gyakorlatomban a 20~23 gr üveg/furat/óra furatterhelés eredményezett 5,5 μm-nél alacsonyabb szálátmérőt. Így a furatszám nagyságrendi meghatározása a következő összefüggéssel számolható:

$$\text{Furatszám} = \text{tervezett kapacitás (kg/h)} / (20 \sim 23 \text{ gr üveg/furat/h}) * 1000 \quad (3)$$

A szálazási kapacitás növelése több furatot igényel, kérdés, hogy ezek hogyan helyezhetők el a szálazótárcsa palástján?

Lehetséges megoldások:

- a furatátmérő csökkentése,
- a szálazótárcsa átmérőjének növelése,
- a szálazótárcsa palást magasságának emelése,
- a furatkiosztás optimalizálása, hogy a furatok minél közelebb kerüljenek egymáshoz.

A furatátmérő csökkentésénél és a furatkiosztás optimalizálásánál figyelembe kell venni, hogy az üzemi emelkedésével az olvadt üveg furatbővítő, koptató hatása is jelentkezik. Megfigyeléseim szerint 500 órás használatnál ez 40~45% átmérő növekedést is okoz. A szálazótárcsa átmérőjének növelése megköveteli a teljes szálazórendszer, a spinner átalakítását, a rögzítést, a meghajtást, a gáz-levegő-kötőanyag rendszer újratervezését. A szálazótárcsa palást-magasságának emelése, a szintén szükséges újratervezésen túl a korábbi hőmérséklet profil jelentős megváltozását is okozhatja. Ekkor viszont alaposan figyelembe kell venni a használt üveg viszkozitásának drasztikus átalakulását, lásd [3], mert a magasabb palást nagyobb üveghűlést eredményez és a felső lyuksorra, nem jut el az üveg, extrém esetben befagy a spinnerbe, vagy megkezdődik a kristályosodás.

## A furatátmérő és a fordulatszám együttes hatásai

Alapvetően a következő furatátmérő kialakítás különböztethető meg:

- A: a teljes palástmagasságon azonos méretű lyukak,
- B: alsó lyuksor kisebb, fölötté nagyobb furatátmérő,
- C: alsó lyuksor nagyobb, fölötté kisebb furatátmérő.

Gyakorlati tapasztalatok alapján elmondható, hogy A és B esetben az üzemidő emelkedésével jelentősen bővül a furat, kopik a szárazótárcsa és egyre kevesebb üveg jut a tárcsa tetején elhelyezkedő lyuksorokra. Szélsőséges esetben „nem megy fel az üveg” és a felső lyuksorok nem dolgoznak, az alsó furatok üvegterhelése jelentősen emelkedik. Bevált gyakorlat, hogy az üzemidő emelkedésével A és B esetben arányosan csökkenteni, míg C esetben növelni kell a fordulatszámot, s így csökken az alsó lyukak üvegterhelése és felkúszik az üveg, az üvegterhelés egyenletesebb lesz, vékonyabb szál képződik.

### Kezelőszemélyzet

A berendezést felügyelő, kezelőszemélyzet hatása nem fogalmazható meg egzakt összefüggésekkel, de az ISO 9001 minőségbiztosítási rendszerünk kialakítása során, a 90'-es években tapasztaltuk azt, hogy mennyire fontos bevonásuk a rendszer üzemeltetésébe. A kezelési utasítások kidolgozásába aktívan bevontuk őket, s így rövid, csak a legszükségesebb elvi leírást, annál több ábrát, és az általuk is javasolt, rövid, azonnal alkalmazható gyakorlati módszer foglalmaztuk meg. Ezzel csökkentettük a gyakran megnyilvánuló szakmai féltékenységet, a „tudom, de nem árulom el” felfogást.

### A mért adatok rögzítése és feldolgozása

Az optimális üzemeltetés, a maximális termelés, a legnagyobb szárazótárcsa üzemidő biztosítás, a jó minőségű vékony szál gyártása megköveteli a gyártás paramétereinek folyamatos dokumentálását és azok elemzését. A különböző, időnként felmerülő problémák megoldásához célszerű alkalmazni a különböző statisztikai alapokra épülő kísérlettervezési módszereket. Jelen tanulmányom is ezen elvek korábbi szisztematikus felhasználásával jött létre.

### A szálátmérő csökkentésének lehetőségei

- Alacsony és magasabb üzemidejű szárazótárcsák egyidejű használata.
- A furat üvegterhelés csökkentése.
- A furatátmérő csökkentése.
- Az optimális viszkozitás viszonyok felkutatása, üvegösszetétel módosítása.
- Az alkalmazott spinner belső fűtésének csökkentése/növelése.
- Az optimális fordulatszám meghatározása és alkalmazása.
- A kezelőszemélyzet intuíciónak kontrolált engedélyezése.
- Alkalmazott statisztikai módszerek használata.

### Összefoglalás

A dolgozat vázlatosan bemutatja az üvegszálygyártást, részletesebben foglalkozik a spinner technika néhány összetevőjével és kölcsönhatásaival. Elemzi a viszkozitás, a hőmérsékletek, a szárazótárcsa kialakítás, a furatátmérő, az üzemidő, az üvegterhelés, a fordulatszám elvi és gyakorlati hatásait. Javaslatokat fogalmaz meg az üvegszálygyártás optimalizálásának lehetséges módozataira.

### Felhasznált irodalom

- [1] Vogel, H.: *Physikalische Zeitschrift*. 22 (1921) 645
- [2] Hitoshi Kume: *Statistical methods for quality improvment* AOTS Tokio 1995
- [3] Szemán József: *A viszkozitás szerepe az üvegyártásban* Építőanyag 58. évf. 2006. 1. szám

Ref.: <http://dx.doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2010.20>

Szemán József: *Az üvegszálygyártás optimalizálásának lehetséges módszerei*. Építőanyag, 62. évf. 4. szám (2010), 110–114. o.