A polipropilén és az ütésálló polisztirol préslég-formázhatóságát befolyásoló tényezők

Speciális nukleáló adalékok bekeverésével drasztikusan megnövelhető a polipropilén béta kristálymódosulatának részaránya a préslég-formázható lemezekben, és ezáltal sokkal könnyebben és termelékenyebben lehet azokat hőformázni.
Az ütésálló polisztirol préslég-formázási paraméterei közül a lemez hőmérséklete, az előformázó tüske hőmérséklete és alakja továbbá az előformázás mélysége jelentős hatással van a termék falvastagság-eloszlásának homogenitására. Ugyanakkor a préslevegő nyomásának és a tüske mozgatási sebességének nincs számottevő hatása.

Tárgyszavak: polipropilén, kristálymódosulat, polisztirol, hőformázás, műanyag-feldolgozás, préslégfomázás; technológiai ablak.

A csomagolóipari gyakorlatban legtöbbször polisztirolt (PS és HIPS), polipropilént (PP), PVC-t és poli(etilén-tereftalátot) (PET) hőformáznak, túlnyomórészt préslégformázással. Míg az amorf műanyagokat (polisztirol és PVC) viszonylag egyszerűen, széles technológiai ablakban lehet feldolgozni, addig a részben kristályos polimerek (PP és PET) feldolgozására – éles olvadáspontjuk és kis ömledékszilárdságuk miatt – sokkal jobban oda kell figyelni.

A polipropilént elterjedten használják préslégformázott élelmiszeripari csomagolóanyagokhoz, mivel olcsó, könnyű és jó fizikai tulajdonságokkal rendelkezik. Ugyanakkor éles olvadáspontja és alacsony ömledékszilárdsága következtében hőformázása nem könnyű feladat, azaz csak egy szűk technológiai ablakban lehetséges.

A polipropilén részlegesen kristályos műanyag. *Kristályainak két számottevő módusulatát ismerjük, az ún. „alfa” (monoklin) és a „béta” (hexagonál) módosulatot.* A fröccsöntött termékekben és a hőformázáshoz használt extrudált lemezekben az alfa módusulat dominál, részaránya mintegy 95%, melynek éles olvadáspontja 165 ^{o}C környékén van. Ugyanakkor megfigyelhető volt, hogy ha sikerül megnövelni a béta módosulat arányát, sokkal könnyebben, azaz alacsonyabb hőmérsékleten és jóval szélesebb hőmérsékletablakban lesz hőformázható a PP lemez.

A béta módosulat olvadáspontja 12–14 ^{o}C-kal alacsonyabb, mint az alfáé. A túlnyomórészt béta módosulatot tartalmazó PP fizikai tulajdonságai is mások: ütésállósága nagyobb, húzószilárdsága pedig kisebb lesz, mint az alfáé és nagyobb mértékben nyújtható. Emellett nyújtása, vagyis a béta módosulat kristályainak olvadáspontja alatti hőmérsékleten végzett hőformázás során bekövetkező alakváltozása során a lemez falában ún. mikroüregek alakulnak ki, amelyek a fényszórás miatt növelik az anyag

opacitását, és így fehér termékeket eredményeznek szinezék hozzáadása nélkül is, vagy pedig jóval kevesebb szinezék bekeverését igénylik azonos fehérség eléréséhez.

A túlnyomórészt béta kristálymódosulatú PP lemezek hőformázása 146–163 ^{o}C tartományban történik (szemben az alfa módosulattal, ahol ez 160–163 ^{o}C). Ezen a hőmérsékleten a béta kristályok már kezdenek megolvadni és így az anyag könnyen formázható lesz, de a kis mennyiségű alfa módosulatú kristályhányad még kellő szilárdságot biztosít, azaz a lemez „nem rogy meg”. Ennek következtében jóval egyenletesebb falvastagságot lehet elérni a termék teljes keresztmetszetében. Ha azonban a PP hosszabb ideig tartózkodik ilyen magas hőmérsékleten, megindul a béta módosulat átalakulása alfává, és a hőformázott darab részben elveszti fehér színét. Az alacsonyabb formázási hőmérséklet és a könnyebb formázhatóság jelentősen csökkenti a ciklusidőt. A kisebb energiafelhasználás és a termelékenység növelése pedig költségcsökkentést eredményez.

A béta módosulat feldúsítását a szokásos műanyag-feldolgozási berendezések és technológiák esetében speciális nukleáló adalékok (1–2%) bekeverésével lehet elérni. Az extrudált lemezeket lassan kell lehűteni a minél magasabb béta kristálymódosulat elérése érdekében. Ezért a lehűtésre és simításra szolgáló hármas hengerkombináció középső hengerét, ahol a lemez megszilárdul, 80–95 ^{o}C-ra kell temperálni.

A polisztirolt, mind normál (PS), mind ütésálló változatát (HIPS) – sőt esetenként a kettő koextrudált kétrétegű kombinációját – régóta és elterjedten használják a préslégformázással előállított csomagolóeszközök alapanyagaként. A gyártás folyamán számos, ráadásul egymással kölcsönhatásban álló feldolgozási paramétert kell beállítani, és noha a megfelelő gyakorlattal rendelkező szakemberek e téren rengeteg tudást halmoztak fel, ezek az információk többnyire nincsenek dokumentálva és megfelelően rendszerezve. Ezért hasznosnak látszott egy olyan kísérletsorozattal meghatározni a legfontosabb feldolgozási paraméterek hatását, ahol a változásokat a termék falvastagság-eloszlásának alakulásával jellemzik. Mint ismeretes, *a préslégformázott termékek falvastagsága sohasem teljesen egyenletes, és mindig a legvékonyabb részek határozzák meg az egész termék szilárdságát.*

A bevizsgálás során egy 400 ml-es kónikus tejipari poharat (magassága 90,5 mm, legnagyobb külső átmérője 90 mm) gyártottak 1,2 mm vastagságú HIPS lemezből a célnak megfelelően beállítható és felműszerezett préslégformázó gépen. A gyártási paraméterek változtatásánál azt a kísérleti elrendezést használták, amely egy jó minőségű terméket adó beállításon *(1. táblázat)* alapult, és az aktuálisan vizsgálandó paramétert leszámítva a többi értéket mindig ennek az alapbeállításnak megfelelő értékeken tartották.

Az adott paraméterkombinációval gyártott termékeket a poharak alján és oldalfalán 33 szimmetrikusan elosztott ponton, azaz 135 mm hosszra kiterítve mérték ultrahanggal. A legkisebb lemezvastagság 0,15 mm, a legnagyobb 1,2 mm, az átlagos pedig 0,3 mm körül mozgott.

Az alapbeállításnak megfelelő paraméterekkel mért falvastagság-eloszlást az *1. ábra* szemlélteti. A falvastagságbeli eltérések tulajdonképpen azt mutatják meg, hogy

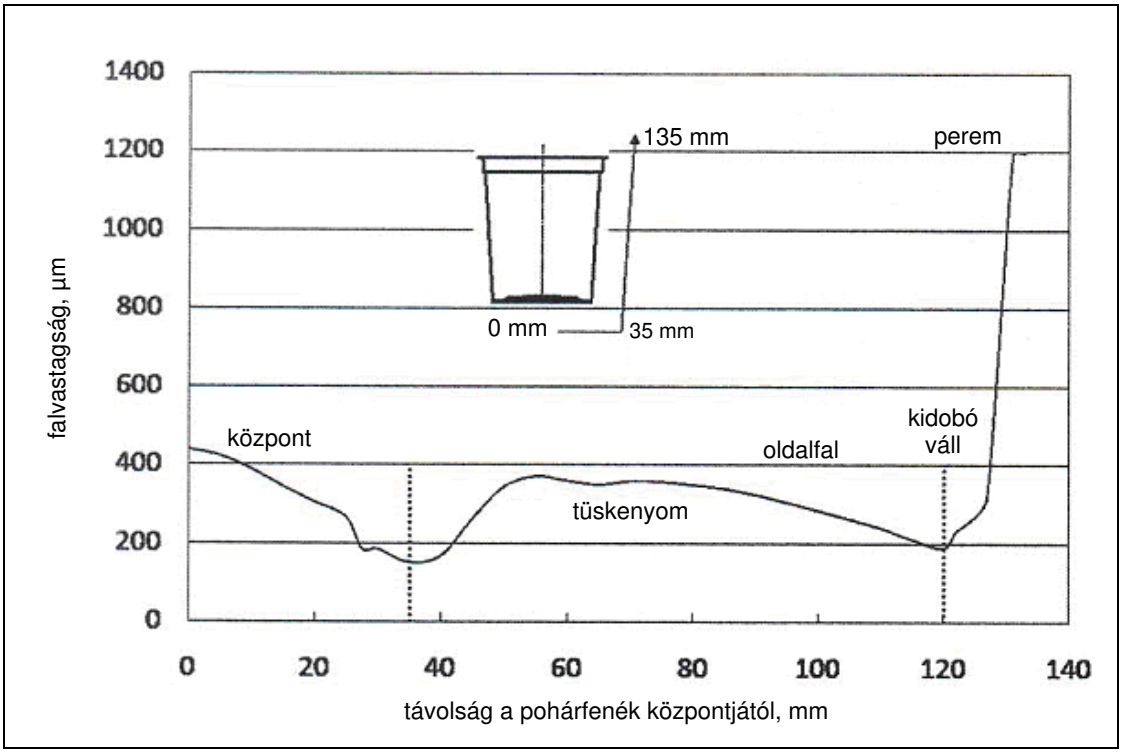
a hőformázás folyamán a lemez kiindulási vastagságú (1,2 mm) anyaga hogyan nyúlik, deformálódik a pohár palástja mentén.

1. táblázat

A feldolgozási paraméterek alapbeállítási értékei és az alkalmazott változtatások

Paraméter	**Mértékegység**	**Alapbeállítás**	**Változtatás 1.**	**Változtatás 2.**
Lemezhőmérséklet	°C	120	130	140
Előformázó tüske – hőmérséklete – sebessége* – elmozdulása – alakja	°C mm/s mm –	 100 178 86,5 lapos	 75 137 81,5 lekerekített	 50 111 76,5 félgömb
Préslevegő nyomása	bar	7	5	3

* átlag.

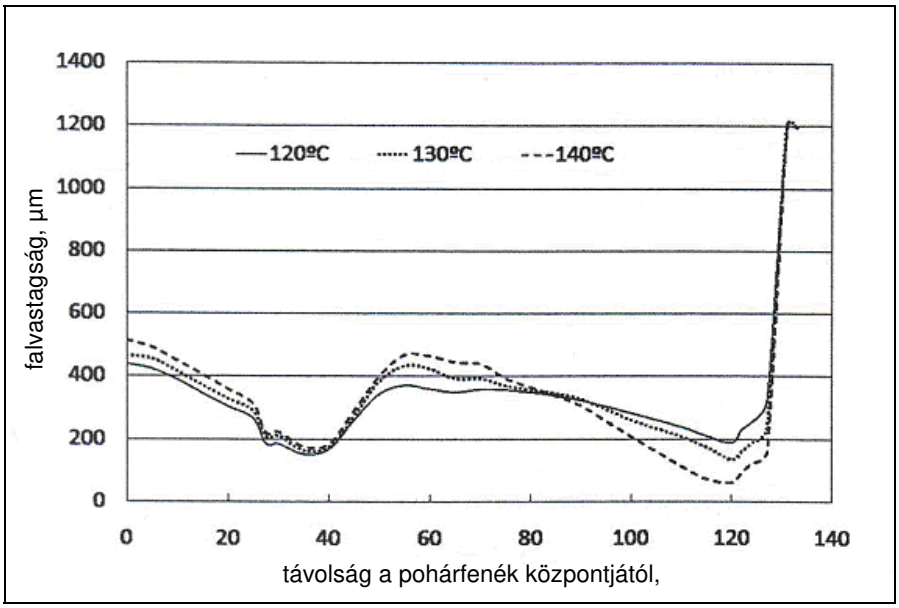


1. ábra A falvastagság-eloszlás alakulása az alapbeállítások szerint gyártott termékeknél

A lemez hőmérsékletének hatását a *2. ábra* szemlélteti. Noha az lenne várható, hogy a hőmérséklet emelkedésével a lemez könnyebben deformálható, a pohár fenekén és az oldalfal alsó szakaszán nőtt a falvastagság. Ez azzal a szakirodalomból is ismert feltevéssel magyarázható, hogy az előformázó tüske és a lemez közti súrlódás

(ami gátolja a formázódó lemez csúszását a tüskén) erősen hőmérsékletfüggő és a súrlódási tényező a hőmérséklet emelésével nő. Vagyis ott, ahol a lemez érintkezik a tüskével, kevésbé tud az anyag megnyúlni, mint a váll közelében, ahol a lemez nem érintkezik a tüskével.

Hasonló jellegű, de még nagyobb mértékű változást okoz, ha az előformázó tüske hőmérsékletét emelik, vagyis ez is a súrlódási tényező hőfokfüggését jelzi. Ha ugyanis az alapbeállításhoz (100 ^{o}C) képest 75 ^{o}C-ra vagy 50 ^{o}C-ra csökkentik a tüske hőmérsékletét, a pohár fenekének falvastagsága kevesebb, mint felére csökken, az oldalfal vastagsága pedig a magassággal fokozatosan nő.



2. ábra A falvastagság-eloszlás alakulása a lemezhőmérséklet változtatásával gyártott termékeknél

A tüske mozgatásának és a préslevegő nyomásának változtatása nem okozott szignifikáns változást a falvastagság eloszlásában. Ez azzal magyarázható, hogy a HIPS, mint amorf műanyag nem érzékeny a nyírási sebességre. Ha azonban a vizsgálatokat kiterjesztenék a részlegesen kristályos polipropilénre vagy PET-re, várhatóan jelentős különbségeket lehetne mérni, mivel az ilyen anyagok mechanikai jellemzői erősen függenek a nyírás (általában a deformáció) sebességétől.

Ha a tüske elmozdulásának mélységét vizsgálták, megállapítható volt, hogy minél kisebb az elmozdulás, annál jobban elvékonyodik a pohár feneke és oldalfalának alsó része, míg a felső rész vastagsága nő. Ez azzal magyarázható, hogy a tüske és a lemez közti súrlódás következtében a lemez anyaga kevésbé képes elmozdulni és így a tüske megállásakor vastagabb a falával érintkező lemezrész vastagsága, mint a vele nem érintkező részeké. A préslevegő hatására viszont az anyag elválik a tüske felületétől és ezután minél nagyobb a távolság a tüske alja és a szerszámüreg feneke között

(vagyis minél kisebb volt a tüske elmozdulása) annál nagyobb mértékben kell az anyagnak megnyúlnia (és ezáltal elvékonyodnia), míg eléri a szerszám fenekét.

Hasonló okokkal magyarázható a tüske alakjának hatása. Az alapbeállításhoz tartozó, csak nagyon kevéssé lekerekített élű, ún. lapos végződésű tüske alsó pereme sokkal jobban megközelíti a szerszám fenekének alsó peremét, mint a jóval nagyobb mértékben lekerekített változat, nem is beszélve a félgömb alakú végződésről. Vagyis itt is arról van szó, hogy a súrlódás miatt kevésbé elvékonyodó lemeznek a préslevegő hatására már szabadon kell nyúlnia és ezért minél nagyobb távolságot kell megtennie mielőtt a szerszámüreg fenekének pereméhez ér, annál jobban elvékonyodik. Vagyis a pohár fenekének közepén viszonylag nagy lesz a falvastagság, de a fenék szélén és az oldalfal alján jelentős elvékonyodás tapasztalható.

2. táblázat

A különböző feldolgozási paraméterek változtatásának következtében tapasztalt legkisebb és legnagyobb falvastagság értékének különbsége

Paraméter	**Max. és min. falvastagság különbsége µm**	**Eltérés az alapbeállítási értéknél mért különbségtől µm**
Tüske elmozdulása 81,5 mm	230	–60
Tüske elmozdulása 76,5 mm	280	–10
Préslevegő nyomása 5 bar	290	0
Alapbeállítási értékek	290	–
Tüske sebessége 137 mm/s	300	10
Préslevegő nyomása 3 bar	310	20
Lemezhőmérséklet 130 ^{o}C	330	40
Tüske sebessége 111 mm/s	350	60
Félgömb alakú tüske	380	90
Tüske hőfoka 75 ^{o}C	390	100
Lemezhőmérséklet 140 ^{o}C	460	170
Tüske hőfoka 50 ^{o}C	460	170
Lekerekített tüske	520	230

A különböző feldolgozási paraméterek hatása a *2. táblázatban* látható. A mért adatok alapján megállapítható, hogy *a falvastagság-eloszlás homogenitására a lemez és a tüske hőmérséklete, illetve a tüskeelmozdulás mértéke van a legnagyobb hatással.*

A tényezők hatásának érzékenységét a *3. táblázat* mutatja, amelyben összefoglalták a vizsgálatok eredményeit.

3. táblázat

A feldolgozási paraméterek változásának érzékenységmutatói

	Min. falvas-tagság µm	**Változás %**	**Falvastagság-tartomány µm**	**Változás %**	**Referencia (alap) beállítás**
Referencia (alap) beállítási érték	151		288		
Lemez hőmérséklete +10 °C +20 °C	134 62	–12 –59	333 453	15 57	**120 °C**
Tüske hőmérséklete –25 °C –50 °C	60 42	–60 –73	396 453	37 57	**100 °C**
Tüske sebessége –41 mm/s –67 mm/s	155 143	3 –5	300 347	4 20	**178 mm/s**
Tüske elmozdulása –5 mm –10 mm	131 98	–14 –35	239 282	–17 –2	**86,5 mm**
Préslevegő nyomása –2 bar –4 bar	158 155	5 2	287 312	–0,3 8	**7 bar**
Tüske alakja lekerekített félgömb	139 146	–8 –3	521 383	81 33	**lapos**

Összeállította Dr. Füzes László

Jacoby Ph.: Using beta nucleation to improve the thermoforming characteristics of polypropylene = Plastics Engineering, 68. k. 7. sz. 2012. p.32–33., 36, 38, 40.
McCool R.; Martin P.J.: The role of process parameters in determining wall thickness distribution in plug-assisted thermoforming = Polymer Engineering and Science, 50. k. 10. sz. 2010. p. 1923–1934.