

Fröccstárgyak vetemedésének vizsgálata a vetemedés csökkentése érdekében
Sikló B., Kovács J. G.

Accepted for publication in Műanyag és Gumi

Published in 2012

DOI:

Fröccstárgyak vetemedésének vizsgálata a vetemedés csökkentése érdekében

Sikló Bernadett* PhD hallgató, Dr. Kovács József Gábor* egyetemi docens

1. Bevezetés

A fröccsöntött termékek alakhűségét rontó vetemedés három fő okozója az anizotrop zsugorodás, különösen a szálerősített anyagok esetén az orientációs hatás, illetve a fröccsöntő szerszám nem egyenletes temperálása.

A zsugorodás anizotrópiáját többnyire a kereszt- és hosszirányú, valamint a vastagság menti zsugorodással vizsgálják [1]. A technológiai paraméterek zsugorodásra gyakorolt hatása közül a legfontosabb az utónyomás és az utónyomási idő. Ezzel kapcsolatban meg kell jegyezni, hogy az utónyomás csak a gátfagyás pillanatáig hatékony, azt követően hatása megszűnik. Az egyéb technológiai paraméterek hatását nehéz sorrendbe állítani, mivel más a befolyásuk az amorf, illetve a részlegesen kristályos anyagokra, valamint másképp hatnak az áramlásra merőleges és az azzal párhuzamos zsugorodásra is [2–4]. Bár a fröccstermékek deformációját az anizotrop zsugorodás okozza, az egyes technológiai paraméterek, mint pl. a szerszámhőmérséklet, vetemedést, valamint zsugorodást befolyásoló szerepének nagysága különbözik egymástól [5].

A szálerősített fröccsöntött alkatrészek tulajdonságait, így a vetemedését is nagymértékben befolyásoló, az ömledékáramlás hatására kialakuló orientációt sokan vizsgálták [6, 7]. Számos kutatás témáját képezi a lokális orientáció, valamint az áramlás során a falvastagság mentén kialakuló mag-héj struktúra [8–10]. A sarkoknál létrejövő mag-héj szerkezet vizsgálatával kimutatták a külső sarokélnél az ún. holt zóna létét. Az alkatrészek egészében kialakuló, globális orientációs képet azonban kevesen elemezték, annak lokális vetemedésre gyakorolt hatását nem vizsgálták. Általában síklapú vagy korong alakú termékeken tanulmányozták a befröccsöntés helyének és az alakdeformációnak a viszonyát [11]. Egyesek hangsúlyozzák a befröccsöntési mód, azaz a gáttípus fontosságát, vizsgálataikat azonban csak a gát méreteire terjesztették ki, a gát típusára nem [12].

A vetemedést főként a zsugorodás méréséhez használt, síklapú próbatesteken vizsgálták [3, 4]. Összetettebb geometriák esetén, mint pl. a sarkoknál kialakuló deformációt csak kevesen tanulmányozták, csak néhány próbatest-kialakítás ismeretes [10, 13, 14]. A sarokvete-

medés hatására létrejövő sarokszöveget csupán egyetlen konkrét értékkel jellemezték, a próbatest oldalait egyenesnek tekintve [14]. A vizsgálatok nem terjednek ki a sarkot alakító oldalak deformációjának hosszváltozására. Emellett hiányosak a szálerősítésről és a kialakuló orientációról szóló ismeretek is.

Az áramlás hatására több ömledékfront találkozásánál kialakuló összecsapási vonal minőségének technológiai beállításokkal való javítására, valamint a termékkialakítással és a szerszámkonstrukcióval az alkatrészeken történő újrapozicionálására számos tapasztalati eljárás létezik [15]. A végeelemes eljárást alkalmazó fröccsöntési szimulációs szoftverek is képesek az összecsapás előrejelzésére. Több kutató is hangsúlyozza [16, 17], hogy a végeelemes modellt alkotó háló éleinek kellően rövidnek kell ahhoz lenniük, hogy az összecsapási vonal nagyságát és az összecsapási szög értékét megfelelő pontossággal előre lehessen jelezni. Az viszont, hogy a pontosság mennyiben függ az összecsapási vonal pozíciójában a végeelemes hálót alkotó háromszögek elhelyezkedésétől, még feltáratlan.

2. A vetemedést befolyásoló főbb paraméterek

A különböző technológiai paraméterek, az alapanyag, valamint a szerszámkialakítás vetemedésre gyakorolt hatását BOREALIS *Daplen HD120MO* polipropilénen vizsgáltuk, a gát kialakítás és gátpozíció (standard gát az oldalél közepén, standard gát az oldalél szélén, film gát), valamint az alapanyag üvegszáltartalom függvényében. A technológiai paramétereket, mint a szerszámhőmérsékletet, a két szerszámfél közt fennálló hőmérséklet-kül-

1. táblázat.

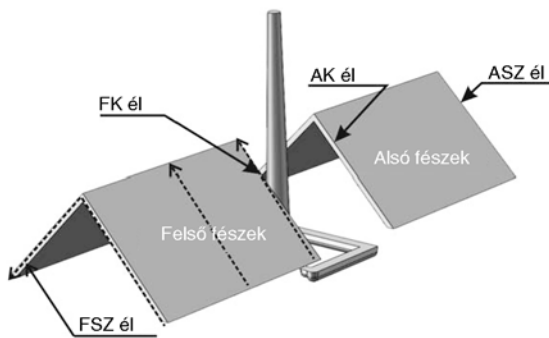
A vetemedést befolyásoló főbb paraméterek meghatározásához alkalmazott technológiai beállítások

Szerszámhőmérséklet, °C	30, 50
Ömledék hőmérséklet, °C	200, 260
Szerszámhőmérséklet-különbség, °C	0, 20
Fröccssebesség, cm ³ /s	25, 100
Utónyomás, bar	100, 500
Alapanyag üvegszáltartalma, m%	10, 20, 30

*Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Polimertechnika Tanszék

lönbséget, az ömledék hőmérsékletét, az utónyomás és fröccsebesség hatását is tanulmányoztuk (1. táblázat). A fröccsnyomásról utónyomásra külső jel alapján kapcsolunk át.

A sarokvetemedést befolyásoló fontosabb paramétereiket az 5, illetve a 95%-os relatív oldalhosszúságnál mért sarokszög alakulása alapján határoztuk meg. A felső és az alsó fészekben előállított próbatetek FSZ és ASZ élein (1. ábra) mért sarokszög nagyságára, az eredmények szerint, 5%-os relatív oldalhosszúság mellett sorrendben leginkább a gátkialakítás és gátpozíció, az utónyomás, a szerszámhőmérséklet és az alapanyag száltartalma volt hatással. 95%-os relatív oldalhosszúságnál pedig leginkább a szerszámhőmérséklet-különbség, a gát kialakítása és pozíciója, a szerszámhőmérséklet és végül az alapanyag száltartalma befolyásolta a sarokszöveget. Az ömledék hőmérséklet, az utónyomás, illetve a fröccsebesség hatása elenyésző volt.

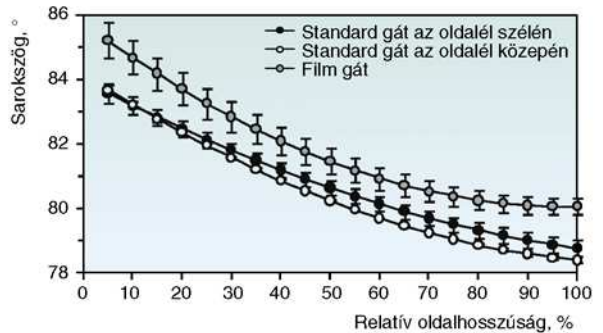


1. ábra. A próbatest élei megnevezésükkel az orientáció szempontjából vizsgált úthosszakkal

Az előkísérletek eredményeire támaszkodva részletesebben tanulmányoztuk a sarokdeformációt befolyásoló paramétereiket. Így az alapanyag száltartalmának, a mozgó szerszámfél álló oldalhoz viszonyított hőmérsékletének és az utónyomásnak a vetemedésre gyakorolt hatását vizsgáltuk különböző gátkialakítások és gátpozíciók mellett, azaz standard gát az oldalél közepén, standard gát az oldalél szélén, illetve film gát alkalmazásával. A technológiai beállításokat a 2. táblázat tartalmazza.

2. táblázat.
Fröccsöntési paraméterek
(Borealis Daplen HD120MO)

Fröccsnyomás korlát, bar	1000
Fröccsebesség, cm ³ /s	50
Utónyomás, bar	10, 300, 500
Utónyomási idő, s	5
Maradék hűtési idő, s	15
Ömledék hőmérséklet, °C	230
Álló szerszámfél hőmérséklete, °C	50
Mozgó szerszámfél hőmérséklete, °C	30, 50, 70

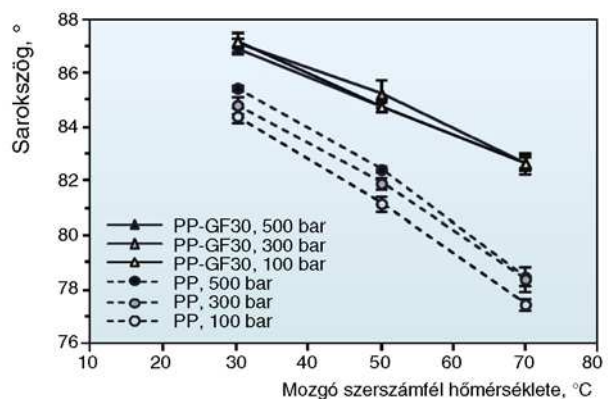


2. ábra. A gátkialakítás és a gátpozíció befolyása a sarokszögre a relatív oldalhosszúság mentén (az álló szerszámfél hőmérséklete: 50°C, a mozgó szerszámfél hőmérséklete: 70°C, utónyomás: 300 bar, alapanyag száltartalma: 20 m%)

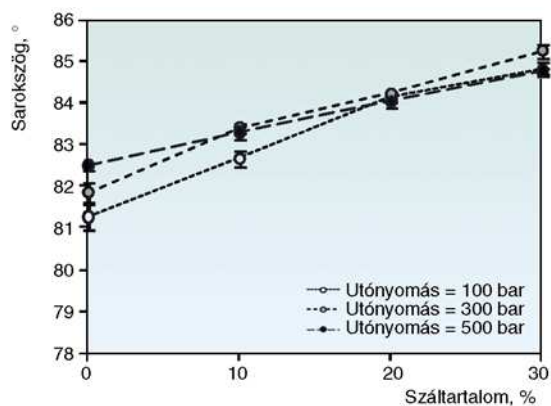
A különböző gátkialakítások és gátpozíciók befolyásolták a sarokvetemedést a próbatest relatív oldalhosszúsága mentén (2. ábra). Film gát alkalmazása esetén nagyobb sarokszög értékek adódtak a relatív oldalhosszúság vonalában a kisebb sarokvetedésnek köszönhetően. Standard gát használatkor viszont nagyobb deformáció alakult ki, mert az oldalak által bezárt szög mintegy 1,5°-kal kisebb volt, mint a film gátnál. Standard gát csak kismértékben befolyásolta a relatív oldalhosszúságnál kialakuló deformációt.

A sarokszög változását a relatív oldalhosszúság mentén összehasonlítva megállapítható, hogy az utónyomásnak csak erősítetlen polipropilén esetén van számottevő hatása (3. ábra). Az utónyomás növelésével a sarokszög értéke nő, és film gát alkalmazása esetén, 500 bar nyomásnál, a sarokhoz közel (5%-os relatív oldalhosszúságnál) eléri a 90°-ot.

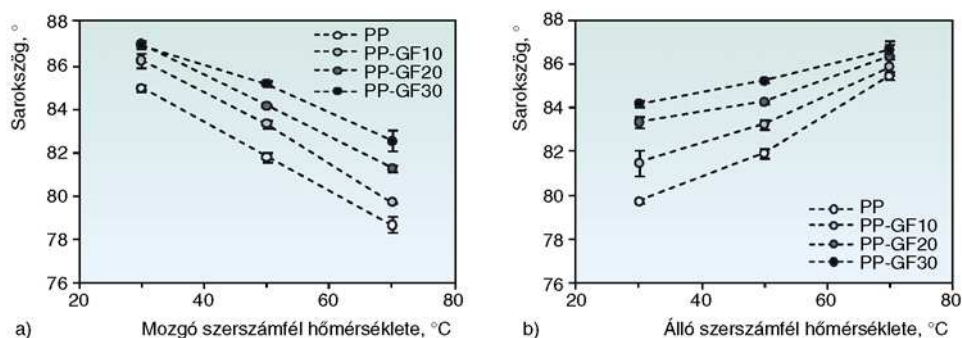
Az alapanyag üvegszáltartalmának vetemedésre gyakorolt hatását vizsgálva megállapítható, hogy növelésé-



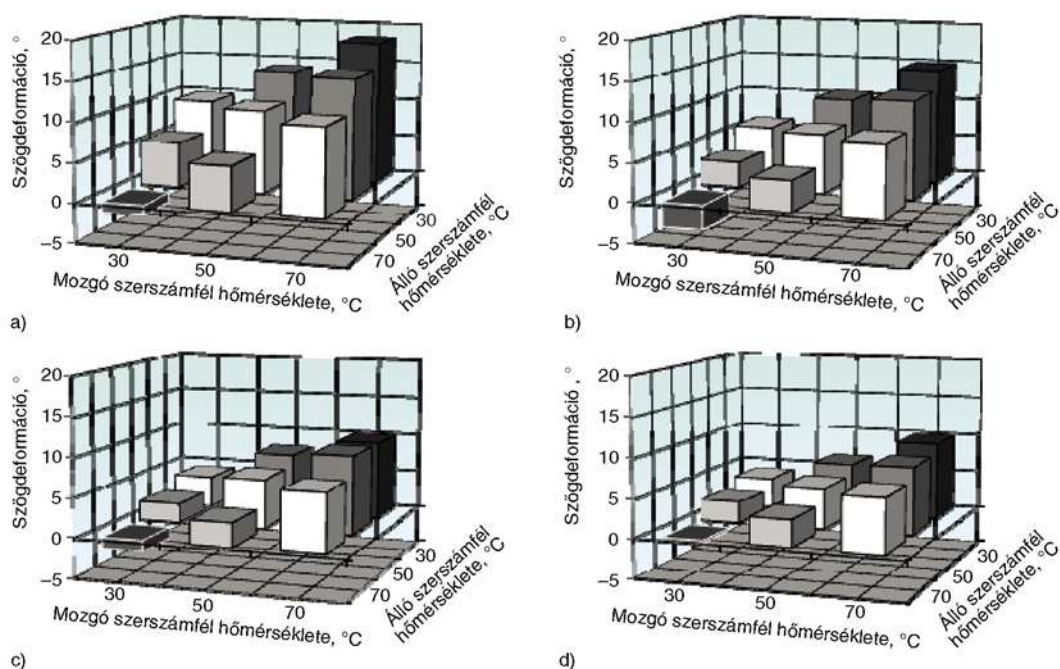
3. ábra. A sarokszög az utónyomás függvényében különböző mozgó szerszámfél hőmérsékletek esetén (film gát, az álló szerszámfél hőmérséklete: 50°C, relatív oldalhosszúság: 50%)



4. ábra. A sarokszög az utónyomás függvényében különböző száttartalom esetén (film gát, a mozgó szerszámfél hőmérséklete: 50°C, relatív oldalhosszúság: 50%)



5. ábra. A mozgó szerszámfél (a) és az álló szerszámfél (b) hőmérsékletének, valamint az alapanyag száttartalmának hatása a sarokszögre (film gát, relatív oldalhosszúság: 50%, utónyomás: 300 bar, (a) az álló szerszámfél hőmérséklete: 50°C, (b) a mozgó szerszámfél hőmérséklete: 50°C)



6. ábra. A szögdeformáció 100%-os relatív oldalhosszúságnál a szerszámfelek hőmérsékletének függvényében (a) PP-GF0, (b) PP-GF10, (c) PP-GF20, (d) PP-GF30 esetén

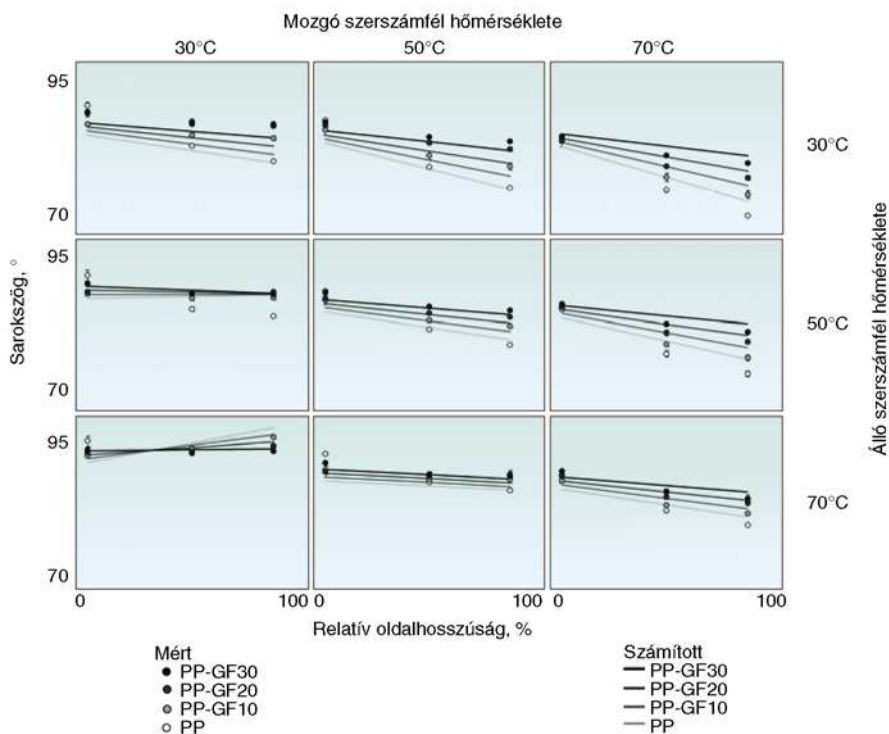
vel csökken a deformáció, növelve az oldalak által bezárt sarokszöget (4. ábra).

A vizsgált paraméterek közül a bezárt szög alakulását leginkább a mozgó szerszámfél hőmérséklete befolyásolja, azaz a szerszámfelek közti hőmérséklet-különbség (5a. ábra). A mozgó szerszámfél hőmérsékletének növekedésével csökken a próbatest oldalai által bezárt szög, nő a sarokvetemedés. Erre az eredményre alapozva, valamint arra, hogy az utónyomás csupán erősítetlen poli-propilén esetén befolyásolja a sarokszöget, a szerszámfelek hőmérsékletét tanulmányoztuk részletesebben. Eddig kizárólag a mozgó szerszámfél hőmérsékletét változtattuk, most vizsgálatainkat kiterjesztettük az álló szerszámfél hőmérsékletének a deformációra gyakorolt hatására is. A továbbiakban a mozgó, illetve az álló szer-

számfél hőmérsékletét is változtattuk, 30, 50 és 70°C-ra állítottuk be azt. Mind a mozgó, mind az álló szerszámfél hőmérséklete is jelentősen befolyásolta az oldalak által bezárt szöget (5b. ábra), növelése csökkentette a vetemedést.

Az oldalak által ténylegesen bezárt szög azonos szerszámhőmérsékletnél min-

den esetben kisebb volt a névleges 90°-nál: nem szálerősített alapanyag alkalmazásánál mintegy 10°-kal (6a. ábra), szálerősített alapanyag esetén csaknem 5°-kal (6b., 6c. és 6d. ábra). A szögdeformáció a vizsgált tartományban egyetlen esetben volt negatív, az alapanyag száltartalmától függetlenül, mégpedig akkor, ha a mozgó szerszámfél hőmérséklete 40°C-kal volt hidegebb az álló szerszámfélnél. Ekkor az oldalak által bezárt szög 90°-nál nagyobb lett. Feltételeztük, hogy az álló és mozgó szerszámfelek közti állandó hőmérséklet-különbséggel elérhető a deformációmentes állapot. A kísérleteket ennek felderítésére ez irányban folytattuk.

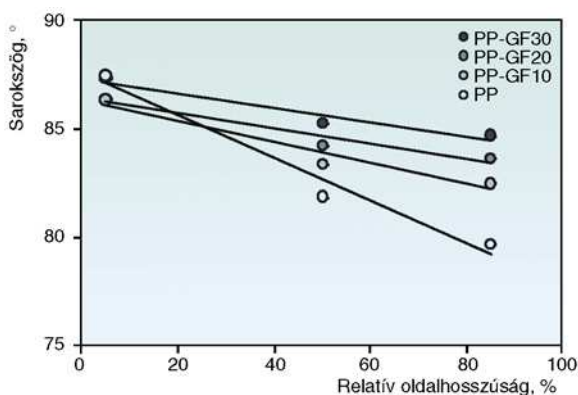


8. ábra. A sarokszög az üvegszáltartalom és a szerszámhőmérséklet függvényében film gát esetén

3. A sarokvetemedés és a befolyásoló paraméterek közötti összefüggés

A sarokdeformációt az oldalak által bezárt szöggel, valamint annak az oldalhosszúság menti változásával jellemeztük, utóbbit az oldalak görbületével határoztuk meg.

A sarokvetemedés változását a próbatest relatív oldalhosszúsága mentén is tanulmányoztuk az 5, 50 és 85%-os pontokban mért értékek összehasonlításával (7. ábra). A vetemedés a relatív oldalhosszúság mentén többnyire nőtt, változásának mértékét az üvegszáltartalom csökkentette. Amennyiben a mozgó szerszámfél hőmérséklete nagyobb volt, mint az álló szerszámfélné, a deformációt



7. ábra. A sarokszög a relatív oldalhosszúság mentén (film gát, a mozgó és az álló szerszámfél hőmérséklete: 50°C)

jelentősen befolyásolta az alapanyag száltartalma. Ezzel szemben, amikor az álló szerszámfél hőmérséklete volt nagyobb, nem volt szignifikáns különbség az eltérő üvegszáltartalmú próbatestek sarokvetemedése között (8. ábra).

A mérési eredmények alapján, 95%-os korreláció mellett, lineáris közelítéssel (1) jellemeztük az üvegszáltartalmú polipropilénből előállított próbatestek deformálódott oldalai által bezárt sarokszöveget a relatív oldalhosszúság mentén:

$$\alpha\left(L; \Phi; \frac{T_a}{T_m}\right) = A\left(\Phi; \frac{T_a}{T_m}\right) \cdot L + B\left(\Phi; \frac{T_a}{T_m}\right) \quad (1)$$

ahol α [°] az oldalak által bezárt szög, L [%] relatív oldalhosszúság, Φ [m%] száltartalom, T_a/T_m [-] az álló és a mozgó szerszámfél hőmérsékletének aránya, A és B az alapanyag száltartalmától és a szerszámfelek hőmérsékletének arányától függő kifejezések. Az (1) összefüggést kifejtve kapjuk:

$$\alpha = \Phi \cdot \left(f_1 \cdot \frac{T_a}{T_m} \cdot L + f_2 \cdot L + i_1 \cdot \frac{T_a}{T_m} + i_2 \right) + g_1 \cdot \frac{T_a}{T_m} \cdot L + g_2 \cdot L + j_1 \cdot \frac{T_a}{T_m} + j_2 \quad (2)$$

ahol a paraméterek

$$f_1 = -2,09 \cdot 10^{-3} / (\% \cdot m\%), f_2 = 2,89 \cdot 10^{-3} / (\% \cdot m\%), g_1 = 8,511 \cdot 10^{-2} / \%, g_2 = -1,3576 \cdot 10^{-1} / \%$$

$$i_1 = 7,821 \cdot 10^{-3} / \text{m}\%, \quad i_2 = 4,713 \cdot 10^{-2} / \text{m}\%, \\ j_1 = 2,53355^\circ \text{ és } j_2 = 82,16^\circ$$

film gát alkalmazásokor. A számértékeket globális adatillesztés módszerével határoztuk meg.

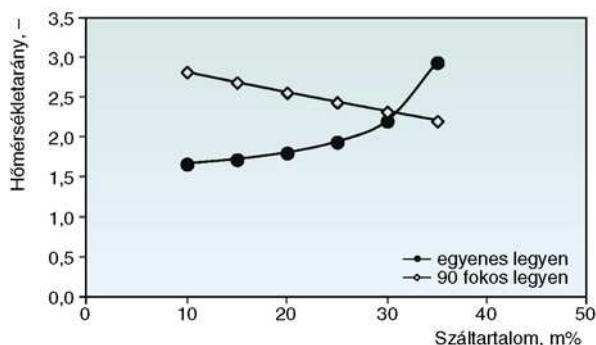
A (2) kifejezést két komponensre szétválasztva meghatározható egyrészt az a technológiai feltétel, amelynél a próbatest oldalai 90° -ot zárnak be egymással, másrészt az, amely szerint az oldalak által bezárt szög nem változik a relatív oldalhosszúság vonalában, vagyis az oldal egyenes marad. Tehát a (2) összefüggés alapján a sarokszög a relatív oldalhosszúság mentén abban az esetben nem változik, ha $d\alpha/dL = \text{állandó} = 0$, ekkor a (3) összefüggés érvényes:

$$\frac{T_a}{T_m} = - \frac{\Phi \cdot f_2 + g_2}{\Phi \cdot f_1 + g_1} \quad (3)$$

Ha a sarokszög $\alpha = 90^\circ$ és $L = 0$, akkor a (4) összefüggés érvényes:

$$\frac{T_a}{T_m} = \frac{90 - (\Phi \cdot i_2 + j_2)}{\Phi \cdot i_1 + j_1} \quad (4)$$

A (3) és (4) összefüggésekkel meghatározható egy elméleti száztartalom, valamint egy elméleti hőmérsékletarány, amelyeknél olyan próbatest fröccönthető, amelynek oldalai a relatív oldalhosszúság mentén végig 90° -ot zárnak be egymással (9. ábra). Ez a számítások alapján $\Phi = 31 \text{ m}\%$ és $T_a/T_m = 2,3$ esetén adódna. Mindez azt mutatja, hogy a sarokvetemedés kiküszöbölhető pusztán a technológia megfelelő beállításával, illetve egy meghatározott száztartalommu anyag használatával. A számított beállításokhoz közeli, 30 m% üvegszáztartalmú polipropilén, valamint $T_a = 70^\circ\text{C}$ és $T_m = 30^\circ\text{C}$ szerszámhőmérséklet mellett fröccsöntött próbatestek oldalai által bezárt sarokszög $89,77^\circ$ és $90,33^\circ$ között ingadozott a relatív oldalhosszúság mentén, ami a számítások helyességét bizonyítja. Emellett a számítások szerinti 1,67 hőmérsékletarány és 10 m% üvegszáztartalom mellett egyenes oldalú próbatesteket lehet előállítani (9. ábra). Ez a kísérleti eredmények alapján szintén igazolható, mi-

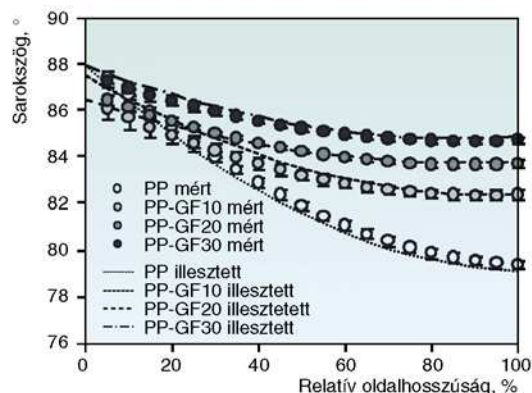


9. ábra. Elméleti száztartalom és szerszámhőmérséklet-arány a sarokvetemedés-mentes állapot eléréséhez (film gát)

vel $T_a = 50^\circ\text{C}$ és $T_m = 30^\circ\text{C}$ szerszámhőmérséklet esetén a relatív oldalhosszúság vonalában az oldalak által bezárt szög $86,36^\circ$ és $87,07^\circ$ között változik. A leírás abszolút (Kelvin) hőmérsékletekre is érvényes, a könnyebb gyakorlati alkalmazhatóság érdekében azonban az összefüggésben a hőmérsékletek Celsius fokban szerepelnek.

4. Sarokvetemedés ívességének jellemzése

A sarokvetemedés hatására nemcsak a próbatest oldalai által bezárt szög változik, hanem az oldalak ívesen is deformálódnak. A kialakuló vetemedés által okozott sarokszögváltozást, 0,99-es korrelációval, harmadfokú görbével közelítettük (10. ábra).



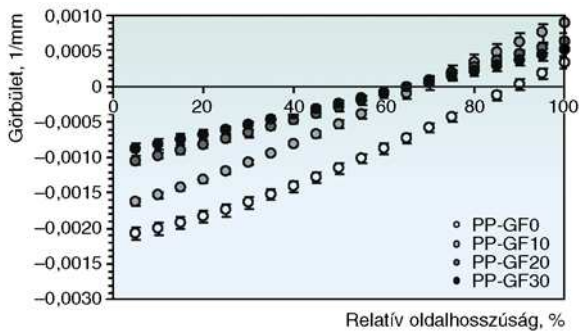
10. ábra. Sarokszög változása mért, illetve harmadfokú illesztett görbék alapján (film gát, az álló és a mozgó szerzősfél hőmérséklete: 50°C)

A próbatest deformációjának meghatározásához nemcsak a próbatest oldalai által bezárt szöget és annak relatív oldalhosszúság menti alakulását vizsgáltuk, hanem az oldalak ívességéből adódóan azok görbületét is összehasonlítottuk különböző beállítások esetén. A képfeldolgozó szoftver a próbatest oldalaira illesztett harmadfokú $y = f(x)$ görbékkel határozza meg a görbületet:

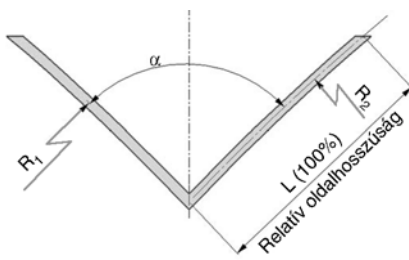
$$g = \frac{y'''}{(1 + y'^2)^{3/2}} \quad (5)$$

A görbületet az oldal közepén és az oldal szélén elhelyezett standard gát, illetve filmgát esetén is vizsgáltuk (11. ábra). A felső fészekben készült próbatest FSZ élén (1. ábra), továbbá mindkét próbatest száron (12. ábra) mértük az ívességet. Negatív értékeknél a konvex, pozitív értékeknél a konkáv görbület dominál a relatív oldalhosszúság mentén az oldalak által közbezárt szög felől szemlélve.

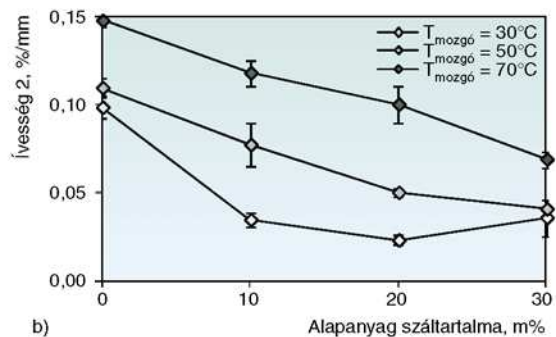
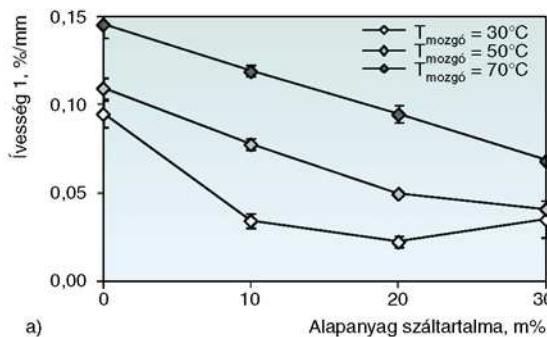
A mért R_1 , R_2 görbületi értékek pontthalmazaira az (5) egyenlet szerinti harmadfokú görbét illesztettünk, amelyeket a relatív oldalhosszúság függvényében integráltunk:



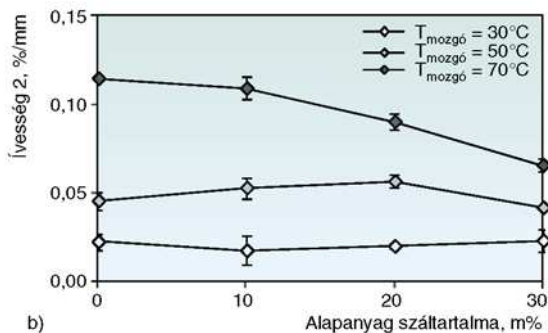
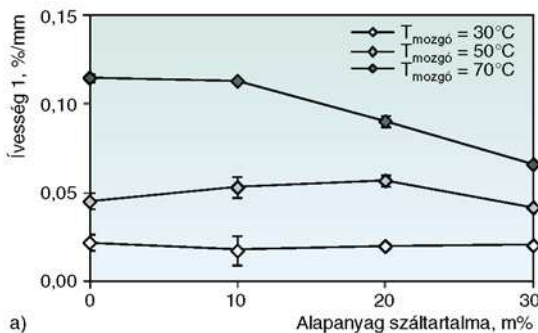
11. ábra. Az ívesség a relatív oldalhosszúság mentén különböző alapanyagok esetén (film gát, az álló és a mozgó szerszámfél hőmérséklete: 50°C)



12. ábra. A próbatest



13. ábra. A mozgó szerszámfél hőmérsékletének hatása az (a) ívesség 1 és (b) ívesség 2 változására az alapanyag száttartalmának függvényében (film gát, az álló szerszámfél hőmérséklete: 50°C)



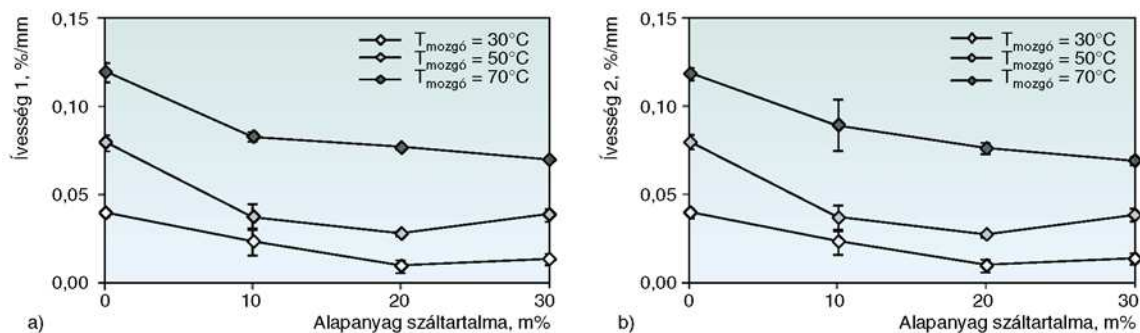
14. ábra. A mozgó szerszámfél hőmérsékletének hatása az (a) ívesség 1 és (b) ívesség 2 változására az alapanyag száttartalmának függvényében (standard gát a szélén, az álló szerszámfél hőmérséklete: 50°C)

$$G = \int_{L=0\%}^{100\%} |g| dx \quad (6)$$

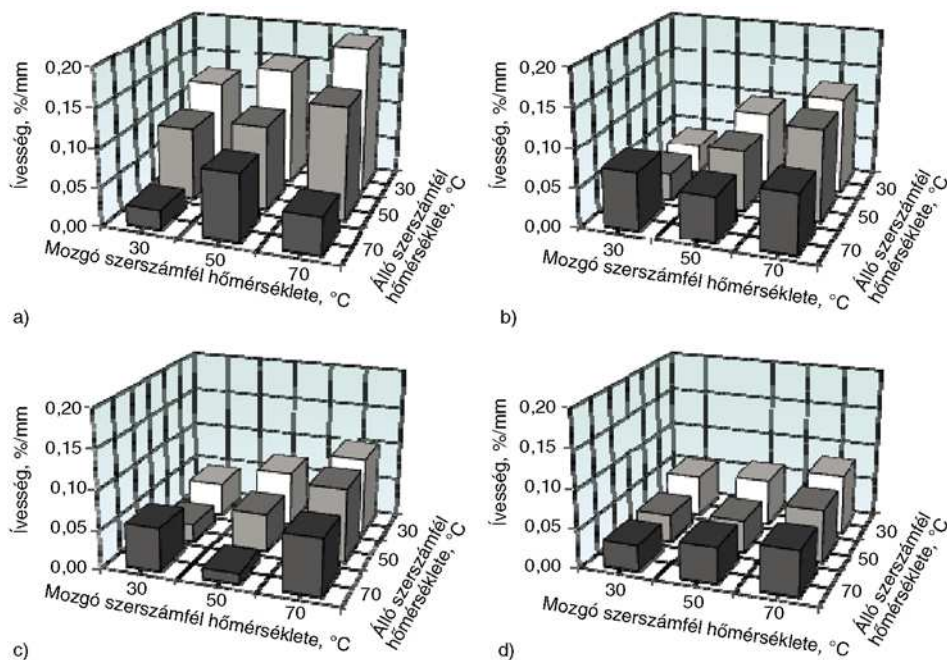
A kapott értékek az ívesség mértékére utalnak. A próbatest két szárának ívességét (ívesség 1 és ívesség 2) összehasonlítva, szignifikáns különbség egyetlen gátalakítás, illetve gátpozíció esetén sem figyelhető meg (13–15. ábra). 50°C-os álló szerszámfél hőmérsékletnél, film gát alkalmazásakor az alapanyag száttartalmának, illetve a mozgó szerszámfél hőmérsékletének növelésével csökken az oldalak ívessége (13. ábra). Az az ívesség 30°C-os mozgó szerszámfél hőmérsékletnél mintegy 20 m% üvegszáttartalomnál minimális.

Amikor a próbatestek kitöltése az oldalél szélén történik standard gáton keresztül, csak akkor változik jelentősen az ívesség, ha a mozgó szerszámfél hőmérséklete 70°C. Alacsonyabb hőmérsékleteknél az ívesség csak jelentéktelen mértékben változik a száttartalom növelésével (14. ábra).

Amennyiben a gát az oldalél közepén helyezkedik el, a próbatestek oldalainak ívességét szintén csökkenti a száttartalom növelése (15. ábra). 10 m% üvegszáttartalom felett az ívességet csak kismértékben befolyásolja a száttartalom növekedése. Azonos szerszámfél hőmérsékletnél 20 m% száttartalomnál adódik minimális ívesség.



15. ábra. A mozgó szerszámfél hőmérsékletének hatása az (a) ivesség 1 és (b) ivesség 2 változására az alapanyag száttartalmának függvényében (standard gát közepén, az álló szerszámfél hőmérséklete: 50°C)



16. ábra. A mozgó és álló szerszámfél hőmérsékletének hatása az oldal ivességére (a) PP, (b) PP-GF10, (c) PP-GF20, (d) PP-GF30 alapanyag esetén (film gát)

Az álló és mozgó szerszámfél hőmérsékletének, valamint az üvegszáttartalom változtatásának együttes vizsgálatával megállapítottuk, hogy a száttartalom nagyobb mértékben befolyásolja az ivességet (16. ábra). Szálerősítetlen polipropilén esetén az álló szerszámfél hőmérsékletének növelésével és a mozgó szerszámfél hőmérsékletének csökkentésével szintén kisebb az oldal ivessége, változtatásuk hatása szignifikáns (16a. ábra). Amennyiben az alapanyag szálerősített, az ivesség mértéke minden vizsgált szerszámhőmérséklet-kombináció esetén jelentősen csökken az erősítetlen polipropilénhez képest. PP-GF10, illetve PP-GF20 alapanyag esetén a próbatest oldalainak ivességére még hatást gyakorol a szerszám hőmérséklete (16b. és 16c. ábra). PP-GF30 anyagánál viszont az ivesség minden esetben kicsi, továbbá a különböző szerszámhőmérsékletek közötti eltérés csekély (16d. ábra).

5. Összefoglalás

Fröccsöntött termékek sarokvetemedése a technológiai paraméterek megfelelő beállításával kiküszöbölhető. A vetemedés a saroktól távolodva változik, amit főképpen az erősítőanyag-tartalom és a szerszámfelek hőmérsékletének aránya befolyásol. A deformálódott oldalak által bezárt szögbe levezetett összefüggést film gát alkalmazásával, széles szerszámhőmérséklet-tartomány (30–70°C) és üvegszáttartalom (10–30 m%) mellett polipropilén alapanyaggal igazoltuk.

A fröccstermékek oldalai mentén kialakuló vetemedés, 0,99-es korrelációval, harmadfokú görbével jól közelíthető. Az oldalak ivességét a harmadfokú görbéből, a görbületi függvény alatti területtel definiáltuk. Kimutattuk, hogy az ivességet a gát kialakítása és pozíciója befolyásolja, és az ivesség az üvegszáttartalom növekedésével csökken.

Irodalomjegyzék

- [1] Fischer, J. M.: Handbook of molded part shrinkage and warpage, *Plastics Design Library/William Andrew, Inc.*, Norwich, 2003.
- [2] Jansen, K. M. B.; van Dijk, D. J.; Husselman, M. H.: Effect of processing conditions on shrinkage in injection molding, *Polymer Engineering and Science*, 38, 838–846 (1998).
- [3] Postawa, P.; Koszkuł, J.: Change in injection moulded parts shrinkage and weight as a function of processing conditions, *Journal of Materials Processing Technology*, 162–163, 109–115 (2005).
- [4] Altan, M.: Reducing shrinkage in injection moldings via the Taguchi ANOVA and neural network methods, *Materials and Design*, 31, 599–604 (2010).
- [5] Liao, S. J.; Chang, D. Y.; Chen, H. J.; Tsou, L. S.; Ho, J. R.; Yau, H. T.; Hsieh, W. H.; Wang, J. T.; Su, Y. C.: Optimal process conditions of shrinkage and warpage of thin-wall parts, *Polymer Engineering and Science*, 44, 917–928 (2004).
- [6] Mlekusch, B.: Fibre orientation in short-fibre-reinforced thermoplastics II. Quantitative measurements by image analysis. *Composites Science and Technology*, 59, 547–560 (1999).
- [7] Régnier, G.; Dray, D.; Jourdain, E.; Le Roux, S.; Schmidt, F. M.: A simplified method to determine the 3D orientation of an injection molded fiber-filled polymer, *Polymer Engineering and Science*, 48, 2159–2168 (2008).
- [8] Bernasconi, A.; Cosmi, F.; Dreossi, D.: Local anisotropy of injection moulded fibre reinforced polymer composites, *Composites Science and Technology*, 68, 2574–2581 (2008).
- [9] Lutz, W.; Herrmann, J.; Kockelmann, M.; Hosseini, H. S.; Jäckel, A.; Schmauder, S.; Predak, S.; Busse, G.: Damage development in short-fiber reinforced injection molded composites, *Computational Material Science*, 45, 698–708 (2009).
- [10] Mlekusch, B.: The warpage of corners in the injection moulding of short-fibre-reinforced thermoplastics, *Composites Science and Technology*, 59, 1923–1931 (1999).
- [11] Fahy, E. J.: Modeling warpage in reinforced polymer disks, *Polymer Engineering and Science*, 38, 1072–1084 (1998).
- [12] Vincent, M.; Giroud, T.; Clarke, A.; Eberhardt, C.: Description and modeling of fiber orientation in injection molding of fiber reinforced thermoplastics, *Polymer*, 46, 6719–6725 (2005).
- [13] Jansen, K. M. B.; van Dijk, D. J.; Keizer, K. P.: Warpage of injection moulded plates and corner products, *International Polymer Processing*, 13, 417–424 (1998).
- [14] Ammar, A.; Leo, V.; Régnier, G.: Corner deformation of injected thermoplastic parts, *International Journal of Forming Processes*, 6, 53–70 (2003).
- [15] Erhard, G.: *Konstruieren mit Kunststoffen*, Hanser Verlag, München, 1999.
- [16] Shoemaker, J.: *Moldflow design guide*. Hanser Verlag, Munich, 2006.
- [17] Zhou, H.; Li, D.: Modelling and prediction of weld line location and properties based on injection moulding simulation, *International Journal of Materials and Product Technology*, 21, 526–538 (2004).