

A fröccsnyomás és a gravitáció hatása a fröccsöntésre

A műanyagok folyóképességét gyakorlatilag nulla nyírósebesség mellett mérik, a fröccsöntés körülményei között – magas hőmérsékleten, nagy nyírósebesség mellett – a viszkozitás azonban erősen megváltozik. Kevés adat van arról, hogy a befröccsentéskor fellépő igen magas nyomás hogyan módosítja tovább az ömledék folyóképességét. A linzi egyetem kutatói ezt a hiányt próbálják pótolni. A fröccsöntő üzemekben a gravitációt is figyelmen kívül hagyják. Egy amerikai vállalatnál kimutatták, hogy bizonyos esetekben már a szerszám egyszerű elfordításával is javítani lehet a termék minőségét.

Tárgyszavak: műanyag-feldolgozás; fröccsöntés; viszkozitás; befröccsentés; fröccsnyomás-viszkozitás összefüggése; gravitáció hatása.

A befröccsentéskor fellépő nyomás hatása az ömledék viszkozitására

Hogy egy fröccsgépen olyan formadarabokat is lehessen gyártani, amelyeken nagy a folyási út és a falvastagság aránya, a gépgyártó lehetővé teszi a magas fröccsnyomás alkalmazását. A feldolgozó azonban legtöbbször nincs annak tudatában, hogy *a nyomás növelése csökkenti az ömledék viszkozitását és az energiahatékonyságra is negatív hatással van.*

A fröccsöntő üzemekben folyamatosan csökkentik a gyártmányok falvastagságát, mert ezáltal anyagot takarítanak meg és a ciklusidőt is rövidíteni tudják. Vannak olyan termékek – ilyenek a szűrők és a fényvezető elemek – amelyek kis falvastagsága funkcionális követelmény. *Az egyre jobb folyóképességű polimerek fejlesztése is támogatja a falvastagság mérséklését.* A befröccsentés sebessége és a formadarab geometriája (a folyási út és a falvastagság aránya) mellett az alkalmazott műanyag folyóképességét a szerszámüregeg kitöltéséhez szükséges fröccsnyomás is befolyásolja. A vékony falú termékek gyártására kifejlesztett nagy teljesítményű szervoelektromos hajtású fröccsgegekben a csiga előtolási sebessége befröccsentéskor 30 ms alatt 800 mm/s-ra növekszik és 2400 bar vagy annál nagyobb fröccsnyomást képes kifejteni.

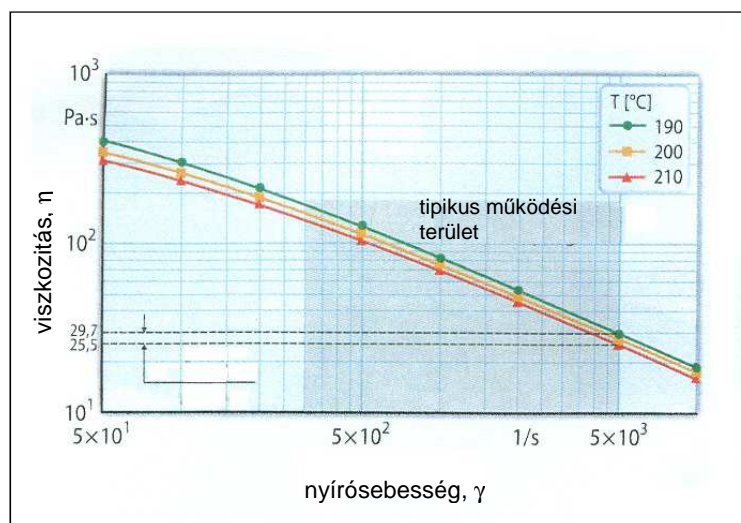
A fröccsöntő üzemekben a műanyagömledék folyóképességét még ma is az MFR érték szerint ítélik meg, a tömeg szerinti folyóképességet g/10 min-ben, a térfogat szerinti folyóképességet cm³/10 min-ben. Ezt az értéket azonban nagyon kis nyírósebességgel mérik, gyakorlatilag az ún. nulla viszkozitás (η_0) tartományában. Fröccsöntéskor azonban – különösen vékony falú termékek fröccsöntésekor vagy szűk szakaszon áthatoláskor – jóval nagyobb nyírósebességek lépnek fel, ezért a fröccsöntés körülményei közötti folyóképességről a MFR értékek nem sokat árulnak el. A bizonyta-

lanságot a nagy fröccsnyomás tovább növeli. Emiatt a szimulációkban gyakran hibás következtetéseket vonnak le a fröccsöntés folyamatától és a fröccsgépek kialakításáról.

A műanyagömledék viszkozitását alapvetően a molekulaszervezet határozza meg. A nagy molekulatömegű vagy hosszú láncú elágazásokat tartalmazó polimerömledékek viszkozitása magas. Az adalékok, pl. a csúsztatók befolyásolják a folyóképességet. Egy műanyag molekulatömeg-eloszlásra alapított folyóképesség-beállításakor mindig kompromisszumot kell kötni az alkalmazáshoz szükséges anyagi tulajdonságok és a feldolgozhatóság között.

A feldolgozás folyamatában az ömledék viszkozitása a feldolgozás paramétereitől függ. *A viszkozitás a növekvő nyírósebesség hatására csökken.* A befröccsentési sebesség hatása a viszkozításra különösen a befröccsentés időszakában nagy, amikor a nyírósebesség elérheti az 5000 s^{-1} értéket. A viszkozitás ilyen körülmények között jelentősen csökken.

A viszkozitást a hőmérséklet emelkedése is csökkenti (1. ábra). Mértékét egyrészt a molekulaláncok mozgékonyasága, másrészt a molekulák közötti szabad térfogat határozza meg. Az ömledék-hőmérséklet növekedésekor a molekulák mozgékonyabbak lesznek, és a hőtágulás következtében a szabad térfogat is tágul. Ennek hatására kevesebb molekulalánc között jöhet létre interakció, emiatt csökken a viszkozitás. Befröccsentéskor az ömledék hőmérsékletét a csiga előterében lévő ömledék hőmérséklete, a szerszámfal hőmérséklete és a sűrűdésből eredő hőmérséklet alakítja ki.



1. ábra Egy polipropilénömledék viszkozitásának függése a nyírósebességtől és a hőmérséklettől. Az ömledék hőmérsékletének 20 °C -os növelése (190 °C -ról 210 °C -ra) 5000 s^{-1} nyírósebesség mellett a viszkozitást 16%-kal ($0,8\%/^{\circ}\text{C}$) csökkenti.

A műanyagömledék viszkozitását befolyásolja az a nyomás is, amely az ömledék mozgása alatt egy-egy adott szakaszban rá hat. Ha az ömledék valahol nagyobb nyomás alá kerül, az csökkenti a szabad térfogatot, gyakoribbá teszi a molekulák közötti interakciókat, ennek következtében növeli az ömledék viszkozitását.

A nyomás viszkozitásra gyakorolt hatásáról kevés adatot lehet találni, mert azt sokkal nehezebb mérni, mint a nyomás hőmérsékletfüggését. Az ausztriai Johannes Kepler Egyetemen (Linz) ezt a hiányt próbálták pótolni egy kutatás keretében.

A nyomás viszkozitásra gyakorolt hatását az ún. β nyomáskoefficiens segítségével lehet kiszámítani egy ismert referencianyomás, ρ_0 birtokában a következő egyenletből

$$\eta(\rho) = \eta(\rho_0) e^{\beta(\rho - \rho_0)} \quad (1)$$

β nyomáskoefficiens háromféle módon írható le:

$$\beta_0 = \left(\frac{\partial \eta_0}{\partial \rho} \right)_T \quad (2)$$

$$\beta' = \left(\frac{\partial \eta}{\partial \rho} \right)_{\gamma, T} \quad (3)$$

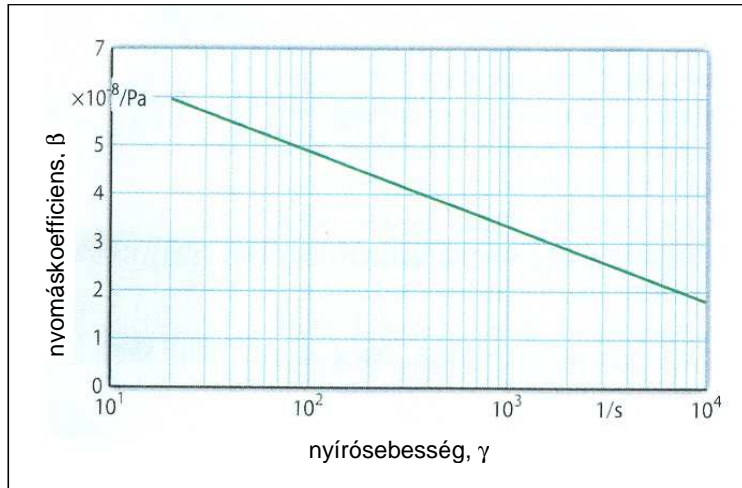
$$\beta'' = \left(\frac{\partial \eta}{\partial \rho} \right)_{\tau, T} \quad (4)$$

A 2. egyenlet β_0 értékét konstans hőmérsékleten, nulla viszkozitás mellett írja le. Mivel azonban fröccsöntés közben nulla viszkozitás nem fordul elő, ennek az egyenletnek a gyakorlati haszna csekély. Több hasznát lehet venni a 3. egyenletnek, amely β' értékét konstans nyírósebesség és konstans hőmérséklet, és a 4. egyenletnek, amely β'' értékét konstans nyírófeszültség és konstans hőmérséklet mellett definiálja.

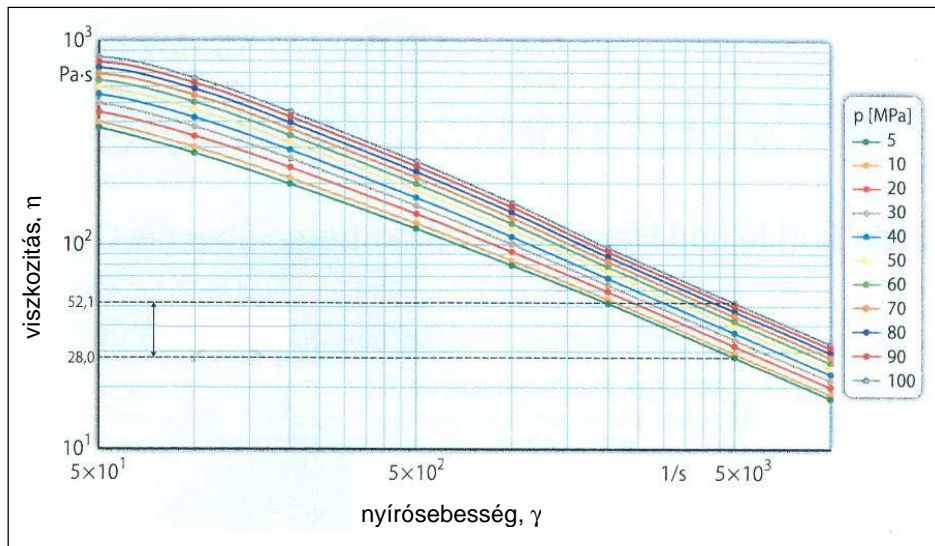
A kutatók a továbbiakban a 3. egyenlet alapján végeztek számításokat, mert egyrészt a viszkozitás nyomásfüggését nagynyomású kapillárreométerben konstans nyírósebesség mellett lehet mérni, másrészt befröccsöntéskor első közelítésben szakaszosan konstans a nyírósebesség és a hőmérséklet. A Göttfert cég *Reograph 25* típusú nagy nyomású kapillárreométerében végzett mérések alapján kapták a 2. ábrát, amely a vizsgált polipropilén β nyomáskoefficiensének nyírósebességtől való függését mutatja.

A kutatók ezután két polimer, egy 2,16 kg terhelés alatt 190 °C-on mérve 11 g/10 min folyásindexű (MFR értékű) polietilén (PE-HD) és egy 2,16 kg terhelés alatt 230 °C-on mérve 30 g/10 min folyásindexű polipropilén viszkozitását hasonlították össze a nyomás függvényében. Amikor a PE-HD vizsgálatokor a nyomást 50 barról 1000 barra növelték, az ömledék viszkozitása 50 s⁻¹ nyírósebesség mellett 92%-kal emelkedett. Amikor növelték a nyírósebességet, a nyomás hatása mérséklődött, de 5000 s⁻¹ nyírósebesség mellett még mindig 27%-kal nagyobb volt a kiindulási értéknél. A PP viszkozitása 50 s⁻¹ nyírófeszültség mellett 122%-kal nőtt meg, amikor 50-bar helyett 1000 bar nyomással vizsgálták, 5000 s⁻¹ nyírófeszültség mellett pedig a viszkozitás-növekedés 86%-át őrizte meg (3. ábra).

Ezek az eredmények azt bizonyítják, hogy a fröccsöntés folyamata alatti nyomásviszonyok jelentősen befolyásolják az ömledék aktuális viszkozitását, és ezt a jelenséget nem lehet figyelmen kívül hagyni.



2. ábra A vizsgált PP nyomáskoefficiensének függése a nyírósebességtől



3. ábra A vizsgált PP viszkozitásának függése a nyírófeszültségtől és a nyomástól. Ha a nyomást 5 MPa-ról 100 MPa-ra (950 bar), a nyírósebességet pedig 5000 s^{-1} -re növelték, az ömledék viszkozitása 24,1 Pa.s-ra emelkedett (86%, ill. 9%/100 bar)

A kutatók ezután számításokat végeztek annak becslésére, hogy milyen hatása lehet a nyomás miatt bekövetkező viszkozitásváltozásnak a szükséges záróerőre. Feltételezték, hogy egy négyfészkés szerszámban PP-ből 140 mm hosszú (L), 70 mm széles (B) és 0,5 mm magas (H) méretű formadarabokat kell fröccsönteni. Egy ilyen résszerű szerszámüregben a nyomáscsökkenés közelítőleg a következő egyenlettel írható le:

$$\Delta\rho = \frac{12\nu\eta_{rep}}{H^2} L \quad (5)$$

ahol v az ömledékfront átlagos sebessége. A reprezentatív viszkozitás η_{rep} a reprezentatív nyírósebességéből:

$$\gamma_{reo} = \frac{6v}{H} \cdot 0,772 \quad (6)$$

és a Carreau egyenletből:

$$\eta_{rep} = \frac{\eta_0}{(1 + \lambda \gamma_{rep})^n} \quad (7)$$

számítható ki, amelyben η_0 , λ (a newtoni és a struktúrviszkózus folyadékállapot átmeneti állapotában mért nyírósebesség reciproka) és n anyagi jellemzők. (n definiálása hiányzik – a fordító megjegyzése).

A befroccsentés fázisában szükséges zárónyomást a szerszámfészek felületéből (A), lehet megbecsülni:

$$F = \frac{\Delta\rho}{2} \cdot A_p \quad (8)$$

Az átlagos fröccssebességet úgy választották meg, hogy a szerszámfészekben a nyírósebesség 5000 s^{-1} körül legyen. Egy 30 mm átmérőjű csigával ez kb. 115 mm/s. A szerszámkitöltés időtartama így 0,26 s volt. Ha eltekintenek a viszkozitás nyomásfüggésétől, a fészek kitöltéséhez az 5. egyenlet szerint 806 bar nyomás szükséges, és ebben a szakaszban a záróerőnek 395 kN-nak kell lennie a 8. egyenlet értelmében. Ha figyelembe veszik azt, hogy a fészekben fellépő átlagos nyomás, 403 bar hatására az ömledék 22,2 Pa.s-os viszkozitása 36,9 Pa.s-ra nő, kiderül, hogy a fészek kitöltéséhez 806 bar helyett 1338 bar-ra van szükség, emiatt a záróerőt 66%-kal, azaz 395 kN helyett 656 kN-ra kell növelni.

A teljesség érdekében meg kell jegyezni, hogy a számításokban nem vették figyelembe sem a beömlőcsatornák átmérőjének a falakon megdermedő anyagból eredő szűkülését, sem a termodinamikusan hatásokat.

A mérési eredmények feldolgozása és továbbgondolása bemutatta, hogy a nagy nyomás milyen erősen megváltoztathatja a műanyagömledék viszkozitását. Mivel a befroccsentés fázisában a szerszámban igen nagy erők lépnek fel, ezt a hatást nem lehet figyelmen kívül hagyni. A legtöbb szimulációs csomagban ugyan elméletileg figyelembe lehet venni a fellépő nyomás hatását, a különböző műanyagok ehhez szükséges adatai jelenleg nem állnak rendelkezésre. Feltétlenül szükséges, hogy a műanyaggyártók a jövőben ezeket a feldolgozók számára elérhetővé tegyék.

Nem elhanyagolható a gravitáció hatása sem

Ha a fröccsöntő üzemben a szerszámból kikerülő formadarabok nem tökéletesek, a feldolgozóknak azt tanácsolják, hogy fordítsák el a szerszámot 90 vagy 180 fokkal, mert *lehetséges, hogy a fészek tökéletlen kitöltésének oka a gravitáció.* Ezt a legtöbbben képtelenségnek tartják, mert úgy vélik, hogy a fröccsöntés folyamata alatt fellépő nagy nyomások és sebességek mellett a gravitáció hatása nem érvényesülhet.

A fröccsöntő üzemekben legtöbbször vékony falú termékeket gyártanak, és eközben a műanyagömladék mindig közvetlen érintkezésben van a szerszám falával. Amikor a meleg ömladék rákerül a viszonylag hideg szerszámfalra, lehül és rátapad a falra. A nagy nyomás alatt előrehaladó ömladékfronton a gravitációnak semmiféle látható vagy mérhető hatása nem érzékelhető.

Más a helyzet, ha a fröccsöntött termék fala vastag. Ilyenkor a falvastagságtól, a feldolgozott anyagtól, a szerszámfészek orientációjától, a beömlőnyílás helyétől és más faktoroktól függően a gravitáció is beleszólhat a fröccsöntés sikerébe.

Tessék elképzelni, hogy mi történik a fészekben, ha a belövellő ömladék nem ütközik a falba, amelyre feltapadhat. Természetesen leesik a fészek fenekére, és ott tapad meg, és erre rétegelődik rá a további ömladék. Ha egy gépből tisztításkor szerszám nélkül hajtják ki az ömladékot, az is lehullik a fúvóka alatti lapra és ott kupacot alkot.

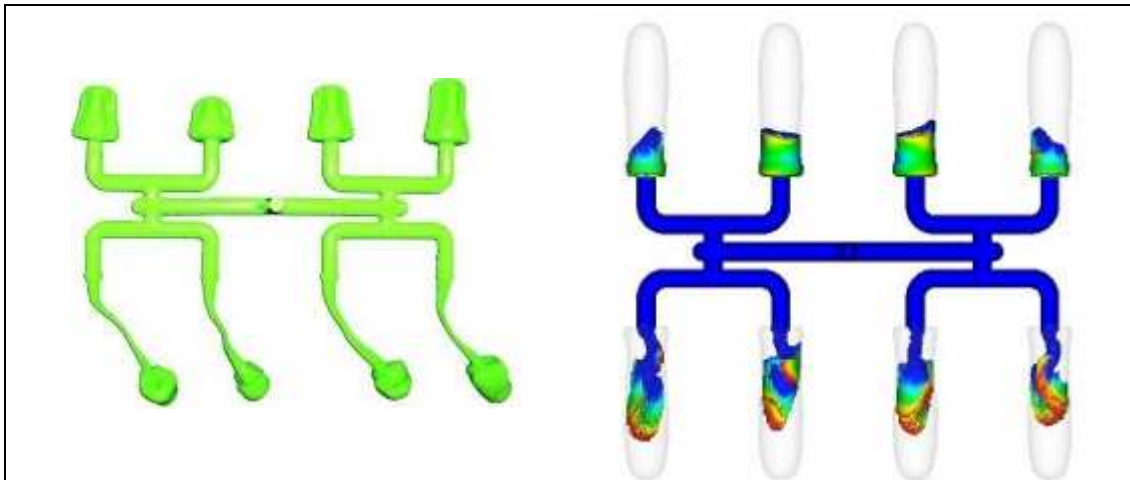
A Beaumont Technologies, Inc. (Erie, Pennsylvania, USA) kutatói korábban a nyíró hatás vizsgálatára készítették el a *4. ábra bal oldalán látható* négyfészkés hideg csatornás legyezőbeömléses szerszámot, amelyben 19 mm vastag falú terméket állítottak elő. A gravitáció a jobb oldali képen figyelhető meg. Amikor az ömladék behatolt a szerszámüregbe, nem tudott azonnal hozzátapadni a falra, ezért a fészek fenekén halmozódott fel.



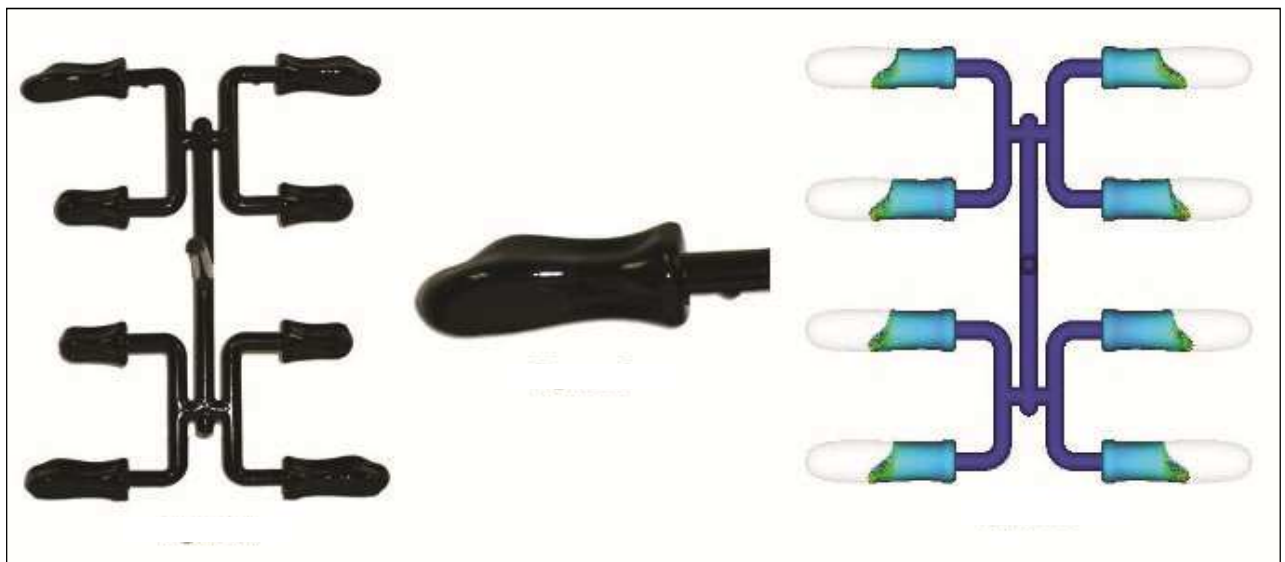
4. ábra Egy 19 mm falvastagságú termék négyfészkés gyártószerszáma (bal oldali kép) és a folyási kép részleges kitöltés után

Egy másik kísérletben nyolcfészkés szerszámban vastag falú csavarhúzónyelet fröccsöntöttek. Ha a szerszám helyzetéből következően a csavarhúzónyelelek függőleges irányúak voltak, az szerszám részleges kitöltésekor az alsó fészekben több ömladékot találtak, mint a felsőkben (*5. ábra bal oldali képe*), mert az ömladék itt sem érintkezett azonnal a fallal és a fészek aljára hullott. Amikor a fészek kitöltését a gravitáció figyelembevételével szoftverrel szimulálták, részleges kitöltést feltételezve a valóságos viszonyokhoz hasonló képet kaptak (*5. ábra jobb oldali képe*).

A csavarhúzónyelelek szerszámát 90°-kal elfordítva (a nyeleket formázó fészeket vízszintes helyzetbe állítva) részleges kitöltéskor a *6. ábra* szerinti eredményeket kaptak. A gravitáció hatása itt is észlelhető, de már sokkal gyengébben. Az ömladékfront ferdeségét a szerszám pontosabb orientálásával sikerült kiküszöbölni. A szimulált folyáskép nagyon hasonló a valódi képhez.



5. ábra Egy függőleges helyzetű csavarhúzónyeleket gyártó nyolcfészkes szerszámban kapott termék részleges fészekkitöltés után (bal oldali kép) és ugyanennek szimulált képe (jobb oldali kép)



6. ábra A csavarhúzónyelek képe részleges fészekkitöltéskor a szerszám 90°-os elfordítása után (bal oldali kép) és ugyanennek szimulált képe (jobb oldali kép.) A gravitáció hatása itt is látható a két legelső és legfelső nyélkezdeményen és a kinagyított középső képen

A kutatók összefoglalva megállapították, hogy a gravitáció hatása fröccsöntés-kor számos esetben olyan csekély, hogy nem kell vele foglalkozni. Bizonyos esetekben – főképpen vastag falú termékek gyártásakor – viszont célszerű a gravitáció figye-

lembe vétele és a darab geometriájának, a szerszám orientációjának és más tényezőknek megfelelő optimalizálása, hogy a szerszámból mindig tökéletes terméket lehessen kivenni.

Összeállította: Pál Károlyné

Straka, K.; Steinbichler, G.; Kastner, C.: Dem Druck mehr Gewicht geben = Kunststoffe, 105. k. 8. sz. 2015. p. 74–77.

Hoffmann, D. A.: = Understanding the gravity of the situation Plastics Engineering, 70. k. 10. sz. 2014. p. 28–31.

Understanding the gravity of the situation = <http://www.beaumontinc.com/understanding-the-gravity-of-the-situation/>