Mikroszerkezetek kialakítása nagy sebességű fröccsöntéssel

A nagy sebességű fröccsöntést nemcsak a vékony falú termékek előállításához lehet alkalmazni, hanem segítségével mikro- sőt nanoméretű mintázatot lehet kialakítani a termékek felületén.

Tárgyszavak: nagy sebességű fröccsöntés; falvastagság; ciklusidő; szimuláció; fröccsgép; felületi mintázat; mikroszerkezet.

Egyre vékonyabb falú termékek

Anyagtakarékossági és egyéb okokból régóta törekszenek a termékek falvastagságának csökkentésére – ebben önmagában semmi új nincsen. Már 10 évvel ezelőtt gyártottak pl. orvosi célra 100 mm hosszúságú, 0,63 mm falvastagságú kanülöket, amelyek külső felületén 0,25 mm-s bordázat volt, 0,05 mm-s görbületi sugárral a tetején. A falvastagság csökkentésére irányuló törekvés manapság – a folytonosan emelkedő nyersanyagárak időszakában – időszerűbb, mint valaha. Az anyagtakarékosságon túl figyelembe kell venni a csökkenő ciklusidőt, amely ugyancsak a gazdaságosságot javítja. A nehézségek jól ismertek: a beömlés megfelelő megtervezése, a folyási viszonyok optimalizálása, az ömledék idő előtti megszilárdulásának megakadályozása, a filmbeömlés vastagságának megfelelő megválasztása annak érdekében, hogy a nyíró deformáció alatti áramlás tovább növelje az ömledék hőmérsékletét – anélkül azonban, hogy a polimer degradálódna.

A falvastagságot nem annyira abszolút értékben mérik, inkább az áramlási hossz és a falvastagság arányával (L/T) jellemzik. Ebben az értelemben vékony falú termékről akkor beszélünk, ha az L/T érték meghaladja a 250–300-as értéket. Ilyen esetekben a fröccssebesség tipikusan 500–1000 mm/s, a fúvókánál mért nyomás 140 MPa nagyságrendű. Manapság már nem ritkák a 100-as ömledékindexű PP fröccstípusok, míg régebben a jól folyó típusok ömledékindexe 10–12 körül volt. Magasabb értékű termékek esetében PP helyett szívesen használnak nagy folyóképességű polikarbonátot (PC) és annak keverékeit.

A vékony falú termékek tervezésekor bizonyos szabályokat be kell tartani. Ilyenkor is érvényes *az egyenletes falvastagság szabálya.* A beömléseket úgy tervezik, hogy ki lehessen használni a nyíróerők hatására történő további felmelegedést – azon túl, amelyet a plasztikáló csiga okoz. A további felmelegedés ugyanis csökkenti a viszkozitást, és elősegíti, hogy az ömledék eljusson a vékony üreg minden részébe. A kes-

keny beömlés orientálja a molekulákat és megkönnyíti áramlásukat. A nagy fröccsnyomás és a jó szerszámkitöltési hatásfok miatt a bordázat és a falvastagság aránya 1:2-ről 1:1-re csökkenthető. A termék kivételét elősegítő rézsűszöget célszerű 0,5–1 fokkal megnövelni, hogy könnyebb legyen a filigrán termék eltávolítása. A szög nagysága természetesen függ a felület textúrájától is. *Az 1 mm-s és vékonyabb termékek általában kb. fele akkora zsugorodást mutatnak, mint robusztusabb társaik*. A szerszámot célszerű megerősíteni olyan megoldásokkal, mint az összekapcsolt üregek (interlocked cavities), szoros illeszkedésű betétek, és a kidobókat a bordázatok közelében elhelyezni, hogy a vékony falszakaszok ne görbüljenek meg a kidobás során.

A szimuláció szerepe

A vékony falú termékeket tervező mérnökök nagy hasznát látják a szimulációs szoftvereknek. Az egyik piacvezető szoftvernek, a *Moldflow*-programnak MPI 6.0 nevű verziója jelent meg, amelyben számos változtatás kimondottan a vékony falú termékek tervezését segíti elő. Az egyik a *viszkozitás nyomásfüggésének* figyelembevétele. Nagyon nagy nyomásoknál ugyanis hirtelen megnő a viszkozitás. A másik lényeges újdonság a szerszámfal és az ömledék közti *hőátadás változásának* számításba vétele. Régente egyetlen hőátadási tényezőt használtak, most azonban tekintetbe veszik, hogy a hőátadás jobb a szerszám feltöltése során, amikor jobb az érintkezés az ömledék és a szerszámfal között, de ez az utónyomási és a szerszámhűtési szakaszban romlik, ugyanis a műanyag fokozatosan elválik a faltól. Az új szoftververzió zsugorodási és befagyottfeszültség-számításokat is végez a vékony falú termékekre, valamint képes a szálorientáció megjóslására is, amennyiben szálerősített műanyagokkal dolgoznak. Tekintettel arra, hogy a vékony falú termékek fröccsöntésekor a molekulatömeg gyakran csökken, ami a termék mechanikai tulajdonságainak (pl. ütésállóságának) gyengülését eredményezi, a feldolgozók szívesen használnak ásványi anyaggal töltött típusokat. A *Moldflow-p*rogram legújabb verziója lehetővé teszi a termék dinamikus igénybevételének (ütésállóságának) szimulációját is, ami jelentősen megkönnyíti a gyártók életét, mert számos konstrukció kizárható még mielőtt a szerszám- és termékgyártásra sor kerülne.

Gazdaságossági és gyártási kérdések

Az anyagmegtakarításon túl a csökkenő ciklusidő javítja a termelés gazdaságosságát. A DVD-tokok előállításánál pl. a 80 g-os tömeget sikerült 60 g-ra leszorítani, aminek haszna jórészt a feldolgozóé – persze csak akkor, ha a kisebb tömegű termék hiánytalanul betölti feladatát.

A vékony falú termékek gyártásához természetesen jó gépek is kellenek – és ezt nem lehet elérni a régi berendezések utólagos javításával. Ha a berendezés nem képes sem megfelelő nyomást, sem elegendő fröccssebességet biztosítani, reménytelen vékony falú terméket gyártani. A kívánt fröccssebesség 500–1000 mm/s, a nyomástartomány pedig 140–340 MPa a fúvókánál. Ezeken kívül robusztus felépítésű lemezekre, a

csiga pontos pozicionálására és párhuzamos mozgatásokra (menet közbeni kidobás, az extrúzió megindítása a lemezek zárásakor) van szükség. A svájci **Netstal** cég speciális „ömledékakkumulátorokat” is szabadalmaztatott, zárt ciklusú vezérlést használ a nagy fröccssebesség eléréséhez. Az „ömledékakkumlátorra” is a dinamikus szabályozásra azért van szükség, mert a csúcssebességet nagyon rövid idő alatt kell elérni.

A **Milacron** cég vékony falú termékekre tervezett berendezésében ugyancsak szerepel az „ömledékakkumulátor”, egy nagy L/D viszonyú csiga (általában ún. barrier-csiga vagy két bekezdésű csiga a jobb keveredés érdekében), és megnövelték a hengerfűtés teljesítményét is. A csigaátmérőt a szerszám üregszerkezetétől és ciklusidejétől függően választják meg, mert ez befolyásolja a tartózkodási időt és a műszaki műanyagok esetleges degradációját. Ilyen alkalmazásokban szívesen használnak teljesen villamos működésű fröccsgépeket. A csiga előtolása rendszerint kicsi, néha csak egy csigaátmérőnyi.

A vékony falú termékek előállításában szerepet játszik a nyersanyag, a szerszám és a feldolgozóberendezés is. Az utóbbi időben a legnagyobb haladást a nyersanyagok területén sikerült elérni, de a szerszám- és gépgyártók is folyamatosan javítják termékeik minőségét, és új műszaki megoldásokkal jelentkeznek.

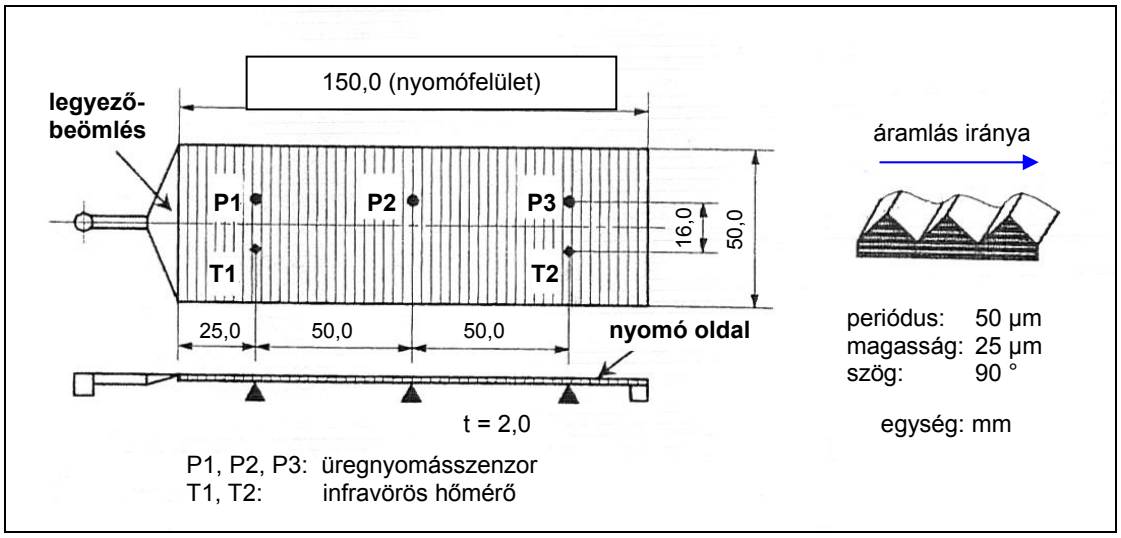
Mikroszkopikus felületi minták képzése nagy sebességű fröccsöntéssel

Válaszként az információtechnológia és a biotechnológia igényeire, az utóbbi években *egyre többet foglalkoznak mikro-, sőt nanoszerkezetek kialakításával műanyagfelületeken*, főként fröccsöntéssel és/vagy meleg préselési módszerekkel. A *meleg préselés (hot embossing)* kiválóan alkalmas olyan finom mikroszerkezetek kialakítására, amelyekben nagy a hossz/átmérő arány (ún. High Aspesct Ratio Microstructures, HARM-szerkezetek). A módszer hátránya azonban a hosszú ciklusidő. Préselésnél és fröccsöntésnél is szívesen hozzák létre a préselési felületet sziklaforgácsolt nikkelből. A korábbi vizsgálatok arra utaltak, hogy a fröccsöntéssel történő felületi mikroszerkezet leképezésekor a legkritikusabb tényező a hőmérséklet. Ennek azonban korlátot szab az anyag degradációja és az a tény, hogy a magasabb szerszámhőmérséklet hosszabb hűlési időt is jelent, azaz növeli a ciklusidőt. *Általánosságban elmondható, hogy annál jobb a felületi leképezés, minél később dermed meg a műanyagömledék felszíne.* Ezt szolgálja a gyors fröccsöntés is. Japán gyártók fejlesztettek ki úgynevezett ultragyors fröccsgépeket (UHSIM) – elsősorban vékony falú termékek gyártására. Ezek a berendezések akár 1000–2000 mm/s fröccssebességet is képesek elérni. Egy japán kutatócsoport azt vizsgálta egy modellszerszám segítségével, hogy milyen hatással van a hőmérséklet és a vákuumozás a felületi leképezés minőségére. Ezt a berendezést számos szenzorral látták el, hogy jól követhető legyen a fröccsöntés folyamata.

Modellvizsgálatok nagy sebességű fröccsgéppel

A vizsgálatokhoz **Nissei** gyártmányú *FN4000-9HTN* típusú fröccsgépet használtak, amely maximálisan 1000 mm/s fröccssebesség elérésre képes, a csiga átmérője 32

mm, záróereje 1700 kN. A szerszám vázlatos felépítését és a szenzorok elhelyezkedését az *1. ábra* mutatja. A szenzorokat és a beömlőblokkot a mozgó szerszámfélen helyezték el, a nikkelből készült nyomófelületet pedig a középső lemezen. A felület prizmás elrendezésű volt V-hornyokkal, amelyek merőlegesek voltak az áramlás irányára (ld. az 1. ábrát). Az üreg felületének mérete 150 x 50 mm^2 volt. A kísérletekhez használt vákuumrendszer vázlatát a *2. ábra* mutatja be. Az elővákuumozás ideje 1,1 s volt, amit 8 s vákuumozás követett a szerszám feltöltése és az utónyomás időszakában. A vákuumszivattyú vezetékében még egy gáznyomás-szenzort is elhelyeztek, hogy követni lehessen a vákuum változását. A kísérletekhez nagy folyóképességű poli(metil-metakrilát)-ot (PMMA) használtak, amelyből CD- és DVD-tokokat szoktak gyártani. Az anyag terhelés alatti behajlási hőmérséklete (HDT, ASTM D 648) 1,82 MPa nyomáson 90 ºC volt, ami valamivel alacsonyabb az általános célú PMMA-énál (102 ºC). A ciklusidő 2 perc volt, amiből 8 s a befröccsöntés, 40 s a hűlés, a többi a szerszámmal kapcsolatos műveletekre és a termék kivételére fordítódott. Az *1. táblázat* foglalja össze a fröccsparamétereket. A leképezés jóságát mérő *TR-tényező (leképezési hányados)* definícióját a *3. ábra* mutatja: lényegében a szerszám hornyának mélységét hasonlítja össze a leképezett felület maximális kiemelkedésével. A leképezés mértéke annál jobb, minél jobban közelíti a leképezési hányados az 1-es értéket. A TR-értéket összesen 28 pontban mérték, hogy legyen valami képük annak térbeli eloszlásáról is.

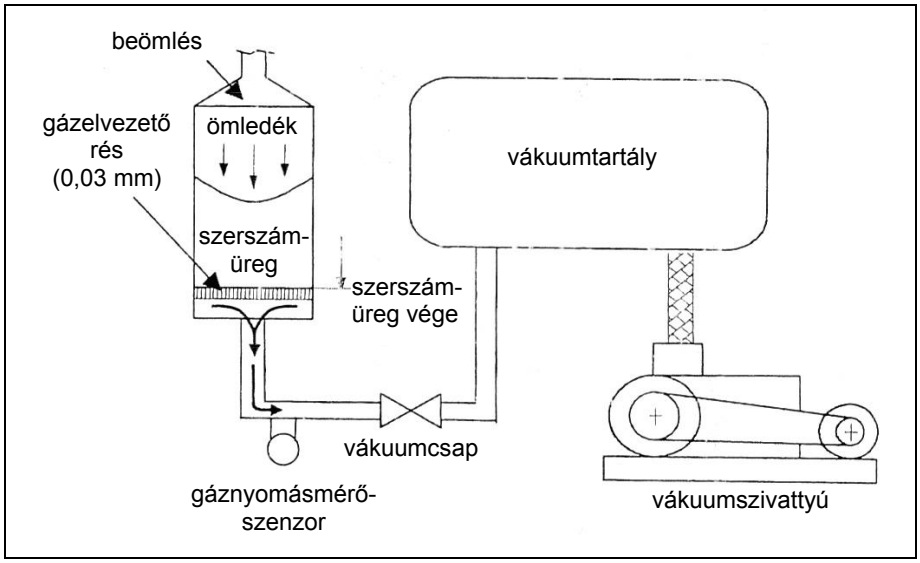


1. ábra Az üreg mérete, a felületi mintázat és a szenzorok elhelyezkedése (P = nyomásszenzor, T = hőmérő)

A fröccssebesség hatása

A térfogati fröccssebességet 100 és 800 cm^3/s között változtatták és általánosságban kijelenthető, hogy a horony geometriája jól leképezhető volt. A leképezés vá-

kuum alkalmazása nélkül is megfelelő, és nő a fröccssebesség növelésével *(4. ábra)*. A lineáris ömledéksebességet, amely nem lineárisan nő a térfogati sebességgel *(5. ábra)* a nyomásszenzorok válaszának időeltéréséből számították ki. Mivel három nyomás-szenzor volt, külön ki tudták számítani az ömledékfront sebességét a szerszám első felében, majd a másodikban, végül a kettő átlagolásával megkapták az átlagsebességet.



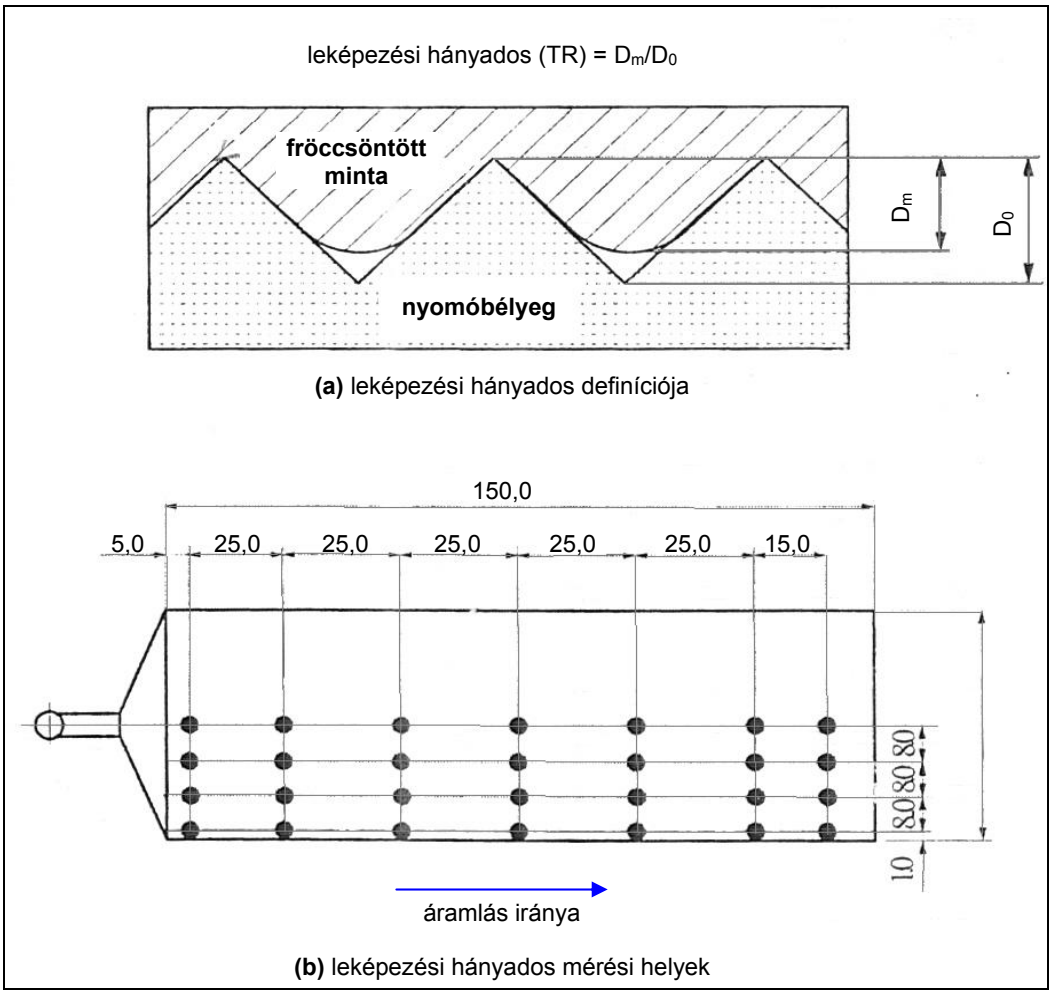
2. ábra A vákuumberendezés vázlata

1. táblázat

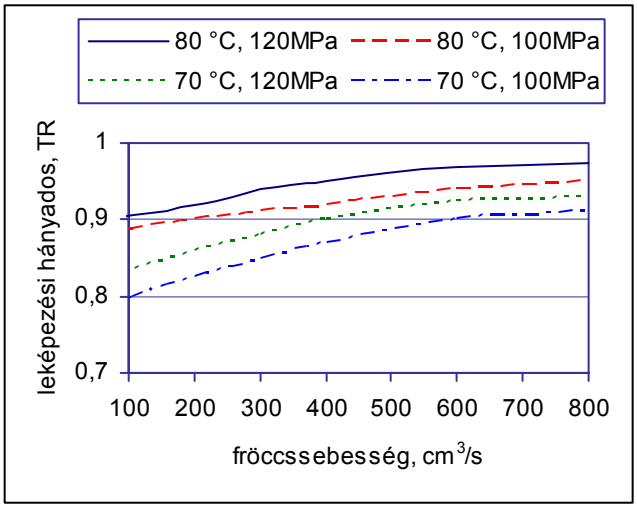
A felületi mikroszerkezetek leképezését vizsgáló modellvizsgálatok paraméterei

Fröccsöntés jellemzői	**PMMA/DS200E, Mitsubishi Rayon Co.** MFR = 21,0 g/10 min
Ömledék-hőmérséklet, ºC	250
Szerszámhőméréséklet, ºC	70/80
Befröccsöntési sebesség (térfogati), cm^3/s	100/200/400/600/800
Befröccsöntési sebesség (lineáris, mm/s)	124,4/248,8/497,6/746,4/995,2
Utónyomás (MPa)	100/120
Üreg vastagsága (mm)	2,0

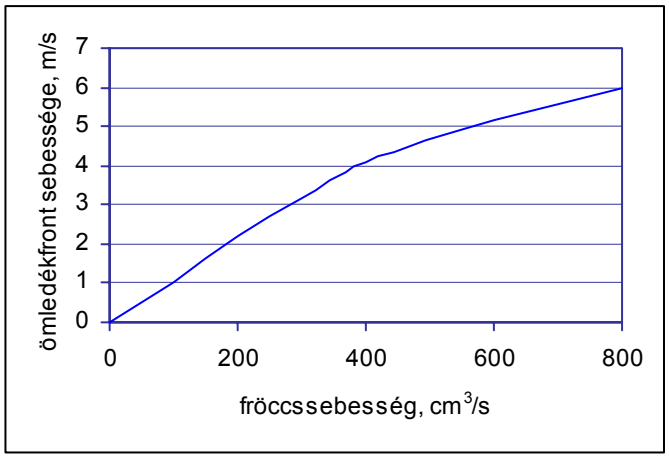
A *6. ábra* mutatja az ömledék hőmérsékletét a fröccssebesség függvényében a szerszám elején (T1) és végén (T2). Jól látható, hogy a legyezőbeömlés és a vele járó intenzív nyíró igénybevétel megnövelte az ömledék hőmérsékletét és késleltette a felszín megdermedését. A 4. ábrán az is látható, hogy az utónyomás és a szerszámhőmérséklet emelése is javítja a leképezés jóságát. A szerszámhőmérséklet hatása különösen jól látható alacsonyabb fröccssebességek esetében.



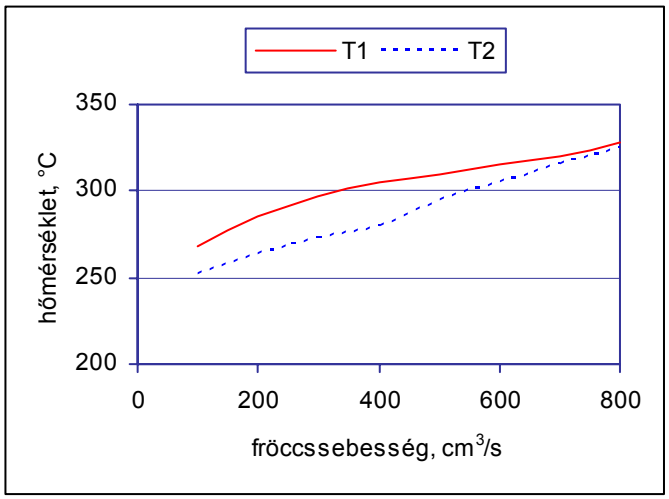
3. ábra A leképezés jóságának kiértékelése



4. ábra A leképezési hányados alakulása a térfogati befröccsöntési sebesség függvényében, különböző szerszámhőmérsékletek és utónyomások mellett, nem vákuumozott szerszám esetében. ($TR = D_m/D_0$)



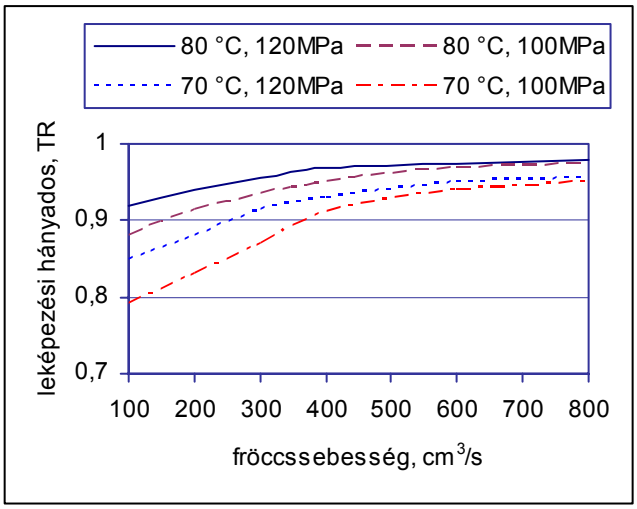
5. ábra Az ömledékfront lineáris sebessége a térfogati befröccsöntési sebesség függvényében (70 ºC-os szerszám, vákuumozás nélkül)



6. ábra A fröccsebesség és az ömledék-hőmérséklet összefüggése 80 ºC-os szerszámhőmérsékletnél és 100 MPa utónyomásnál
(T1 és T2 a hőmérsékletmérés helye, l. az 1. ábrán)

A vákuumozás hatása

A szerszámok vákuumozása szokványos fröccsöntés esetében is ajánlott lehet, mert a beszorult gázok sokféle fröccshibát okozhatnak: nem teljes szerszámfeltöltést, beégést, felületi hibákat. A gáz jelen esetben különösen könnyen megrekedhet a hornyok alján, ami akadályozza a hornyok teljes kitöltését műanyaggal. A nagy sebességű fröccsöntésnél különösen nagy nyomásnövekedést észlelnek a szerszámtérben, ezért magától értetődő a kitöltés segítése vákuumozással. A *7. ábra* mutatja a leképezési hányados értékét a fröccssebesség függvényében, vákuumozás mellett. A 4. ábrával történő összehasonlításból jól látható, hogy a *vákuumozás jelentős mértékben javítja a leképezést.* A fröccssebesség hatása különösen 400 cm^3/s felett jól látható.



7. ábra A leképezési hányados a térfogati befröccsöntési sebesség függvényében, különböző szerszámhőmérsékletek és utónyomások mellett, vákuumozott szerszám esetében ($TR = D_m/D_0$)

A leképezés jóságának térbeli eloszlása

Nagyobb szerszámfelületek esetében természetesen az az előnyös, ha a leképezés az egész felületen egyenletesen jó. Ezt a felmérést szolgálta a TR-értékek térbeli eloszlásának meghatározása. A kísérletek tapasztalatai szerint a nagyobb fröccssebességeknél a TR-értékek nemcsak nagyobbak, de eloszlásuk is egyenletesebb a szerszámfelület mentén. *Minél gyorsabb a fröccsöntés, és minél magasabb a hőmérséklet, annál kisebb eltérés érzékelhető a szerszám elején és végén mért TR-értékek között. Az eloszlás egyenletességét tovább javítja a vákuumozás.* Az sem váratlan, hogy a szerszámüreg közepén általában valamivel jobb a leképezési hányados, mint a szerszám széléhez közeledve. A vákuumvezetékben elhelyezett gáznyomásdetektorral azt is jól ki lehetett mutatni, hogy ha a vákuumozást csak a befröccsöntés kezdetéig végzik, roszszabb eredményeket kapnak, mint ha az a vákuumozás végig fennmarad. Ez arra utal, hogy az ömledékből is felszabadul gáz, amelyet ugyancsak el kell távolítani.

Az ilyen vizsgálatok nagymértékben hozzájárulhatnak a nagy sebességű fröccsöntés és a finom felületi mintázatok leképezési törvényszerűségeinek megértéséhez.

Összeállította: Dr. Bánhegyi György
www.polygon-consulting.ini.huT

Deligio, T.: Thinner thin-wall. = Modern Plastics Worldwide, 83. k. 4. sz. 2006. p. 78–81.
Yokoi, H.; Han, X. stb.: Effects of molding conditions on transcription molding of microscale prism patterns using ultra-high-speed injection molding. = Polymer Engineering and Science, 46. k. 9. sz. 2006. p. 1140–1146.