

Vastagfalú termék leképezésének analízise „Cavity Eye” belsőnyomás mérőrendszerrel

Dr. Szűcs András* főiskolai adjunktus, Dr. Belina Károly* egyetemi tanár

1. Bevezetés

A fröccsöntött termékekkel szembeni minőségi elvárások is egyre nagyobbak, elegendő csak a járműipari vagy a híradástechnikai és távközlési termékeket kiemelni, melyek mechanikai tulajdonságai, méretpontossága és megjelenése sokat fejlődött az elmúlt években. Ez annak köszönhető, hogy egyre precízebb fröccsöntő gépek, pontosabb fröccsöntő szerszámok és speciálisabb poli-merek jelentek meg a piacon. A megfelelő minőségű termék folyamatos gyártásának további alappillére a helyesen beállított fröccsöntési technológia. A gépbeállítás, természetesen a fröccsöntési ciklus paraméterein túl, az alapanyag megfelelő előkészítését, szárítását, a szerszám temperálását és egyéb beállításokat is jelent. Nehezíti a termégyártás reprodukálhatóságát, ha többfészkes szerszámmal dolgozunk, mert az egyes fészkek kitöltése eltérő lehet. A reprodukálhatóság és a technológia stabilitásának vizsgálatára a fröccsöntő gép felügyeleti eszközeit tudjuk használni. Ez a módszer többé-kevésbé célravezető, azonban vannak korlátai, mivel nem ott mérjük a paramétereket, ahol a leképezés történik, így a zavaró tényezők korlátozzák a felügyelet megbízhatóságát. A belsőnyomás mérés az egyetlen technika, ami zárt visszacsatolást jelent a rendszer működése szempontjából. A belsőnyomás alapján történő átkapcsolás a rendszer stabilitását megnöveli, a görbék alakja szerinti termékválogatás – megfelelő tűréshatár beállításával – selejtmentes gyártást, a mért értékek tárolása folyamatos minőségellenőrzést, visszavezethetőséget biztosít. Sajnos ezek a rendszerek máig nem terjedtek el tömegesen az ipari gyakorlatban, ezért a KECSKEMÉTI FŐISKOLA GAMF KAR-án kifejlesztettünk egy teljesen új konstrukciójú belsőnyomás mérőrendszert, amely új távlatokat nyit a felhasználók számára. Cikkünkben gyakorlati oldalról mutatjuk be a mérőrendszer által nyújtott lehetőségeket egy műszerezett, vastagfalú terméket gyártó szerszám segítségével.

2. Kísérleti rész

A vizsgálatokhoz *Tipelin R-959A* (TVK Nyrt.) fröccsöntéshez ajánlott, kis viszkozitású polipropilént használtunk, melynek folyásindexe 230°C-on és 2,16 kg terheléssel mérve 45 g/10 perc.

A kísérleteket fejlett paraméter felügyeleti rendszerrel ellátott ARBURG *Allrounder 470A* fröccsöntő gépen végeztük. A mért értékeket (anyagpárna, fröccsnyomás, fröccsidő stb.) az elektronikus adathordozó folyamatosan tárolja a vizsgálati/termelési folyamat alatt, így azok utólag viszonylag egyszerűen és gyorsan kiértékelhetők.

A mérésekhez egy átalakított szabványos próbatest gyártó szerszámot használtunk. A szerszám beömlő rendszere betétezhető, így oldal-, film-, egy- és kétoldali beömlővel lehet terméket gyártani. A formaüreg vastagsága 4 mm. Mind a két fészkekben a folyási út elején és végén található a kidobócsapok, amelyekben keresztül indirekt mérés valósítható meg. Saját fejlesztésű π -cell márkanévű nyomásmérő szenzorokat építettünk be a kidobócsapok alá. A szenzorok méréstartományja 15 kN, ami szükséges is, mivel a kidobócsapok átmérője 10 mm, és az 1000 bar üregnyomás esetén ébredő reakcióerő megközelítőleg 7850 N. A jel-zaj viszony minimalizálásának köszönhetően igen nagy felbontásban láthatók a mért értékek, így néhány N terhelés már pontosan mérhető, és a teljes méréstartományban lineáris a karakterisztika. A szenzorok nem érzékenyek a hőmérséklet változására. Az általuk szolgáltatott jeleket „Cavity Eye” mérőrendszerrel (1. ábra) és ipari környezetbe kifejlesztett szoftverrel dolgoztuk fel, ami természetesen alkalmas laboratóriumi mérésekhez is. A műszer alap kivitelben 8 csatornát – érzékelőt – kezel, ami korlátlanul bővíthető. Számos automatizált funkciót tartalmaz, pl. elektronikus beléptetést, az összes mérési eredmény tárolását és tömörítését, statisztikai kiértékeléseket, a szerszám automatikus felismerését stb.



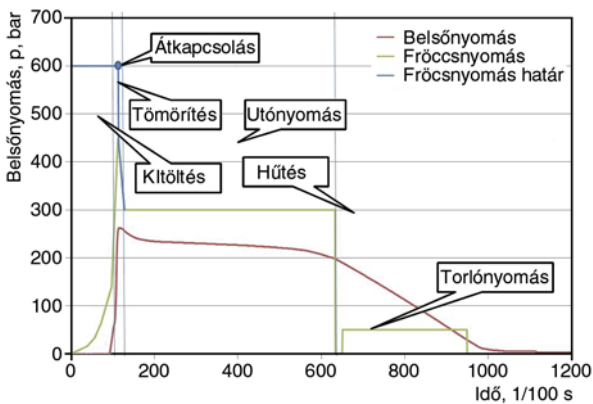
1. ábra. „Cavity Eye” belsőnyomás mérőrendszer

*Kecskeméti Főiskola, GAMF Kar, Anyagtechnológia Tanszék

A szerszám leképezési folyamatának elemzése

A belsőnyomás és a hidraulikanyomás görbe több-kevesebb kapcsolatban van egymással. A fröccsnyomás egyértelműen befolyásolja a belsőnyomást, azonban a termék leképezése a formaüregben történik, így a termékgyártás folyamatáról akkor kapunk pontos információt, ha a szerszámüregben belül vizsgáljuk a nyomás időbeli lefutását. Egy általános belsőnyomás- és hidraulikanyomás görbe a 2. ábrán látható. A görbe több, egyértelműen elkülönülő szakaszra bontható, ezek a

- kitöltés,
- tömörítés,
- utónyomás,
- hűtés [1].



2. ábra. A belsőnyomás és a fröccsnyomás időbeni lefutása

A *kitöltési* fázisban az anyag szabadon áramlik a formaüregben. Az áramlás fenntartásához szükséges nyomás viszonylag kicsi, elsősorban az anyag folyóképességétől, az ömledékfront sebességétől és az áramlási keresztmetszettől függ. Alapvető különbségek mutatkoznak a kis és a nagy falvastagságú termékek között. A vékonyfalú, hosszú folyási úttal rendelkező termékek kitöltése lényegesen nehezebb, kevesebb idő áll a rendelkezésre, és már kitöltési fázisban is nagyobb nyomás ébred a szerszámüregben, miközben a hűtési idő is sokkal rövidebb.

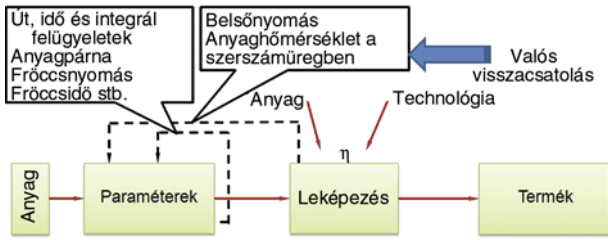
A *tömörítési* fázisban a szerszámüreg már teljesen megtelik műanyag ömledékkel. Az anyag nem áramlik, így azt kismértékben összenyomjuk, amely 0,01... 0,1 másodperc alatt felépíti a nyomást az üregben. A kompresszió tulajdonképpen azt jelenti, hogy néhány százalékkal több anyagot préselünk a szerszámüregbe, mint ami atmoszférikus nyomáson elférne benne. (Az anyag összenyomhatóságát $p-v-T$ mérésel tudjuk meghatározni.) A komprimálást követően átkapcsolunk *utónyomásra*, azaz a valós felépülő fröccsnyomás értékről pillanatszerűen, vagy egy meghatározott „rampa” időn belül a nyomást lecsökkentjük az utónyomás értékére. A

modern fröccsöntő gépeken a „rampa” minden esetben megadható, ami nagymértékben állandósítja a folyamatot, mert a PID vezérlő elektronika nem képes a pillanatszerű változásokat stabilan kezelni. Az átkapcsolás a fröccsöntési folyamat egyik legérzékenyebb paramétere.

Az anyag hőmérsékletének csökkenése során csökken a fajtérfogata, ezt kompenzáljuk az utónyomási fázisban bejutott anyagmennyiséggel. Utónyomás során állandó, csökkenő, növekvő, esetleg pulzáló nyomásprofilok használhatók. Az utónyomás elhagyása, nem megfelelő beállítása a termék felületén beszívódási nyomokat, vagy a belsejében lunkereket eredményez. A hasznos utónyomási idő a lepecsételődésig tart, azaz amikor a gát keresztmetszetében az anyag hőmérséklete a folyási vagy kristályosodási hőmérséklet alá csökken, akkor az megszilárdul és megakadályozza a további anyagáramlást.

A *hűtési* fázisban az anyag tovább hűl, a szerszámüregben a nyomás csökken, de a pecsételődés miatt anyag már nem áramlik. Ennek megfelelően a nyomás csökkenése jó közelítéssel arányos a fajtérfogat csökkenésével, vagyis a termék zsugorodásával. A hűtési fázisban érvényesülő negatív meredekség a hűtési sebességgel arányos.

Az egyik legfontosabb gépbeállítási paraméter az átkapcsolás. Az ipari gyakorlatban legelterjedtebb az út szerinti átkapcsolás, ami annyit jelent, hogy egy megadott csigaúton kapcsolunk át a sebességvezérlésről a nyomásvezérelt utónyomási szakaszra. A modern gépek esetében ez a pozíció 0,001–0,01 mm pontossággal tartható. A rendszer hibája, hogy nem veszi figyelembe a kitöltési folyamatot befolyásoló külső hatásokat. A visszaáramlás-gátló szelep meghibásodása, vagy kismértékű kopása esetén az átkapcsolási út ugyan állandó lesz, de a befröccsöntött anyag mennyisége minden egyes ciklusban ingadozni fog. Az idő szerinti átkapcsolás a legkevésbé elterjedt módszer. Előnye, hogy az időt rendkívül pontosan tudjuk mérni, és így szabályozásra is jól felhasználható. A folyamat stabilitásának szempontjából leghatékonyabb, ha a szerszámüregben felépülő nyomást mérjük. A nyomásérzékelőt a beömlési ponthoz közel vagy attól távol helyezik el. Amennyiben a beömléshez közel található, akkor a teljes kitöltési folyamat jól nyomon követhető, amennyiben viszont a folyási út végén van, akkor a termék kitöltöttsége ellenőrizhető. A legtöbb információt akkor kapjuk, ha a folyási út elején és végén is található érzékelő. Ennek elsősorban kis falvastagságú termékeknel van jelentősége. Mivel a cél az, hogy minden ciklusban azonos minőségű terméket gyártsunk, így a legnagyobb stabilitás a szerszámnyomás alapján történő átkapcsolással valósítható meg, ami zártkörű visszacsatolást jelent [3]. A 3. ábrán látható a termékgyártási folyamat.



3. ábra. A termékgyártás folyamatábrája

3. Mérési eredmények

A kísérleti gyártáshoz stabil technológiát állítottunk be (1. táblázat), amelyhez képest a következő paramétereket változtattuk:

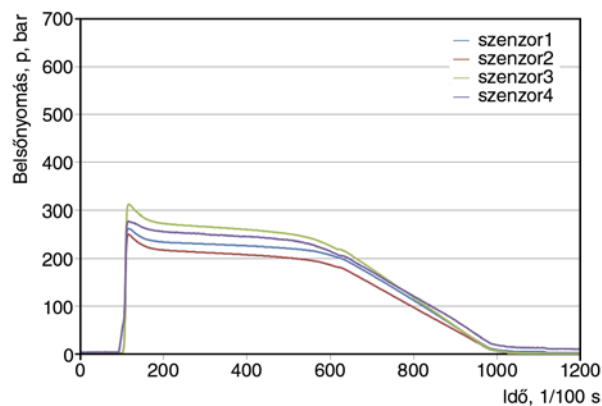
- fröccssebesség ($v_{\text{fröccs}}$),
- anyaghőmérséklet (T_a),
- szerszámhőmérséklet (T_{sz}),
- átkapcsolási pont ($s_{\text{át}}$),
- utónyomás (p_u),
- utónyomási idő (t_u).

A 4. ábrán az egy ciklusban mért szerszámnyomás görbék láthatók. Fészkenként 2 szenzor szolgáltatja a jeleket, így összesen 4 görbét láthatunk, amelyek páronként tartoznak össze. Mivel a szenzorokat kalibráltuk, ezért a nyomáscsúcsokban tapasztalható különbségek a szerszám geometriai eltéréseiből adódhatnak. Jól elkülöníthető az előzőekben tárgyalt négy szakasz.

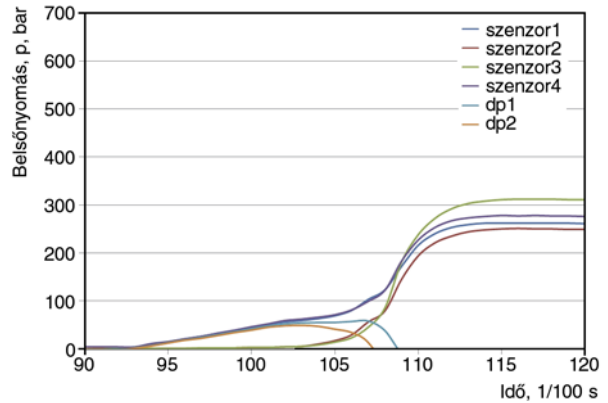
A görbe kezdeti felfutó részét kinagyítva láthatóvá válik a kitöltési és a kompressziós fázis (5. ábra). Az ömle-

1. táblázat.
Technológiai paraméterek

Anyaghőmérséklet	200°C (240°C)
Szerszámhőmérséklet	30°C (90°C)
Fröccssebesség	80 mm/s (40, 60, 100, 120, 140 mm/s)
Átkapcsolási pont	10 mm (11, 9, 8, 7, 6 mm)
Fröccsnnyomás	1500 bar
Utónyomási idő	5 s (1, 2, 3, 4 s)
Utónyomás	300 bar (100, 200, 400, 500, 600 bar)



4. ábra. A belsőnyomás görbe lefutása az idő függvényében



5. ábra. A belsőnyomás görbe lefutása az idő függvényében

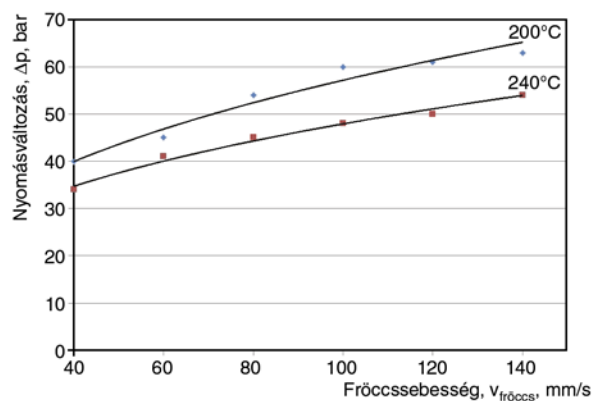
dék kb. 85 ms alatt ér el a gáthoz közel elhelyezett szenzorokhoz, azonban mérhető nyomás a folyási út végén, csak 100 ms eltelte után van. A kitöltési fázisban mért szenzorok közötti nyomáskülönbség (dp1 és dp2) egy rövid szakaszon közel állandó és arányos az anyag viszkozitásával, a két jel felfutása között eltelt idő pedig a fröccssebességgel (nyírósebességgel).

A 2. táblázat a Δp értékeket és a fröccsnnyomást foglalja össze.

A 6. ábrán látható görbék hasonlóságot mutatnak a folyásgörbével [3]. Ez azzal magyarázható, hogy a nyírófeszültséget a nyomásesésből és az áramlási geometriából, a

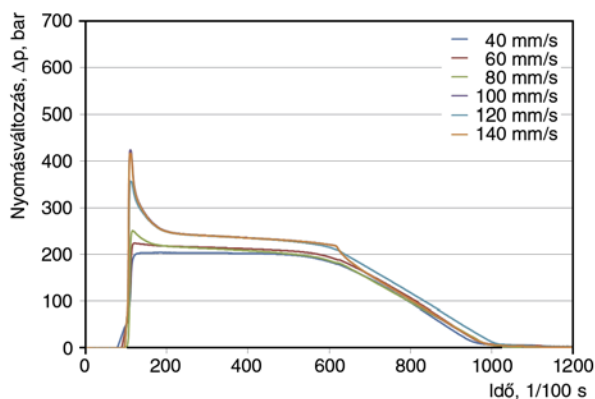
2. táblázat.
A Δp és a fröccsnnyomás
a fröccssebesség függvényében

Hőmérséklet	200°C		240°C	
$v_{\text{fröccs}}$ [mm/s]	$P_{\text{fröccs}}$ [bar]	P_1-P_2 [bar]	$P_{\text{fröccs}}$ [bar]	P_1-P_2 [bar]
40	380	40	334	34
60	426	45	384	41
80	462	54	391	45
100	495	60	415	48
120	523	61	438	50
140	548	63	458	54



6. ábra. Δp értékek a fröccssebesség függvényében

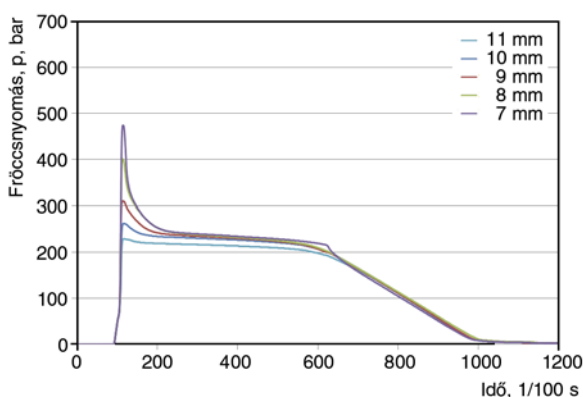
nyírósebességet a térfogatáramból és az áramlási geometriából határozzuk meg. A fröccssebesség növelésével a szenzorok között mért nyomáskülönbség nem-lineárisan változik, tehát az anyag viszkozitása csökken és ez on-line mérhető az összeállított rendszerrel. Az anyaghőmérsékletnek a folyóképességre gyakorolt hatása szintén egyértelmű. Kisebb nyomásra volt szükség ahhoz, hogy a magasabb hőmérsékletű műanyaggal töltsük ki a szerszámüreget. A regisztrált fröccsnyomás is hasonló tendenciát mutat, ami teljesen más okkal magyarázható. A gépen beállított fröccsnyomás határa 1500 bar. A fröccsfázisban mért nyomás messze elmaradt ettől, vagyis ez a paraméter nem játszik szerepet a leképezésben, a valós fröccsnyomás szabadon fel tud épülni. A különbség sokkal inkább a fröccsöntő gép reakcióidejével magyarázható, ami géptípustól függően 0,01...0,1 s között változik. A csigadugattyú sebességének növelésével a csiga tehetetlensége is növekszik, azaz később fog megállni. Az átkapcsolás az összes beállításnál 10 mm volt, azonban a csiga egyre később állt meg. A 7. ábrán látható a fröccssebesség függvényében az 1. szenzor nyomásgörbéje. (A görbék könnyebb összehasonlíthatósága érdekében a továbbiakban az 1. jeladó mérési eredményeit használjuk fel.)



7. ábra. A belsőnyomás a fröccssebesség függvényében

Teljesen azonos paraméterek esetén a fröccssebesség jelentős hatást gyakorolt a szerszámüregben kialakult nyomásra. A 120 és 140 mm/s sebességgel készített próbatetek erősen sorjásak lettek, ami a nagy belsőnyomással magyarázható. A sorjaképződés szempontjából figyelembe kell venni, hogy az a kitöltés- vagy az utónyomás fázisban alakul ki. Ebben az esetben az impulzusszerű nyomáslökés enyhén megnyitja a szerszámot, és a kis viszkozitású, még ömledék állapotban lévő anyag sorját képez. Ilyen esetekben egyértelműen a fröccssebesség csökkentésével lehet a sorjaképződést megszüntetni, az utónyomásnak nincs rá hatása.

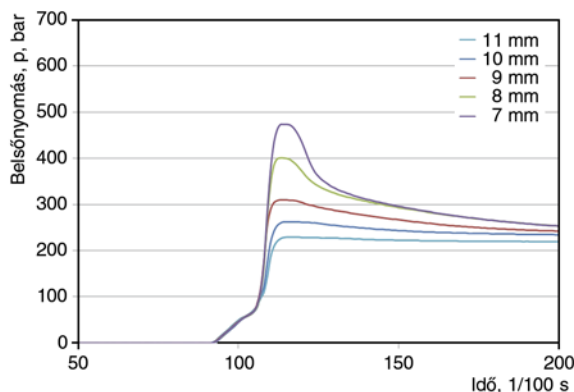
Hasonló eredményeket hozott az átkapcsolási pont változtatása is. Az alapbeállításnál 10 mm-es pozícióban kapcsolunk át fröccsnyomásról utónyomásra. Amennyi-



8. ábra. Az átkapcsolási pont hatása a fröccsnyomásra

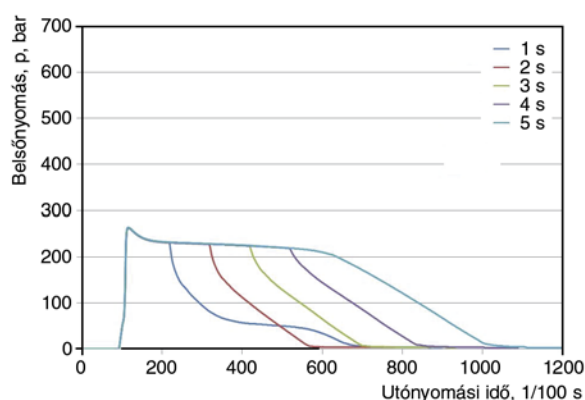
ben az átkapcsolás korábban, azaz 11 mm-en következett be, az csak kismértékben csökkentette az utónyomást. Ez azt jelenti, hogy a tömörítés az utónyomás fázisban történt meg. Amennyiben később kapcsolunk át, akkor a fröccssebességnél már bemutatott jelenséget tapasztaljuk. Mivel a beállított fröccsnyomás felső határa ebben az esetben is 1500 bar volt, így a fröccsöntő gép a valós, felépülő fröccsnyomást nem korlátozta. A késői átkapcsolás miatt a darab szintén sorjásodott (8. ábra).

A folyamat pontosabb elemzése céljából érdemes a kitöltési és tömörítési fázist közelebbről megvizsgálni (9. ábra). A kitöltési fázisban mért nyomásgörbék teljesen megegyeznek, a vonalak fedik egymást. A 11 és 10 mm-es átkapcsolás enyhén elhajlik, a viszonylag korai átkapcsolás miatt. A görbék még a tömörítési fázisban is együtt futnak, míg a fröccssebesség meredekebbé vagy laposabbá tette a felfutások meredekségét. Az átkapcsolást követően az összes beállításnál 300 bar utónyomást alkalmaztunk. Az üregben kialakuló csúcnyomás időbeni csökkenése az anyag visszaáramlásával magyarázható. A szerszámüregben 200...250 bar nyomás uralkodott a lepecsételődésig. Ez az eltérés a polimer összenyomhatóságával, a nem-newtoni folyással és az áramlási keresztmetszetben a hűlés alatt bekövetkező szerkezetváltozásokkal magyarázható [4].



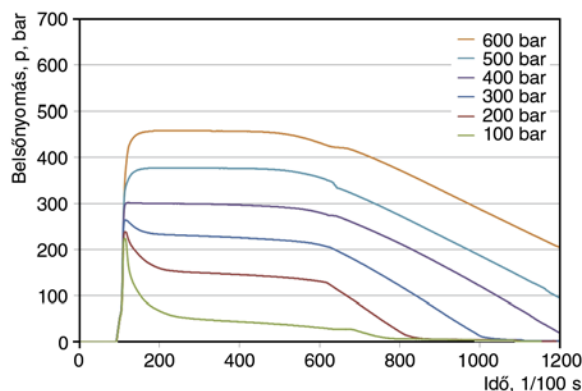
9. ábra. Az átkapcsolási pont hatása a belsőnyomásra

Az utónyomási időt leggyakrabban a darab tömegének mérésével határozzák meg. A belsőnyomás mérőrendszerrel gyorsabban és pontosabban lehet megállapítani a hasznos utónyomási időt (10. ábra). Mivel minden paraméter állandó, így a görbék együtt futnak az utónyomási idő végéig. A pecsételődésnél rövidebb utónyomás hirtelen törést okoz, ami szintén az anyag szabad kiáramlásának következménye. Amennyiben viszont az utónyomási idő hosszabb, mint a pecsételődési idő, már nem mutatkozik a görbe alakjában, mivel a gáton megdermedt anyagrészek nem engednek meg sem a be-, sem a kiáramlást. A pecsételődést követően – a hűlési szakaszban – a görbék meredeksége közel állandó, amit a hűtés vizsgálatánál elemzünk.



10. ábra. Az utónyomási idő hatása a belsőnyomásra

Nagyon érdekes eredmények születtek az utónyomás vizsgálata során (11. ábra). A szerszámüregben kialakuló nyomás kis mértékben elmarad a beállított értéktől. Ennek a magyarázatát már az előbbieken ismertettük. Amennyiben az utónyomás kisebb, mint a szerszámban felépülő nyomás, akkor visszaráamlás lép fel a gáton és a nyomás lecsökken, amikor viszont nagyobb, akkor az utónyomással hozzuk létre a tömörítést, a csúcsnyomás lassabban alakul ki, és az egészen a pecsételődésig állandó érték marad. Egyik beállításnál sem sorjásodott a pró-



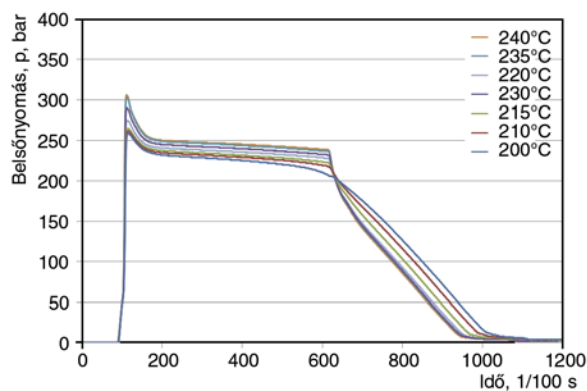
11. ábra. Az utónyomás hatása a belsőnyomás görbére



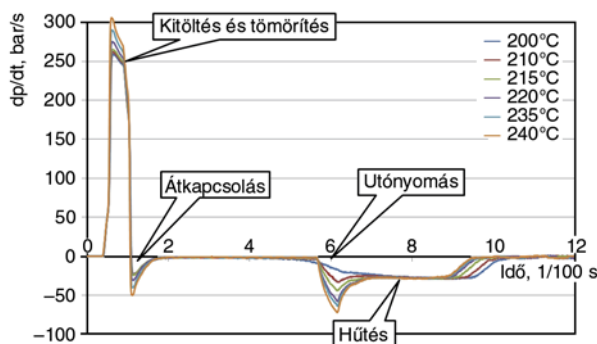
batest, annak ellenére, hogy lényegesen nagyobb volt a belsőnyomás, mint a fröccssebesség változtatása során. Oka, hogy a kitöltés alatt a darab héja folyamatosan hűl. Amikor a héjrteg hőmérséklete a kristályosodási hőmérséklet alá csökken, akkor már szilárd burok veszi körbe az ömledéket. Ennek megfelelően az ömledék állapotú anyag nem képes a héjat átszakítani, az osztási síkba befolyani, sorját képezni. Ebből az következik, hogy vastagfalú termékek gyártásánál a beszívódások csökkentése érdekében érdemes profilozni az utónyomás értékét, még hozzá célszerű az időben növelni.

A 12. ábrán az anyag hőmérsékletnek a belsőnyomásra gyakorolt hatása látható. Azonnal szembe tűnik, hogy a műanyag hőmérsékletének növelésével a belsőnyomás nő, sőt a pecsételődés is egyre később következik be. 230°C felett az 5 másodperces utónyomás már rövidnek mondható, ennek egyértelmű magyarázata az, hogy a magasabb hőmérsékletű ömledék később pecsételődik le.

A 12. ábra görbéinek idő szerinti első derivált függvényei láthatók a 13. ábrán. A folyamat elemzése szempontjából számos érdekességet tartalmaz. Szintén jól jelentkezik az anyag hőmérséklet leképezési folyamatot befolyásoló hatása. A tömörítési fázisban látható az első



12. ábra. Az anyag hőmérséklet hatása a belsőnyomásra

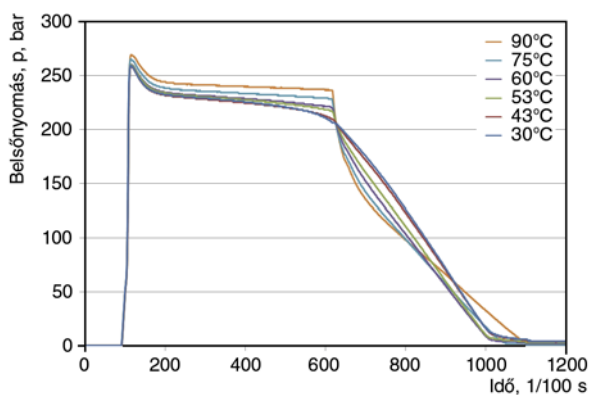


13. ábra. Belsőnyomásgörbék időszerinti első derivált függvényei eltérő anyaghőmérsékletek esetében

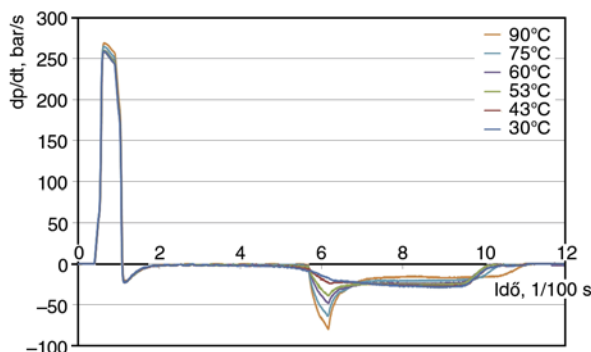
egyben legnagyobb csúcs pozitív irányban, melyet egy negatív csúcs követ, ez az anyag szerszámüregből történő kiáramlási sebességével arányos mennyiség. Az utónyomási fázisban minimális negatív előjelű meredekség tapasztalható, a nyomás csak kis mértékben csökken. A következő negatív csúcs már sokkal szemléletesebb változást eredményez a hőmérséklet függvényében. Folyamatos átmenetet láthatunk az átkapcsolás és a hűtés között, ha megtörténik a lepecsételődés, amennyiben az utónyomási idő rövid, akkor viszont ismét negatív csúcs jelentkezik. A hűtési fázisban mindegyik meredekség azonos, mivel a pecsételődést követően a hűtési sebesség érdemben nem változik.

A szerszámhőmérséklet hasonlóan befolyásolta a görbét, mint az anyaghőmérséklet, azonban a csúcshőmérsékletet nem növelte meg olyan nagy mértékben (14. ábra). A pecsételődési idő a szerszámhőmérséklet növelésével ismét későbbre tolódott. 53°C-nál már az látható, hogy az 5 másodperces utónyomási idő nem elegendő, és az anyag kiáramlik az üregből a pecsételődés megtörténte előtt. Az utónyomási fázisban kevésbé csökken a nyomás, ha magasabb a szerszámhőmérséklet. Ez a lassabb hűléssel és a lassabb fajtérfoogat csökkenéssel magyarázható.

A 14. ábra derivált függvényének kiértékelésével a hasznos utónyomási idő és a hűtési sebesség ellenőrizhe-



14. ábra. A szerszámhőmérséklet hatása a belsőnyomásra



15. ábra. Belsőnyomásgörbék időszerinti első derivált függvényei eltérő szerszámhőmérsékletek esetében

tő (15. ábra). Magasabb szerszámhőmérséklet lassabb hűtést eredményez, ami szemléletesen és jól megjelenik a diagramon. A derivált függvények elemzését a „Cavity Eye” mérőműszer ellenőrző és beavatkozó folyamatának algoritmusában használjuk, melynek fejlesztése folyamatban van.

4. Összefoglalás

Az utóbbi évek alapkutatásainak eredményeképpen kifejlesztettünk egy üregnyomás-mérő rendszert, amely magában foglalja a mérőcellák, a hardverelemek és a szoftver fejlesztését. A műszert az ipari igényeknek megfelelően alakítottuk ki, azonban alkalmas laboratóriumi mérésekhez is. Cikkünkben bemutatjuk a belsőnyomás mérés lehetőségeit és a leképezési folyamat körülményeit. A mérési eredmények jól szemléltetik, hogy a leképezés négy fő szakaszára hogyan hatnak az egyes technológiai paraméterek. A görbék és a görbék idő szerinti első derivált függvényével a fröccsöntési folyamat analízise és szabályozása további automatizálási lehetőségeket biztosít. A rendszer alkalmazásával könnyebb és gyorsabb lehet a gyártásindítás, hibás darabok gyártása esetén a probléma okának meghatározása és a technológia instabilitásából adódó véletlenszerű selejtes termékek kiválogatása és elkülönítése.

Irodalomjegyzék

- [1] Ming-Shyan Huang: Cavity pressure based grey prediction of the filling-to-packing switchover point for injection molding, *Journal of Materials Processing Technology*, 183, 419–424 (2007).
- [2] Ho Yin Wong, Ka Tsai Fung, Furong Gao: Development of a transducer for in-line and through cycle monitoring of key process and quality variables in injection molding, *Sensors and Actuators, A* 141, 712–722 (2008).
- [3] Szűcs, A.: Rheological and thermal analysis of the filling stage of injection moulding, *eXPRESS Polymer Letters*, 6/8, 672–679 (2012).
- [4] Pantani, R.; Coccorullo, I.; Speranza, V.; Titomanlio, G.: Morphology evolution during injection molding: Effect of packing pressure, *Polymer*, 48, 2778–2790, (2007)