



**BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR
POLIMERTECHNIKA TANSZÉK**

PVT MÉRÉSI MÓDSZER TELJES KÖRŰ FEJLESZTÉSE

PHD ÉRTEKEZÉS TÉZISFÜZETE

ÍRTA:

SZABÓ FERENC
OKLEVELES GÉPÉSZMÉRNÖK

TÉMAVEZETŐ:

DR. KOVÁCS JÓZSEF GÁBOR
EGYETEMI DOCENS

**BUDAPEST
2015**

A doktori disszertáció bírálata és a védésről készült jegyzőkönyv a
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Gépészmérnöki Karának Dékáni Hivatalában megtekinthetőek

1. Bevezetés és célkitűzés

A XX. század során a mesterséges polimerek szerepe a fejlett társadalmakban egyre inkább nőtt, és ez a tendencia a XXI. század elején is megmaradni látszik. Napjainkban a feldolgozásra kerülő hőre lágyuló alapanyagok több mint 30%-át fröccsöntéssel dolgozzák fel. A fröccsöntés a polimer késztermékek gyártási eljárásai közül az egyik legsokoldalúbb és legdinamikusabban fejlődő, szakaszos eljárás. Segítségével háromdimenziós, bonyolult geometriájú és nagyméretű alkatrészek is előállíthatóak gazdaságosan, gyakorlatilag hulladékmentesen, így a technológiát egyre nagyobb mértékben alkalmazzák többek között műszaki és háztartási cikkek, járműalkatrészek, játékok, csomagoló anyagok és orvostechikai eszközök előállításánál is.

A fröccsöntött termékek végső tulajdonságait rendkívül sok tényező együttesen határozza meg, így a folyamat komplexitásából adódóan is régóta cél a gyártás közben lejátszódó folyamatok jobb megismerése, illetve azok minél pontosabb modellezése. Napjainkban a fröccsöntésszimulációs programok alkalmazása egyre elterjedtebb, mivel segítségükkel lehetőség nyílik a fröccsöntés technológiájának virtuális megvalósítására a szerszám tényleges legyártása nélkül. Ehhez nagy mértékben hozzájárult a számítástechnika és a szimulációs algoritmusok fejlődése, illetve a kiélezett gazdasági verseny is. A fröccsöntés gazdaságosságát, a termék végső árát és nem utolsósorban a piacra kerülési időt azonban nagymértékben befolyásolja, hogy az adott termék és a gyártásához szükséges fröccsöntő szerszám tervezését a numerikus szimulációs eljárások milyen mértékben tudják segíteni. A fröccsöntésszimulációs programok, mint például a Moldflow, megkísérlik csökkenteni a nem kellőképp méretpontos és alakhű termékek gyártásának veszélyét, illetve a vevői igényeknek megfelelő termék gyártásához szükséges szerszámmódosítások számát azzal, hogy a rendelkezésre álló adatokra támaszkodva kvantitatív előrejelzést adnak. A kapott eredmények alapján optimalizálható a termék- és szerszámkialakítás, az alapanyag választás, valamint a feldolgozási paraméterek jelentős része, azonban a jól használható eredményekhez pontos alapanyag adatokra van szükség. Számos esetben a szimulációs programok csak becült adatokkal, illetve átlagos értékekkel számolnak, ami az anyagjellemzők költséges mérésére vezethető vissza.

A fröccsöntési folyamat numerikus szimulációjánál, a használni kívánt alapanyag nyomás-hőmérséklet-fajtérfogat összefüggése (pvT adatai) az egyik legfontosabb, de egyben legnehezebben mérhető bemenő adatnak tekinthető. Ezért fontos, hogy a rendelkezésre álló pvT adatok a lehető legpontosabban írják le az alapanyag viselkedését, mivel csak így lehet

biztosítani a megfelelő pontosságú számításokat, előrejelzéseket, becsléseket, valamint a helyes optimalizálásokat.

Napjainkban a pV_T adatok mérésére elterjedten használt eljárások lassúak, a mérések akár napokig is eltarthatnak, a termikus degradációra hajlamos polimer anyagok mérése pedig különös körültekintést igényel. Gyakran az eredmények pontossága sem kielégítő. A pontatlanságok egy részét a mérési elvek hibái okozzák, más részük annak köszönhető, hogy a mérések közel sem a fröccsöntési technológiának megfelelő paraméterek mellett zajlanak.

PhD értekezésem fő célja egy olyan új mérési elv lehetőségeinek és részfolyamatainak teljes körű felmérése és elemzése, amely fröccsöntőgép segítségével, a fröccsöntés során jellemző körülmények között teszi mérhetővé a hőre lágyuló polimer alapanyagok nem egyensúlyi állapotára jellemző fajtérfogatának meghatározását. Ennek az új mérési elvnek nagy előnye, hogy a mérés várhatóan nem csak sokkal gyorsabban elvégezhető lesz, hanem az így nyert adatok sokkal közelebb is lesznek a valósághoz, hiszen mérések feldolgozási körülmények között, magán a képlékeny alakadást végző gépen zajlik.

2. Az irodalom kritikai elemzése, célok pontosítása

A fröccsöntés az egyik legfontosabb és legsokoldalúbban felhasználható, polimer alkatrészek gyártására alkalmas technológia. A feldolgozott alapanyagok viselkedéséből és a technológia alapelveiből fakadóan a feldolgozás közben az alapanyag jelentős fajtérfogat változáson megy keresztül, amelyek pontos ismerete elengedhetetlen mind a technológia szempontjából, mind az alkatrészek tervezése során.

A polimerek viselkedését alapvetően meghatározza kémiai szerkezetük, amelynek eredményeként az amorf és részben kristályos hőre lágyuló polimerek pV_T tulajdonságai jelentős eltéréseket mutatnak. Közös jellemzőjük azonban, hogy mindkét alapanyag típus fajtérfogata jelentős hőmérsékletfüggést (átlagosan egy nagyságrenddel nagyobb hőtágulási együttható a fémekéhez viszonyítva), nyomásfüggést (jelentős kompresszibilitás szilárd állapotban is), valamint hűtési sebességtől való függést mutat. Az elvégzett irodalomkutatásom alapján megállapítható, hogy a pV_T tulajdonságok mérésére elterjedten használt konvencionális módszerek, úgy mint a direkt és indirekt dilatometria, nem képesek a fröccsöntés, vagy az extrúzió során fellépő hőtani viszonyokra jellemző fajtérfogat adatokkal szolgálni, mivel a mérések során elérhető hűtési sebesség akár több nagyságrenddel is elmarad a feldolgozási technológiákra jellemzőktől.

Az utóbbi években, több szakirodalom is foglalkozott speciális mérőrendszerek kialakításával, amelyek már alkalmasak a hűtési sebesség hatásának vizsgálatára, de az elért hűtési sebesség sok esetben kisebb, mint a fröccsöntött termékek gyártása során jellemző sebesség. További probléma, hogy a hűtési sebesség megfelelő szabályozása nem minden esetben volt megoldott. A polimerek rossz hővezetési tulajdonságai miatt a nagy hűtési-, illetve fűtési sebességgel végzett vizsgálatok során további problémákat okoz a vizsgált mintában kialakuló hőmérséklet különbség, amely a minta méretétől függően a 100°C-ot is meghaladhatja. Ennek ellenére a szerzők egy része a nagyobb hűtési sebességgel végzett mérések során elhanyagolta a próbatestben kialakuló hőmérséklet inhomogenitást, amely negatívan hat a mérések pontosságára.

Több szerző foglalkozott extrúzió alapuló mérőrendszerek fejlesztésével, amelyek azonban csak az átmeneti hőmérséklet tartomány felett képesek mérni, továbbá a mérhető nyomástartomány maximuma jellemzően egy nagyságrenddel elmarad a fröccsöntésre jellemzőtől. A vizsgálati nyomástartomány megnövelése érdekében, több szerző foglalkozott a fröccsöntőgép aggregátjában történő pvT tulajdonságok mérésével. Ezt a mérési módszert azonban a szerzők a nyomás növelés hatására fellépő, a hagyományos mérési eljárás eredményeihez képesti jelentősebb eltérések miatt, alkalmatlannak tartották.

További problémákat okozhat, hogy a szakirodalom alapján többféle mérési mód is elterjedt a pvT tulajdonságok vizsgálatára, amelyek eredményei között kisebb-nagyobb eltérések léphetnek fel, illetve belőlük mérési hibák is származhatnak legfőképp az átmeneti tartomány meghatározása során. A fröccsöntési folyamat vizsgálatára és a fröccsöntés szimulációkhoz azonban csak az izobár hűtéssel felvett pvT görbék használhatók megfelelően, mivel csak ebben a mérési módban biztosítható, hogy a vizsgált átmenet a fröccsöntés során is végbemenő szilárdulás legyen, illetve hogy az átalakulási folyamatot a nyomás változás ne befolyásolhassa.

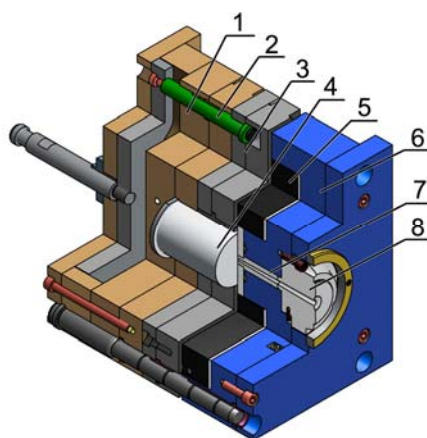
Napjainkban a végeselemes algoritmusok egyre nagyobb szerepet kapnak, mivel segítségükkel a tervezési folyamat jelentősen gyorsítható, illetve a hibák jelentős része még a gyártás megkezdése előtt megszüntethető. A pvT adatok nélkülözhetetlenek gyakorlatilag az összes elterjedten használt zsugorodás számítási modell és így a végeselemes algoritmusok számára is. Az algoritmusok bemenő adatainak pontossága hatással van a végeredmények pontosságára is, így fontos, hogy a pvT adatok a lehető legpontosabban írják le az alapanyag feldolgozás közbeni viselkedését. Mivel a pvT adatok leírására használt állapotegyenletek leggyakrabban csak a mérés során alkalmazott körülményeknek megfelelően képesek jellemezni az alapanyag viselkedését, fontos, hogy a mérések a feldolgozás során jellemző

paramétereknek megfelelően történjenek. Az elvégzett irodalomkutatás alapján a doktori értekezésemben a következő célokat tűztem ki:

- olyan új mérési eljárás lehetőségeinek és részfolyamatainak teljes körű feltárása és elemzése, amelynek segítségével a hőre lágyuló polimer alapanyagok nyomás-hőmérséklet-fajtérfogat (pV_T) összefüggése a feldolgozás (fröccsöntés) során kialakuló, nem egyensúlyi viszonyoknak megfelelően válik mérhetővé,
- az általam kifejlesztett új mérési elv gyakorlati alkalmazhatóságának vizsgálatához szükséges mérőberendezés tervezése, építése és tesztelése,
- a mérések kiértékeléséhez szükséges algoritmusok kifejlesztése, tesztelése,
- a berendezés működésének optimalálása, valamint a mért pV_T adatok más eljárással meghatározott adatokkal való összehasonlítása,
- a hűtési sebesség hatásának vizsgálata amorf hőre lágyuló alapanyagok esetében, illetve a nagy sebességű hűtéssel felvett pV_T adatok fröccsöntési szimulációs algoritmussal történő felhasználása és azok számítási pontosságra gyakorolt hatásának elemzése.

3. Vizsgálati módszerek, eredmények

Dolgozatomban egy új mérési eljárást fejlesztettem, amely a polimer ömledékek fröccsöntő szerszámba való juttatását követően a forró ömledék hűlésének következtében fellépő zsugorodás mérésével teszi mérhetővé a fajtérfogat változását. Az új mérési elv alkalmazhatóságának bizonyítására speciális fröccs-sajtoló szerszámot (1. ábra) terveztem és gyártottam.

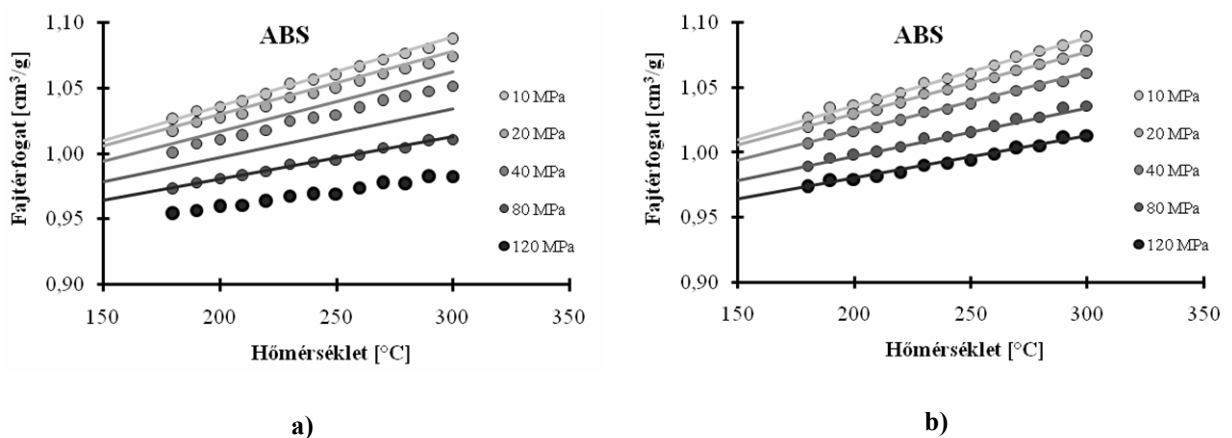


1. ábra A mérésekhez használt speciális fröccs-sajtoló szerszám felépítése (1-mozgó oldali szerszámblokk, 2- húzórud, 3- lengőlap, 4- mag, 5- elektromágnes, 6- álló oldali szerszámblokk, 7- cserélhető beömlő elem, 8-pneumatikus düzni)

Az általam fejlesztett mérőszerszám formaürege fokozatmentesen változtatható a teljes mérési ciklus során, amelyet egy a szerszámban elhelyezett mozgatható mag tesz lehetővé. A különböző mérési nyomások a mozgatható magra kifejtett, eltérő nagyságú erőkkel hozhatóak létre, a formaüregbe zárt alapanyag térfogatváltozása a mag elmozdulásából számítható.

Az első eredmények elemzését követően a mért adatok pontosságának javítására a mérési folyamatot két szakaszra bontottam. A mérések első fázisában az átmeneti hőmérséklet feletti tartományt vizsgálatát a fröccsöntőgép aggregátjának segítségével végeztem, majd az átmeneti tartomány alatt jellemző viselkedést vizsgáltam a speciális fröccs-préselő szerszám segítségével.

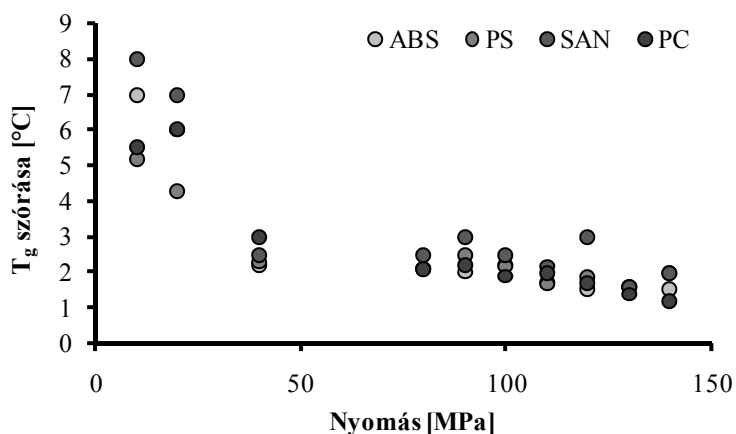
A fröccsöntőgép aggregátjában végzett méréseim során, az irodalmi adatokkal egyezően jelentős eltéréseket tapasztaltam a hagyományos úton mért és a fröccsöntőgépben mért adatok között a nagyobb nyomások (40-120 MPa) tartományában. A mérések pontosságának javítására megvizsgáltam, hogy melyek azok a mérés során fellépő jelenségek, amelyek elhanyagolása jelentős mérési hibához vezethet. Vizsgálataim alapján fizikai alapokon nyugvó kompenzációkat javasoltam az általam legjelentősebbnek vélt, mérési hibákat okozó tényezők hatásának kiküszöbölésére. ABS alapanyagon vizsgáltam a plasztikálási folyamat jellemzőinek hatását az aggregátban mért fajtérfogatokra. Megállapítottam, hogy a plasztikálási folyamat jellemzőinek (csiga kerületi sebesség, torlónyomás, hőtartási idő) nem megfelelő beállítása jelentős hibákat okozhat a mérések során. Bizonyítottam, hogy megfelelő plasztikálási beállítások mellett, az általam javasolt kompenzációkat is figyelembe véve, a szakirodalmakban elterjedt állásponttal szemben, a nagyobb nyomások tartományában is lehetséges pontos pVT adatok meghatározása a fröccsöntőgép aggregátjában (2. ábra).



2. ábra A fröccsöntőgép aggregátjában, ABS alapanyagon mért (pontok), kompenzációk nélküli fajtérfogat értékek (a) és kompenzált fajtérfogat értékek (b) összehasonlítva Confining Fluid eljárással meghatározott adatokkal (vonalak)

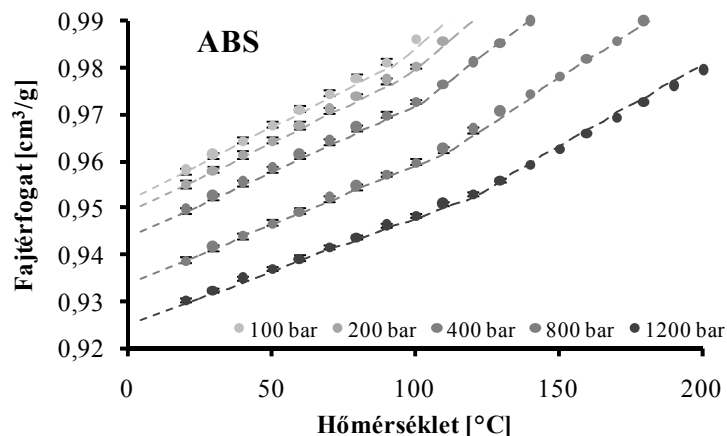
A mérések során, a mintában fellépő nagy hűtési sebesség miatt jelentős, akár 100°C-ot meghaladó hőmérséklet különbség is kialakulhat a minta külső és belső részei között, így a fröccs-sajtoló szerszámban mért adatok közvetlenül nem köthetőek egy adott hőmérséklethez és nyomáshoz. Az egyes hőmérsékletekhez tartozó fajtérfogatok meghatározására kompenzációs módszert fejlesztettem, amelynek segítségével a speciális szerszámban mért térfogat-idő összefüggésből a hőmérséklet eloszlás ismeretében a számítás elvégezhető. A hőmérséklet eloszlásának meghatározására a hővezetés differenciálegyenletének explicit közelítő megoldását alkalmaztam. Hőtani számításokkal igazoltam, hogy a fröccs-sajtoló szerszámban végzett méréseim során a próbatest vastagságának megfelelő megválasztásával többféle hűtési sebesség is elérhető. Ezzel a vizsgálatok során 5-1 mm vastagságú próbatestek mérésével, az üvegesedési hőmérsékleten mérhető hűtési sebességet 115-6500°C/perc tartományban tudtam változtatni az alkalmazott alapanyagok esetében.

Bizonyítottam, hogy a fröccs-préselésen alapuló nyomás-hőmérséklet-fajtérfogat mérések során létezik egy olyan alapanyagtól függő préselési határ nyomás (3. ábra), amely felett az amorf hőre lágyuló polimerek üvegesedési hőmérséklete és annak nyomásfüggése pontosabban meghatározható. A kisebb nyomásokon végzett üvegesedési átmeneti hőmérsékletek pontosítására extrapoláción alapuló módszert alkalmaztam, amellyel a 10 és 20 MPa nyomáson mért eredmények bizonytalanságát sikerült jelentősen csökkenteni.



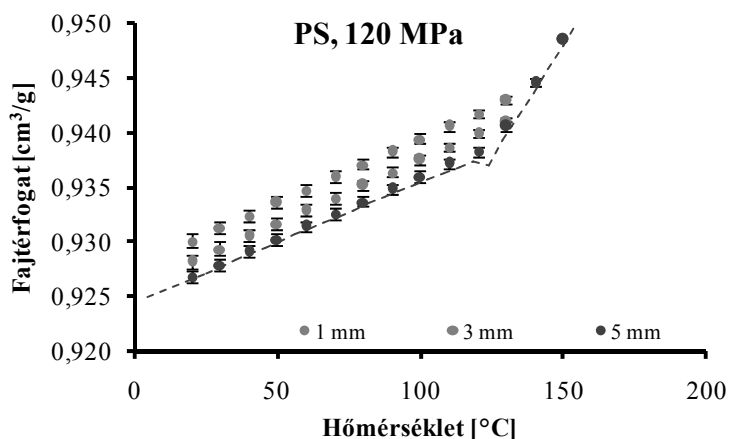
3. ábra A különböző nyomásokra meghatározott üvegesedési hőmérsékletek mérési bizonytalansága

A nagy falvastagságú próbatesteken, tehát kis hűtési sebességgel vizsgált darabokon mért fajtérfogatok jó egyezést mutattak a hagyományos mérési eljárással meghatározott adatokkal (4. ábra).



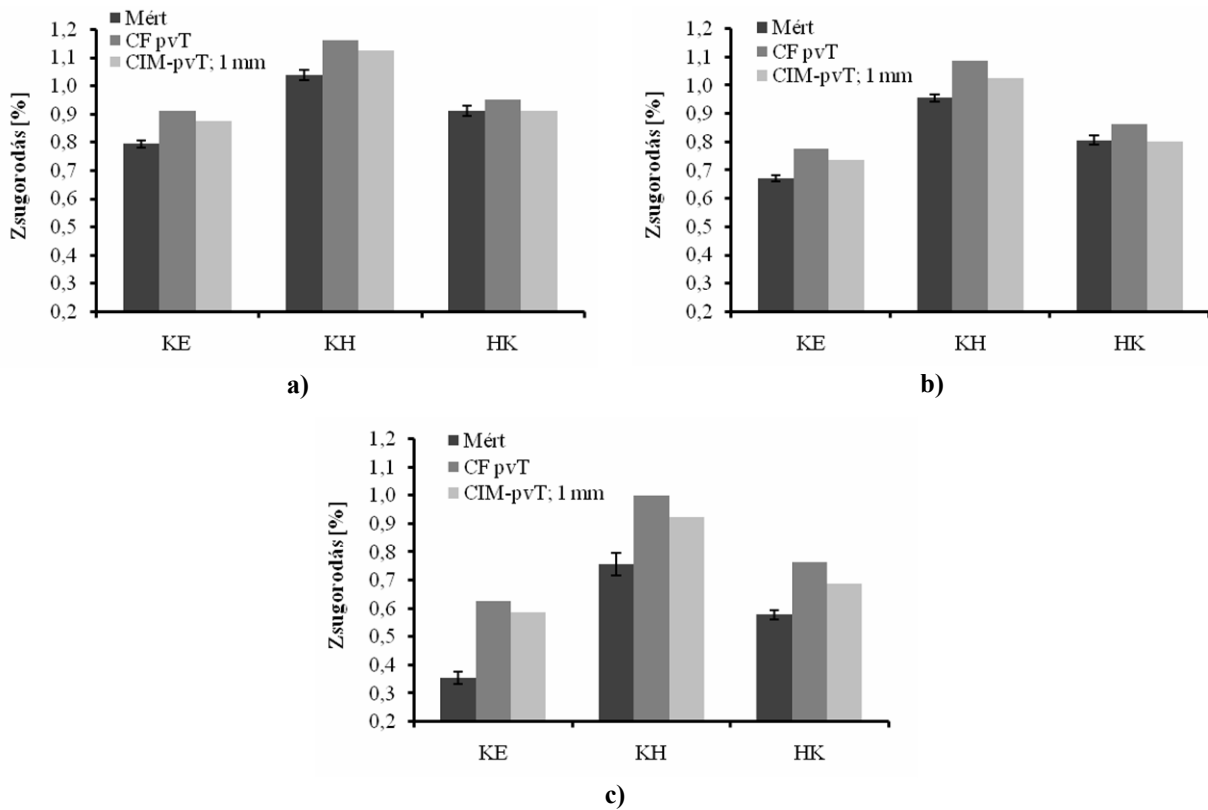
4. ábra 5 mm vastagságú, ABS alapanyagú próbatesten mért fajtérfogat értékek (pontok) összehasonlítva hagyományos eljárással meghatározott adatokkal (vonalak)

Amorf hőre lágyuló alapanyagokon eltérő hűtési sebességekkel végzett vizsgálataim segítségével igazoltam, hogy az új mérési eljárás alkalmas a hűtési sebesség növelésének hatására bekövetkező fajtérfogat növekedés és üvegesedési hőmérséklet eltolódás kimutatására (5. ábra).



5. ábra 5, 3 és 1 mm vastagságú próbatesteken, eltérő hűtési sebességgel, 120 MPa nyomáson, polisztirol (PS) alapanyagon mért fajtérfogat értékek (pontok) összehasonlítva hagyományos eljárással meghatározott adatokkal (vonalak)

A különböző hűtési sebességekkel mért pvT adatok szimulációkra gyakorolt hatásának vizsgálatára több, eltérő hűtési sebességgel mért pvT adatsor felhasználásával végeztem zsugorodás számításokat többféle eltérő technológiai beállításra. A számított eredményeket a szimuláció során használt technológiai beállításokkal fröccsöntött darabokon mért zsugorodás értékekkel hasonlítottam össze. Igazoltam, hogy az algoritmus a nagy sebességű hűtéssel meghatározott adatok felhasználásával, a valós adatokkal összehasonlítva pontosabban képes előre jelezni vékony falú (1,2 mm) lapkaszzerű termék zsugorodási tulajdonságait (6. ábra).



6. ábra A BASF Terluran GP-35 alapanyagból fröccsöntött, 80*80*1,2 mm méretű próbatetek valós és eltérő módon mért pvT adatokkal, szimulációval számított zsugorodása 240°C ömledék hőmérséklet és 40°C szerszám hőmérséklet mellett, 300 bar (a), 500 bar (b) és 700 bar (c) utónyomás esetén (CF pvT: Szimulációval, Confining Fluid technikával mért pvT adatokkal számítva; CIM-pvT; 1 mm: Szimulációval, saját mérésből származó, 1 mm vastagságú próbatesten mért pvT adatokkal számítva; KE - keresztirányú első zsugorodás, KH - keresztirányú hátsó zsugorodás, HK - hosszirányú középső zsugorodás)

4. Tézisek

Kutatómunkám eredményeit az alábbi tézispontokban összegzem:

1. Tézis:

Kifejlesztettem egy speciális fröccs-sajtoláson alapuló, fröccsöntőgépen kivitelezhető mérési eljárást és a hozzá tartozó kiértékelő algoritmust, amellyel valós feldolgozási körülmények között, két lépésben lehet meghatározni az amorf hőre lágyuló polimerek nyomás-hőmérséklet-fajtérfogat összefüggését 20-350°C hőmérséklet tartományban, illetve 10-180 MPa nyomástartományban. Az átmeneti hőmérséklet tartomány feletti hőmérsékletre jellemző adatok mérését a fröccsöntőgép plasztikáló egységében, az átmeneti hőmérséklet tartomány alatt jellemző adatok meghatározását egy speciális fröccs-sajtoló szerszámban végzett mérésekből matematikai modell felállításával végeztem. A mérési elv alkalmazhatóságát polisztirol (PS), sztírol-kopolimerek (ABS, SAN), valamint polikarbonát (PC) alapanyagokon indirekt dilatometriás mérésekkel összevetve igazoltam [1-3, 5, 6].

2. Tézis:

Bizonyítottam, hogy a fröccsöntőgép fröccsegységben fellépő mechanikai és hőtani hatásokból származó deformációk, valamint a csigacsúcs előtti holtter hatásának és a mérés során a mintán végzett mechanikai munka kompenzálásával, illetve a plasztikálási folyamat által okozott ömledék hőmérséklet növekedés minimalizálásával a fröccsegységében végzett mérésekkel 0,3% pontossággal határozható meg hőre lágyuló polimer ömledékek fajtérfogata 10-120 MPa nyomástartományban. Állításomat Arburg Allrounder 370S 700-290 Advance fröccsöntőgépen polisztirol (PS) és sztírol-kopolimerek (ABS, SAN) esetében 180-300°C hőmérséklettartományban, polikarbonát (PC) alapanyag esetében pedig 250-340°C hőmérséklettartományban igazoltam [2, 3, 6].

3. Tézis:

Kimutattam, hogy az általam fejlesztett fröccs-préselésen alapuló mérőrendszer alkalmas az üvegesedési hőmérséklettartomány alatti nyomás-hőmérséklet-fajtérfogat összefüggés meghatározására izobár hűtést alkalmazva. Bizonyítottam, hogy amorf hőre lágyuló alapanyagok esetében a számítás a préselési fázisban a minta falvastagságának

időbeni változásából és annak keresztmetszeti hőmérséklet eloszlásából elvégezhető. Állításaimat polisztirol (PS), sztirol-kopolimerek (ABS, SAN), valamint polikarbonát (PC) alapanyagok alkalmazásával igazoltam [1-3, 5, 6].

4. Tézis:

Bizonyítottam, hogy a fröccs-préselésen alapuló nyomás-hőmérséklet-fajtérfogat mérések során létezik egy olyan alapanyagtól függő préselési határ nyomás, amely felett az amorf hőre lágyuló polimerek üvegesedési hőmérséklete és annak nyomásfüggése pontosabban meghatározható. Igazoltam, hogy ezekből a mérésekből a két tartományú Tait egyenlet átmeneti hőmérsékletet és annak nyomásfüggését leíró paraméterei számíthatók és segítségükkel a határ préselési nyomás alatt számított adatok tovább pontosíthatók. Állításaimat polisztirol (PS), sztirol-kopolimerek (ABS, SAN), valamint polikarbonát (PC) alapanyagok alkalmazásával igazoltam.

5. Tézis:

Bizonyítottam, hogy amorf hőre lágyuló polimer alapanyagok esetében az eltérő falvastagságú próbatestek izobár hűtés melletti mérésével különböző hűtési sebességekre jellemző fajtérfogat függvények határozhatók meg. A fröccsöntés során is jellemző hűtési sebesség tartományban végzett mérésekből származó fajtérfogat adatokkal történő számítások esetén a várható zsugorodások előrejelzésének pontossága javítható.

5. Publikációk

1. **Szabó F.**, Kovács J. G.: Development of a novel pvT measuring technique. *Material Science Forum*, 729, 126-131 (2013).
2. **Szabó F.**, Kovacs J. G.: Development of a pressure-volume-temperature measurement method for thermoplastic materials based on compression injection molding. *Journal of Applied Polymer Science*, 131, 41140-41148 (2014).
3. **Szabó F.**, Kovács J. G.: Új lehetőségek a pvT tulajdonságok meghatározására: a CIM-pvT rendszer. *Műanyag és Gumi*, 51, 47-51 (2014).
4. Suplicz A., **Szabo F.**, Kovacs J. G.: Injection molding of ceramic filled polypropylene: The effect of thermal conductivity and cooling rate on crystallinity. *Thermochimica Acta*, 574, 145-150 (2013).
5. Suplicz A, **Szabó F.**, Kovács J G: Anyagvizsgálati módszerek fejlesztése fröccsöntési alkalmazáshoz. *Műanyagipari Évkönyv*, 11, 34-41 (2013).
6. **Szabó F.**, Suplicz A., Kovács J. G.: Anyagtulajdonságok újszerű mérési lehetőségei. *Nemzetközi Gépészeti Találkozó - (OGÉT)*, Arad, Románia, 350-353 (2013).
7. **Szabó F.**, Tábi T.: Optimization of the injection moulded PLA-cellulose composite products. *Proceedings of the Seventh Conference on Mechanical Engineering*, Budapest, Hungary, p6 (2010).
8. Tábi T., Sajó I. E., **Szabó F.**, Luyt A. S., Kovács J. G.: Crystalline structure of annealed polylactic acid and its relation to processing. *Express Polymer Letters*, 4, 659-668 (2010).
9. Suplicz A., **Szabó F.**, Kovács J. G.: Hővezető polimerek fejlesztési lehetőségei és vizsgálati módszerei. *Nemzetközi Gépészeti Találkozó - (OGÉT)*, Arad, Románia, 346-349 (2013).
10. Zink B., **Szabó F.**, Hatos I., Hargitai H., Kovács J. G.: DMLS szerszámbetétek szimulációs vizsgálata. *Műanyag- és Gumiipari Évkönyv*, 12, 80-87 (2014).
11. Tábi T., Suplicz A., **Szabó F.**, Kovács N. K., Zink B., Hargitai H., Kovács J. G.: The analysis of injection molding defects caused by gate vestiges, *Express Polymer Letters*, 9, 394-400 (2015).