

FRÖCCSÖNTÉS SZIMULÁCIÓS SZOFTVER VETEMEDÉSSZÁMÍTÁSI ALGORITMUSAINAK PONTOSÍTÁSA

Napjainkban a fröccsöntési folyamat szimulációja egyre nagyobb szerepet kap az ipari gyakorlatban, így a számítás során használható modellek pontosságának fokozása is kiemelt jelentőségű. Kutatásunk célja olyan szimulációs módszer fejlesztése, amelyek segítségével a fröccsöntés során kialakuló alapanyag inhomogenitások hatása figyelembe vehető a számítások során. Munkánkban az Autodesk Simulation Moldflow fröccsöntés szimulációs program zsugorodás számítási algoritmusainak pontosabbá tételét végeztük el az alapanyagban található töltőanyag szegregációjának számításba vételével.

Nowadays injection molding simulation is playing a more and more important role in the plastic industry, therefore increasing the accuracy of models used in simulation is of paramount importance. The goal of our research is to develop a simulation method which can take into account the inhomogenities of the material which form during injection molding. We improved the shrinkage calculation algorithms of the Autodesk Simulation Moldflow injection molding simulation program by taking into account the segregation of the filler in the material.

1. BEVEZETÉS

Az elmúlt évtizedekben a műanyag-feldolgozás korunk egyik legmeghatározóbb iparágává nőtte ki magát. 2015-ben 322 millió tonnányi polimer terméket gyártottak, amelynek köszönhetően a műanyagipar az előkelő 7. helyet foglalja el Európa vezető iparágai között. A folyamatos fejlődésnek köszönhetően a polimer termékek felhasználása mára számos területre kiterjed, többek között a csomagoló-, az építő-, az autó- és az elektronikai iparra [1].

Jelenleg a fröccsöntés az egyik legelterjedtebben alkalmazott feldolgozástechnológia, részaránya meghaladja a 30%-ot a magyar műanyag-feldolgozó iparban [2]. Az ágazat dinamikus fejlődése, a fröccsöntött termékek bonyolult geometriája, valamint a folyamat során lejátszódó összetett anyagszerkezeti változások indokolják a folyamat szimulációs úton történő modellezését. A termék-, illetve szerszámtervezési folyamat támogatása mellett a fröccsöntés szimulációs programok segítségével optimalizálható a gyártás, így rengeteg idő és költség takarítható meg, valamint jobb termékminőség érhető el [3].

A fröccsöntött termékekre jellemző zsugorodás és vetemedés számítása szintén egyre elterjedtebb kihívás a szimulációs mérnökök számára, mivel a nem tervezett deformációk minőségromlást eredményezhetnek, így az esetek jelentős részében

TOMIN MÁRTON¹
SZABÓ FERENC²

A cikk az Emberi Erőforrások
Minisztériuma ÚNKP-18-4 kódszámú
Új Nemzeti Kiválóság Programjának
támogatásával készült.



már a tervezési fázisban célszerű szimulációs úton minimalizálni azokat. A számított eredmények pontosságát azonban csökkentik a modellezés során alkalmazott egyszerűsítések, amelyre jó példa az alapanyagban alkalmazott töltő- és erősítőanyagok folyási út menti szétválasztódása (szegregáció), amelyet a kereskedelmi szoftverek algoritmusai pillanatnyilag nem képesek figyelembe venni. Mivel a termék különböző részein létrejövő eltérő töltőanyag-tartalom hatására megváltoznak a lokális alapanyag tulajdonságok, így módosul az egyes részekre jellemző zsugorodás mértéke is, ezzel a szimulációk pontossága csökken [4, 5].

A szegregáció elsősorban szilárd anyagokra jellemző folyamat, amely során a részecskék valamilyen tulajdonság szerinti elkülönülése megy végbe. A keverékekben ideális esetben a komponensek részaránya a keverék minden pontjában megegyezik, ezt tökéletes keveréknek is nevezik. Mivel a valóságban ilyen nem létezik, a gyakorlatban a véletlenszerű keverék előállítása a cél, amikor a részecskék megtalálási valószínűsége a keverék bármely pontján megegyezik az egész rendszerre vonatkozó részecske részarányával. Abban az esetben, ha ez az állapot nem áll fenn, szegregáció megy végbe, a részecskék megtalálási valószínűsége, vagyis a részecskekoncentráció eltérő lesz a keverék egyes régióiban (1. ábra) [6].

Abban az esetben, ha a kívánt keverék komponensei azonos fizikai tulajdonságokkal bírnak, kellően hosszú keveréssel elérhető a véletlenszerű keverék előállítása, ám ez a gyakorlatban nem jellemző. Mivel legtöbbször a komponensek között tulajdonságbeli különbségek adódnak, a keverék nem lesz homogén, szegregáció megy végbe. Szemcsés anyagok esetében ennek legfőbb oka a részecskék között fennálló méretkülönbség, amelyre a szegregációs mechanizmusoknak négy fő típusa vezethető vissza. Ezek az eltérő röppályából adódó szegregáció, a kisebb részecskék nagyokon való átszivárgásából adódó szegregáció, az elutriálásból származó szegregáció, valamint a nagyobb részecskék vibráció hatására történő felemelkedéséből adódó szegregációja [6].

¹ doktorandusz, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Polimertechnika Tanszék, 1111 Budapest, Műegyetem rakpart 3.

² adjunktus, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Polimertechnika Tanszék, 1111 Budapest, Műegyetem rakpart 3. szabof@pt.bme.hu



Tökéletes keverék

Véletlenszerű keverék

Szegregált keverék

1. ábra. Keverék típusok [6]

A töltőanyagot tartalmazó polimer ömledék szerszámüregben történő előrehaladása a töltőanyag koncentráció megváltozását okozza a folyási út mentén keresztirányban, valamint a termék vastagsága mentén is. Ezek közül a folyásirányú szegregáció a legjelentősebb, amely a töltőanyag méretének, valamint koncentrációjának növelésével szignifikánsan növekszik. Ezt segítik elő továbbá a folyási út mentén fennálló éles geometriai törések, amelyek megnehezítik az ömledékfront előrehaladását [7, 8].

A polimerek zsugorodásának és árának csökkentésére gyakran alkalmazott megoldás a töltőanyagok használata. Ilyen, széleskörűen elterjedt anyag az üvegyöngy, amely izotróp jellegéből adódóan a hossz- és keresztirányú zsugorodást egyenletesen változtatja meg, azonban esetében is felléphet a szegregáció jelensége, amely nem kívánt vetemedéshez vezethet.

Célunk olyan módszer kidolgozása, amelynek segítségével a szegregációs jelenségek és akár más jellegű inhomogenitások hatása is figyelembe vehető a numerikus számítások során, ezáltal a számítások pontossága javítható, a vetemedett alak jobban közelíthető. Mivel a szimulációs programokat az ipar számos területén alkalmazzák, így a vetemedési számítások pontosítása széles körben lehet pozitív hatással a termék- és szerszámtervezési folyamatokra, valamint elősegítheti a megfelelő alapanyag és töltőanyag kiválasztását.

2. FELHASZNÁLT ANYAGOK ÉS MÓDSZEREK

2.1. FELHASZNÁLT ANYAGOK

Vizsgálatainkat 80x80x2 mm névleges méretű, üvegyönggyel töltött polipropilén alapanyagú lapka próbatesten végeztük el, mivel ez a geometria kiválóan alkalmas a folyási út menti szegregációs folyamatok vizsgálatára.

Előkísérleteink során 10 alapanyagnál vizsgáltuk a fellépő zsugorodás mértéket, valamint a töltőanyag szegregáció hatását. Töltetlen polipropilén (MOL Tipplén H145 F) mellett három eltérő töltőanyag koncentrációban három különböző átmérő mérettartományba eső Cerablant típusú üvegyönggyel töltött PP mátrixú próbatesteket gyártottunk (1. táblázat).

A kompaundálást megelőzően az üvegyöngyöket mérettük szerint osztályoztuk BA 200N szitarázóval. Ezt követően az LTE 25-30/C típusú extruderen az 1. táblázatnak megfelelő tömegszázalékkal töltött kompaundokat hoztunk létre. A kompaundálás során 25 1/perc fordulatszámot és 210 °C-os ömledékhőmérsékletet alkalmaztunk. A fröccsöntött próbatestek zsugorodási és szegregációs mérése szolgálja az alapot

a szimulációs program vizsgálatára, a vetemedésszámítási algoritmusok pontosítására.

1. táblázat. A kísérletekhez felhasznált PP mátrixú próbatestek üvegyöngy összetétele

Koncentráció [%]	Átmérő tartomány [µm]		
10	75-125	125-250	250<
25	75-125	125-250	250<
40	75-125	125-250	250<

2.2. MÉRÉSI MÓDSZEREK

Az alapanyagok zsugorodási tulajdonságainak, valamint a fröccsöntési szimulációk zsugorodásszámítási pontosságának vizsgálatára lapka próbatesteket gyártottunk Arburg Allrounder 370S 700-290 típusú fröccsöntő géppel a 2. táblázat szerinti fröccsöntési paraméterekkel.

2. táblázat. A próbatestek fröccsöntési paraméterei

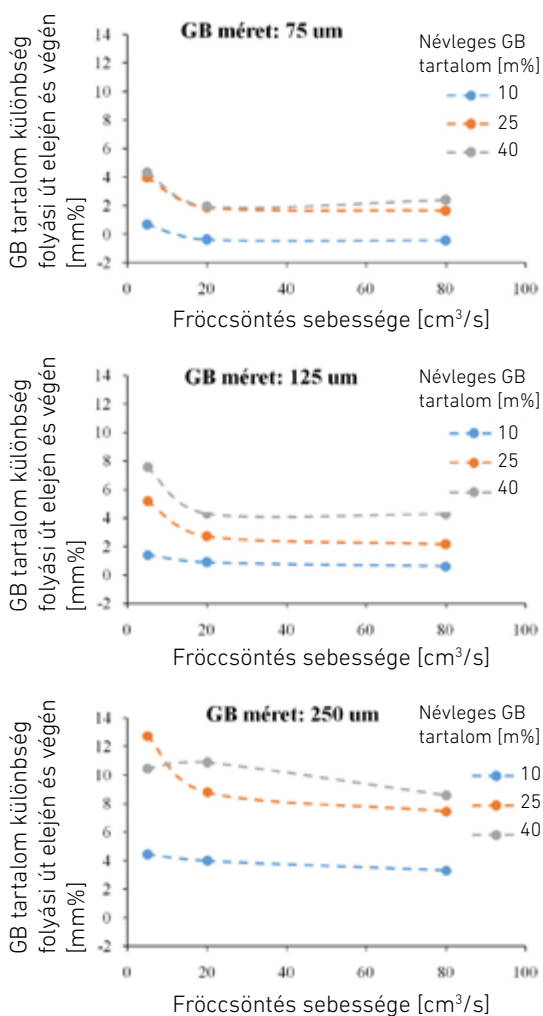
Paraméter	Érték
Szerszámhőmérséklet, °C	30
Ömledékhőmérséklet, °C	230
Befröccsöntési sebesség, cm ³ /s	5, 20, 80
Utónyomás, bar	100, 200, 500
Utónyomási idő, s	5
Maradék hűtési idő, s	15

A próbatesteken végzett zsugorodásmérések rámutattak az üvegyöngy koncentráció és a zsugorodás közti egyértelmű összefüggésre, hiszen a koncentráció növelése minden esetben a zsugorodás csökkenését eredményezte. A kapott eredmények referenciaként szolgáltak a későbbi szimulációk értékeléséhez.

A zsugorodásmérés során meghatározott kísérlettervvel meg egyezően vizsgáltuk a fröccsöntési sebesség szegregációra gyakorolt hatását, így három különböző befroccsöntési sebességgel (5, 20, 80 cm³/s) gyártott próbatestek szegregációját mértük minden alapanyag esetében. A folyási út menti szegregáció vizsgálata céljából a fröccsöntött próbatesteket négy egyenlő részre daraboltuk, majd a minták mátrixanyagának kiégetését követően az üres csésze tömegének, valamint az égetés előtti és utáni

tömegek ismeretében a szegregáció meghatározhatóvá vált.

A mérések igazolták a szegregációs folyamatokról korábban alkotott elméletet, miszerint a folyási út elejáról a befroccsöntési folyamat során kimosott töltőanyag a folyási út végén halmozódik fel, így a folyási út mentén töltőanyag tartalomban különbség lesz. Az eredményekből megállapítottuk, hogy a szegregációs folyamatot az üvegyöngyök méretének növekedése, valamint a befroccsöntési sebesség csökkentése felerősítette. A 2. ábra a mért üvegyöngy tartalom különbségét ábrázolja a folyási út eleje és vége között a fröccsöntési sebesség függvényében. A diagramok alapján megállapítható, hogy a legnagyobb eltérés az 5 cm³/s sebességgel fröccsöntött, 250 µm átmérőjű gyöngyök esetében jelentkezik, ahol a koncentráció különbség a régiók között a 10%-ot is meghaladja.



2. ábra. Üvegyöngy tartalom különbség a folyási út elején és végén a fröccsöntési sebesség függvényében eltérő átmérőjű üvegyöngyök (GB) alkalmazása esetén

A szimulációs modellek véges elem hálójá 5 mm élhosszúságú tetraéder elemekből épült fel. Az alapanyag modellek definiálása céljából pvT, DSC, hővezetés, valamint viszkozitásméréseket végeztünk.

A tiszta PP pvT adatait egy PistonDie elven működő dilatometerrel határoztuk meg. A különböző üvegyöngy tartalmú alapanyagok pvT adatait a töltetlen PP kimért pvT értékeinek felhasználásával, a keverékszabály segítségével számítottuk ki. Miután a pvT görbék adatpontjait kiszámítottuk, elvégeztük a Tait

egyenlet illesztését, amelynek paramétereit bevittük a program adatbázisába.

A fajhő meghatározására TA Q2000 berendezésen DSC mérést végeztünk 0 és 300 °C közötti hőmérséklet tartományban, 5 °C/perc hűtési sebességet alkalmazva.

A hővezetési tényező értékének mérését egy speciális, aszimmetrikus elrendezésű hot-plate berendezésen végeztük el 55 °C-os hőmérsékleten.

A viszkozitásgörbéket a fröccsöntési folyamatra jellemző nyírósebességi tartományt figyelembe véve határoztuk meg kapilláris (Ceast SR 50) és rotációs (Anton-Paar Physica MCR 301) reométerekkel. A rotációs reométeres méréseket lap-lap elrendezésben, 1 mm-es résméretet beállítva három különböző hőmérsékleten (150 °C, 190 °C, 240 °C) végeztük.

A szimulációs modellek megfelelőségének igazolására vizsgáltuk a szerszámüregben uralkodó nyomásviszonyok és a számított adatok egyezését. A szimulációkkal megegyező paraméterekkel gyártott próbatetek fröccsöntése során a szerszámbe helyezett Kistler 6182B nyomásmérő szenzorok és a Kistler CoMolnjection adatgyűjtő segítségével négy különböző pontban folyamatosan mértük a nyomást és hasonlítottuk össze a számított eredményekkel.

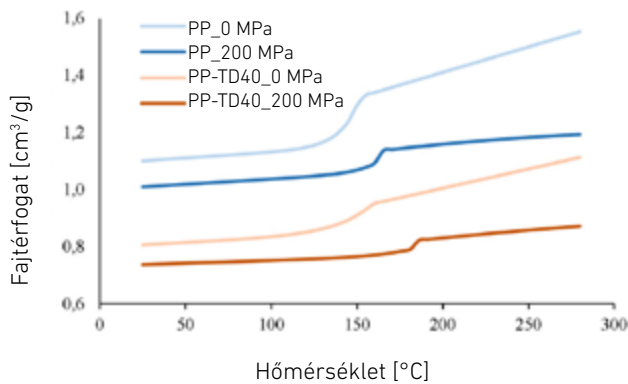
Az alapanyag jellemzők teljes körű meghatározására irányuló mérések alapján elkészített modelleken végzett szimulációk a valóságot jól közelítő nyomáslefutásokat adtak. A nyomásértékek maximumai mellett a mérési pontok közti nyomásesés és a görbék lefutásának jellege is egyeztek a gyártás során mért görbékkel.

3. EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKELÉSÜK

A kitűzött cél megvalósítására létrehoztunk egy új programmodult, amelynek segítségével az Autodesk Simulation Moldflow programcsomag pvT kezelési eljárása módosítható. A fröccsöntés modellezése során a program alapesetben csupán a módosított, kéttartományú Tait-egyenlet segítségével képes kezelni a fajtér fogat alakulását a folyamat során, amely jellegéből adódóan nem kezeli az alapanyag inhomogenitását. A kialakított kiegészítés működésének alapelve, hogy a szimuláció során az összes számításban részt vevő csomóponthoz lehetővé teszi egyedi fajtér fogat leíró függvény definiálását, így a vizsgált darabon belül akár a csomópontok számával megegyező számú inhomogenitás kezelését. A létrehozott bővítmény (API) C++ programozási nyelvben íródott, az inhomogenitások adatait külső forrásokból képes beolvasni.

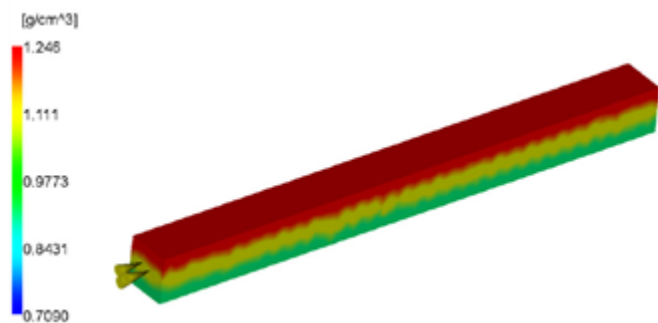
A továbbiakban egy reprezentatív mintán, egy egyszerű hasáb testen szemléltetjük az API működésének hatását. A test esetében három különálló régió került definiálásra, amelyek eltérő pvT adatokkal, így eltérő zsugorodási tulajdonságokkal rendelkeztek. Az első régió alapanyagként töltetlen PP-t választottunk (Borealis HD120M0), a középső régió alapanyaga 20% talkummal töltött PP (Borealis ME266U), a harmadik régió anyaga pedig 40% talkummal töltött PP (Borealis ME466WG). Az említett alapanyagok pvT adatai a szimulációs szoftver alapanyag adatbázisában megtalálhatók, rajtuk az eltérő töltőanyag tartalom hatása egyértelműen megmutatkozik (3. ábra). Amint az látható, a talkum töltőanyag használatával

az alapanyag fajtérfogata, hőtágulási együtthatója, kompresszibilitása és a kristályosodás során végbemenő fajtérfogat változása is csökkent. Ezek összegeként, azonos körülmények között a nagyobb arányban töltött alapanyag várhatóan kisebb zsugorodást mutat a számítások során.



3. ábra. Az algoritmus tesztelése során használt töltetlen PP alapanyag és 40% talkum töltésű PP alapanyag fajtérfogatának változása 0 MPa és 200 MPa nyomáson

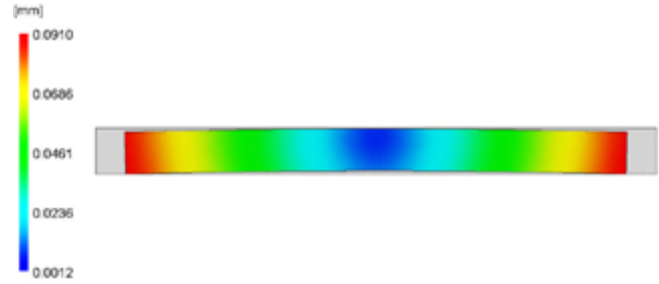
A régiók kialakítását és a rájuk jellemző fajtérfogat leíró függvények megadását követően a program a számításokat a hagyományos szimulációkhoz hasonlóan elvégzi, ám a fajtérfogat változásokat a régióként beállított, eltérő p/vT adatokból számítja. Az API használata a számítási eredményekben megjelenik, ezt bizonyítja a próbatest három régiójában kialakuló eltérő sűrűség észlelése is (4. ábra).



4. ábra. Régióként eltérő sűrűség a hasáb minta esetében

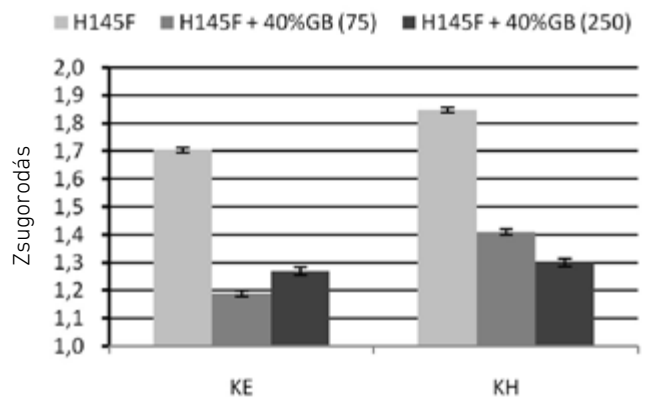
Az eltérő p/vT adatok megadása, a sűrűségek változásának kimutatása mellett, lehetővé teszi továbbá a töltőanyag szegregáció zsugorodásmódosító hatásának kimutatását is. Ezt bizonyítja az 5. ábra, amely a hasáb esetében fellépő vetemedést mutatja, amelyet a régióként eltérő zsugorodás okoz.

A mintán bemutatva jól látható a beépített API pozitív hatása a számítási eredményekre, amely segítségével kimutathatóvá válik a szegregáció zsugorodásra gyakorolt hatása, így számos, eddig szimulációs úton nem kezelhető problémakör megoldására nyílik lehetőség.



5. ábra. A vizsgált hasáb mintában jelentkező vetemedés mértéke a régióként eltérő fajtérfogat változás hatására

Előkísérleti eredményeink rámutattak, hogy a szegregáció hatása a 25 m% és 40 m% üvegyönggyel töltött mintáknál, 125 µm vagy nagyobb méretű töltőanyag alkalmazásakor volt jelentősebb, így ezekben az esetekben lépett fel a legnagyobb mértékű üvegyöngy tartalom eltérés a folyási út eleje és vége között. Amint azt a 6. ábra is mutatja, ennek hatása jelentős a termékek zsugorodására is. A töltetlen PP alapanyag zsugorodását a 40 m% üvegyöngy átlagosan 0,5%-kal mérsékelte, azonban a 250 µm-es üvegyöngyök alkalmazásával a próbatestek (gáthoz közelebb eső) keresztirányú első (KE) zsugorodása kis mértékben nőtt, míg a keresztirányú hátsó zsugorodás (KH) kis mértékben csökkent a 75 µm-es üvegyöngyök használatához viszonyítva, ezzel a folyási út elején és végén jellemző zsugorodás csaknem kiegyenlítődt. Ugyanez a trend volt megfigyelhető a 25 m% üvegyöngy tartalom esetén is. A jelenség hátterében az eltérő mértékű szegregáció áll, amelyre jelentős hatása volt az eltérő töltőanyag méretnek.

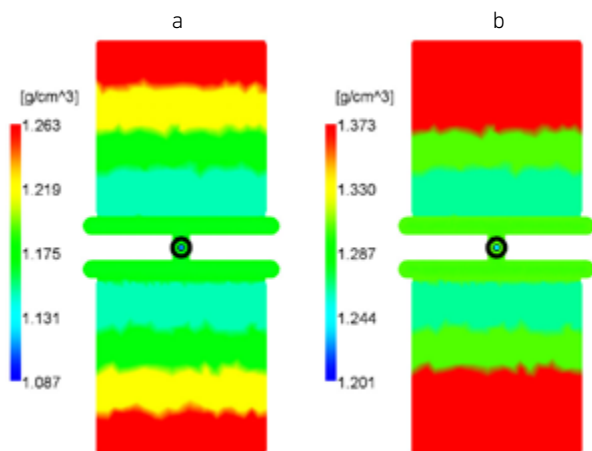


6. ábra. A szegregáció hatása a lapka próbatestek keresztirányú első (KE) és keresztirányú hátsó (KH) zsugorodására

Mivel a szoftver továbbfejlesztésének célja a töltőanyag szegregáció figyelembevétele a zsugorodási számítások esetén, ezért a fejlesztések eredményeinek bemutatását a továbbiakban a szegregációra leginkább hajlamos, 250 µm-es üvegyöngyöt 25 és 40 m%-ban tartalmazó keverékekre szűkítjük.

A szimulációs modellen mindkét anyagnál eltérő töltőanyag tartalommal rendelkező régiókat alakítottunk ki a mérési eredményeknek megfelelően. Az adott régió p/vT görbéjére jellemző Tait-egyenlet paramétereinek meghatározását követően számításokat végeztünk az API használatával. Mint azt a 7. ábra mutatja, a régióként eltérő üvegyöngy koncentrációt a szoftver az API használatával megfelelően kezeli, hiszen a régiók

sűrűsége közti eltérés szemmel láthatóan is megjelenik mindkét anyag esetében. Ez a fajta régiókénti eltérés abból fakad, hogy a program az egyes régiókban az adott koncentrációra jellemző Tait-egyenlet segítségével számítja a fröccsöntési folyamat során a fajtér fogat változását, így a szegregáció hatása a ciklus végén jellemző alapanyag sűrűségben is megjelenik.



7. ábra. Sűrűség változása régióként 25 m% (a), valamint 40 m% (b) üvegyöngy tartalom esetén

A számításokat a kifejlesztett API használata nélkül, a nominális töltőanyag tartalomra meghatározott alapanyag adatokkal is elvégeztük, majd az eredményeket összehasonlítottuk mind a valós, mind az API használatával számított adatokkal. A mért és számított eredményekből meghatároztuk a folyási út végén (KH) és elején (KE) mérhető zsugorodások arányát, amelyeket a 3. táblázat mutat be.

3. táblázat. Zsugorodás folyási út menti arányának változása az API használatával

Anyag	25 m% GB	40 m% GB
KH/KE API nélkül	1,16	1,15
KH/KE API használatával	1,06	1,07
KH/KE valós	1,07	1,02

Látható, hogy az eredményekben megjelent a régiókénti zsugorodászámítás töltőanyag tartalomtól való függése, hiszen a folyási út végén és a folyási út elején mérhető zsugorodás egymáshoz viszonyított aránya megváltozott. A hátsó és első régióban mérhető keresztirányú zsugorodás hányadosa az API beépítésével közel 10%-kal csökkent. Ennek oka, hogy az üvegyöngy feldúsulása a folyási út végén az ott mérhető zsugorodás csökkenését eredményezi, míg a folyási út elején a nominális értéknél kisebb üvegyöngy tartalom az adott régió zsugorodásának megnövekedéséhez vezetett a valósággal megegyező módon. Ezáltal a hátsó és első régiókban mérhető értékek egymáshoz közeledtek, amely összhangban van a mérési eredményekkel, valamint a szakirodalomokban megfogalmazott általános tendenciával. Megállapítható tehát, hogy az API beépítésével sikeresen pontosítható a program zsugorodási és vetemedési számítása, mivel a töltőanyag szegregáció hatása kezelhetővé válik. Az API segítségével módosított modell esetében a szimulációs eredményekben megjelent az üvegyöngy tartalom nominális értéktől való eltéréseinek sűrűséget és zsugorodást befolyásoló hatása, hiszen a folyási út végén és

elején mért keresztirányú zsugorodások aránya a valóságnak megfelelő irányba változott és a számított értékek is jóval közelebb állnak a fröccsöntött darabokon mért arányhoz.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

Kutatásunk céljából egy fröccsöntés szimulációs szoftver vetemedésszámítási algoritmusainak pontosabbá tételét tűztük ki a fröccsöntés során fellépő töltőanyag szegregáció hatásának figyelembevételével. A töltőanyag szegregáció zsugorodásra gyakorolt hatásának modellezésére elvégeztük egy, az Autodesk Simulation Moldflow programba integrálható modul fejlesztését, amelynek használatával lehetőség nyílik a régióként eltérő alapanyag paraméterekkel történő számítások elvégzésére. A modul alkalmazásának köszönhetően a szegregációs folyamatok figyelembevehető a zsugorodási és vetemedési számítások során. A vizsgált alapanyagokkal régióként eltérő pvT paramétereket beállítva végeztünk számításokat. A számított eredményekben jelentkező trend alátámasztotta az API helyes működését, annak megfelelő használhatóságát. Megállapítottuk, hogy az API használata jelentősen növeli a zsugorodás számítások pontosságát a szegregációra hajlamos alapanyagok viselkedésének modellezésekor. Jövőbeni terveink között szerepel az API használatának kiterjesztése komplexebb geometriákra és új alapanyagokra, amelyek segítségével az API megfelelő működése teljeskörűen igazolhatóvá válik. A kifejlesztett beépülő modul iparban történő alkalmazása nagymértékben elősegítené a szerszámtervezési, valamint a termékoptimalizációs folyamatokat, így a fröccsöntés szimulációs szoftverek elterjedtségének köszönhetően az ipar számos szegmensében fejtené ki pozitív hatását.

A cikk a Bolyai János Kutatási ösztöndíj támogatásával készült. Munkánk a Nemzeti Kutatási és Innovációs Hivatal támogatásával az NKFIH Alapból valósult meg a „Fröccsönthető polipropilén alapú tapadasközvetítő kompozitok fejlesztése járműtechnológiai alkalmazásokhoz” (NVKP_16-1-2016-0038) projekt keretében. Köszönjük továbbá az ARBURG HUNGÁRIA Kft.-nek az ARBURG Allrounder 370S 700-290 típusú fröccsöntő gépet, valamint a TOOL-TEMP HUNGÁRIA Kft.-nek, a LENZKES GmbH-nak és a PIOVAN HUNGARY Kft.-nek a kiegészítő berendezéseket.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Plastics Europe: Plastics - the Facts 2016, An analysis of European plastics production, demand and waste data (2016).
- [2] Buzási, L.: A fröccsöntés helyzete Magyarországon 2015-ben, Polimerek, 2, 8, 221-225 (2016).
- [3] Czvikovszky, T.; Nagy, P.; Gaál, J.: A polimertechnika alapjai, Műegyetemi Kiadó, Budapest (2000).
- [4] Huamin, Z.: Computer Modeling for Injection Molding: Simulation, Optimization, and Control, John Wiley & Sons, New Jersey (2013).
- [5] Dunai, A.; Macskási, L.: Műanyagok fröccsöntése, Lexica kiadó, Budapest (2003).
- [6] Rhodes, M.: Introduction to Particle Technology, John Wiley & Sons Ltd., West Sussex, London (2008).
- [7] Lafranche, E.; Krawczak, P.; Ciolczyk, J. P.; Maugey, J.: Injection moulding of long glass fibre reinforced polyamide 6-6: guidelines to improve flexural properties, eXPRESS Polymer Letters, 1, 7, 456-466 (2007).
- [8] Kovács, J. G.: Shrinkage Alteration Induced by Segregation of Glass Beads in Injection Molded PA6: Experimental Analysis and Modeling, Polymer Engineering and Science, 51, 12, 2517-2525 (2011).