

## Fröccsöntött termékben elhelyezett fotopolimer inzert hőtanának és deformációjának vizsgálata

### Investigation of the thermodynamics and deformation of a photopolymer insert placed in an injection molded product

SZÉPLAKI Péter<sup>1</sup> MSc hallgató, HAJAGOS Szabolcs<sup>2</sup> MSc hallgató,  
ZINK Béla<sup>3</sup> adjunktus, SZABÓ Ferenc<sup>4</sup> adjunktus

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Polimertechnika Tanszék,  
H-1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3., +36-1-463-1459,  
e-mail: <sup>1</sup>szeplakipeter@edu.bme.hu, <sup>2</sup>hajagos.szabolcs@edu.bme.hu, <sup>3</sup>zink@pt.bme.hu, <sup>4</sup>szabof@pt.bme.hu

#### Abstract

*In our work, we investigated the thermal and deformation conditions of polymer inserts which were produced by additive PolyJet technology. We examined the possibility that these polymer inserts are capable of surviving an injection molding cycle without critical deformations. Furthermore, we analysed the process with numerical calculations, and investigated the correlation of these values to the measurement results, which turned out not reliable in the different scenarios.*

**Keywords:** injection molding, insert, deformation, thermology, simulation

#### Kivonat

*Munkák során polimer inzertek hőtani és deformációs viszonyait figyeltük meg, amelyeket additív gyártással, azon belül PolyJet típusú berendezéssel állítottunk elő. Munkák során vizsgáltuk, hogy ezek a polimer inzertek képesek-e kibírni egy fröccsöntési ciklust kritikus deformáció nélkül. Ellenőriztük továbbá a folyamatot numerikus számításokkal, illetve megvizsgáltuk a számított és mért eredmények korrelációját. Az eredményekből kiderült, hogy ezek a számítási eredmények nem minden esetben pontosak.*

**Kulcsszavak:** fröccsöntés, inzert, deformáció, hőtan, szimuláció

## 1. BEVEZETÉS

A XXI. század egyik legfontosabb ipari területe a polimer termékek előállítása. A műanyagipar szinte végeláthatatlan fajtájú és mennyiségű feldolgozási, gyártási módszere közül is az egyik legjelentősebb eljárás a fröccsöntés, ami a magyarországi termelés 30,9 m%-át tette ki 2019-ben [1].

Az inzertek egyik fajtája egy olyan, már kész alkatrész, amelyet még fröccsöntés előtt behelyeznek a szerszámba és ráfröccsöntenek, ami így beágyazódik a kész termékbe, bármiféle külső szerelés vagy ragasztó/kötőanyag használata nélkül. Ezzel a módszerrel remekül lehet célzott helyeket erősíteni. Jelen esetben ezek az inzertek additív gyártással, azon belül is PolyJet típusú berendezéssel gyártott alkatrészek voltak [2]. Munkák során célunk, hogy megvizsgáljuk, hogy ezek az inzertek milyen termikus és mechanikai terhelést viselnek el, és kibírnak-e egy fröccsöntési ciklust jelentős károsodás nélkül. Emellett a mért adatokat numerikus számítások eredményeivel hasonlítjuk össze annak megítélésére, hogy egy ilyen folyamat mennyire pontosan és milyen peremfeltételekkel modellezhető szimulációk útján.

## 2. KÍSÉRLETI RÉSZ

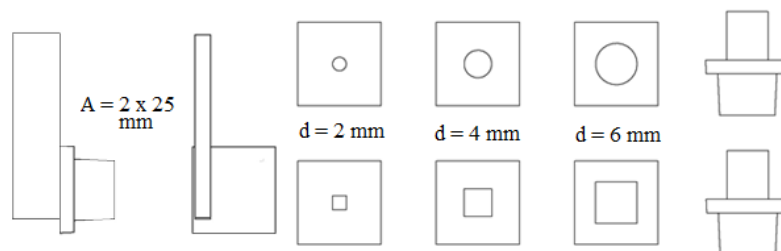
A következő fejezetben bemutatjuk a deformációs és hőtani mérések eredményeit, és azok összehasonlítását a numerikus számításokkal.

### 2.1 Vizsgálati módszer és paraméterek

A mérések során a fröccsöntéshez a MOL Petrolkémia Zrt. Tipplen H 145 F típusú polipropilénjét (PP) használtuk, az inzertek pedig Objet FullCure 835 fotopolimerből készültek. A deformációs mérések során 10,

20, illetve 40 cm<sup>3</sup>/s befroccsöntési sebességgel alkalmaztunk, amíg a hőtani méréseknél 10 cm<sup>3</sup>/s-ot. A polimer ömledék hőmérséklete minden esetben 200 °C volt, utónyomást nem alkalmaztunk egyik mérés során sem. A felhasznált fröccsöntő szerszám üvegbetétes, amelyen keresztül vizsgálható az inzertdeformáció. A felvételek elkészítéséhez Keyence VW-9000 nagysebességű kamerát és Nikon D600 digitális fényképezőgépet (Nikkor 28-300mm f/3.5-5.6g ED VR típusú objektívvel) használtunk. A hőtani méréseket pedig az inzertekben elhelyezett Ni-NiCr hőelemekkel végeztük.

A deformációs vizsgálatok két részre oszlottak, egyrészt vizsgáltuk az ömledék által kifejtett nyíró igénybevételt, másrészt a hajlító terhelést, és ezekre két különböző inzertgeometriát terveztünk (1. ábra).



1. ábra Hajlító (bal oldalt) és nyíró igénybevételt (jobb oldalt) vizsgáló inzertgeometriák

## 2.2. A deformációs mérések eredményei

A 6 mm-es jellemző méretű sorozatnál semmilyen deformációt nem fedeztünk fel, bármilyen befroccsöntési sebességet használtunk, tehát egy ekkora méretű inzertet hasonló körülmények között nem tud tönkretenni a fröccsöntés során fellépő igénybevétel. A 4 mm-es mintákon a 40 cm<sup>3</sup>/s sebességből adódó nagyobb erőhatás miatt hibahelyek keletkezésére utaló kifehéredés jelent meg az inzert tövében.

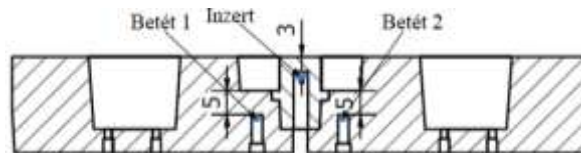
A 2 mm-es jellemző méretű minták esetében a legkisebb befroccsöntési sebességnél mind a kör-, mind a négyzetes keresztmetszetű minta eltört (2. ábra), azonban ez elsősorban nem a nyíróhatásának volt köszönhető, hanem a polimerömledék által átadott hőnek és a nyomásnak, ami a hosszú ciklus miatt (5,61, illetve 5,71 másodperc) nagy volt ilyen vékony keresztmetszetnél. Az inzertek ebben az esetben kilágyultak, és anyageltávolításnál kitépődtek. A vizsgált inzertek, ahogy az a Zink és társainak a munkájából kiderül [3], mivel fotopolimerek, szilárdságuk az üvegesedési hőmérséklet-tartomány felett (50-60 °C), fokozatosan, több nagyságrenddel csökken, amit ilyen vékony keresztmetszetnél várhatóan könnyedén elérnek. A közepes befroccsöntési sebességnél már nem történt törés, mivel a hőhatás a kisebb ciklusidővel lecsökkent, a nyíró erő növekedés pedig nem volt elég a töréshez. A legnagyobb befroccsöntési sebességnél (40 cm<sup>3</sup>/s) a négyzetes mintánál ismét törés következett be, ebben az esetben viszont akkora volt már a nyíró erő növekedés, hogy azt az inzert nem bírta ki, illetve az hőmérséklet okozta szilárdságcsökkenés is szerepet játszott. (2. ábra).



2. ábra Anyag kilágyulás okozta törés a 2x2 mm-es, négyzetes 10 cm<sup>3</sup>/s-os minta esetén (bal oldalt) és nyíróerő okozta törés a 40 cm<sup>3</sup>/s sebességnél, 2x2 mm-es négyzetes mintánál (jobb oldalt) (Keyence VHX-5000 típusú optikai mikroszkóp segítségével)

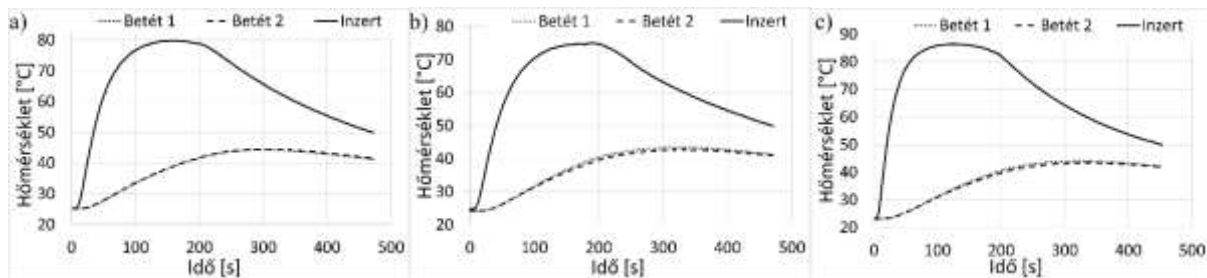
A hajlító terhelésre tervezett mérések során mind a 10 és a 40 cm<sup>3</sup>/s-os sebesség esetén is látványos elhajlás történt, törésre, vagy repedésre utaló jel viszont egyik esetben sem volt látható. A fotósorozatokból megállapítható, hogy a sebesség növelésével 0,05-0,1 mm-rel nagyobb a deformáció és a deformációk 0,6-0,75 mm közé esnek.

A hőtani vizsgálat során három inzertgeometriát vizsgáltunk (kör, négyzet, elforgatott négyzet) és mindegyik geometria esetében három fröccsöntési ciklust hajtottunk végre. A hőmérsékletet három pontban mértük: két pontban a szerszámbeütést és egy pontban az inzert hőmérsékletét (3. ábra).



3. ábra: Szenzor pozíciók

A hőmérsékletlefutási görbéken (4. ábra) jól látszanak a ciklus alatt lejátszódó hőtani folyamatok. Ezek a görbék megmutatják, hogy az inzertek mennyi időt töltöttek  $T_g$  felett (250-300 s), illetve, hogy a geometria ilyen szintű változtatása nem befolyásolja nagy mértékben a lehülési görbéket.

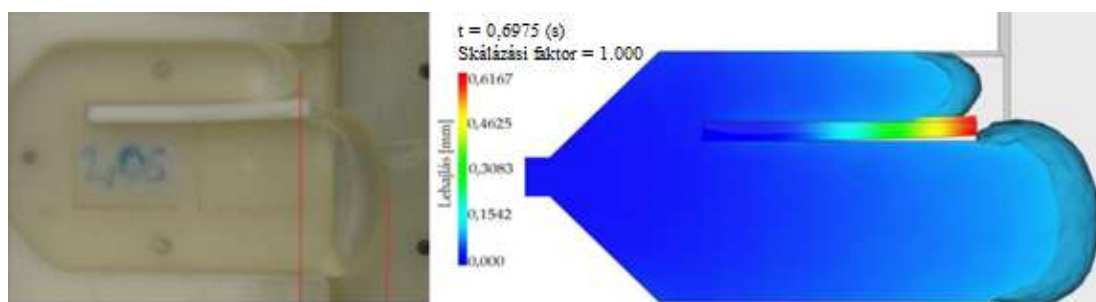


4. ábra: Mért hőmérséklet lefutások (a) kör, (b) négyzet és (c) elforgatott négyzet keresztmetszet esetében

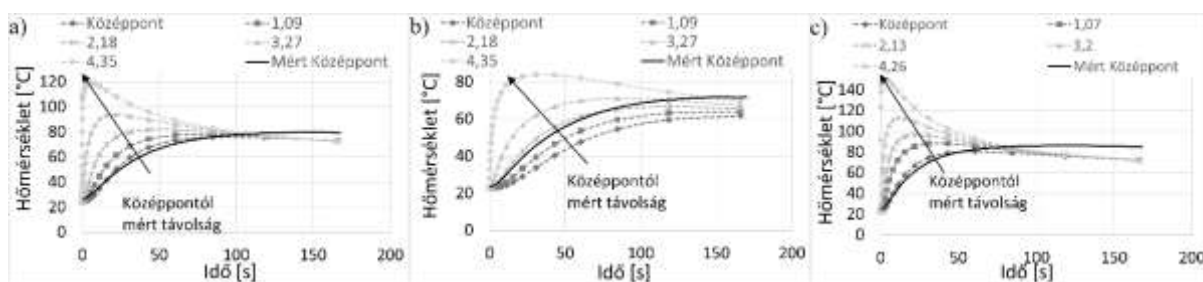
### 2.3 Numerikus számítások eredményei, azok összehasonlítása

A numerikus számítások elvégzéséhez a Autodesk MoldFlow Insight 2019 fröccsöntés szimulációs programot használtunk. A számításokat összehasonlítottuk a mért értékekkel és észrevehető eltéréseket tapasztaltunk. A nyíró igénybevételek mérései során a legkisebb inzerteknél nagyobb mértékű deformáció is fellépett a lassított felvételeken számolt pixelek alapján (0,5-1 mm), azonban a számítási eredmények ennél nagyságrenddel kisebbek (0,01-0,1 mm), mivel a program nem tudja kezelni a súrlódásos érintkezést és a hőmérsékletfüggő anyagtulajdonságokat sem. A számításokhoz használt hajlítási- és húzórugalmassági modulus konstans érték volt, azonban ez a valóságban a  $T_g$  átlépésével jelentősen csökken (55-65 °C), és ezt a program nem tudja lekövetni, ami a számítások során nagy mértékben csökkenti az előre jelzett deformációt.

A hajlítás szimulációi során a kapott eredmények a nyíró vizsgálattal ellentétben szinte teljesen pontos értékeket adtak a deformációról (5. ábra), aminek az oka, hogy a hajlítás esetén a terhelés időtartama nagyon rövid, és az az ömledékkel való találkozás elején történik, így az inzertnek nincs ideje felmelegedni, és ebből kifolyólag a hőmérséklet függő anyagtulajdonság hiánya nem okoz problémát a számításoknál

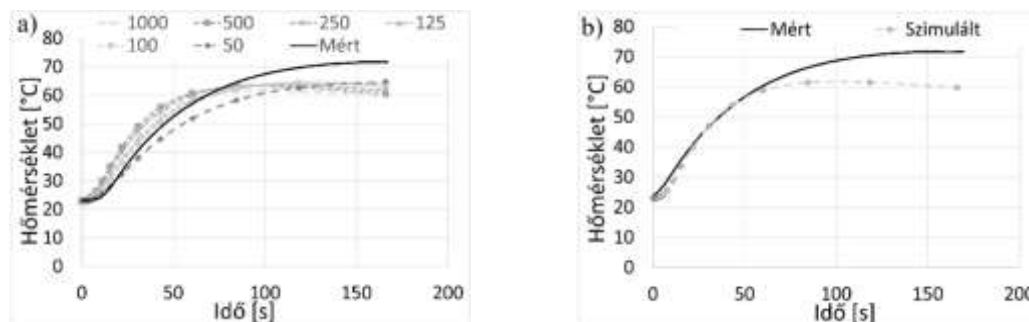
5. ábra Hajlító vizsgálat eredménye  $10 \text{ cm}^3/\text{s}$ -os sebességnél, illetve a kihajlás maximális értékének elérésének pillanata a MoldFlow számítási szerint ugyanezzel a sebességnél

A hőtani számítások pontosságának növelése érdekében a Ni-NiCr hőelemet, hővezető pasztát és az üvegszálás kábelborítást is modelleztük. A hűlés számításánál a Cool FEM opciót választottuk, illetve a peremfeltétel a teljesen kitöltött szerszámüreg, valamint a kezdetben mindenhol azonos,  $200^\circ\text{C}$  ömledék hőmérséklet voltak. A mért és numerikus eredmények összehasonlítását a 6. ábra mutatja, a diagramokba továbbá felvettük az inzert középsíkjában a középponttól kifelé haladva az inzert szélég egyenlő távolságban további 4 pont hőmérséklet eloszlását.



6. ábra: Numerikus eredmények (a) kör, (b) négyzet és (c) elforgatott négyzet keresztmetszet esetében

Az eredmények azt mutatják, hogy a ciklus elejét pontosan számítja a program, azonban a ciklus végen a kidobási hőmérsékletek eltérnek. A kialakuló hőmérséklet-különbség nagy valószínűséggel a hőátadási tényező pontatlanságából adódik. Fröccsöntésnél a hőátadási tényezőt a nyomás és a fellépő hőmérséklet-különbség nagysága befolyásolja leginkább. Polimer szerszámoknál a rossz hővezetési tényező miatt a kezdeti nagy hőmérséklet különbség gyorsan csökken, felülete felmelegszik, ezért csökken a hőátadás, továbbá az alacsony fröccsnyomás is tovább csökkenti a hőátadási tényezőt a fém szerszámokhoz képest. Zsugorodás közben ez akár  $10\text{-}20\text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  értékre is visszaeshet, mivel a termék elválk a szerszám falától, ezért vizsgáltuk különböző hűtési hőátadási tényezők beállításával a négyzet keresztmetszetű inzert hőmérséklet eloszlását. Az eredetileg beállított  $1000\text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  után  $500$ ,  $250$ ,  $125$ ,  $100$  és  $50\text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  esetén is lefuttattuk a számításokat. Az eredményeket a 7. ábra/a mutatja, az inzert közepén a mért értékkel együtt. Itt látszik, hogy a  $50\text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  esete áll legközelebb a valósághoz, így azt hasonlítottuk a mért értékekhez, amit 7. ábra/b mutat.



7. ábra: Hőátadási tényező hatása (a), mért és numerikus szimuláció eredményének összehasonlítása (b)

### 3. ÖSSZEFOGLALÁS

A munkák során vizsgáltuk fotopolimer inzertek viselkedését fröccsöntési ciklus közben. Megállapítottuk, hogy amennyiben nem extrém kis méretű az inzert, az kibírja a terheléseket. A numerikus ellenőrző számításoknál programból adódó pontatlanságokat fedeztünk fel. A hőtani esetben a kidobási hőmérsékletekben nagy eltérést tapasztaltunk, aminek az oka lehet a pontatlan hőátadási tényező, amit a jövőben pontosítani szeretnénk. A deformációs eredményeket is pontosítani szeretnénk, akár nyúlásmérő bélyeggel, illetve más szimulációs programokat is meg szeretnénk vizsgálni, hogy ott mennyire pontosan modellezhető egy ilyen folyamat. Emellett más anyagokat és gyártástechnológiákat is ki akarunk próbálni.

### KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatást a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal (NKFIH) OTKA (FK 134336) pályázata támogatta. Köszönjük továbbá az Arburg Hungária Kft-nek az Arburg Allrounder 420C 1000-290 típusú fröccsöntőgépet, a Lenzkes GmbH-nak a szerszámfelfogókat és a Tool-Temp Hungária Kft.-nek a szerszámtemperálókat. A szerzők részvételét az OGÉT 2021 konferencián az Emberi Erőforrás Támogatáskezelő NTP-HHTDK-20 pályázata támogatta.

### IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Buzási Lajosné: Magyarország műanyagipara 2019-ben, Polimerek, MMSZ Lapkiadó Kft., 2020, VI. évfolyam, 07-08. szám, 977-987
- [2] Omer Sagi: White Paper: PolyJet Matrix Technology A New Direction in 3D Printing, Stratasys Ltd, 2009
- [3] Zink B., Kovács N. K., Kovács J. G.: Thermal analysis based method development for novel rapid tooling applications, International Communications in Heat and Mass Transfer, 2019, Volume 108 104297, 1-8