

# Prototípus fröccsöntő szerszámok üzem közbeni állapotfelügyelete és termékminőség vizsgálata

## Operational state and product quality monitoring of prototype injection moulds

KRIZSMA Szabolcs<sup>1</sup>, doktorandusz; SUPLICZ András<sup>1,2</sup>, PhD, egyetemi docens

1, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Polimertechnika Tanszék, 1111 Budapest, Műgyetem rkp. 3., +36-1-463-1525, krizsmasz@pt.bme.hu, www.pt.bme.hu

2, MTA-BME Lendület Könnyűszerkezetes Polimer Kompozitok Kutatócsoport, 1111 Budapest, Műgyetem rakpart 3, +36-1-463-1487, suplicz@pt.bme.hu, www.pt.bme.hu

### Abstract

*Injection moulding allows the economical production of complex 3D parts in large series. Due to the significant product development and conventional tooling costs and the rise of the so-called mass-customisation, the importance of prototype injection moulds is increasing. Alongside conventional aluminium prototype moulds, the additively manufactured polymeric moulds are also gaining ground thanks to the recent developments. They allow faster and more cost effective production of injection moulded parts. A significant downside of polymeric moulds is that their mechanical properties are worse compared to their aluminium counterparts and their properties are also heavily dependent on temperature. Due to this, significant measurement technical developments are needed to reach constant product quality. In our work, we elaborated the complex operational state monitoring (both mechanical and thermal) of such moulds by the combination of strain, cavity pressure, volumetric temperature and cavity surface temperature measurements.*

**Keywords:** injection moulding, prototype moulds, state monitoring, strain measurement, product quality monitoring

### Kivonat

*Fröccsöntéssel tetszőleges komplexitású, 3D-s termékek nagyszériás gyártása valósítható meg gazdaságosan. Azonban a termékfejlesztés és a hagyományos szerszámozás jelentős költségei, valamint az úgynevezett tömeges testreszabás igényei miatt a prototípus szerszámozás lehetőségét a piaci szereplők egyre gyakrabban alkalmazzák. A fejlesztéseknek köszönhetően, manapság a hagyományos alumínium prototípus szerszámok mellett megjelentek az additív technológiákkal készült, polimer alapanyagú szerszámok is, amelyekkel gyorsabban és költséghatékonyabban lehet kisszériás fröccsöntött termékeket előállítani. A polimer alapú szerszámok nagy hátránya, hogy rosszabb mechanikai tulajdonságokkal bírnak, mint az alumínium társaik, és tulajdonságaik is jelentős hőmérsékletfüggést mutatnak. Így a termékek egyenletes minőségének biztosításához gyártás közbeni mérés-technikai fejlesztések szükségesek. Ezért munkánkban az ilyen szerszámok üzem közbeni komplex mechanikai és termikus állapotfelügyeletét (nyúlás-, üregnyomás-mérés, térfogati hőmérséklet mérés és felületi hőkamerás mérés) valósítottuk meg.*

**Kulcsszavak:** fröccsöntés, prototípus szerszámok, állapotfelügyelet, nyúlásmérés, termékminőség felügyelete

## 1. Bevezetés

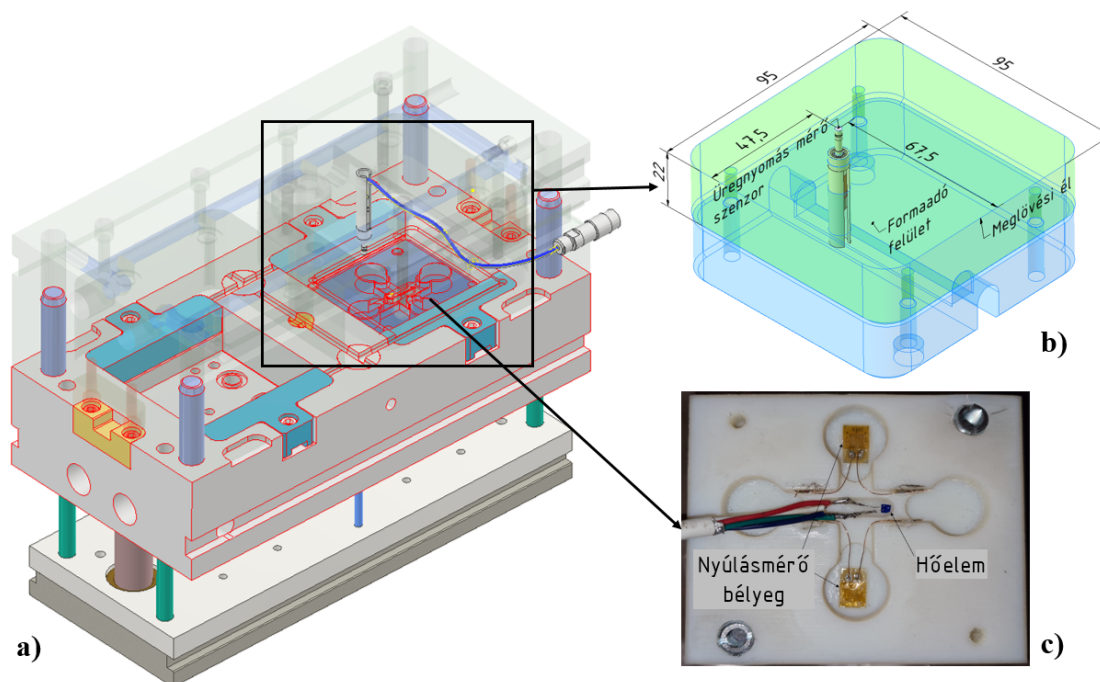
A fröccsöntés napjaink legdinamikusabban fejlődő műanyag feldolgozási technológiája. Az összes feldolgozott műanyagmennyiség megközelítőleg egyharmada fröccsöntött termék [1]. A hagyományos, nagyszériás gyártás mellett megjelennek a kis- és közepes szériás, változatos geometriájú fröccsöntött termékek iránti igények is. Ennek kielégítése prototípus szerszámokkal lehetséges, amelyek hagyományos alapanyaga az acélnál könnyebben forgácsolható, emellett elfogadható mechanikai és kiváló termikus tulajdonságokkal (elsősorban hővezetési tényezővel) rendelkező alumínium. A prototípus szerszámok új irányaként kerül előtérbe az anyaghozzáadásos (additív) gyártással készülő fém vagy polimer szerszámok

alkalmazása is. Polimer szerszámbetétek készíthetők hőre lágyuló alapanyagból (szinterezési eljárással porból vagy filament megömlesztésével ömledékrétegezéssel) továbbá hőre nem lágyuló, térhálósodó gyantákból (sztereolitográfiával illetve úgynevezett „Material Jetting” eljárásokkal) is [2-3]. Polimer szerszámbetétekkel többnyire kisszerűs gyártás valósítható meg, azok korlátozott mechanikai teherbírása, hőmérsékletfüggő merevsége és kúszási hajlama miatt. Mindezek mellett azonban átfogó mérés technika (üzem közbeni nyúlás-, üregnyomás- és hőmérsékletmérés) alkalmazásával a fröccsöntési paraméterek pontosan beállíthatók és a szerszámbetétek élettartama maximalizálható [4]. Munkánkban egy ilyen állapotfelügyeleti rendszert mutatunk be és rávilágítunk a nyomtatott epoxi-akrilát (térhálós fotopolimer) és a hagyományos, forgácsolt alumínium szerszámbetétek üzemi viselkedésének jellegzetes különbségeire.

## 2. Felhasznált anyagok, berendezések és módszerek

A fröccsöntésekhez Tipplen H145F (MOL Petrolkémia Zrt.) polipropilén homopolimert használtunk. A vizsgált szerszámbetétet PolyJet elven működő, Objet Alaris 30 (Stratasys Inc.) nyomtatón készítettük el RGD835 jelű, UV fényrel térhálósítható epoxi-akrilát gyantából. Térhálósított állapotban szakítószilárdsága 50-65 MPa, rugalmassági modulusza 2-3 GPa, felületi keménysége pedig ~85 Shore D. Hátránya az alacsony üvegesedési átmeneti hőmérséklet ( $T_g = 45-50\text{ °C}$ ), amely felett drasztikus rugalmassági modulusz csökkenés következik be és a kúszási hajlam felerősödik. Emiatt a polimer szerszámbetét alkalmazása során az üzemi hőmérséklet folyamatos monitorozása és annak  $T_g$  alatt tartása kiemelkedő fontosságú. Referenciaként alumínium szerszámbetétet használtunk (EN AW 5754 O/H111), amely 160-200 MPa szakítószilárdsággal, ~68 GPa rugalmassági moduluszsal és 147 W/(m·K) hővezetési tényezővel rendelkezik.

Az üzemi betétdeformációkat két pontban vizsgáltuk KMT-LIAS-06-3-350-5EL (Kaliber Mérés Technika Kft.) bélyegek segítségével, amelyek jelét egy Spider 8 (Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH.) adatgyűjtő egységgel rögzítettük. A betétek hőmérsékletét M222 Pt 100 hőelemmel (Heraeus GmbH) mértük, amelyek jelét egy Ahlborn Almemo 8990-6 egység gyűjtötte. A mérési összeállítást mutatja be az 1. ábra.



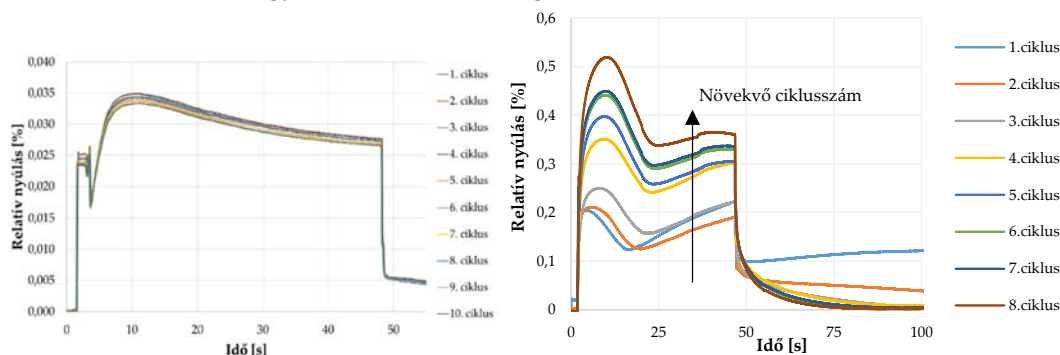
1. ábra. A fröccsöntésekhez használt tesztszerszám

## 3. Mérési eredmények

Ebben a fejezetben ismertetjük a fröccsöntési kísérleteink során mért nyúlás és hőmérséklet eredményeket az alumínium és az epoxi akrilát szerszámbetét esetén. Bemutatjuk továbbá a szerszámbetét és a gyártott termékek méreteltéréseit valamint a terméktömegeket és vastagságokat.

### 3.1. Ismételhetőségi vizsgálat

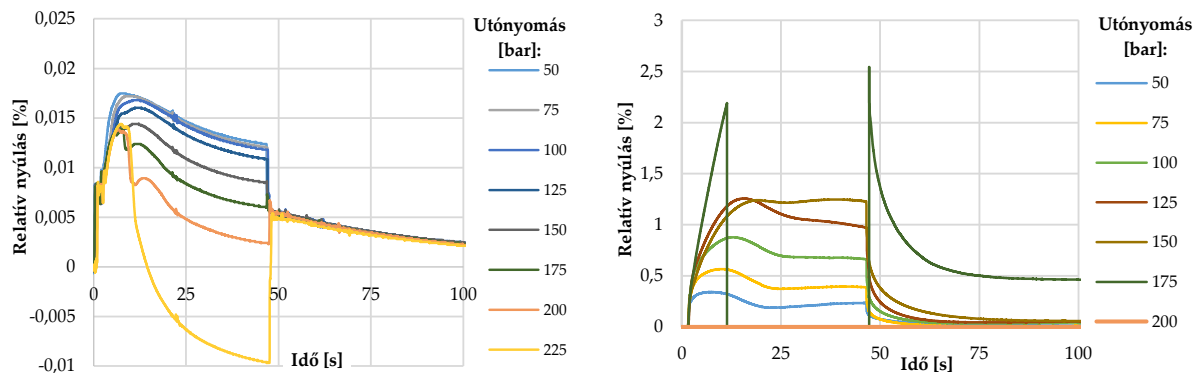
A fröccsöntés sorozatok első részében a termikus egyensúly beállítását és az ismételhetőséget vizsgáltuk. Így 75 bar állandó utónyomás mellett 10 ciklust fröccsöntöttünk. Az egy cikluson belül, a ciklus kezdetéhez viszonyított nyúlásváltozásokat (relatív nyúlásokat) mutatja be az alumínium és az epoxi-akrilát szerszámbetétek esetén a gátközeli bélyegekre a 2. ábra. Látható, hogy az alumínium betét esetén a maximális nyúlásváltozás 0,032-0,035 % között mozog, míg az epoxi-akrilát betét esetén ez több mint egy nagyságrenddel nagyobb tartományban mozog: ~0,21 %-tól 0,52 %-ig. A betétanyag függvényében a görbék alakjában is jelentős eltérések mutatkoznak. Alumínium betét esetén a szerszám a záróerő felépülésekor és a befröccsöntési szakaszban meredek, közel azonnali nyúlásnövekedés figyelhető meg, amely az átkapcsolást követően, az utónyomás szakaszában tovább emelkedik és eléri a maximumát, ahogyan a befröccsöntött ömledék mennyisége növekszik. Az utónyomás elvételét követően a maradék hűtés szakaszában egy fokozatos nyúláscsökkenés figyelhető meg, amely elsősorban a kiváló hőelvonó képességgel rendelkező alumínium szerszámbetétben történő gyors termékűléssel és annak formaüregből történő kiszugorodásával magyarázható. A szerszám nyitásakor a terméket a formaüregbe préselő erő megszűnik, amely ugrásszerű nyúláscsökkenésként jelentkezik a görbén. Az epoxi-akrilát szerszámbetét esetén ezzel szemben más görbealak figyelhető meg. A szerszám zárását követően a befröccsöntés szakaszában szintén meredek emelkedés tapasztalható, a nyúlás a maximum értéket már az utónyomás szakaszában éri el. Az utónyomás további részében és a maradék hűtés szakaszában három komplex hatás eredője adja meg a relatív nyúlás görbe jellegét. Az első az átmelegedő polimer betét merevségcsökkenése, a második a magasabb hőmérsékleten dominánsabbá váló kúszás, a harmadik pedig az alumíniumhoz viszonyított több mint háromszoros hőtágulási együtthatóval jellemzett méretváltozás. A szerszám nyitásakor ugrásszerű nyúláscsökkenés figyelhető meg. Az ismétlésvizsgálat jól jellemzi a technológia reprodukálhatóságát is. Alumínium szerszámbetét esetén a görbék teljesen együtt futnak, ezzel szemben az epoxi-akrilát betét esetén számottevőbb ingadozás, fokozatos nyúlásváltozás növekedés figyelhető meg a görbékben, vagyis az előzetes várakozásokkal összhangban alumínium betéttel stabilabb gyártás valósítható meg.



2. ábra. A relatív nyúlások állandó, 75 bar utónyomás mellett, alumínium (bal) és epoxi-akrilát (jobb) szerszámbetét esetén

### 3.2. Növekvő terhelés hatása

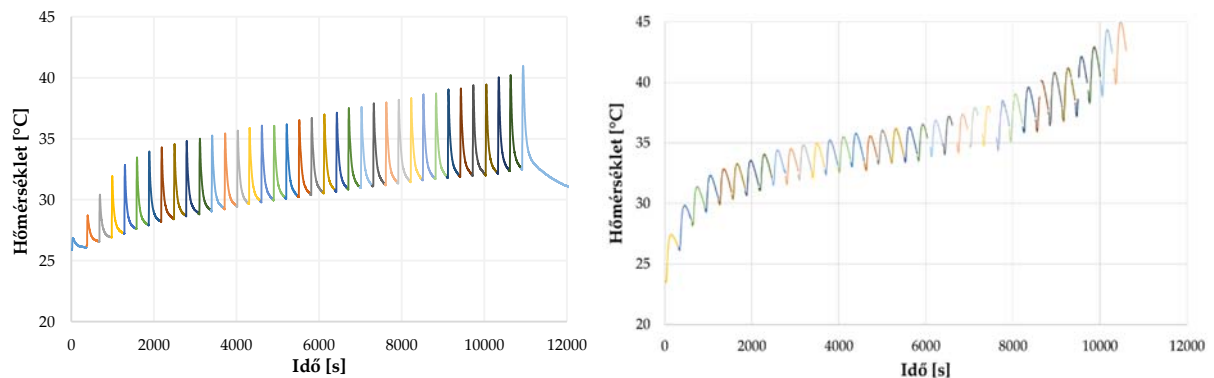
Az állandó utónyomás szakaszt követően 50 bar-tól kezdődően 2 ciklusonként emeltük az utónyomás szintjét, 25 bar-os lépcsőkben. A 3. ábra szemlélteti a két szerszámbetét esetén az egyes ciklusokban mérhető nyúlásváltozásokat. Az alumínium betét esetén a relatív nyúlások az utónyomás szintjének emelésével csökkentek, amely az alkalmazott 5 tonna záróerő fokozatos elégtelenségét mutatja. A növekvő utónyomással a formaüreg fokozatosan túltöltődik, a szerszám megnyílik és sorjaképződés lép fel. Ezzel ellentétben az epoxi-akrilát betét esetén a relatív nyúlás görbék maximum értékei is növekednek, továbbá azok egyre inkább kitolódnak az utónyomás szakaszába. A görbék alatti terület is jelentősen növekszik, azaz hosszabb ideig áll fenn a deformáció magasabb szintje. A polimer szerszámbetét esetén a szerszám megnyílás helyett a magasabb utónyomás miatti anyagöbbltet a bélyegek zsebei feletti kikönnnyített részen helyileg növekvő deformációt okoz. A 75 bar-os szinten mérhető maximális 0,13%-os nyúlásról egészen 2% fölé növekszik 175 bar esetén. A gátközeli nyúlásmérő bélyeg 200 bar utónyomás esetén tönkrement, mivel a lokális deformáció túllépte a 2%-os méréshatárt. Az epoxi-akrilát szerszámbetét a további fröccsöntések során még használható maradt, azonban a nyúlásmérés már nem szolgáltatott eredményeket. Jól látható, hogy az utónyomás szintjének emelésével a nyúlások növekedése erősen progresszív. Ez egyrészt a magasabb mechanikai terhelés hatása, másrészt pedig a növekvő utónyomás által a hőátadás is intenzívebbé válik a termék és a polimer szerszámbetét között. A betét fokozatos átmelegedésével annak merevsége csökken, valamint a kúszás hatása felerősödik.



3. ábra. A relatív nyúlások növekvő utónyomás mellett (50 bar-225 bar között). Alumínium (bal) és epoxi-akrilát (jobb) szerszámbetét esetén

### 3.3. Betétek hőmérsékletének változása

Az előzőek miatt a kidolgozott állapotfelülegyeleti rendszerünk másik fontos eleme a betétek hőmérsékletének vizsgálata, hőelemes mérés segítségével. A mért hőmérsékleteket mutatja be a két szerszámbetét esetén a 4. ábra. Látható, hogy az alumínium betét esetén a kiemelkedő hővezetés miatt az egyes ciklusokban a hőmérsékletek felfutása gyorsan (még az utónyomás szakaszában) bekövetkezik, majd a maradék hűtési időben és a ciklusok közötti ~250 másodperces holtidőben a betét visszahűl. Egy cikluson belül a hőmérséklet ingadozás a mért pontban 5-6°C. Látható, hogy a szerszámbetét az alkalmazott holtidők ellenére is fokozatosan átmelegszik. Az első ciklusban mérhető ~27°C kiinduló hőmérsékletre 32°C-ra melegszik az utolsó ciklus kezdetére. Az epoxi-akrilát betét esetén az átmelegedés és a lehűlés is lényegesen lassabb, amely az igen rossz hővezetési tényezővel és a magas fajhő értékkel magyarázható. Az első ciklus elején mérhető 24°C-os kiindulási hőmérsékletre egészen 45°C-ig emelkedik a betét hátoldali hőmérséklete, amely az üvegesedési átmeneti tartományban van. Fontos kiemelni, hogy ezek hátoldali hőmérsékletek, vagyis az ömledékkel érintkező formafelületek hőmérséklete ennél számottevően magasabb. Mindezek indokolják, hogy a fröccsöntési sorozat utolsó szakaszában a tönkremenetel erősen progresszív.

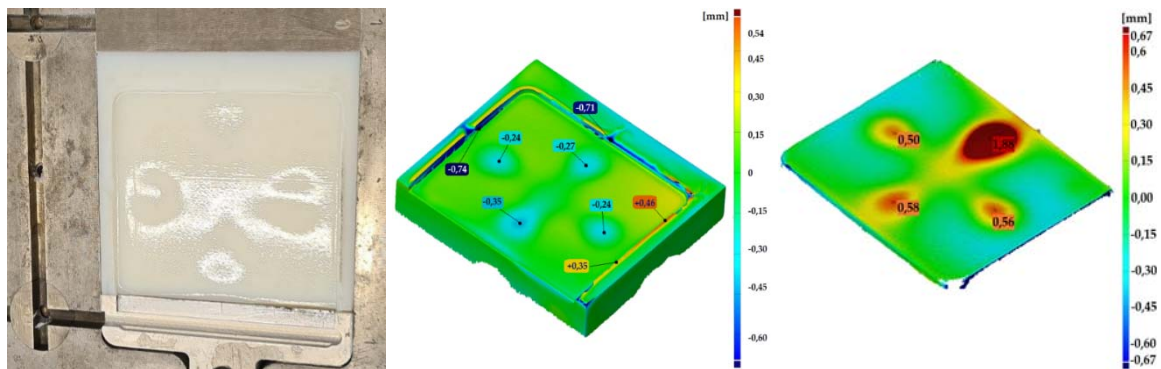


4. ábra. A hőelemes hőmérsékletmérés eredményei alumínium (bal) és epoxi-akrilát (jobb) szerszámbetét esetén

### 3.4. Betétek és termékek geometriai vizsgálata

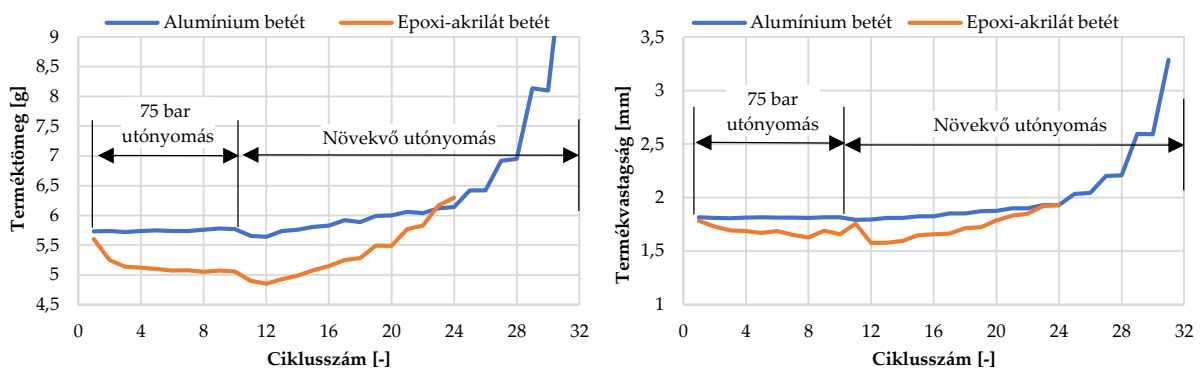
A fröccsöntés sorozatokat követően a szerszámbetéteket kisereltük és megvizsgáltuk azok mérettartását. Az alumínium betéten méretváltozás nem volt tapasztalható, míg az epoxi-akrilát betéten jelentős deformációk voltak láthatók, amelyeket az 5. ábra mutat be. A betétet GOM ATOS Core 3D (GOM GmbH.) szkennel segítségével digitalizáltuk és számszerűsítettük a méreteltéréseket a kiindulási geometriához képest. Látható, hogy a deformációk elsősorban a kialakított zsebek környékére lokalizálódnak, nagyságuk 0,24-0,35 mm. Emellett a formafelületek oldalain is számottevő alaktorzulások figyelhetők meg. Térhálós polimerek esetén a deformáció kellően alacsony szintjén maradó deformáció komponens nem jelenik meg. Jelen esetben viszont a szerszámbetét számottevő maradó deformációt szenvedett az üvegesedési átmeneti hőmérséklet elérése miatt. Ki kell emelni ugyanakkor, hogy a ciklusok közötti megfelelő holtidő meghagyásával, valamint kíméletes fröccsöntési paraméterek alkalmazásával (alacsony ömledéghőmérséklet, alacsony fröccssebesség és utónyomás, kisebb záróerő) a szerszámbetétek élettartama növelhető. Az élettartam

szempontjából az egyik kritikus tényező, hogy a betét hőmérsékletét kellő biztonsággal az üvegesedési átmenet alatt lehessen tartani.



5. ábra. A tönkrement epoxi-akrilát szerszámbetét és a fröccsöntött termék 3D szkennelési eredményei

A fröccsöntéseket követően a gyártott termékek tömegeit és vastagságait megmértük (utóbbit Mitutoyo Digimatic mikrométer segítségével), amely mérések eredményeit mutatja be a 6. ábra. Látható, hogy az alumínium szerszámbetét esetén állandó fröccsöntési paraméterek mellett a közel állandó terméktömeg és vastagság jól tartható. Az utónyomás emelésével a formaüreg fokozatosan túltöltődik, amely mindkét vizsgált termékjellemző növekedését eredményezi. Az utónyomás magasabb értékénél a szerszám fokozatosan megnyílik, amely a tömeg és a vastagság értékek meredek emelkedését okozza (megközelítőleg a 24. ciklust, azaz 200 bar utónyomást követően). Az epoxi-akrilát szerszámbetét esetén a gyártott termékek tömege és vastagsága is változó az állandó 75 bar utónyomás ellenére is. Ez azzal magyarázható, hogy a ciklikusan befrocsöntött forró ömledék hatására a betét fokozatosan átmelegszik és hőtágulást szenved, amely a formaüreg zsugorodását idézi elő. Ezzel szemben a növekvő utónyomás szakaszában a nyomás elegendő a hőtágulás hatására zsugorodó formaüreg fokozatos szétfeszítésére, amely a terméktömegek és vastagságok emelkedésében mutatkozik meg. A fröccsöntés sorozatot 200 bar utónyomásig (a 24. ciklusig) folytattuk, mert az 5. ábrán látható módon a betéten és a gyártott termékeken is durva alaktorzulások jelentek meg. Az utónyomás további emelése alakhibás termékeket eredményez, illetve a szerszámbetét korai tönkremenetelét is okozhatja.



6. ábra. A terméktömegek és a gátközeli termékvastagságok a két különböző szerszámbetéttel gyártott lapkák esetén

#### 4. Összefoglalás

Munkánkban összehasonlítottunk egy alumíniumból forgácsolt és egy PolyJet eljárással készült epoxi-akrilát szerszámbetét üzem közbeni viselkedését állandó üzemi körülmények és növekvő nyomásterhelés esetén. Az összehasonlítás az általunk kidolgozott állapotfelügyeleti rendszer eredményei alapján történt, amely többek között a szerszámbetétek deformációjának és hőmérsékletének méréséből áll. Megállapítottuk, hogy állandó üzemi körülmények esetén az alumínium betéttel rendkívül stabil gyártás érhető el, míg az epoxi-akrilát betét esetén az üzemi deformációk elfogadható mértékben ingadoznak. A növekvő utónyomás terhelés hatására az alumínium szerszámbetét deformációi csökkentek, mert a nagyobb merevség miatt a szerszám

merev testként megnyílik. Ezzel szemben a polimer szerszámbetét elsősorban a zsebek, mint kikönnnyítések környezetében lokálisan megnövekednek a deformációk. Megállapítottuk, hogy az üzemi hőmérsékletmérés hasznos eszköz a polimer szerszámbetét élettartam növelésére, mivel segítségével a betét hőmérséklete tartósan az üvegesedési átmenet alatt tartható. Megállapítottuk továbbá, hogy a mért üzemi nyúlások és a terméktömegek, továbbá vastagságok között erős korrelációk figyelhetők meg az epoxi-akrilát szerszámbetét esetén. Igazoltuk, hogy a PolyJet eljárással készülő epoxi-akrilát szerszámbetétek a megfelelő feldolgozási paraméterek használata esetén alkalmasak a kisszériás fröccsöntésre.

## 5. Köszönetnyilvánítás



A Kulturális és Innovációs Minisztérium ÚNKP-22-3-

II-BME-105 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült. Kutatásunk a Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Hivatal (NKFIH) OTKA FK134336 pályázatának a Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült. Az RRF-2.3.1-21-2022-00009, azonosítószámú, Megújuló Energiák Nemzeti Laboratórium megnevezésű projekt a Széchenyi Terv Plusz program keretében, az Európai Unió Helyreállítási és Ellenállóképességi Eszközének támogatásával valósul meg. A szerzők köszönetüket fejezik ki az ARBURG HUNGÁRIA KFT-nek, a TOOL-TEMP HUNGÁRIA KFT-nek, a LENZKES GmbH-nak és a PIOVAN HUNGARY KFT-nek a kutatásokhoz biztosított berendezésekért.

## 6. Irodalmi hivatkozások

- [1] Macskási L., Dunai A.: *Műanyagok fröccsöntése*, Lexica Kft., Budapest 2003.
- [2] 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, 2019/108, 104297/1-104297/9.
- [3] Gebhardt A., *Understanding Additive Manufacturing*, Carl Hanser Verlag, München 2011.
- [4] Krizsma Sz. G., Kovács N. K., Kovács J. G., Suplicz A.: *In-situ monitoring of deformation in rapid prototyped injection molds*. Additive Manufacturing, 2021/42, 102001/1-102001/8.