



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM

GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR

POLIMERTECHNIKA TANSZÉK

KRIZSMA SZABOLCS GÁBOR

okleveles gépészmérnök

PHD ÉRTEKEZÉS TÉZISFÜZETE

PROTOTÍPUS FRÖCCSÖNTŐ SZERSZÁMBETÉTEK  
DEFORMÁCIÓINAK ELEMZÉSE

Témavezető:

*Dr. Suplicz András*

egyetemi docens

BUDAPEST, 2024



# 1 BEVEZETÉS

A globális műanyagtermelés 2022-ben meghaladta a 400 millió tonnát, amelynek a feldolgozásában a fröccsöntés meghatározó szerepet tölt be. A fröccsöntött termékek, amelyek a modern élet mindennapos részeivé váltak az összes feldolgozott műanyag mennyiség megközelítőleg egyharmadát teszik ki. A fröccsöntés fejlődése töretlen, hiszen közel tetszőleges bonyolultságú 3D termékek gyárthatók vele nagy széria esetén gazdaságosan. A fröccsöntő gépek egyik fő jellemzője, hogy akár ezer tonnát is meghaladó záróerővel rendelkezhetnek, amely ahhoz szükséges, hogy fröccsöntés során a formaüregben fellépő jelentős nyomások által szétnyitni akart szerszámfeleket összeszorítsa. Az alakadási folyamat során a formaüregben több száz bar körüli nyomás is kialakulhat. Az üregnyomásból származó, a szerszámot szétfeszítő erő nagysága függ többek között a szerszámfészkek számától, a termék falvastagságától és vetített felületétől, a felület strukturáltságától és ezzel összefüggésben a folyási út hosszától, a feldolgozott alapanyag tulajdonságaitól és az ezek által meghatározott feldolgozási paraméterektől is. Az üregnyomás, a záróerő jelentette mechanikai terhelés, valamint a temperálás és a forró ömledék által okozott hőterhelés együttesének hatására a szerszámok számottevő deformációt szenvednek el, amely számos termékhibának is a forrása lehet. Ilyenek például a termék méreteinek ellenőrizetlen eltérése, esetenként a tűrésmezőből való kiesése. A formaüreg méretváltozása miatt megváltozó nyomáslefutások a termék zsugorodására és vetemedésére is hatással vannak. A ciklikusan fellépő deformációk emellett a szerszámalkatrészek tönkremenetelének forrásai lehetnek. Látható tehát, hogy a szerszámok deformációja mind a termék, mind pedig a szerszám szempontjából komoly gyakorlati jelentőséggel bír.

A fröccsöntő iparban megjelenő másik aktuális folyamat a különböző additív gyártástechnológiákkal készülő kisszériás, prototípus szerszámok elterjedése. Ezek a mindennapi nyelvben gyakran csak „3D nyomtatott” szerszámoknak nevezett, jellemzően polimer alapanyagú formabetétek kiváló lehetőséget biztosítanak egy termékgeometria fröccsönthetőségének ellenőrzésére valós üzemi körülmények között, még a drága nagyszériás szerszám elkészítése előtt. Lehetővé teszik továbbá, hogy a formabetétek gyors cseréjével kis sorozatban, rugalmasan lehessen gyártani testreszabott termékgeometriákat, amely előrelépést jelent a hagyományosan százezres vagy milliós darabszámban készülő, egyforma fröccsöntött termékekhez képest. Látható tehát, hogy a prototípus szerszámokkal, illetve szerszámbetétekkel a hagyományosan nagyszériás technológiának számító fröccsöntés alkalmassá válik kis, illetve közepes sorozatú termékgyártásra is. A polimer alapanyagú prototípus szerszámok nagy hátránya ugyanakkor az, hogy az alkalmazható alapanyagok merevsége, szilárdsága és hővezetési tényezője sok esetben nagyságrendekkel elmarad a hagyományos szerszámacéloktól, továbbá ezek a jellemzőik erősen hőmérsékletfüggők is. Polimer szerszámbetétek esetén szintén problémát okoz a

kúszás jelensége, amelyet a magasabb üzemi hőmérséklet csak tovább erősít. A polimer alapanyagú formabetétek esetén figyelemmel kell lenni a fém szerszámbetétekhez képest korlátozott hőelvonó képességre is, amely jelentős hűtési idő növekedést okoz. A polimer szerszámbetétek esetén a hűtési sebesség csökkenése emellett a lefagyott réteg vastagságát és ezáltal az ömledék számára rendelkezésre álló áramlási teret is jelentősen befolyásolja. Amennyiben a prototípus szerszámbetétek üzem közbeni jellemzői mérhetővé, illetve ezt követően modellezhetővé válnak, úgy az additív technológiákkal készült szerszámokra építő kis-közepes szériás fröccsöntés elterjedése is elősegíthető.

Ennek megfelelően a PhD értekezésem célkitűzése a prototípus fröccsöntő szerszámokban üzem közben fellépő deformáció-komponensek azonosítása, azok vizsgálata méréssel, elemzése és szimulációs módszerekkel történő reprodukálása. Ehhez összehasonlítom különböző technológiákkal készült szerszámbetétek üzemi viselkedését azonos fröccsöntési paraméterek mellett és bemutatom a köztük tapasztalható különbségeket. Ismertetem, hogy a modern és átfogó mérés technika miként alkalmas a fröccsöntési paraméterek finomhangolására, ezáltal növelve az elérhető prototípus szerszám élettartamot, továbbá milyen módon lehet felhasználni a nyúlásmérést és az üregnyomás mérést a termékjellemzők előrejelzésére. Célkitűzésem továbbá, hogy kidolgozzak egy olyan kapcsolt szimulációs eljárást, amellyel a vizsgált prototípus szerszámbetétek deformációi és termikus állapota jelentősen pontosabban modellezhető, mint a kereskedelmi forgalomban elérhető fröccsöntésszimulációs szoftverben erre a célra rendelkezésre álló saját környezetben. Kutatásom során kiemelt feladatom, hogy a modellezési módszerem alkalmas legyen a polimer alapanyagú szerszámbetétek időfüggő és hőmérsékletfüggő mechanikai viselkedésének leírására, mivel a jelenlegi fröccsöntésszimulációs módszerek erre még nem alkalmasak. Célnak tekintem továbbá, hogy a szimulációs eredményeket minden esetben validáljam a méréssel meghatározott nyúlás- és hőmérséklet eredményekkel, ilyen módon bizonyítva a modellek megfelelőségét és a kidolgozott módszerem helytállóságát.

## 2 AZ ÁTTEKINTETT IRODALOM KRITIKAI ELEMZÉSE

Szakirodalom kutatásom során ismertettem a különböző gyors szerszámozási (Rapid Tooling) technikákat és összehasonlítottam az így készült fröccsöntő szerszámbetétek üzem közbeni tulajdonságait a hagyományos, acél anyagú szerszámbetétekkel. A közvetlen RT technikák közül a hangsúlyt az additív technológiákkal készült (fém alapanyag esetén az LPBF, polimer alapanyag esetén az FDM, SLA, SLS és PolyJet) betétek vizsgálatára helyeztem. A szakirodalom alapján a polimer szerszámbetétek élettartama még jellemzően a néhány tíz ciklus tartományban van, a fémekhez viszonyított számottevően kisebb szilárdságuk és merevségük miatt. Ezek a szerszámbetétek érzékenyek továbbá a megnövekedett üzem közbeni hőmérsékletre is. Ezzel szemben fontos kiemelni azt az alakadási szabadságot és gyártási rugalmasságot is, amelyet az új additív gyártástechnológiák biztosítanak, a fém szerszámbetétek forgácsoló megmunkálásához képest. Amennyiben a polimer alapanyagú fröccsöntő szerszámbetétek jelenlegi korlátozott élettartama növelhető, úgy azok alkalmazása előtt komoly jövő állhat. Ehhez azonban szükséges egy olyan átfogó állapotelemzési rendszer kidolgozása, amely segítségével a fröccsöntési paraméterek beállíthatók és a prototípus szerszámok élettartama maximalizálható. Ennek megalapozásához áttekintettem a fröccsöntő szerszámokban jelenleg használatos, korszerű mérés technikát. Megállapítottam, hogy olyan átfogó állapotelemzési rendszer, amely egyidőben mérné az üzem közbeni hőmérsékleteket, deformációkat és nyomásokat még nem áll rendelkezésre a szakirodalomban.

A fröccsöntő szerszám deformációk vizsgálati lehetőségeit áttekintettem és megállapítottam, hogy a tématerülettel még viszonylag kevés kutatócsoport foglalkozott. A fröccsöntésszimulációs szoftverekben már lehet a szerszámmagok üzem közbeni elmozdulását vizsgálni, viszont ezek számos egyszerűsítéssel élnek, amelyek negatívan befolyásolják az eredmények pontosságát. Ezek közül hármat emelek ki, amelyek a PhD-dolgozatom szempontjából relevánsak. Az első az, hogy az algoritmus a szerszámalkatrészek csomóponti elmozdulásait addig számítja, ameddig az adott pontban az ömledék le nem fagy. Onnantól az adott csomópontban az elmozdulást állandónak tekinti, azaz nem veszi figyelembe, hogy a fröccsöntött alkatrész további hűlése során az zsugorodik és vetemedik, amely továbbra is befolyásolja a szerszámalkatrészre ható terhelést. A módszer második alapvető hiányossága az, hogy csak az ömledéssel közvetlenül érintkező alkatrészek modellezésére ad lehetőséget. Egy teljes szerszám üzemi deformációjának csak egyik részét okozza a formaüregre ható ömledéknyomás. Nagy üzemi nyomások és kisebb merevségű szerszámházak esetén gyakori jelenség az úgynevezett „lélegzés”, azaz a formabetéteket befoglaló formalapok meghajlása, amely a tönkremenetel veszélye mellett azért is kerülendő, hiszen a lapok meghajlása a záróerő eloszlását is egyenetlenné teszi és akár élszerű felfekvések is kialakulhatnak. A vizsgált szerszámbetétet körbevevő további alkatrészek véges merevségének

figyelembevételére a fröccsöntésszimulációban nincsen lehetőség. A harmadik hiányosság már specifikusabb, ugyanis az algoritmus csak állandó anyagparaméterekkel (rugalmassági modulusz és Poisson-tényező) jellemzett homogén, izotróp és lineárisan rugalmas anyagmodellt tud kezelni a szerszámbetétek anyagaként. Ez a közepes és nagyszériás szerszámanyagok (acél, alumínium, bronz) esetén helytálló, ugyanakkor a fröccsöntésben egyre népszerűbbek a PhD dolgozat témáját is képző polimer alapanyagú szerszámbetétek továbbá a polimer inzertekre történő ráfröccsöntés is. Ezek esetén az alkalmazott anyagmodell igen durva elnagyolás, hiszen nem veszi figyelembe a polimer szerszámbetétek / inzertek merevségének hőmérsékletfüggését és azok kúszási hajlamát (amely magasabb hőmérsékleten ráadásul felerősödik). Mindezen hiányosságok szükségessé teszik egy újfajta modellezési módszer kidolgozását is, amely polimer szerszámbetétek és inzertek esetén pontosabb eredményeket ad.

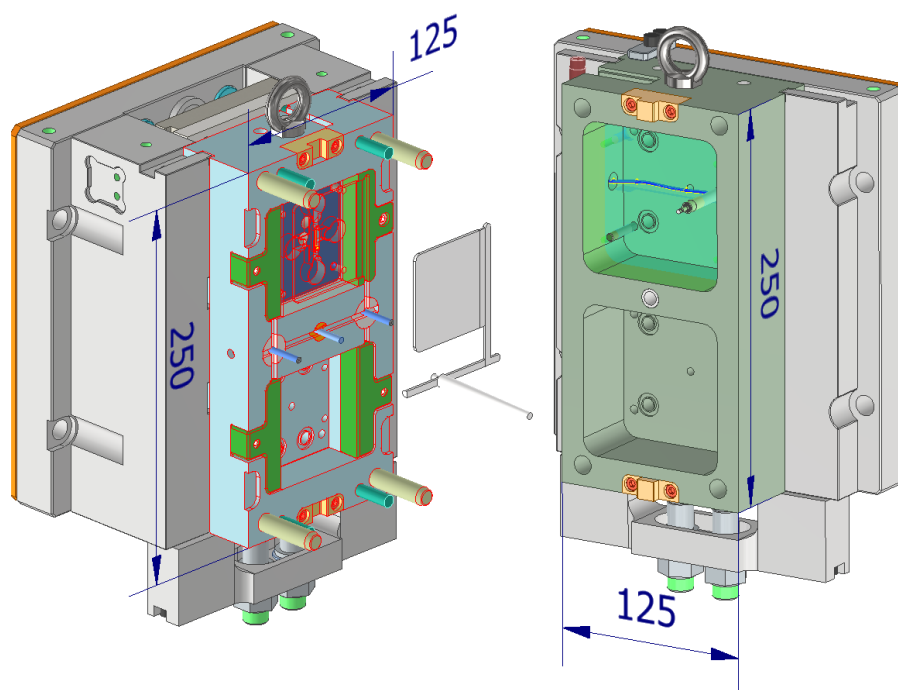
PhD dolgozatomban a következő célkitűzéseket valósítom meg.

- Lefektetem az additív technológiákkal készült kisszériás polimer szerszámbetétek átfogó állapotelemzésének módszerét, amellyel azok üzem közbeni termikus és mechanikai viselkedése mérésrel vizsgálhatóvá válik.
- A fröccsöntési kísérleteket elvégzem a leginkább elterjedt polimer alapanyagú additív technológiákkal készült szerszámbetétekre, valamint egy referenciának tekintett forgácsolt alumínium betétre, hogy létrehozzak egy mérési adatbázist ezen betétek üzem közbeni hőtani és deformációs állapotáról.
- Alkalmazom az állapotelemzési módszeremet a fröccsöntési paraméterek beállítására, hogy a szerszámbetétek élettartama növelhető és a gyártott termékek méretpontossága javítható legyen.
- Megvizsgálom, hogy az alumínium szerszámbetét esetén az üregnyomás integrálja, illetve a polimer szerszámbetétek esetén a mért nyúlások integrálja és a termékjellemzők (tömeg és vastagság) között milyen kapcsolat található.
- Megvizsgálom térhálós fotopolimer szerszámanyag esetén a nagyenergiájú besugárzással történő utókezelés alkalmazhatóságát a szerszámbetétek merevségének növelésére és kúszási engedékenységük csökkentésére, ezzel javítva azok fröccsöntésben való alkalmazhatóságát.
- Kidolgozok egy kapcsolt szimulációs módszert, amellyel a szerszámbetétek üzemi viselkedése fröccsöntésszimuláció és kapcsolt hőtani - mechanikai végelelemes szimuláció együttesével modellezhetővé válik. A végelelemes módszerrel számított hőmérséklet- és nyúlás eredményeket az állapotelemzési rendszerem mérési eredményeivel validálom, ezáltal bizonyítva azok helytállóságát.

### 3 FELHASZNÁLT ANYAGOK, MÓDSZEREK ÉS ALKALMAZOTT BERENDEZÉSEK

#### 3.1 A fröccsöntési kísérletekben használt szerszámgeometria és alapanyagok

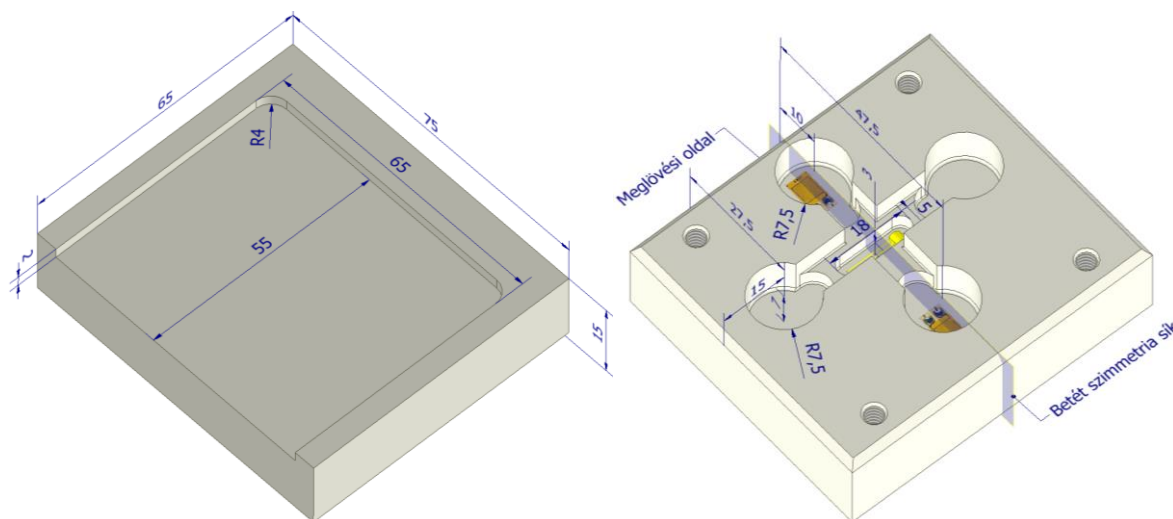
A különböző hagyományos és additív technológiákkal készült prototípus szerszámbetétek üzem közbeni viselkedésének vizsgálatára egy új mérési összeállítást dolgoztam ki, amelyhez egy cserebetétes tesztszerszámot használtam fel. A megtervezett mérési összeállítást mutatja be az 1. ábra. A gyártott termék egy 65x55x2 mm-es lapka, a folyási út végén lévő sarkaiban R4 sugarú lekerekítésekkel. Utóbbira azért van szükség, hogy a formaadó betét a későbbi összehasonlító vizsgálatokhoz alumíniumból is elkészíthető legyen, csak marással és fúrással. A szerszám a gátbetétek cserélhetőségével lehetőséget biztosíthat akár a különböző meglövési módok hatásának vizsgálatára is. A méréseimben vizsgálandó meglövési módnak egységesen a filmgátat választottam.



1. ábra. A cserebetétes tesztszerszám kilövő oldala és beömlő oldala.

A beömlő oldali szerszámfélben elhelyezett betétbe excentrikusan építettem be egy piezoelektromos nyomásmérő szenzort, amelynek 180°-os forgatásával lehetőség van egy gátközeli és egy gáttávoli pontban is az üregnyomások mérésére. A beömlő oldalban elhelyezett piezoelektromos nyomásmérő szenzort egy hasított távtartó persellyel építettem be, amely tengelyirányban a szerszámházban kialakított fészek alján ütközik fel. Az üregnyomást a kísérleteim során egységesen a gáttávoli pozícióban mértem. A mérési összeállítás kilövő oldali formabetétjét mutatja be részletesen a 2. ábra. A betét hátulján kialakított négy zsebbe nyúlásmérő bélyegeket lehet felragasztani, így lehetőség van a folyási úttal párhuzamos, valamint az arra

merőleges irányú nyúlások vizsgálatára is. A betét közepén lévő horonyban elhelyezett hőelemmel a betét hátoldal hőmérsékletét lehet mérni. A kilökő oldali szenzorok kábelkivezetése az alátétben kialakított két furaton keresztül történik, amelyek a szerszámbáz kábelkivezető furataihoz csatlakoznak. A mérések során a gátközeli és a gáttávolságokban mértem nyúlást egyirányú bélyegekkel a 2. ábra szerinti helyeken, míg a másik két üres zsebet a többi szenzor számára szükséges kábelek elvezetéséhez használtam. A két bélyeg bekötése az adatgyűjtőbe két egymástól független félhídban történt.



2. ábra. A kilökő oldali formaadó betét főbb méretei, a nyúlásmérő bélyegek és a hőelem beépítése

A mérések során felhasznált alapanyagokat és szenzorokat foglalja össze az 1. táblázat. A fröccsöntött alapanyag a Tipplen H145 F polipropilén homopolimer volt.

Felhasznált alapanyagok		
Fröccsöntött alapanyag:	Tipplen H145 F (PP)	MOL Zrt.
Betétanyag 1:	RGD835 - VeroWhite (fotopolimer)	Stratasys Ltd.
Betétanyag 2:	EN AW5754 O/H111 (aluminium)	Amari Kft.
Betétanyag 3:	Z-ABS (ABS)	Zortrax S.A.
Betétanyag 4:	PA 2200 (PA12)	EOS GmbH.
Felhasznált szenzorok		
Hőmérséklet mérés (hőelem)	Platinum Resistance Temperature Detector M222	Heraeus GmbH.
Hőmérséklet mérés (hőkamera)	FLIR - A325sc	FLIR Inc.
Piezoelektromos üregnyomásmérő	RJG Piezo 6159	RJG Inc.
Nyúlás mérés (nyúlásmérő bélyeg)	KMT-LIAS-06-3-350-5EL	Kaliber Méréstechnika Kft

1. táblázat Az átalakított mérési összeállításban felhasznált alapanyagok és szenzorok.

A főkísérletek során négy különböző szerszámbetét alapanyagot használtam, az egyes anyagok kiválasztásának rövid indoklása a következő.

- Az alumínium a prototípus szerszámkészítés hagyományosan legkedveltebb alapanyaga: megfelelő szilárdságú és merevségű, továbbá könnyen megmunkálható. Emellett ugyanakkor a hővezetési tényezője az acélnál akár egy nagyságrenddel is magasabb. Ez a szerszámkészítés szempontjából nem előnyös, hiszen az acéltól jelentősen eltérő hővezetés miatt az alumínium prototípus szerszámra beállított fröccsöntési folyamatot a nagyszériás acél szerszám esetén teljesen újra kell gondolni. Ezt először a lefagyott héjrétegben, majd a gátfagyásban, végül pedig hűtési szakaszban jelentkező hőelvonásbeli különbségek okozzák.
- A VeroWhite alapanyagú formabetétet Material Jetting elven működő, PolyJet technológiát alkalmazó Objet Alaris 30 nyomtatón (Stratasys Inc.) készítettem el. Az alapanyag az erősítetlen polimerek között kiváló szilárdsági és merevségi jellemzőkkel rendelkezik, ugyanakkor az üvegesedési átmeneti hőmérséklete viszonylag alacsony, amely behatárolja az alkalmazhatóságát.
- A mozgó oldali formaadó betétet ömledékrétegezéssel is elkészítettem Zortrax Z-ABS alapanyagból. Az alapanyag kiválasztásánál a döntő szempont a magas üvegesedési átmeneti hőmérséklet volt (108 °C). Másik fontos szempont volt, hogy a szerszámbetét alapanyaga inkompatibilis legyen a fröccsöntött alapanyaggal (PP), elkerülve a betét és a fröccsdarab esetleges összehegedését. Szintén kiemelt szempont volt az, hogy az ömledékrétegezés napjaink leginkább elterjedt polimer 3D nyomtatási eljárása, elsősorban viszonylagos egyszerűsége miatt, továbbá számos megfizethető árú nyomtató és filament elérhető már a kereskedelmi forgalomban.
- A szelektív lézer szinterezés (SLS) ígéretes technológia a prototípus fröccsöntő szerszámkészítés szempontjából, mivel nagy merevségű és hőállóságú alapanyagokból is képes dolgozni. SLS technológiával jellemzően kifejezetten műszaki felhasználásra készítenek alkatrészeket. Ennek megfelelően az EOS GmbH által gyártott PA2200 alapanyagot választottam, amely egy PA12 alapanyag, por formában. Tipikusan komoly mechanikai és termikus igénybevételnek kitett alkatrészek készíthetők belőle.

### 3.2 A kísérletekben alkalmazott fröccsöntési paraméterek, mérési módszer

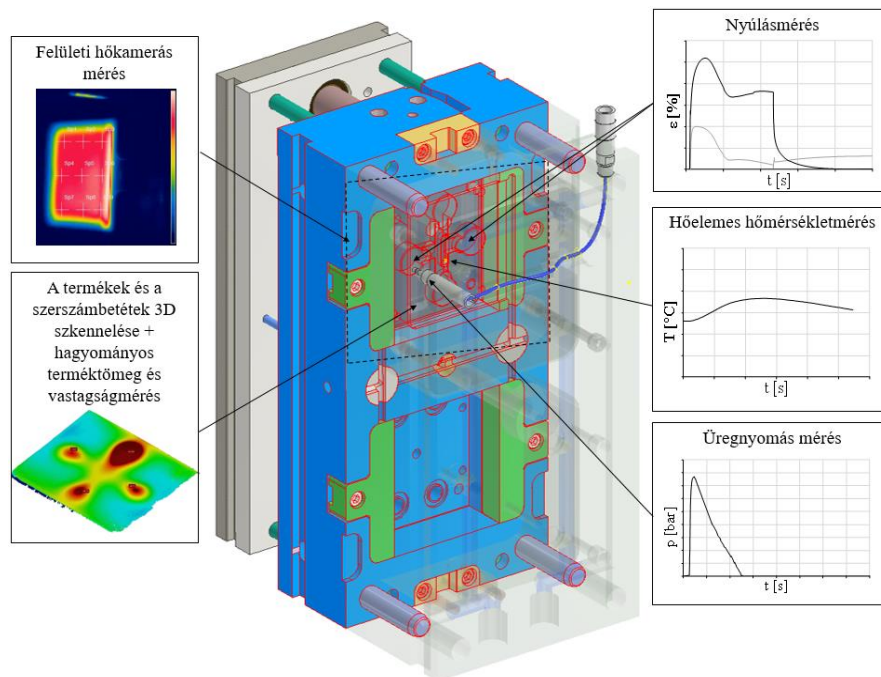
A kísérletek során alkalmazott fröccsöntési paramétereket foglalja össze a 2. táblázat. Változtatott paraméternek az utónyomás nagyságát választottam. Az ömledék hőmérsékletét az anyag technikai adatlapján megadott, ajánlott feldolgozási hőmérséklettartomány alapján jelöltem ki. Az utónyomás nagyságok kijelölésénél, valamint a mérés során állandó paraméterek meghatározásánál a befröccsöntési sebesség, a fröccsöntési nyomás korlát és a záróerő alacsony értékre választása, valamint a holtidők beiktatása a betét védelme és az élettartam maximalizálás miatt szükségesek.

Mérés során változtatott paraméter		
Utónyomás nagysága (állandó üzemi paraméterek)	[bar]	75 bar (10 ciklus)
Utónyomás nagysága (utónyomás változtatás hatásvizsgálat)	[bar]	50 bar-tól indulva 25 bar-os lépcsőkben emelve, maximálisan 300 bar-ig
Mérés során állandó paraméterek		
Termék térfogat (filmgáttal és elosztóval) (3D modell alapján)	[cm <sup>3</sup> ]	12,6
Fröccssebesség	[cm <sup>3</sup> /s]	15
Szerszámhőmérséklet	[°C]	környezeti – nincs temperálás
Záróerő	[t]	5
Átkapcsolási térfogat	[cm <sup>3</sup> ]	26
Gépi nyomás korlát	[bar]	500
Utónyomási idő	[s]	15
Adagvételi térfogat	[cm <sup>3</sup> ]	40
Dekompressziós térfogat	[cm <sup>3</sup> ]	4
Maradék hűtési idő	[s]	30
Holtidő	[s]	~250
Ömledékhőmérséklet	[°C]	190

2. táblázat. A kísérletekben alkalmazott fröccsöntési paraméterek.

A mért mennyiségek a következők voltak: a betét nyúlása az idő függvényében (2 pontban, a 2. ábra szerinti zsebeknél), az üregnyomás az idő függvényében, a hőmérséklet a betét hátulján az idő függvényében (hőelemmel mérve), a formaüreg felületi hőmérséklete a szerszám nyitott állapotában a holtidőben (hőkamerával mérve), továbbá a gyártott termék tömege és méretei. A nyúlásmérő bélyegeket és a hőelemet 3M Scotch-Weld Plastic & Rubber Instant Adhesive PR100 típusú pillanatragasztóval rögzítettem. A mérési sorozatokban csak a mozgó oldali formabetét alapanyagát változtattam, azaz a mozgó oldali alátét továbbá a teljes álló oldali betétetezés EN AW 5754 O/H111 alumínium alapanyagú volt.

A mérési összeállítást mutatja be, a mozgó és az álló oldalt összeillesztve a 3. ábra. Az 1.-3. ábra szerinti tesztszerszámmal fröccsöntési kísérlet sorozatokat hajtottam végre. A termékek és a szerszámbetétek szkennelését GOM ATOS Core 5M típusú 3D szkennelvel végeztem. A termékek vastagságát Mitutoyo Digimatic kengyeles mikrométerrel, míg azok tömegét Radwag PS 600.R2 labor mérlegen mértem.



3. ábra. A fröccsöntési kísérletekhez használt cserebetétes tesztszerszám és a mérési helyek.

### 3.3 Anyagvizsgálati módszerek

#### Kúszásvizsgálat

A polimer szerszámalapanyagok kúszási jellemzőinek vizsgálatára 4 x 10 x 59 mm méretű, téglalap keresztmetszetű próbatesteket nyomtattam ezekből az alapanyagokból. A próbatesteket dinamikus mechanikai analízis berendezésen (DMA-n) vizsgáltam, kúszás hőmérséklet-idő superpozíció (Creep Time Temperature Superposition) üzemmódban. A vizsgált mérési elrendezés három pontos hajlítás volt, a támaszköz a mérőfeltéten 50 mm. A vizsgálati paramétereket tartalmazza a 3. táblázat.

Alkalmazott paraméterek	Mértékegység	Jellemző érték
Hajlító feszültség	[MPa]	5
Hevítési idő	[min]	10
Kúszási idő	[min]	30
Visszaalakulási idő	[min]	30
Minimális hőmérséklet	[°C]	30
Maximális hőmérséklet	[°C]	90
Hőmérséklet növekmény	[°C]	5
Mérési közeg	Levegő	

3. táblázat. A DMA Creep TTS mérés során használt paraméterek.

#### Dinamikus mechanikai jellemzők vizsgálata

Az alapanyagok merevségének hőmérsékletfüggését DMA berendezésen vizsgáltam, úgynevezett „Multi-Frequency – Strain” üzemmódban. A méréseket „Dual Cantilever” elrendezésben végeztem el. A próbatestek mérete 4 x 10 x 50 mm volt. A vizsgálati hőmérséklettartomány 25 – 105 °C volt, a vizsgálati frekvencia 1 Hz, a fűtési sebesség 3 °C/perc amíg a vizsgálati amplitúdó 15 μm volt.

## 4 ÖSSZEFOGLALÁS

PhD-dolgozatomban prototípus fröccsöntő szerszámbetétek átfogó üzem közbeni állapotelemzését és szimulációs módszerfejlesztését valósítottam meg.

Kidolgoztam egy PolyJet technológiával gyártott fröccsöntő szerszámbetét üzem közbeni jellemzőinek mérését. A mérési összeállításban két pontban vizsgáltam a mozgó oldali betét hátulján a nyúlásokat és az álló oldali betétbe épített nyomásmérő szenzorral az üreghőnyomást. A mérési rendszer tartalmaz hőelemes mérést is, amellyel a betét hátoldal hőmérséklete mérhető, illetve kiegészül hőkamerával, amely a formaüreg felületi hőmérsékletét méri a szerszám nyitott állapotában.

A szenzorozott tesztszerszámmal fröccsöntés sorozatot végeztem egy PolyJet technológiával készült epoxi-akrilát betétbe, amely során vizsgáltam az állandó üzemi körülményeket (így az ismételhetséget) és a növekvő utónyomás hatását is. Az üzemi jellemzők mellett mértem a gyártott termékek méretét és a szerszámbetétek mérettartását is. Megvizsgáltam továbbá a fröccsöntési módszer hatását az üzem közbeni nyúlásokra, nyomásokra és hőmérsékletekre. Az idővezérelt, nyomáskorlátos kitöltéssel a betét hőtágulásából eredő, megváltozó átkapcsolási pont problémája kiküszöbölhető. A módszer ugyanakkor nagyobb nyomás- és hőterhelést is ró a betétre, a hagyományos térfogatra történő átkapcsoláshoz képest. Ezután vizsgáltam az epoxi-akrilát betétanyag nagyenergiájú besugárással történő utókezelésének hatását a merevségre, a kúszási engedékenységre és a hőalakításra. A besugárzás hatására a merevség növekedett, a kúszási engedékenység lecsökkent, az üvegesedési átmeneti hőmérséklet pedig jelentősen emelkedett. Ez vélhetően a térháló kötéssűrűség megnövekedésének a következménye. Ezután fröccsöntési kísérleteket végeztem a különböző dózissal besugárzott betétekkel és a legnagyobb dózist kapott szerszámbetét üzemi nyúlása számottevően kisebb volt, mint az utókezelést nem kapott betété. Ezzel igazoltam a nagyenergiájú sugárzás pozitív hatását a szerszámbetétek alkalmazhatóságára.

A továbbiakban megvizsgáltam az ömledékrétegezés, mint széleskörben elterjedt és gazdaságos additív technológia alkalmazhatóságát prototípus fröccsöntő szerszámbetét készítésre. Megállapítottam, hogy magas térkitöltés alkalmazása esetén az így gyártott szerszámbetétek alkalmasak kisszériás fröccsöntésre. Bevezettem továbbá a nyúlásintegrált, amely a mért nyúlásgörbék alatti területet jelenti és ezt korreláltattam a terméktömeggel és vastagsággal. Az erős lineáris kapcsolatok igazolták a módszer alkalmazhatóságát a termékfelügyeletben. A továbbiakban a hőre lágyuló polimer alapanyagú technológiák közül szelektív lézer szinterézéssel, poliamid 12 por alapanyagból nyomtattam szerszámbetétet, amellyel elvégeztem a fröccsöntési kísérletsorozatot. Vizsgáltam az összefüggéseket a terméktömeg és vastagságok, valamint a nyúlásintegrál között. A termékjellemzők erős függést mutattak ebben az esetben is a nyúlásintegráltól.

Ezután ismertettem a prototípus fröccsöntő szerszámbetétek modellezési lehetőségeit. Bemutattam a fröccsöntés szimulációs szoftverben (Moldflow) rendelkezésre álló Core Shift szimulációt, amellyel szerszámbetétek és inzertek deformációit lehet modellezni. Megállapítottam a módszer előnyeit és alkalmazási korlátait és az utóbbiak alapján kidolgoztam egy új kapcsolt szimulációs módszert, amely fröccsöntés szimulációból, majd tranziens hőtani- végül pedig mechanikai szimulációból áll. Ez az általánosabb módszer alkalmas arra, hogy az üzem közbeni hőmérséklet eloszlást és a deformációkat is megfelelő pontossággal tudja előrejelezni a vizsgált alumínium és a polimer szerszámbetétek esetén is. A fröccsöntés szimulációs programban történik a vizsgált geometria hálózása, továbbá az időfüggő nyomásterhelés kiszámítása. Az eredményeket ezután egy tranziens hőtani szimulációban használtam fel, ahol a szerszámblokk időfüggő hőmérséklet eloszlását határoztam meg, a termék hűlésének hatására. A hőmérséklet mezőt, továbbá a fröccsöntés szimulációval kapott nyomásmezőt ezután egy mechanikai szimuláció bemeneteként használtam. Emellett kiegészítő kúszásvizsgálatokat végeztem az eddig használt betétanyagokon egy DMA berendezésen. Meghatároztam továbbá a szerszámanyagokra a tárolási modulusokat és veszteségi tényezőket is hogy a merevség hőmérsékletfüggését is figyelembe tudjam venni. Az anyagvizsgálatok után végeeselemesen modelleztem a betétanyagok kúszását. A kúszási modulus Prony-sorozatos közelítésére épülő anyagmodell a kis alakváltozások tartományában kellő pontossággal képes reprodukálni a hárompontos hajlító elrendezésben mért kúszást. A kúszásvizsgálatok modellezésével egyben kalibráltam is a betétanyagok anyagparamétereit, amelyeket utána a szerszámbetétek modelljében használtam fel.

Összefoglalásképpen kijelenthető, hogy a kidolgozott átfogó állapotelemzési rendszer használatával a szerszámbetét üzem közbeni termikus és a mechanikai jellemzői egyaránt vizsgálhatóvá váltak. A fröccsöntési méréseket a prototípus szerszámanyagok és lehetséges gyártástechnológiák széles körére elvégeztem és kapcsolatot teremtettem a gyártás közbeni nyúlások, üregnyomások továbbá a gyártott termékek jellemzői között. Sikeresen vizsgáltam a térhálós fotopolimer alapanyagok esetén az utókezelés lehetőségeit, hogy növeljem a betétek merevségét, és javítsam a hőalaktartásukat. Kiegészítő anyagvizsgálatokkal meghatároztam a polimer betétanyagokra a hőmérsékletfüggő kúszási tulajdonságokat és a merevséget. Bemutattam egy lehetséges modellezési módszert a polimer szerszámanyagok kúszásának modellezésére, kis deformációk esetén. A modellt validáltam, ismertettem az alkalmazhatóság határait. Kidolgoztam egy modellezési módszert, amely a fröccsöntés szimuláció és a végeeselemes hőtani és mechanikai szimulációk egyirányú összekapcsolására épül. A módszerrel fém és polimer szerszámbetétek esetén is lehet az üzemi hőmérsékleteket és nyúlásokat modellezni. A mérési eredményeimmel validáltam a számítási modelleket és igazoltam azok megfelelőségét. Mind a kidolgozott mérési, mind pedig a modellezési módszer is a gyakorlatban alkalmazható.

## 5 TÉZISEK

### 1. tézis:

Kidolgoztam egy átfogó állapotelemzési rendszert, amellyel a hagyományos és az additív gyártástechnológiákkal készült szerszámbetétek üzem közbeni viselkedése mérésrel vizsgálhatóvá válik. A rendszer alkalmas előrejelezni a szerszámbetétek tönkremenetelét, valamint gyártás közben jellemezni a gyártott termék méretpontosságát és a technológia ismételtetését. Az állapotelemzési rendszer a betétek nyúlásmérő bélyeggel történő deformációméréséből, üregnyomás mérésből, hőelemes térfogati hőmérsékletmérésből és hőkamerás felületi hőmérsékletmérésből áll. Az üzem közbeni állapotelemzésen túl a mérési rendszert kiegészíti a gyártott termékek és a szerszámbetétek 3D szkennelése, valamint a termékeken elvégzett geometriai és tömegmérések. A rendszer alkalmazhatóságát alumínium, epoxi-akrilát, ABS és PA12 alapanyagú szerszámbetétek vizsgálatával bizonyítottam.

Tézishez kapcsolódó publikációk: [1-5,9]

### 2. tézis

A létrehozott állapotelemzési rendszer alkalmas az adott fröccsöntési paraméterek mellett szükséges ciklusvégi holtidő meghatározására a szerszámbetét élettartamának növelése és a termékek méretpontosságának javítása érdekében. A nyúlásméréssel a szerszámnyitáskor meglévő, késleltetett rugalmas deformáció visszaalakulását, a hőmérséklet mérésével pedig a betét üvegesedési átmeneti hőmérséklet alá csökkenéséhez szükséges időt határozhatjuk meg. Állításomat Vero White-RGD835, RGD 720 (Stratasys Inc.), Z-ABS (Zortrax) és PA2200 (EOS GmbH) anyagokból készült fröccsöntő szerszámbetéteken végzett fröccsöntési kísérletekkel igazoltam.

Tézishez kapcsolódó publikációk: [1-5,9]

### 3. tézis

Alumínium szerszámbetétekkel gyártott termékek esetén a terméktömeg és vastagság a formaüregben mérhető nyomások integráljával lineáris összefüggésben áll adott utónyomási idő, ömledékhőmérséklet és szerszámhőmérséklet esetén. Az üregnyomás görbék integrálja és a terméktömeg és vastagság között az alábbi összefüggések teremtenek kapcsolatot:

$$m_{\text{termék}} \approx c_1 \cdot \int_{t=\text{utónyomás kezdete}}^{t=\text{utónyomás vége}} p_{\text{üreg}}(t) dt + m_1 \quad (1)$$

$$w_{\text{termék}} \approx c_2 \cdot \int_{t=\text{utónyomás kezdete}}^{t=\text{utónyomás vége}} p_{\text{üreg}}(t) dt + w_1 \quad (2)$$

ahol:  $m_{\text{termék}}$  [g] és  $w_{\text{termék}}$  [mm] a termék tömege és vastagsága,  $c_1$  [g/(bar·s)] és  $c_2$  [mm/(bar·s)] a szerszám anyagától, annak helyi geometriájától és a terhelési esettől függő illesztett paraméterek,  $p_{\text{üreg}}$  [bar] az üregnyomás,  $m_1$  [g] és  $w_1$  [mm] a statikus terméktömeg és vastagság, amely az elméletileg 0 nyomásintegrál (azaz a formaüreg volumetrikus kitöltése) esetén mérhető.

Állításomat EN AW 5754 O/H111 anyagminőségű alumínium ötvözetből készült szerszámbetéten történő mérésekkel igazoltam.

**Tézishez kapcsolódó publikáció: [6]**

#### **4. tézis**

**A nagyenergiájú ( $\gamma$ ) sugárzással kezelt, additív gyártástechnológiával készült fotopolimer szerszámbetétek üzem közbeni nyúlásai számottevően csökkentek a dózismagyság függvényében. Ezt a betétanyag rugalmassági modulusának növekedése és a kúszási engedékenysége csökkenése okozza.**

Ennek köszönhetően az utókezelést kapott szerszámbetétek üzemi nyúlásai a maradék hűtés szakaszában már stabilizálódnak magasabb utónyomások (250-300 bar) esetén is. Vizsgálataimat 0-200 kGy dózistartományban,  $^{60}\text{Co}$  sugárforrással besugárzott RGD835 –VeroWhite (Stratasys Ltd.) alapanyagú szerszámbetétekkel elvégzett fröccsöntési kísérletekkel, valamint hagyományos DMA méréssel (hőmérséklet söprés), kúszásvizsgálattal (DMA Creep Time Temperature Superposition) és Shore D keménységmérésekkel igazoltam.

**Tézishez kapcsolódó publikáció: [7]**

#### **5. tézis**

**Kidolgoztam egy szimulációs módszert, amellyel a szálerősítés nélküli fröccsöntő szerszámbetétek üzemi viselkedése is modellezhető. A modellezési módszer a fröccsöntés szimuláció és a hőtani, valamint a mechanikai végeselemes szimulációk egyirányú összekapcsolására épül.** A fröccsöntés szimulációban történik a szerszámbetét végeselemes hálózása és az időfüggő nyomásterhelés meghatározása. Az eredményeket ezt követően egy mechanikai végeselemes szimulációs rendszerbe kell beolvasni, ahol egy kapcsolt hőtani-mechanikai végeselemes szimulációt kell készíteni. A hőtani szimulációban történik a vizsgált szerszámblokk időfüggő hőmérsékletmezőjének meghatározása, amely a mechanikai szimuláció bemeneteként szolgál. Az időfüggő nyomásmezőket csomóponti erők listái reprezentálják a mechanikai végeselemes szimulációban. A mechanikai szimulációval a szerszámbetétek üzemi deformációit lehet meghatározni. Az egyirányú kapcsolási módszer a szerszámbetétek kis alakváltozása esetén alkalmazható, amikor az ömledék áramlási terének változatlansága helytálló feltételezés marad a teljes modellezett fröccsöntési folyamat során.

**A kapcsolt szimulációs eljárás az általánosított Standard-Solid modell használatával alkalmas a polimer szerszámbetétek üzemi viselkedésének modellezésére is. A betét alapanyagának kúszási modulusát Prony-sorozatos közelítéssel lehet definiálni.** Állításomat EN AW 5754 O/H111 anyagminőségű alumínium ötvözetből továbbá Vero White-RGD835, Z-ABS (Zortrax) és PA2200 (EOS GmbH.) anyagokból készült fröccsöntő szerszámbetéteken végzett fröccsöntési kísérletekkel igazoltam.

**Tézishez kapcsolódó publikációk: [6,8,10]**

## 6 HIVATKOZÁSOK

1. **Krizsma Sz. G.**, Kovács N. K., Kovács J. G., Suplicz A.: In-situ monitoring of deformation in rapid prototyped injection molds. Additive Manufacturing, 42, 102001/1-102001/8 (2021) [10.1016/j.addma.2021.102001](https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102001) **IF=11,632 D1**
2. **Krizsma Sz. G.**, Suplicz A.: Comprehensive in-mould state monitoring of Material Jetting additively manufactured and machined aluminium injection moulds. Journal of Manufacturing Processes, 84, 1298-1309 (2022) [10.1016/j.jmapro.2022.10.070](https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.10.070) **IF=6,2 D1**
3. **Krizsma Sz.**, Suplicz A.: Analysis of the applicability and state monitoring of material extrusion–printed acrylonitrile butadiene styrene injection mould inserts with different infill levels. Materials Today Communications, 35, 106294/1-106294/ (2023) [10.1016/j.mtcomm.2023.106294](https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.106294) **IF=3,8 Q2**
4. **Krizsma Sz. G.**, Suplicz A.: Additív gyártástechnológiával előállított fröccsöntő szerszámbetétek üzem közbeni deformációinak vizsgálata. Polimerek, 7, 155-160 (2021)
5. **Krizsma Sz. G.**, Suplicz A.: State-monitoring and product quality measurement of additively manufactured injection mould inserts. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1246, 012020/1-012020/8 (2022) [10.1088/1757-899X/1246/1/012020](https://doi.org/10.1088/1757-899X/1246/1/012020) **Q3**
6. **Krizsma Sz. G.**, Suplicz A.: Monitoring and modelling the deformation of an aluminium prototype mould insert under different injection moulding and clamping conditions. Results in Engineering, 20, 101556/1-101556/13 (2023) [10.1016/j.rineng.2023.101556](https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101556) **IF=6 Q1**
7. **Krizsma Sz.**, Mészáros L., Kovács N. K., Suplicz A.: Expanding the applicability of material jetting–printed photopolymer prototype injection moulds by gamma irradiation post-treatment. Journal of Manufacturing Processes, **IF=6,2 D1, minor revision.**
8. **Krizsma Sz.**, Széplaki P., Suplicz A.: Coupled injection moulding simulation–thermal and mechanical simulation method to analyse the operational behaviour of additively manufactured polymeric injection moulds. Results in Engineering, 23, 102558 (2024) [10.1016/j.rineng.2024.102558](https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102558) **IF=6 Q1**
9. **Krizsma Sz.**, Suplicz A.: Prototípus fröccsöntő szerszámok üzem közbeni állapotfelügyelete és termékminőség vizsgálata. XXXI. Nemzetközi Gépészeti Konferencia (OGÉT), Temesvár, Románia. 2023.04.17. - 2023.04.20., 323-328 (2023)
10. **Krizsma Sz.**, Suplicz A.: Comprehensive Measurement and Simulation of Prototype Injection Moulds. Defect and Diffusion Forum Chapter 4: Defect Identification and Fault Analysis (2024)