



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

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

**FRÖCCSÖNTŐ SZERSZÁMOK HŐTANI TULAJDONSÁGAINAK**  
**ELEMZÉSE ÉS KAPCSOLÓDÓ MÉRÉSI MÓDSZEREINEK**  
**FEJLESZTÉSE**

**PHD ÉRTEKEZÉS TÉZISFÜZETE**

KÉSZÍTETTE:

**ZINK BÉLA**

OKLEVELES GÉPÉSZMÉRNÖK

TÉMAVEZETŐ:

**DR. KOVÁCS JÓZSEF GÁBOR**

**2018**

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

## 1. Bevezetés

A műanyag alapanyaggyártó és feldolgozóipar mára a gazdaság egyik meghatározó ágazatává nőtte ki magát, a világ műanyagipari termelése meghaladta a 322 millió tonnát a 2016-os évben. Az ágazaton belül az egyik legfontosabb feldolgozási technológiának számít a fröccsöntés, amellyel a műanyag termékek közel harmadát állítják elő. Willert 1956-ban szabadalmaztatta a csigadugattyús fröccsöntő gépet, ami a mai modern berendezések alapja. A csigadugattyús fröccsöntő gép indította el a fröccsöntési technológia dinamikus fejlődését. Mára ez a technológia a rendkívüli fejlődésnek köszönhetően az egyik legnagyobb pontosságot, termékminőséget és gazdaságosságot biztosító polimerfeldolgozási technológiává vált. A fröccsöntési technológiához kapcsolódóan megjelent több újszerű eljárás, a legjobb hatékonyság eléréséhez elengedhetetlen ezeknek az eljárásoknak az alkalmazása, mint például a fröccsöntési szimuláció és gyors szerszámozás (RT).

A szerszámban a fröccsöntési ciklus során összetett hőtani folyamatok játszódnak le, amelyek meghatározzák a szerszám termikus igénybevételét, a termék minőségét és a szerszám élettartamát is. A szerszámba való hőbevitel magával az ömledékáramlással történik, amelytől a szerszámmal való érintkezés pillanatában megkezdődik a hőelvonás. A hőelvonás hőátadás, hővezetés és hőszugárzás formájában történik a hűtőfolyadék, a környezet, a szerszám egyes részei által. Ezek a hőterjedési formák közül a fröccsöntési technológiánál a hőátadás és a hővezetés domináns. A szabályozott hőelvonás egészen a szerszám nyitásaig tart, kidobás után a fröccsöntött termék a környezeti hőmérsékletre hűl. A szerszámban lejátszódó hőtani folyamatok az egyre nagyobb számítási kapacitásnak köszönhetően közelítésekkel és elhanyagolásokkal ugyan, de számíthatók numerikus eljárásokkal.

Ezeket a numerikus közelítéseket biztosító programok kifejlesztése 1970-es évek végén kezdődött el. Kezdetekben problémát okozott az informatikai eszközök költsége és korlátozott számítási kapacitása. Mára az informatika fejlődésének köszönhetően viszont a fröccsöntési szimulációs programokkal számos szerszámtervezési probléma vizsgálható és elkerülhető. Az összetett hőtani folyamatok viszont csak elhanyagolásokkal és közelítésekkel kezelhetők. Ezek a hőtani eredmények bemeneti paraméterként szolgálnak a további számításokhoz, így további pontatlanságot okoznak a hőtani elhanyagolások, amelyek sok esetben lehetetlenné teszik az összetett fröccsöntési hibák numerikus számításokkal támogatott kiküszöbölését. A fröccsöntési technológiához egyre inkább használt új, hagyományos szerszámanyagoktól eltérő hőtani paraméterekkel rendelkező szerszámalapanyagok (réz, alumínium, epoxi-akrilát bázisú gyanták stb.) és összetett hűtőkör-kialakítások (formakövető hűtési rendszerek) a hőtani

számításokat bonyolítják. Ezekben az esetekben a pontatlan kezdeti és peremfeltételek nagyobb számítási hibát eredményezhetnek.

A prototípus gyártással készült fröccsöntő szerszámbetétek megjelenése lehetővé tette a kisszériás termékek olcsóbb és gyorsabb előállítását. Ezekkel a technológiákkal számítógépes vezérléssel, additív módon, rétegről rétegre építhető fel a szerszám. A gyors prototípusgyártási technológia új szerszámozási módszereket tesz lehetővé, segítségével tetszőlegesen bonyolult fröccsöntő szerszám- és hűtőkör-geometria állítható elő. Ezek a polimerbázisú betétek viszont hőtani viszonyok tekintetében eltérnek a fémszerszámoktól, az alapanyag hővezetési tényezője nagyságrendekkel kisebb, mint a fémeké, ezért a hőelvonás lassú, illetve az ömledékkel érintkező szerszámfelület és annak közvetlen környezetének a hőterhelése nagyobb, mint a szerszámbetét egyéb részében.

Doktori disszertációm célja a fröccsöntő szerszámok hőátviteli folyamatainak elemzése és mérési módszereinek fejlesztése. Munkámban foglalkozom a fröccsöntési technológiához használt numerikus számítások bemeneti paramétereinek (hőátadási és hővezetési tényező) pontosításával, különös figyelmet fordítva a polimerbázisú, kisszériás szerszámok hőtani paramétereire. További célom a fröccsöntő szerszámokhoz felhasznált alapanyagok és a hűtőkör kialakítások hűtési hatékonyságra és numerikus számításokra gyakorolt hatásának vizsgálata fröccsöntési technológiával és numerikus eljárással. A mért adatokkal a fröccsöntési szimulációs programok hűtési analíziseinek folyamatait tervezem pontosítani. A munkámban foglalkozom továbbá hűtőcsatornáknak lerakódó vízköréteg modellezésével, hőtani paramétereinek mérésével és a hűtési hatékonyságra gyakorolt hatásának numerikus számításával.

## **2. Az irodalom összegzése és kritikai elemzése**

Az additív technológiák lehetővé tették a fröccsöntött, kisszériás termékek gazdaságos gyártását. A kisszériás szerszámoknál a legnagyobb problémát a gyors tönkremenetel jelenti. A rossz hővezető képességű alapanyag nem képes elvezetni a hőt a termékkel érintkező részekről, ezért a hőmérséklet az üvegesedési átmeneti hőmérséklet fölé emelkedik és az alapanyag mechanikai tulajdonságai jelentős mértékben romlanak. Ahhoz, hogy a kisszériás szerszámoktól a hőt gyorsan el lehessen vezetni, az általában fotopolimer bázisú szerszám-alapanyagok hővezetési tényezőjének növelése szükséges. A kisszériás szerszámok alapanyagának fejlesztésével többen is foglalkoztak, de a legfontosabb szempont a mechanikai tulajdonságok javítása volt. A mechanikai tulajdonságok javíthatók kalcium-foszfát,

kalcium-bentonit, szilícium-karbid, szén nanocső stb. erősítő anyag adagolásával, de akár utólagos térhálósítással is. A szerzők keveset foglalkoztak a szerszámok hővezetési tényezőjének növelésével és a hűtőkörök alkalmazásával. A kísérletek többségében a hűtőkörök alkalmazása helyett inkább a ciklusidő növelésével és a befröccsöntés, illetve az utónyomás csökkentésével növelték a szerszám élettartamát. Megállapították, hogy a befröccsöntési fázis során fellépő hajlító igénybevétel teszi leginkább tönkre a kisszériás fröccsöntő szerszámokat. A nyomások csökkentése és a ciklusidő növelése viszont csökkenti a termék méretpontosságát, ezt a szerzők nem vizsgálták.

Additív technológiákkal előállíthatók nagyszériás szerszámok is, amelyeknél alkalmazható formakövető hűtőkör, ami nagyobb mennyiségű hőt képes elvonni rövidebb idő alatt a terméktől. A szakirodalomban a formakövető hűtőkörök alkalmazásának előnyeivel többen foglalkoztak, megállapították, hogy akkor jelent jelentős előnyt a hűtőkör alkalmazása, ha a fröccsöntött darab térfogata nagy, a geometriája összetett vagy a fröccsöntési hőmérséklet nagy. Ezekben az esetekben közel 50%-kal csökkent a maximális szerszámhőmérséklet, egyenletesebb lett a hőmérséklet-eloszlás és 25%-kal csökkent a ciklusidő. A kutatók a munkájuk során foglalkoztak a formakövető hűtések numerikus ellenőrzésével is, de a legtöbb esetben a hűtőkörökben kialakuló áramlást csak jelentős elhanyagolásokkal számították. A szerszámhőmérsékletek hőkamerás mérésénél sem részletezték a szerszámbetétek reflexiós tényezőjének meghatározását, pedig a pontos értéke nélkül nem lehet pontosan mérni a hőmérsékletet.

A szimulációs szoftverek a polimer és a szerszámfal közötti hőátadást közelítő módszerekkel határozzák meg. Befröccsöntés során a legnagyobb a hőátadás, az utónyomási fázis alatt csökken és a hűtési szakaszban még tovább csökken, a pontos hőátadási értékek viszont nem ismertek. Az utónyomási és hűtési fázisban a nyomás csökken, amint a nyomás lokálisan eléri az atmoszferikus nyomást, a termék leválik a szerszám faláról és hőátadási érték nagymértékben esik. A jelenséggel néhány kutató már foglalkozott, a szerzők által meghatározott értékek viszont nem egységesek, a hőátadási tényező  $500-6600 \text{ W/m}^2\text{K}$  között változik. Különböző mérési és számítási módszereket vizsgáltak, megállapították, hogy a felületi és hővezetési hőellenállás alapján felállított modell érzékenysége nem megfelelő. A haladó differencia módszer viszont alkalmas lehet a hőátadási tényező meghatározására, ehhez a kezdeti értékek mérése szükséges, amelyre jó megoldást nyújthat az infravörös hőmérőszenzor.

Fröccsöntési technológiával összetett geometriájú és nagy méretpontosságú műanyag termékeket lehet gazdaságosan gyártani. A termék minőségét az utónyomási és hűtési fázis

határozza meg leginkább, a hűtési fázis továbbá a fröccsöntési technológia leghosszabb ideig tartó szakasza. Ezért elmondható, hogy a hűtési szakasz a legfontosabb technológiai fázis a gazdasági és minőségi szempontok szerint. A vízkő- és korróziós réteg kialakulása rontja a hőátviteli tényező értékét, így az összetett geometriájú hűtőkörök hatásfoka is jelentősen csökken. A témával csak néhány kutatás foglalkozik, megállapították, hogy az 1 mm-es vízkőréteg 40 °C-kal növeli a termék maximális felületi hőmérsékletét a kidobási pillanatban, amely 0,9 mm-es többlet deformációt okoz a vízkőmentes esethez képest. A korrózió a kutatások alapján kisebb mértékben rontja a minőséget és a ciklusidőt. A szerzők viszont egyik esetben sem határozták meg a vízkő és korróziós réteg hővezetési tényezőjét, továbbá nem foglalkoztak a lerakódás képződését befolyásoló tényezők elemzésével sem. A numerikus eljárással kapott eredményeket sem ellenőrizték hőkamerás vagy szenzoros mérésekkel.

Az irodalomkutatás alapján a következő célokat tűztem ki:

- A fotopolimer bázisú kisszeriás szerszámok hőtani elemzése, a hűtőkörök szerszám-tönkrementelre gyakorolt hatásának elemzése.
- A formakövető hűtőkörök hőtani tanulmányozása numerikus módszerrel és mérésekkel, illetve hagyományos technológiával, nagy hővezető képességű anyagból megmunkált szerszámbetétek hőátviteli folyamatainak összehasonlítása. A felületi minőség és szerszám bevonatolás hőkamerás mérésekre gyakorolt hatásának elemzése.
- A fröccsöntő szerszámokban a polimer ömledék és a szerszámfal között lejátszódó hőtani folyamatok vizsgálata, a hőátadási tényező méréséhez szükséges eljárás és berendezés fejlesztése.
- A vízkőréteg hőtani paramétereinek (hővezetési tényező, sűrűség és fajhő) meghatározása különböző összetételre. A lerakódások hőátvitelre gyakorolt hatásának elemzése numerikus módszerrel.

### 3. A vizsgálatokhoz felhasznált alapanyagok és gépek

A következő fejezetekben a felhasznált berendezéseket, alapanyagokat és vizsgálati módszereket mutatom be.

#### 3.1. Fröccsöntési alapanyagok

A különböző hűtőkör-kialakítású és alapanyagú szerszámbetétek hőtani elemzéséhez a Styrolution által gyártott Terluran GP35 típusú ABS alapanyagot használtam fel, amely fröccsöntési technológiával dolgozható fel. A kisszériás szerszámok hőtani elemzéséhez a MOL Petrolkémia Zrt. által gyártott Tipplen H-145F típusú polipropilént használtam. A hőátadási tényező meghatározásához az INEOS Olefins & Polymers által előállított Ineos PP 100-GA12 alapanyagból fröccsöntöttem próbatesteket.

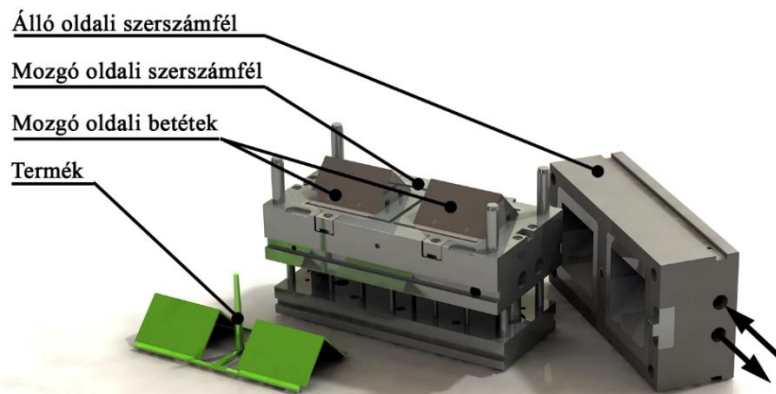
#### 3.2. Szerszámalapanyagok

A nagyszériás szerszámok vizsgálatához 1.2311 (P20) (Böhler) és MaragingSteel1 (MS1) (EOS) acélból, illetve Ampcoloy 940 és 88 (Ampcometal) rézötvözetből készült szerszámbetéteket használtam. A kisszériás szerszámok vizsgálatához két epoxi alapú gyantát használtam fel a szerszámbetétek elkészítésére, Fullcure 720 (RGD720) (Stratasys) és Digital ABS Plus (RGD5160-DM) (Stratasys).

#### 3.3. A szerszám felépítése és a szerszámbetét-kialakítások

A felhasznált szerszám kétfézeskes, az álló és mozgó oldal külön temperálható (1. ábra). A szerszámban két darab, 2 mm vastagságú 90°-os sarkot tartalmazó sík lapokból álló termék gyártható. A mag oldalon a két síklap találkozásánál található gerincél környezetében a sarokhatás miatt felhalmozódik az ömledékkal bevitt hő.

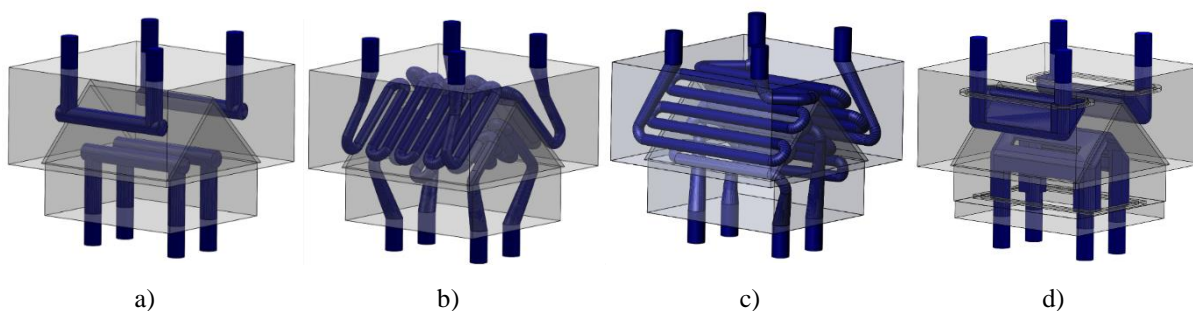
Négy különböző hűtőkörkialakítást vizsgáltam, a hűtőkörök minden esetben a hagyományos hűtőcsatornák tervezési szempontjai alapján kerültek kialakításra. Az első megoldás hűtőcsatornái hagyományos kialakítású, fűréssal készültek (*Hagyományos hűtőkör*) (2/a ábra). A hűtőcsatornák átmérője 8 mm, mert a fröccsöntött termék 2 mm vastagságú, a középvonaluk a felülettől a csészénél 13,2 mm-re, a magoldali betétnél 12 mm-re találhatók.



1. ábra A felhasznált szerszám és a szerszámmal gyártható termék

A második és harmadik hűtőkörkialakítás formakövető, additív gyártástechnológiával készült. Ezeknél a hűtéseknel a hűtőkörök átmérője kisebb és közelebb helyezkedik el a fröccsöntött termékhez, mint a hagyományos megoldás esetében. Ennek ellenére a hőelvonás egyenletes, mert a csatornák követik a termék geometriáját (2/b és c ábra). A hűtőkörök átmérője a betétbe belépve 8 mm-ről 5 mm-re csökken, a hűtőkörök távolsága a csésze és a magoldal felületétől is 6,5 mm, a hűtőkörök egymástól vett távolsága 8,5 mm. A két hűtőkörrendezés között a legnagyobb különbség a csatornák irányultsága, elrendezése és térfogata. Az egyik esetben a magoldal gerincével merőlegesek a csatornák (*Merőleges formakövető hűtőkör*) (2/b ábra), a másik kialakításnál párhuzamosak a hűtőcsatornák a gerincével (*Párhuzamos formakövető hűtőkör*) (2/c ábra). A *Párhuzamos hűtőkör* esetében a hűtőkörök térfogata a magoldalán 27%-kal, a csészeoldalon 13%-kal nagyobb, mint a *Merőleges hűtőkör* esetében.

A negyedik szerszámbeépítés hűtése marással készült, a betét több részből áll, az alkatrészek összeszerelése után alakul ki a 2/d ábrán látható hűtés (*Üregelt hűtőkör*). A hűtőkör hőelvonó felülete a formaadó üregtől 8 mm-re található mindkét oldali betét esetében.



2. ábra A hagyományos, fűrt (a), a merőleges formakövető (b), a párhuzamos formakövető (c) és a marással készült, üregelt (d) hűtőkör-kialakítás



### **3.4. Felhasznált gépek és mérőeszközök**

#### **Fröccsöntő gép**

A hőátadási tényező meghatározásához használt próbatetek legyártását és a hőtani méréseket Arburg 370S 700-290-es fröccsöntő gépen hajtottam végre.

#### **Szerszámok temperálása**

A szerszámok temperálását Wittmann Tempro Plus 90 temperálóval végeztem.

#### **Differenciális pásztázó kalorimetria**

Az alapanyagok fajhőjének mérését TA Instruments Q2000 típusú DSC berendezéssel végeztem. A fajhő mérése során egy fűtés-hűtés-fűtés programot használtam 2 °C/perces sebességgel, 0-120 °C-os hőmérséklettartományban. A minták tömege minden esetben 15-20 mg között volt, a mintartató alján a porított minta egyenletes eloszlottságú volt.

#### **Dinamikus mechanikai analízátor**

A Fullcure 720 és a Digital ABS alapanyagok tárolási modulusának és a veszteségi tényezőjének mérését a TA Instruments DMA Q800 berendezésen végeztem. A méréseknél mindkét alapanyagot egyoldali befogással terheltem deformáció gerjesztéssel, 20 µm amplitúdóval. Az alátámasztási távolság 17,5 mm-re és a felfűtési sebesség 1 °C/percre állítottam be. A vizsgálati hőmérséklettartományt a Fullcure 720 esetén 0-100 °C-ra, a Digital ABS-nél 0-160 °C-ra állítottam. Minden esetben 3 mérés átlagolt értékeit határoztam meg.

#### **Hőkamera**

A szerszámbetétek hőkamerás méréseit Flir A325 SC típusú hőkamerával végeztem.

#### **Adatrögzítő**

A vízkő minták hővezetési tényezőjének meghatározásához és a kisszériás szerszámok hőtani elemzéséhez Ahlborn Almemo 8990-6-V5 típusú adatrögzítőt és NiCr-Ni T190 hőelemeket használtam, 0,1 °C felbontással, illetve 0,3 s és 3 s mintavételezési időlépéssel.

#### **Kapilláris plasztométer**

A szabványos folyási mutatószám (MFI) meghatározását CEAST 7027.000 kapilláris plasztométeren MSZ EN ISO 1133:2005 szabványnak megfelelően, 200 °C-on és 2.16 kg terheléssel végeztem.

#### **Mérleg**

A vízkőminták sűrűségének mérését Ohaus Explorer mérlegen végeztem, amelynek mérési tartománya 0-110 g, mérési pontossága 0,0001 g.

## **Prés**

A vízkő hővezetési tényezőjének meghatározását Collin Pressplate 200E hidraulikus présgépen 50 és 80 °C-ra fűtve 60, 120, 180, 250, 300, 425, 550 bar nyomásokon végeztem.

## **Univerzális terhelőgép**

A hőátadási tényező meghatározását Zwick Z250 univerzális terhelőgépen 11, 22, 44, 110, 220 kN-on terheléseken végeztem. A mérésekhez használt próbatest átmérője  $\varnothing 75$  mm, vastagsága 2 mm volt.

## **Szoftver**

A numerikus számításokhoz az Autodesk Moldflow Synergy 2015-2018 verzióit használtam, amelyben már megtalálható a vége-selemes hűtési számításokhoz használt Computational Fluid Dynamics (CFD) algoritmus.

## **4. Összefoglalás**

A dolgozatom elején bemutattam röviden az additív technológiákhoz köthető fontosabb definíciókat, részletesen foglalkoztam az additív technológiákkal előállítható kisszériás szerszámokban végbemenő hőtani folyamatokkal, a szerszámok tönkremenetelével és a kisszériás szerszámok előállításához használható alapanyagokkal. Ezt követően összevetettem a hagyományos és a speciális, formakövető hűtőkör-kialakításokat, bemutattam a formakövető kialakítás alkalmazásának előnyeit és tervezési szempontjait. Részletesen bemutattam továbbá a polimer ömledék és a fröccsöntő szerszám fala között fellépő hőátadási tényező meghatározásával foglalkozó kutatásokat és azok eredményeit. Végül kitértem a vízkő- és korróziós lerakódások hűtési hatékonyságára gyakorolt hatására.

Az értekezésemben a fröccsöntő szerszámban végbemenő hőtani folyamatok mérési és numerikus számítási módszereinek továbbfejlesztésével foglalkoztam. A szerszámbetét és az ömledék közötti hőátadási tényező nyomásfüggését a numerikus számítások elhanyagolják, ami jelentős hibát eredményez a számításokban. A szerszám fala és az ömledék között fellépő hőátadási tényező meghatározásához mérési eljárást majd egy berendezést fejlesztettem, amellyel a hőátadási tényező meghatározható a nyomás és a hőmérséklet függvényében. A mérések során két referenciahenger között polipropilén próbatesteket préseltem Zwick Z250 szakítógépen 25, 50, 100, 250 és 500 bar nyomásokon. A mérési eredmények alapján meghatároztam az ömledék és a szerszám között fellépő hőátadási tényezőt, illetve összefüggést állítottam fel, amellyel számítható a hőátadási tényező, a nyomás és a hőmérsékletkülönbség függvényében. A meghatározott összefüggés ellenőrzése érdekében

további méréseket hajtottam végre, amellyel igazoltam az összefüggés helyességét. Hibaszámításokat hajtottam végre továbbá, amellyel meghatároztam a kifejlesztett módszer kvadratikus relatív hibáját.

A hőátadási folyamatokat leíró paraméterek bemeneti értéként szolgálnak a numerikus számításokhoz, amelyek így nagymértékben meghatározzák a számított eredményeket. Egyre több speciális fröccsöntő szerszámozási megoldás jelenik meg piacon, amellyel gyorsabban, egyre jobb minőségű termékeket lehet előállítani. Ilyen megoldás a speciális a formakövető hűtőkörök és erősen ötvözött réz szerszámalapanyagok használata, ezért foglalkoztam a dolgozatomban a formakövető hűtőkörös acél (*DMLS*), hagyományos, fűrt hűtőkörös acél (*P20*) és réz (*Ampcoloy*) szerszámberétek numerikus és hőkamerás vizsgálatával. A hőkamerás mérések során megállapítottam, hogy az  $\varepsilon=0,5$  emissziós tényezőjű, tömbszikkázással ( $R_{a, \text{átlag}}=1,98$ ) gyártott szerszámberétek közvetlen hőkamerás mérése pontatlan a környezetből származó sugárzás miatt, ezért csak felületi kezelés után lehet pontos méréseket végrehajtani. A szerszámberétek numerikus és hőkamerás vizsgálatának eredményeiből meghatároztam, hogy az erősen ötvözött réz szerszámberét hagyományos hűtéssel is hatékonyabban és egyenletesebben vezeti el a hőt egyszerű, sarokgeometriájú fröccsöntött termék esetében, mint a *DMLS* szerszámberét. A *P20* szerszámberét esetében a mért és számolt hőmérsékletek között közel  $5^{\circ}\text{C}$ -os különbséget tapasztaltam, amely valószínűleg a pontatlan kezdeti és peremfeltételekből adódik. Megállapítottam, hogy a *P20* szerszámberét esetében álló és mozgó oldala közötti illesztési hézag modellezésével 65%-kal csökkenthető a mért és számított eredmények közötti különbség, a további különbség származhat a formaadó felület és hűtőkörök felületi érdességéből és abból, hogy berétek temperálásához használt hűtőfolyadék hőmérséklete a valóságban  $\pm 2^{\circ}\text{C}$ -kal eltérhet a számításoknál beállított értékektől a fröccsöntési ciklus során.

A közvetlenül additív technológiával előállított, kisszériás fröccsöntő szerszámok esetében is alkalmazható a formakövető hűtés, ami csökkentheti a hőterhelést és növelheti az élettartamot, ezért végrehajtottam a FullCure 720 és Digital ABS Plus alapanyagokból készült szerszámberétek hőtani vizsgálatát. A vizsgálatomban hagyományos kialakítású hűtéssel hűtött és a hűtés nélküli szerszámberéteket hasonlítottam össze két eltérő kialakítású, formakövető szerszámberéttel. Megállapítottam, hogy felesleges a hagyományos kialakítású hűtés használata, mert a hűtési hatékonysága közel nulla, a mért hőmérsékleti eredmények nem mutattak szignifikáns különbséget a hűtés nélküli esethez képest. A formakövető hűtőkörök ezzel ellenben szignifikánsan csökkentik a szerszámberétek hőterhelését, az üvegesedési hőmérséklet felett eltöltött idő 70%-kal csökkenthető formakövető hűtés használatával a

hagyományos vagy a hűtés nélküli esethez képest. A kisszériás, műanyag szerszámok fröccsöntési ciklusa hőtani szempontok alapján három részre osztható, az első szakaszban a hőbevitel domináns, a szerszámhőmérséklete monoton nő. A másodikban szakaszban, amikor az ömledék és a szerszám felületi hőmérséklete kiegyenlítődött, akkor a hővezetés és a hűtés általi hőelvonás domináns. A harmadik fázisban, amikor a termék eltávolítása megtörtént, akkor hősugárzás és a konvekció hatása is jelentőssé válik a szerszám hőelvonásában.

A hűtőkörben lerakódó vízkőréteg gátolja a hőelvonást, ami csökkenti a termék minőségét és a termelési hatékonyságot. Numerikus számításokkal vizsgáltam vízkőlerakódás hatását egy egyszerű, sarokgeometriájú fröccsöntött termék esetében. A számításokhoz szükséges hőtani paramétereket (átlagos hővezetési tényező  $1,37 \text{ W}/(\text{mK})$ ; átlagos fajhő  $800 \text{ J}/\text{kgK}$ .) és sűrűséget ( $2,33 \text{ g}/\text{cm}^3$ ) mérésekkel meghatároztam. Megállapítottam, hogy a 2 mm vastagságú vízkőréteg hatására a jobb hűtési hatékonyságú, formakövető hűtőkörös szerszámot hőelvonó képessége a hagyományos kialakítású szerszámotéét értékére csökken, mert a hűtőfolyadékkal elvont hő a hőelvonás domináns mechanizmusa. A nagy hővezetőképességű, réz szerszámotéét esetében viszont a szerszámotéétben végbemenő hővezetés a meghatározó folyamat, ezért a vízkő ebben az esetben nem befolyásolja jelentősen a hőelvonó képességét.

## 5. Tézisek

### 1. Tézis

Bebizonyítottam, hogy a fröccsöntő szerszámok hűtési hatékonyságát legnagyobb mértékben az általánosan alkalmazott hűtőfurat átmérő tartományban (4-10 mm) a hűtés elrendezése, azaz elhelyezkedésének nyomvonala, valamint a szerszám alapanyaga és az esetleges lerakódások határozzák meg.

Kimutattam, hogy egyszerű geometriájú fröccsöntött termékek esetében a nagy hővezető képességű, ötvözött réz szerszámot hagyományos, fűrt hűtőkörrel is nagyobb mennyiségű hőt képes elvonni, mint a Direct Metal Laser Sintering (DMLS) eljárással készített, formakövető hűtőkörös, acél szerszámot azonos fröccsöntési ciklusidő alatt.

Állításaimat Ampcoloy 940 réz, Böhler 1.2311 acél és MaragingSteel MS1 acél szerszám-alapanyagokból készült szerszámotéteken akrinitril-butadién-sztirol alapanyaggal elvégzett numerikus számításokkal és hőmérsékleti mérésekkel igazoltam [1, 3, 4, 8, 10].

### 2. Tézis

Igazoltam, hogy a szerszámotétek illesztési hézagjai által keltett hőellenállás figyelembevételével pontosíthatók a numerikus számítások azoknál a fröccsöntő szerszámoknál, ahol a hűtőkörök hűtési hatékonysága kicsi, ezért hőelvonásban résztvevő szerszámalkatrészek közötti hőátadás szerepe megnő.

Állításaimat Ampcoloy 940 réz, Böhler 1.2311 acél és MaragingSteel MS1 acél szerszám-alapanyagokból készült szerszámotéteken akrinitril-butadién-sztirol alapanyaggal elvégzett numerikus számításokkal és hőmérsékleti mérésekkel igazoltam [1, 3, 4, 8, 10].

### 3. Tézis

Létrehoztam egy összefüggést, amellyel a fröccsöntő szerszámokban keletkező lerakódások hűtési hatékonyságot módosító hatása leírható az alábbi módon:

$$H = H_0 \cdot \frac{\lambda_l^{C_3(\lambda_{sz}) \cdot V_l + C_4}}{(\lambda_{sz} - \lambda_l) \cdot (C_5(\lambda_{sz}) \cdot V_l^{C_6})^{(C_3(\lambda_{sz}) \cdot V_l + C_4)} + \lambda_l^{C_3(\lambda_{sz}) \cdot V_l + C_4}}$$

ahol  $H_0$  [%] a lerakódásmentes esethez tartozó hűtési hatékonyság,  $\lambda_l$  [W/(mK)] és  $\lambda_{sz}$  [W/(mK)] rendre a lerakódás és a szerszám hővezetési tényezője,  $C_3(\lambda_{sz})$  [1/m] és  $C_5(\lambda_{sz})$  [1/m] a fröccsöntő szerszám hővezetési tényezőjétől függő konstansok,  $C_4$  [-] és  $C_6$  [-] a lerakódás vastagságától függő konstansok,  $V_l$  [m] a lerakódás vastagsága.

Állításaimat hagyományos és formakövető hűtőkör-kialakítások esetében lerakódásmentes és 0,25, 0,5 és 1 mm-es, 0, 0,1, 0,15, 0,25, 0,56, 1, 1,37 és 1,74 W/(mK) hővezetési tényezőjű lerakódások modellezésével igazoltam [5].

#### 4. Tézis

Epoxi-akrilát alapú prototípus szerszámok esetében kimutattam, hogy formakövető hűtés alkalmazásával akár 70 %-kal csökkenthető a szerszámbetétek üvegesedési hőmérséklet felett töltött időtartama, amivel szignifikánsan növelhető a szerszámbetétek élettartama. Igazoltam továbbá, hogy a hagyományos kialakítású hűtőkörök alkalmazása epoxi-akrilát alapú fröccsöntő szerszámok esetében nem növeli meg jelentősen a szerszámbetét hőelvonó képességét a hűtés nélküli esethez képest.

Állításaimat RGD 720 és RGD 5160-DM epoxi-akrilát alapú alapanyagból készült szerszámbetéteken polipropilén alanyaggal elvégzett mérésekkel igazoltam [2, 6, 7].

#### 5. Tézis

Kidolgoztam egy speciális, préselésen alapuló mérési eljárást és a hozzá tartozó kiértékelési elméletet, amellyel a polimer és a fröccsöntő szerszám fala között fellépő hőátadási tényező a hőmérséklet-különbség és a nyomás függvényében meghatározható ömledék és szilárd állapotban is.

Igazoltam, hogy az általam fejlesztett mérési eljárás kvadratikus abszolút hibáját az

$$\frac{\delta\alpha}{\alpha} = \sqrt{\frac{\left(\delta\Delta T_{ref} \cdot \frac{\partial\alpha}{\partial\Delta T_{ref}}\right)^2 + \left(\delta\Delta T_{ref, felület} \cdot \frac{\partial\alpha}{\partial\Delta T_{ref, felület}}\right)^2 + \left(\delta\delta_{minta} \cdot \frac{\partial\alpha}{\partial\delta_{minta}}\right)^2}{\alpha^2}}$$

összefüggéssel írható le, ahol  $\delta\alpha$  [W/(m<sup>2</sup>K)] a hőátadási tényező kvadratikus abszolút hibája,  $\alpha$  [W/(m<sup>2</sup>K)] a hőátadási tényező,  $\delta\Delta T_{ref}$  [K] a referenciahengerek hőmérsékletmérési hibája,  $\delta\Delta T_{ref, felület}$  [K] a referenciahengerek felületének hőmérsékletmérési hibája,  $\delta\delta_{minta}$  [m] a minta vastagságának mérési hibája. A mérés maximális kvadratikus abszolút hibája 4,77 %-ra adódott a saját fejlesztésű berendezésen 5, 10, 25, 50 és 70 °C hőmérséklet-különbségen, 25, 50, 100, 250 és 500 bar nyomásokon, polipropilén próbatesteken mérve

#### 6. Tézis

Bizonyítottam, hogy a hőmérséklet-különbség és a nyomás növelésével a polimer ömledék és a fröccsöntő szerszám fala között fellépő hőátadási tényező a hőmérséklet-különbség logaritmusával az alábbi összefüggés szerint nő:

$$\alpha(p, \Delta T) = C_{12} \cdot \ln\left(\frac{\Delta T + C_{13}}{C_{13}}\right) \cdot \frac{1 - e^{-k \cdot p^l}}{1 + e^{-k \cdot p^l}}$$

ahol  $p$  [bar] a polimer és a szerszám között ébredő nyomás,  $k$  [1/bar],  $l$  [-],  $C_{12}$  [W/m<sup>2</sup>K] és  $C_{13}$  [K] konstansok,  $\Delta T$  [K] a felületek között fellépő hőmérséklet-különbség. Az összefüggés 30 °C ≤ T<sub>polimer</sub> ≤ 200 °C hőmérséklettartományban és 0 bar ≤ p ≤ 500 bar nyomástartományban érvényes. Polipropilén-acél anyagpáron 5, 10, 25, 40, 50 és 70 °C hőmérséklet-különbségen,

25, 50, 100, 250 és 500 bar nyomásokon  $k=0,18$  [1/bar],  $l=0,38$  [-],  $C_{12}=345,3$  [W/(m<sup>2</sup>K)],  $C_{13}=2,28$  [K] konstansok alkalmazásával a hőátadási tényező maximális 29 %-os relatív hibával írható le [9].

## 6. Saját közlemények jegyzéke

### Folyóiratcikkek

1. **Zink B.**, Szabó F., Hatos I., Hargitai H., Kovács J. G.: DMLS szerszámbetétek szimulációs vizsgálata, Műanyag- és Gumiipari Évkönyv, 12, 80-87 (2014)
2. Kovács J. G., Szabó F., Kovács N. K., Suplicz A., **Zink B.**, Tábi T., Hargitai H.: Thermal simulations and measurements for rapid tool inserts in injection molding applications, Applied Thermal Engineering (IF=**2.624**), 85, 44-51 (2015)
3. Tabi T., Suplicz A., Szabo F., Kovacs N. K., **Zink B.**, Hargitai H., Kovacs J. G.: The analysis of injection molding defects caused by gate vestiges, Express Polymer Letters (IF=**2.953**), 9, 394-400 (2015)
4. **Zink B.**, Szabó F., Hatos I., Suplicz A., Kovács N. K., Hargitai H., Tábi T., Kovács J. G.: Enhanced Injection Molding Simulation of Advanced Injection Molds, Polymers (IF=**3.364** (2016)), 9, 1-11 (2017)
5. **Zink B.**, Kovács J. G.: The effect of limescale on heat transfer in injection molding, International Communications in Heat and Mass Transfer (IF=**3.718** (2016)), 86, 101-107 (2017)
6. **Zink B.** Kovács J. G.: Enhancing thermal simulations for prototype molds, Periodica Polytechnica Mechanical Engineering (megjelenés alatt)
7. **Zink B.**, Kovács N. K., Kovács J. G.: Thermal analysis based method development for novel rapid tooling applications International Journal of Thermal Sciences (IF=**3.615** (2016)) (bírálat alatt)

### Konferenciatickek

8. **Zink B.**, Kovács N. K., Kovács J. G.: Hűtőkörök hatása a fröccsöntési technológiára, XXIII. Nemzetközi Gépészeti Találkozó - OGÉT 2015, Csíksomlyó, 411-414 (2015)
9. **Zink B.**, Suplicz A., Szabó F.: Szimulációs modellfejlesztés, XXIV Nemzetközi Gépészeti Találkozó - OGÉT 2016, Déva, 503-506 (2016)
10. **Zink B.**, Suplicz A., Szabó F.: Fröccsöntött termékek vetemedésének csökkentése üveggyönggyel, XXVI Nemzetközi Gépészeti Találkozó - OGÉT 2018, Marosvásárhely, 537-540 (2018)

### **Konferencia-előadások**

11. **Zink B.**, Kovács N. K., Kovács J. G.: Hűtőkörök hatása a fröccsöntési technológiára, XXIII. Nemzetközi Gépészeti Találkozó - OGÉT 2015, Csíksomlyó, 2015.04.23-26., szóbeli előadás
12. **Zink B.**, Kovacs J.G.: Vízkőlerakódás hatása a fröccsöntő szerszámok hőtranszport folyamataira, X. Országos Anyagtudományi Konferencia, 2015.10.11-13., poszter
13. **Zink B.**, Suplicz A., Szabó F.: Szimulációs modellfejlesztés, XXIV Nemzetközi Gépészeti Találkozó - OGÉT 2016, Déva, 2016.04.21-24. szóbeli előadás
14. **Zink B.**, Suplicz A., Szabó F.: Fröccsöntött termékek vetemedésének csökkentése üveggyönggyel, XXVI Nemzetközi Gépészeti Találkozó - OGÉT 2018, Marosvásárhely, 2018.04.26-29., szóbeli előadás