HATOS ISTVÁN[1]

# 3D nyomtatott hibrid szerszámgyártás technológiai fejlesztése

Az Új Nemzeti Kiválósági Program támogatásával 2018 szeptemberétől doktorjelölt hallgatójaként folytatom a „3D nyomtatott hibrid szerszámgyártás technológiai fejlesztése" című kutatási programot. Kutatási területem a fémek 3D nyomtatása. A több területen is alkalmazható felépítő technológia szerszámgyártásban való alkalmazhatóságot kutatom és fejlesztem. A fém 3D nyomtatás egyik első gépészeti alkalmazása a formakövető hűtéssel rendelkező fröccsöntő szerszámbetétek gyártása volt. Bizonyított, hogy az ilyen szerszámbetétek alkalmazásával jelentősen javítható a fröccsöntési technológia. A kutatási munkám valós ipari igények alapján megfogalmazott alap és alkalmazott kutatás. A fém 3D nyomtatással készülő szerszámbetétek széleskörű alkalmazásának gazdasági korlátai vannak. Kutatási munkámat az a cél vezéreli, hogy a hagyományos és felépítő gyártás kombinálásával, a nyomtatott szerszámbetétek tulajdonságait felülmúló, de gazdaságosabban létrehozható szerszámok gyártástechnológiát fejlesszük és tanulmányozzuk. Új gyártási eljárást fejlesztettünk ki, amivel a gazdasági számítások és szimulációs eredmények alapján olcsóbb szerszámokkal tudunk gyorsabban gyártani, jelentős gazdasági hasznot hajtva.

## BEVEZETÉS

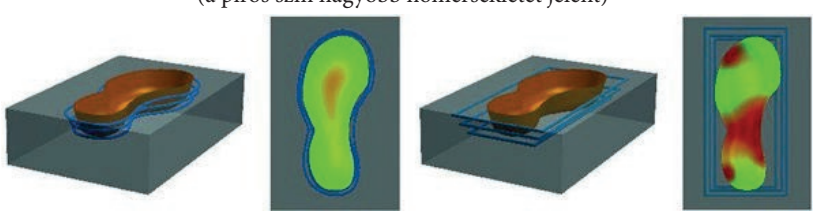
A fröccsöntés napjainkban az egyik legmeghatározóbb polimer feldolgozási technológia, gyakorlatilag a műanyag termékek több mint egyharmadát ezzel az eljárással állítják elő. Az olvadáspontja fölé melegített polimer ömledéket nagy sebességgel szűk beömlő nyíláson át zárt szerszámba fecskendezik, ahol a kis viszkozitású ömledék kitölti a termék geometriájának megfelelő teret. A zárt szerszámüregben nagynyomáson kihűlő polimerből alakul ki a fröccsöntött (3D) termék.[2] A fröccsöntés szakaszosan ismétlődő eljárás, gazdaságosságát döntően befolyásolja az ismétlődő szakaszok hossza, az a ciklusidő. A fröccsöntési ciklus legmeghatározóbb része a hűtési idő, amely szerszámtól, feldolgozási hőmérséklettől, darabtérfogattól és geometriai összetettségtől függően a teljes

[1] SZE Multidiszciplináris Műszaki Tudományi Doktori Iskola, PhD-hallgató; SZE Audi Hungaria Járműmérnöki Kar, Anyagtudományi és technológiai Tanszék, egyetemi tanársegéd. Témavezető: Dr. Hargitai Hajnalka, SZE Audi Hungaria Járműmérnöki Kar, Anyagtudományi és technológiai Tanszék, egyetemi docens.

[2] Kovács József Gábor: *Fröccsöntött termékek tervezése és szimulációja*, 2007, PhD értekezés, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar.

ciklus több mint felét is kiteheti. A járműiparban számos olyan alkatrész van, amelyek gyártásánál a nagy térfogatuk, összetett geometriájuk, illetve az alkalmazott műszaki műanyag nagy feldolgozási hőmérséklete miatt a hűtésnek különösen nagy jelentősége van. A termék hűtésének optimalizálása tehát rendkívül fontos része a szerszámtervezési folyamatnak. A fröccsöntés gazdaságossága a fröccsöntési ciklusidő csökkentésével, azon belül a hűtési idő csökkentésével jelentősen javítható. A hűtési idő a szerszám hőelvonó képességének fokozásával csökkenthető. A termék minőségét nagymértékben befolyásolja a hőelvonás egyenletessége, tehát a hűtés intenzitását úgy célszerű fokozni, hogy az minél kisebb hőmérséklet különbségeket okozzon a munkadarabban. Ez a kettős cél hagyományos hűtési rendszereknél – ahol a hűtőköröket fúrással állítják elő – sokszor nem megvalósítható. Kialakulhatnak olyan részek, ahol a hűtési rendszer nem tud megfelelő intenzitással hőt elvonni. Az ideális egy olyan hűtőrendszer lenne, ahol a szoftveresen vagy tapasztalati úton tervezett hűtőkörök, akár változó keresztmetszetű csatornái tetszőleges nyomvonalon haladhatnának. A forma- vagy kontúrkövető hűtés (*conformal cooling*) olyan speciális szerszámhűtési kialakítás, ahol a hűtőrendszer követi a formaüreg geometriáját. Az ilyen hűtőkörök előnye főleg összetett geometriájú fröccs termékek gyártásánál mutatkozik, ahol a csatlakozó egyenes furatokkal kialakított hűtőrendszer nem tud egyenletes hőmérséklet eloszlást biztosítani. A formakövető hűtés a hagyományosnál egyenletesebb hőelvonása az optimálisan elhelyezett hűtőkörök és a termék fala közötti egyenletes távolság miatt jelentkezik. Az azonos hőelvonás kisebb belső feszültséget és deformációt okoz (1. ábra). Az intenzív hűtés hatására a fröccsöntés ciklusideje akár 30-50%-kal is csökkenthető. A hűtés további előnye a szerszám kisebb és egyenletesebb hőterhelése, ami a szerszám élettartamát növelheti. Egyszerűbb formakövető hűtésű szerszámok gyárthatók hagyományos technológiákkal is, de a bonyolult és tetszőleges belső hűtőkör rendszerek előállítására a rétegről-rétegre építő úgynevezett gyors prototípusgyártó technológiák, köztük a DMLS (Direct Metal Laser Sintering) alkalmasak.[3]

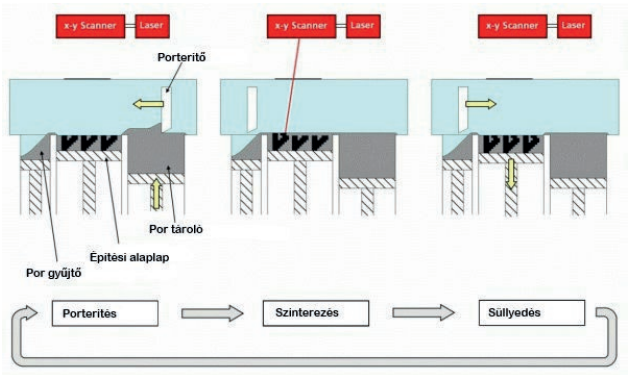
1. ábra: Hagyományos (bal) és formakövető (jobb) hűtés
(a piros szín nagyobb hőmérsékletet jelent)[4]



[3] Wang, Yu – Yu, Kai-Min – Wang, Charlie C. L.: Spiral and conformal cooling in plastic injection moulding, in *Computer-Aided Design*, 2015, Vol. 63., pp. 1–11., Hatos István – Hargitai Hajnalka – Kovács József Gábor: Műanyag fröccsöntő szerszámbetétek szinterezési technológiája, in Zsoldos Ibolya (szerk.): *Fejezetek nemfémes anyagok legújabb járműipari kutatási területeiből*, Széchenyi István Egyetem, Győr, 2015. pp. 88–111., Nickels, Liz: Channelling quality for moulded parts using fast manufacturing, in *Metal Powder Report*, 2009, 64/8., pp. 8–12.
[4] Ruffner, Tim: *Success with Conformal Cooling Using Direct Metal Laser Sintering*, 2012,

A DMLS technológia egy közvetlen felépítő eljárás, ahol a fémporok felületét lézersugárral olvasztják meg. A lézeres szinterezőnek a rétegről-rétegre való építési módból adódóan szakaszosan ismétlődő működése van. Az alapanyag minden esetben finomszemcsés fémpor, amelyet egy porterítő mechanizmus terít vékony (jellemzően 20-40 μm) rétegekben. Minden egyes porterítés után egy koncentrált lézersugár pásztázza végig a termék adott rétegbe eső keresztmetszetét. A pásztázott területen a por „összeolvad", a nem pásztázott részeken a por érintetlen marad és egy későbbi gyártáshoz újra felhasználható marad. A keresztmetszet szinterezése vagy olvasztása után az asztal lesüllyed egy rétegvastagságnyit, és a porterítő újabb réteg port terít szét. A folyamat addig ismétlődik, amíg a munkadarab el nem készül.[5] (2. ábra)

2. ábra: A gyártási folyamat




## HIBRID SZERSZÁMKIALAKÍTÁS

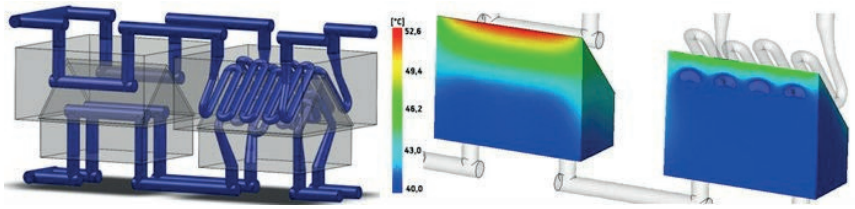
A formakövető hűtőkörök előnye főleg összetett geometriájú fröccs termékek gyártásánál mutatkozik, de egyszerűbb geometriák esetén is eredményesen alkalmazható.[6] (3. ábra)

MoldMaking Technology.

[5] Hatos István: Fémek 3D nyomtatásának technológiája és alkalmazása, in *Gépgyártástechnológia*, 2015/2. 6–10. o., Hatos István – Hargitai Hajnalka: Formakövető hűtéssel rendelkező szerszámbetétek gyártása lézerszinterezéses technológiával, in *A Jövő Járműve*, 2013/3-4., 95–97. o.

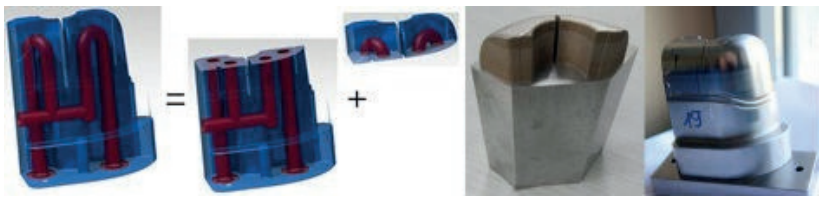
[6] Zink Béla – Szabó Ferenc – Hatos István – Hargitai Hajnalka – Kovács József Gábor: DMLS szerszámbetétek szimulációs vizsgálata, in *Műanyag- és Gumiipari Évkönyv*, 2014, 12. évf., 49–56. o.

3. ábra: Hagyományos (bal) és formakövető hűtéskialakítás, és a szerszámok hőmérséklet eloszlása




Amennyiben a betét teljes magasságában nem tartalmaz hagyományos úton nem gyártható belső üregeket, célszerű megosztani a betétet egy forgácsolt és egy felépített részre. Ez esetben a forgácsolással elkészített alsó félre közvetlenül ráépítjük a speciális hűtőköröket tartalmazó felső részt (hibrid szerszám), így két különböző alapanyagból egy mechanikus kötések nélküli közös darabot kapunk.[7] (4. ábra)

4. ábra: Szerszámbetét megosztása forgácsolt és felépített részre

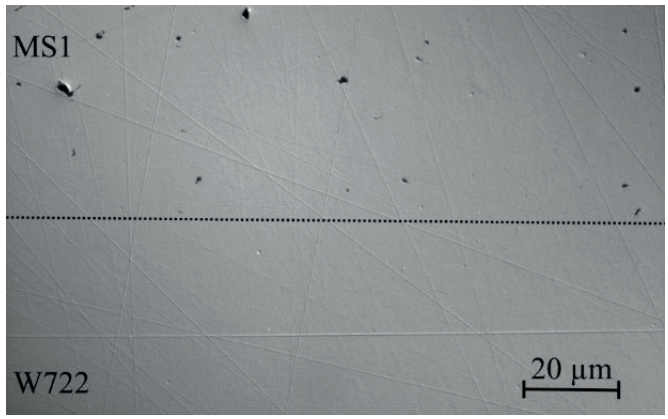



## VIZSGÁLATOK

Az alsó forgácsolt rész anyagát a szerszámmal szemben támasztott elvárások és a szinterezést követő hőkezelések vagy felületi bevonatolás figyelembe vételével kell megválasztani. Hagyományos gyártású forgácsolt alapra ráépített szerszám polírozott felületét vizsgáltuk optikai mikroszkóppal. A nyomtatott szerszámfél (MS1=EOS MaraginSteel) jól láthatóan porozitást tartalmaz, míg az alsó hagyományosan gyártott rész tömör. A porozitás értéke a mikroszkópi felvétel alapján meghatározható. A nyomtatott anyag esetében 032%, míg az azonos kémiai összetételű hagyományosan gyártott anyagpár (W722=1.2709) esetében 0,28% százalék, kiválásos keményítés után.

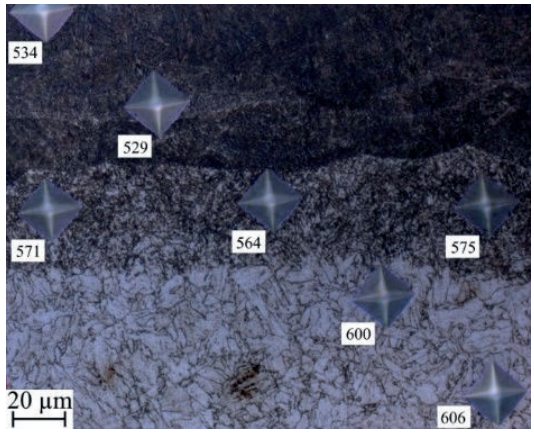
[7] Hatos, István – Kocsis, Bence – Hargitai, Hajnalka: Conformal cooling with heat-conducting inserts by direct metal laser sintering, in *IOP Conference Series: Materials Science And Engineering*, 2018.

5. ábra: Hibrid szerszám porozitás képe



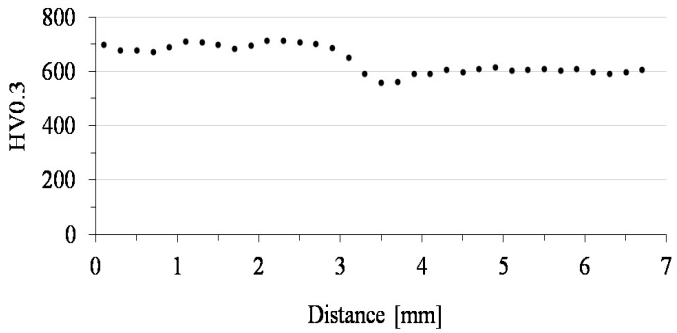

Az átmeneti zónának fontos szerepe van a szerszám élettartamában. A lokális szerszámkopások elkerülése érdekében, az átmeneti zóna keménysége nem térhet el lényegesen a homogén szerszámtesttől. Munkánk során MS1-W722 és MS1-1.2343 anyagösszetételű mintákat vizsgáltunk, és mikroszkópi csiszolatokon mértük az átmenetizóna környezetében a keménységet (HV0,3). A 6. ábra középső részén látható, hogy az átmenti rész, amit már a lézer által átolvaszt, a W722-es anyag finomabb struktúrájában szilárdul meg. Az átmeneti rész keménysége a homogén MS1-W722 anyagok keménysége közé esik (6. ábra).

6. ábra: MS1-W722 anyagpár mikroszkópi csiszolata



Az átmeneti rész keménysége MS1-1.2343 acélpár esetén kisebb, mint a homogén anyagrészeken mért (7. ábra).

7. ábra: HV0,3 keménység értékek MS1-1.2343 szerszámtest keresztmetszetén

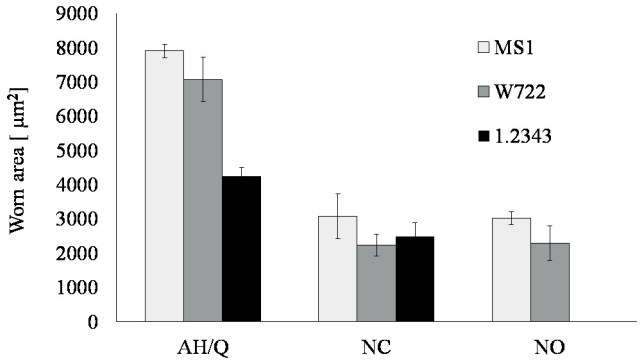



Az egyes szerszámanyagok koptató igénybevétellel szembeni ellenállásának meghatározására kopás vizsgálatokat végeztünk. A vizsgálatokhoz korong alakú (d=30mm, h=5,5) próbatesteket készítettünk DMLS technológiával MS1fémporból és W722 és 1.2343 rúd alapanyagból. A koptató vizsgálatok előtt a próbatesteket azonos körülmények között políroztuk (8. ábra).

8. ábra: Az MS1 nyomtatott minták (bal), a polírozott (közép) és hibrid minta (jobb).

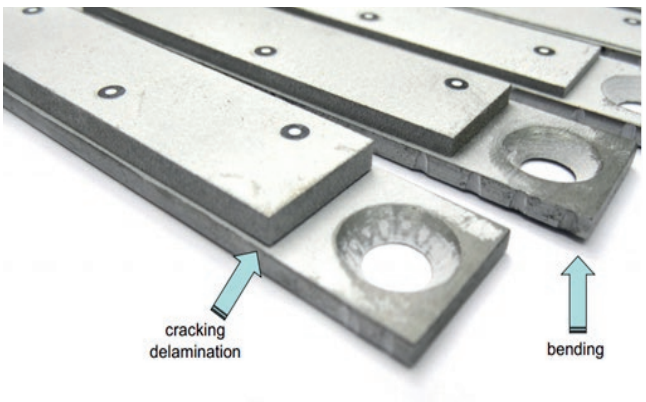
Különféle hőkezelési állapotokban (AH: kiválásosan keményített, Q: edzett+-megeresztett, NC: karbo-nitridált, NO: oxi-nitridált) határoztuk meg próbatesteken a kikopott keresztmetszet nagyságát. Az eredményekből jól látható, hogy az MS1 és W722 anyag koptató igénybevétellel szemben kevésbé ellenálló, mint az 1.2343 anyag. Az MS1 anyag W722-t meghaladó kopása, a nyomtatott anyagban megtalálható porozitással magyarázható. Nitridálás után, a vizsgált anyagok kopással szembeni ellenállása nőtt, az egyes mintákon közel azonos kopást mértünk (9. ábra).

9. ábra: A próbatesteken mért kopás értékek




Az acél testre ráépített szerszámok alkalmazása során, a technológiából adódó belső feszültségek hatását is figyelembe kell venni, mivel a felső ráépített rész belső feszültséggel terhelt. A belső feszültségek kimutatására próbatesteket készítettünk. A próbatesteken jól látható, hogy 3,5mm vastag lemezre való ráépítés esetén a belső feszültségek hatására a ráépítés elválhat az alap lemeztől, vagy jelentős mértékben görbíti az egész szerkezetet.[8] (10. ábra)

10. ábra: Hibrid felépítés vizsgálati mintái

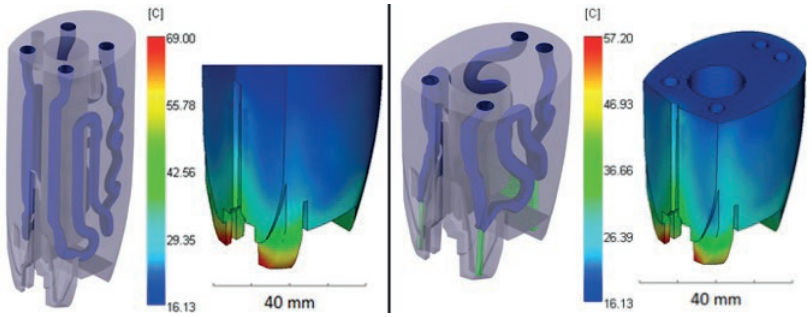



[8] Hatos, István – Hargitai, Hajnalka – Kovács, József Gábor: Characterization of internal stresses in hybrid steel structures produced by direct metal laser sintering, in *Materials Science Forum*, 2017, Vol. 885., pp. 196–201.

## SZERSZÁMTERVEZÉS

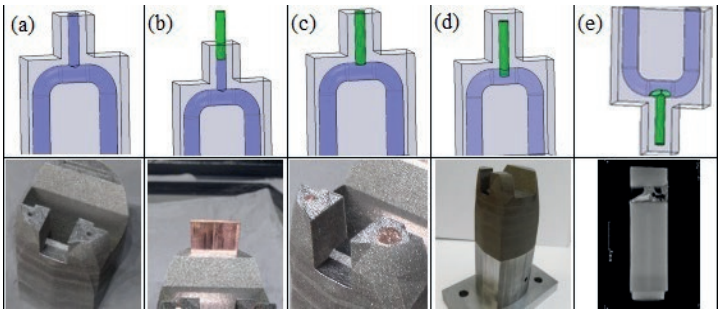
Olyan szerszámok esetén, amelyek szűk keresztmetszeteket tartalmaznak, a formakövető hűtő csatornák kialakítása nem lehetséges. A szűk keresztmetszetű szerszámok hűtése a szerszámtesten belüli hővezető betétekkel fokozható (11. ábra).

11. ábra: Formakövető szerszám (bal), formakövető szerszám hővezető betéttel (jobb)




A hővezető (réz) „bennszülött" betéttel rendelkező szerszámok hűtésére kidolgoztunk egy többlépcsős gyártási eljárást. A betét a hővezető elem magasságáig kerül nyomtatásra (*12.* ábra a). A fémpor furatból való eltávolítása után a rézbetétet a furatba helyezzük (*12.* ábra b). A rézbetét felső síkját a nyomtatott betéttel egy magasságba munkáljuk (12. ábra c), majd folytatjuk a szerszám betét felépítését (*12.* ábra d). A rézbetét és a nyomtatott szerszám kontaktfelülete, a szerszám felfordított helyzetében végzett vákuum közegű olvasztással növelhető (12. ábra) .

12. ábra: Hővető betétes szerszámtest gyártási folyamata



Főleg nagyméretű szerszámoknál jelentős költség csökkenést eredményezhet, ha a szerszám feleket nyomtatott külső héj és öntött belső mag kombinációval készítik. A technológia újnak számít, az öntési zsugorodás miatt légrés keletkezhet a héj és mag között. Mérési eredményekkel még nem igazolták az eljárás jogosságát. Amennyiben jó hővezető képességű anyaggal történik az öntés, a szerszám hővezető képessége jelentősen javul, a nyomtatási költség pedig akár 80%-al is csökkenhet. A hűtőkör nélküli szerszám a fröccsöntés költségét is jelentősen csökkentheti.[9] Az öntött magú szerszám hőelvonó képessége, formakövető hűtés és nagy hővezető képességű mag együttes használatával tovább fokozható. A korábban bemutatott (3. ábra) szerszámtest, továbbfejlesztett, formakövető hűtésű és hővezető maggal kitöltethető szerszámtest 3D modellje a következő ábrán látható (13. ábra).

13. ábra: Formakövető üreges szerszámtest 3D modellje

## ÖSSZEGZÉS

A hibrid szerszámbetétek gyártása számos megoldatlan kérdést vet fel. A koptató vizsgálatokkal meghatároztuk a nyomtatott betétek, abrazív igénybevétellel szembeni ellenállását a leggyakoribb referencia anyagokhoz képest. A belső feszültségek vizsgálatát tovább folytatom végeselemes szimulációkkal és direkt feszültség mérésekkel kiegészítve. A hővezető betétekkel kialakított szerszám és a kitöltött szerszámmal a validációs mérések még folyamatban vannak, de hama-

[9] Meiners, Wilhelm – Wissenbach, Konrad: *Cost-effective manufacturing of large-volume components now possible with combined SLM and casting method*, 2014. http://www.ilt.fraunhofer.de/content/dam/ilt/en/documents/Publication-and-Press/press_release/pr2014/PR_GenCast_EuroMold_2014.pdf, (letöltve: 2019. március 18.), Becker, David – Wissenbach, Konrad: *Tools made out of combination of materials*. http://www.ilt.fraunhofer.de/content/dam/ilt/en/documents/annual_reports/JB11/JB11_P89.pdf, (letöltve: 2019. március 18.).

rosan rendelkezésre állnak, és vélhetően igazolják a szimulációs eredményeket. Munkám során a hibrid fém 3D nyomtatás több területével foglalkozom. Az eddig rendelkezésre álló eredmények jó publikálási lehetőséget ígérnek, az eredmények gyakorlatban is hasznosíthatók, ipari alkalmazásra kerülhetnek.

## FELHASZNÁLT IRODALOM


- Becker, David – Wissenbach, Konrad: *Tools made out of combination of materials*. http://www.ilt.fraunhofer.de/content/dam/ilt/en/documents/annual_reports/JB11/JB11_P89.pdf, (letöltve: 2019. március 18.).
- Hatos, István – Hargitai, Hajnalka – Kovács, József Gábor: Characterization of internal stresses in hybrid steel structures produced by direct metal laser sintering, in *Materials Science Forum*, 2017, Vol. 885., pp. 196–201.
- Hatos István – Hargitai Hajnalka – Kovács József Gábor: Műanyag fröccsöntő szerszámbetétek szinterezési technológiája, in Zsoldos Ibolya (szerk.): *Fejezetek nemfémes anyagok legújabb járműipari kutatási területeiből*, Széchenyi István Egyetem, Győr, 2015. pp. 88–111.
- Hatos István – Hargitai Hajnalka: Formakövető hűtéssel rendelkező szerszámbetétek gyártása lézerszinterezéses technológiával, in *A Jövő Járműve*, 2013/3-4., 95–97. o.
- Hatos, István – Kocsis, Bence – Hargitai, Hajnalka: Conformal cooling with heat-conducting inserts by direct metal laser sintering, in *IOP Conference Series: Materials Science And Engineering*, 2018.
- Hatos István: Fémek 3D nyomtatásának technológiája és alkalmazása, in *Gépgyártástechnológia*, 2015/2. 6–10. o.
- Kovács József Gábor: *Fröccsöntött termékek tervezése és szimulációja*, 2007, PhD értekezés, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar.
- Meiners, Wilhelm – Wissenbach, Konrad: *Cost-effective manufacturing of large-volume components now possible with combined SLM and casting method*, 2014. http://www.ilt.fraunhofer.de/content/dam/ilt/en/documents/Publication-and-Press/press_release/pr2014/PR_GenCast_EuroMold_2014.pdf, (letöltve: 2019. március 18.).
- Nickels, Liz: Channelling quality for moulded parts using fast manufacturing, in *Metal Powder Report*, 2009, 64/8., pp. 8–12.
- Ruffner, Tim: *Success with Conformal Cooling Using Direct Metal Laser Sintering*, 2012, MoldMaking Technology.
- Wang, Yu – Yu, Kai-Min – Wang, Charlie C. L.: Spiral and conformal cooling in plastic injection moulding, in *Computer-Aided Design*, 2015, Vol. 63., pp. 1–11.
- Zink Béla – Szabó Ferenc – Hatos István – Hargitai Hajnalka – Kovács József Gábor: DMLS szerszámbetétek szimulációs vizsgálata, in *Műanyag-és Gumiipari Évkönyv*, 2014, 12. évf., 49–56. o.