

## Rendezett szintaktikus fémhab előállítás és karakterizálása

### BEVEZETÉS

Az additív technológiák folyamatos fejlődése lehetővé teszi a 3D nyomtatás újabb és újabb területeken való megjelenését és egyre szélesebb körű használatát. Jelen munkámban 3D nyomtatási technológiával üreges gömbhéjakat készítettem 1.2709 fémporból és (egy eddig még nem vizsgált területen) azok szintaktikus fémhab erősítőanyagként való alkalmazhatóságát vizsgáltam. Az additívan gyártott gömbhéjak jellemzője, hogy azok geometriája tág határokon belül változtatható és a hagyományos technológiákkal előállított erősítőanyagoknál kisebb méretszórással rendelkezhetnek, ami a teljes habszerkezet tulajdonságait pozitívan befolyásolhatja. A készített erősítőanyagok geometriáját és felületi minőségét komputer tomográfias mérésekkel ellenőriztem. A felvételekből megállapítható a külső és belső héjfelületek névleges geometriától való eltérése és a falvastagság változása. Pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálatokkal elemeztem, hogy szintaktikus fémhab gyártásakor az 1.2709 nyomtatott erősítőanyag és a folyékony alumínium mátrixanyag között milyen kölcsönhatások mennek végbe. A vizsgálati eredményekből következtetni lehet az erősítőanyag szintaktikus fémhabokban való alkalmazhatóságára.

Az additív (közismerten 3D nyomtatás) technológiákat már számos helyen használják az iparban. Az eljárások sajátossága, hogy a gyártandó munkadarab 3D modelljét szoftveresen vékony rétegekre szeletelik. Majd a szeletelt rétegek egymásra építésével alakul ki a fizikai darab, lehetővé téve olyan geometriák gyártását, amelyek eddig hagyományos módszerekkel nem voltak előállíthatók.

Napjainkban már számos additív gyártástechnológiai megoldás létezik különféle fémek, ötvözetek feldolgozására. A legelterjedtebbek a PBF (Powder Bed Fusion) eljárások, ahol az alapanyag minden esetben finomszemcsés fémpor, amelyet egy mechanizmus terít el vékony (jellemzően 20-40  $\mu\text{m}$ ) rétegekben. Minden egyes porterítés után egy koncentrált lézer vagy elektronsugár olvasztja végig a termék adott rétegbe eső keresztmetszetét. Az eljárásokkal közel porozitásmentes, nagyon jó mechanikai tulajdonságokkal rendelkező munkadarabok

---

[1] SZE Multidiszciplináris Műszaki Tudományi Doktori Iskola, PhD-hallgató. Témavezető: Dr. Czinege Imre professzor emeritus, SZE Audi Hungaria Járműmérnöki Kar, Anyagtudományi és Technológiai Tanszék.

gyárthatók. Több gyártó kínálatában megtalálhatóak a leírt alapelv szerint működő gépek (sokszor egyedi elnevezéssel pl. DMLS, SLM, DMLM, EBM).<sup>2</sup>

Az ismertetett módszerrel készült munkadarabokat az ipar számos területén használják. A munkadarab kontúrját követő, úgynevezett formakövető hűtéssel készült szerszámbetéteket illesztnek öntő- és fröccsöntő szerszámokba.<sup>3</sup>

Az additív technológiák gyártási szabadságát kihasználják üreges és rácsszerkezetek előállításakor, ezen struktúrák használatának alapvető motivációja a szerkezet fajlagos tulajdonságainak javítása. Kis tömeg és sajátos mechanikai tulajdonságok nemcsak a rácsszerkezeteknek, hanem a fémhaboknak is sajátossága. A szintaktikus fémhabok gyártására két eljárása terjedt el. Az egyik módszer szerint vákuum közegű hevített kamrában az erősítőanyag és a mátrixanyag együtt kerül felmelegítésre. A hevítés során megolvadó mátrixanyag elkülöníti a kamra és az erősítőanyag közti térrészt. Végül a kamrába vezetett magasnyomású gáz az olvadékot az erősítőanyagba infiltrálja. A kamra lehűlése után a szintaktikus fémhab eltávolítható. A másik módszernél a mátrixanyag külön kerül megolvasztásra, majd az olvadt mátrixanyagot erősítőanyagokkal megtöltött zártszelvénybe öntik. A zártszelvény teteje zárható, az alja perforált, ami a gázok eltávozását teszi lehetővé. Az olvadék zártszelvénybe történő öntését és lezárását követően nagynyomású gázzal infiltrálják az olvadékot az erősítőanyag közé.

Jelen munkámban fém 3D nyomtatással előállított gömbhéjak alkalmazhatóságát vizsgáltam szintaktikus fémhabokban történő felhasználás céljából. Az additív technológia által nyújtott nagy geometriai szabadsággal élve változó falvastagságú erősítőanyagokat gyártottam. A gyártás helyességét komputer tomográfiai mérésekkel ellenőriztem. Zömítéssel meghatároztam, hogy milyen falvastagság mellett kedvező az erősítőanyag viselkedése. A szintaktikus fémhabok gyártása során olvadt alumíniummal való érintkezés hatását is vizsgáltam az erősítőanyagokon.

## VIZSGÁLATI MÓDSZEREK ÉS ANYAGOK

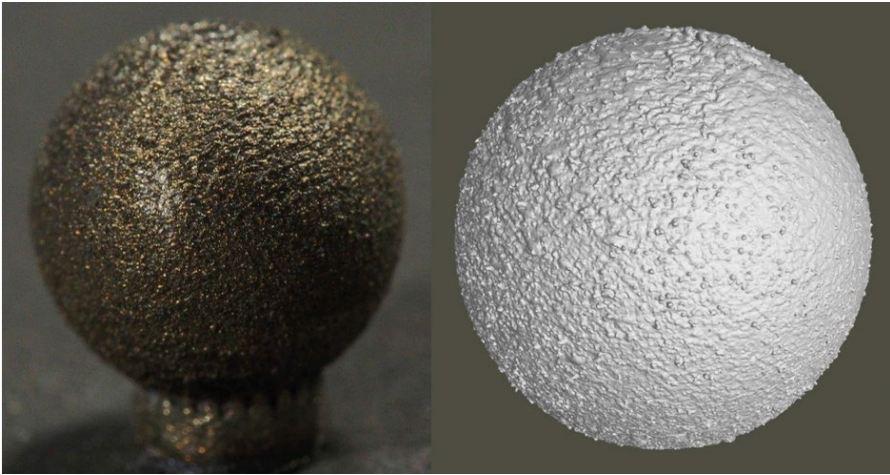
A vizsgálatokhoz szelektív lézeres fém 3D nyomtatással állítottam elő gömbhéj szerkezeteket 200 W névleges teljesítményű EOSINT M270 típusú gépen. A gyártás szerszámacél (1.2709) porból (EOS Maraging Steel MS1, EOS GmbH) történt, "EOS MS1\_Surface 1.0" nyomtatási beállításokkal, 20 µm rétegvastagsággal.

---

[2] HATOS I. – HARGITAI H. – KOVÁCS J. G.: Műanyag fröccsöntő szerszámbetétek szinterezési technológiája, in: *Fejezetek Nemfémek Anyagok Legújabb Járműipari Kut. Területeiből*, Széchenyi István Egyetem, Győr, 2015, 88–111.

[3] KOVÁCS, S. E. – VARGA, L. – SZENTES, Z.: Analysis of a Special, 3D Metal-Printed HPDC Tool Material, in: *Int. J. Eng. Manag. Sci.* 5, 2020, 251–265.; ZINK B. – SZABÓ F. – HATOS I. – HARGITAI H. – KOVÁCS J. G.: DMLS szerszámbetétek szimulációs vizsgálata, in: *Műanyag- És Gumiipari Évkönyv*, 2014, 80–87.

1. ábra: 3D nyomtatott erősítő gömb és 3D rekonstrukciója



A gyártott erősítőanyagok 7 mm átmérőjű üreges gömbhéjak voltak (1. ábra), 0,1 – 0,8 mm falvastagságokkal, 0,1 mm lépésekben. A gömbhéj modellek támaszait Materialize Magics szoftverrel generáltam. A gömbhéjakat nyomtatás után levágtam a nyomtató alaplajjáról. A támaszok eltávolítása során fokozott figyelmet fordítottam arra, hogy a gömbök ne deformálódjának. A gömböket kézben tartva a támaszokat fogóval összenyomva törtem le. A 0,1 mm falvastagságú gömbhéjak felülete részben lyukas és túlzottan deformált volt. Ezért ezeket a mintákat nem vizsgáltam tovább.

A nyomtatott 1.2709 acél alumíniumban való oldódásának vizsgálatához 0,3 mm falvastagságú erősítőanyagokat használtam. Az erősítőanyagokat 750 °C hőmérsékletű alumíniumba merítettem 5, 10, 15, 25, 35, 50, 70 perc időtartamokra. Az alumíniumba merítés során a gömbhéjak felületén kémiai oldás megy végbe, amely az erősítőanyag falvastagságát csökkenti. A vizsgálat előtt a gömbhéjak alsó és felső felületére kis mennyiségű, nagyhőmérsékletű ragasztót vittem fel (Cerafelt OG800). A ragasztó meggátolja az alumínium általi oldást, míg a ragasztóval nem kezelt felületek szabadon érintkeznek az olvadékkal. A bevont felület referenciaként szolgál majd az alumínium által kioldott anyagmennyiség meghatározásánál.

Az alumíniumba merített erősítőanyagokat precíziós vágóval elvágtam és vezető anyagba (PolyFast, Struers Inc.) ágyaztam. Az előkészített mintát pásztázó elektronmikroszkóppal (S-3400N, Hitachi Ltd.) vizsgáltam. Az erősítőanyagok határfelületén pontelemzést végeztem az egyes fázisok összetételének meghatározásához.

A nyomtatott és alumíniumba merített gömbhéjakat komputer tomográffal (Computed Tomography, CT) digitalizáltam. A felvételekhez mikrofókuszú CT berendezést használtam flat-panel detektorral (Y.CT Modular, Yxlon GmbH). A felvételek során a csőfeszültség és csőáram 190 kV és 0,12 mA volt. A detek-

tor 1024x1024 felbontással 1440 felvételt készített 1000 ms integrációs idővel. A minták kis mérete miatt a nagyítás körülbelül 40-szeres volt, a rekonstruált térfogat voxel mérete 9,8  $\mu\text{m}$ -re adódott.

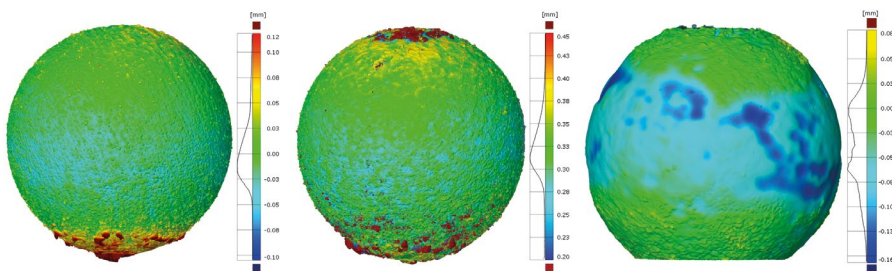
A rekonstruált gömbök szeleteit VGStudio MAX 3.2 szoftverrel dolgoztam fel. A felvétel szűrkeségi árnyalatai alapján szegmentáltam a levegő alacsony értékű és az anyag magas értékű voxeleit. A szegmentálási lépéssel a gömbhéjak felülete meghatározható. A kapott felületet egy felülethálóként mentettem ki Standard Tessalation Language (STL) formátumban, amit GOM Inspect 2018 szoftverrel dolgoztam fel. A rekonstruált felülethálót betöltve, azt a nyomtatott gömbhéj modelljével regisztráltam. Azonos koordináarendszerbe helyezés után kiszámítottam a nyomtatott gömbhéj felületének (valós) és modelljének (névleges) eltéréseit és falvastagságát. Ezáltal a valós felület minden pontjában ismertté vált a névleges modelltől való eltérés és falvastagság. Az alumíniumba merített gömbhéjak felületének vizsgálata is hasonló módon történt annyi eltéréssel, hogy a ragasztóval kezelt felület referenciaként szolgált a falvastagság meghatározásához. A kezeletlen, alumínium által oldott felületen a falvastagság változását mértem a referenciához képest.

A különböző falvastagságú gömbhéjak zömítő vizsgálatát univerzális szakítógépen (Instron 5582, Instron Ltd.) végeztem el. A vizsgálatokat 50% alakváltozásig (3,5 mm elmozdulás) vizsgáltam 2 mm/perc keresztfej sebességgel. A minták a nyomtatási irányukkal megegyezően voltak terelve.

## EREDMÉNYEK

A felülethálók vizsgálata során a GOM Inspect szoftver által számított geometriai eltérést és a falvastagság értékek adatait szintérképpel megjelenítve a 2. ábra bal és középső ábrái mutatják. A felületi eltérések jelentős hányadát a támaszszerkezet gömbbel érintkező felületein maradt részek okozzák, ezek a gömbök alján látható piros területek.

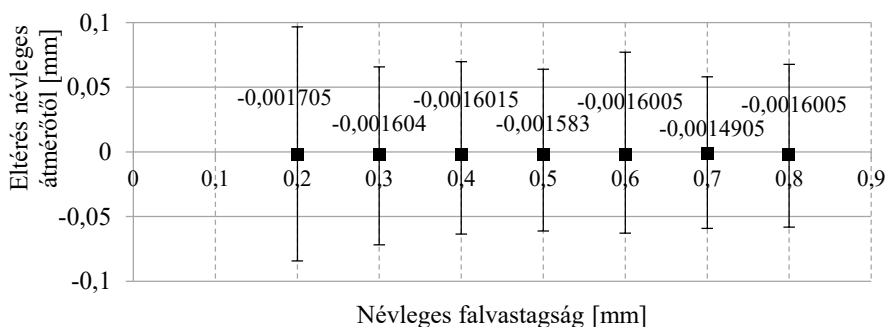
2. ábra: bal: a nyomtatott erősítőanyagok geometriai összehasonlítása, közép: a falvastagság mérése, jobb: az alumíniumba merítés hatására végbement oldás mértékének szintéréképe



A falvastagság a gömbök tetején jelentősen nagyobb, mivel a nyomtatás során ezek a részek kevésbé vannak alátámasztva. Az alkalmazott additív technológia jellemzője, hogy az alulról fémporral érintkező felületeken anyag többlet alakul ki. Az alumíniumba merítéses oldás vizsgálatok eredményén megfigyelhető a gömb alsó és felső felülete, amely ragasztóval volt kezelve. Ezek a területek a ragasztó védő hatása miatt nem oldódtak az olvadékban. Ezért ezek a felületek szolgáltak referenciaként a gömbhøj többi részén. A gömb többi felületén megfigyelhető a váltakozó mértékű falvastagság változás az oldás hatására.

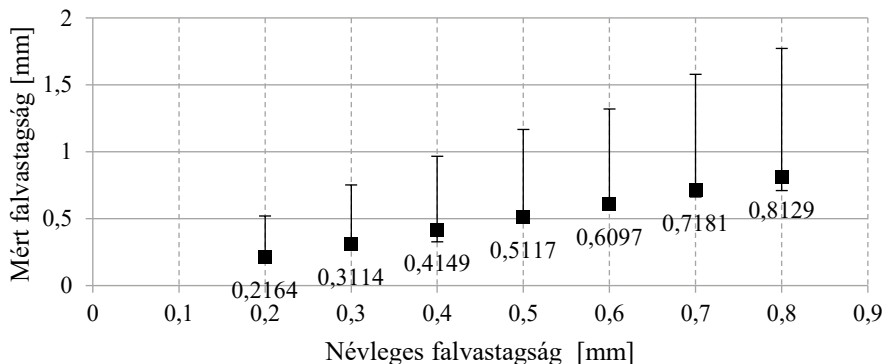
A nyomtatott gömbhøjak modellhez képesti eltéréseit a 3. ábra mutatja. Megfigyelhető, hogy az eltérések átlagos értéke közel nulla. A közelítőleg  $\pm 0,06$  mm szórást a test nyomtatás irányú torzulása és a támasz miatti többlet anyag okozza.

3. ábra: Nyomtatott gömbhøjak modellhez képesti eltérései



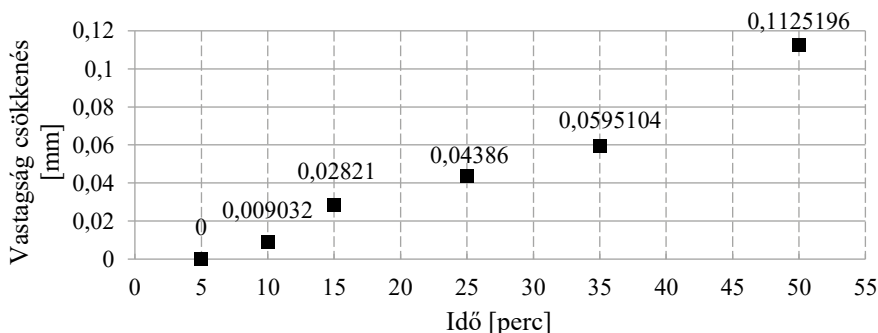
A 0,2 mm falvastagságú gömbhøj kissé megnövekedett szórásmezője deformációra utal. Ennek oka lehet a nyomtatás során a porterítés erőhatása vagy a támaszeltávolítás miatti deformáció. A 4. ábra a falvastagságok névleges méreteihez képest mért átlagos méreteket mutatja. Megfigyelhető, hogy az átlagos falvastagság közel 0,01 mm-el nagyobb a névleges értéknél.

4. ábra: Falvastagságok névleges méreteihez képest mért átlagos értékei



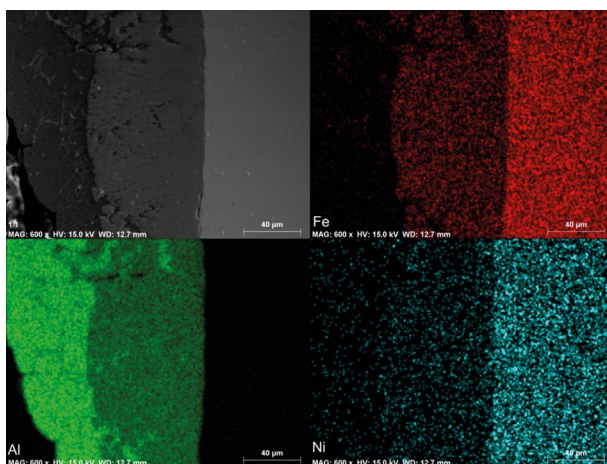
A szórásmezők jelentős pozitív eltérése a támaszok többlet anyaga okozza. Ehhez hozzájárul még a gömbhég felső alámetszést tartalmazó rétegeinek többlet vastagsága is. Az alumíniumba merítéses vizsgálatok során a 70 perces vizsgálat eredményeként a gömbhég teljes mértékben feloldódott az olvadékban. Ezért ezt a mintát nem vettem további vizsgálatok alá. Az 5 perces alumíniumba merítés után a gömbhég felületén nem történt változás. Az 5. ábra mutatja a vastagság csökkenések mértékét a referencia felülethez képest.

5. ábra: Vastagság csökkenés a referencia felületekhez képest mérve



Az alumíniumba merített gömbhéjak pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálatának elemtérképe és vonalelemzése a 6. ábrán látható. A minta 25 percet töltött az olvadékban. Az 1. pont a megszilárdult olvadékban, a 2. pont az intermetallikus rétegben, míg a 3. az 1.2709 acél erősítőanyagban történt pontelemzések helyét ábrázolja.

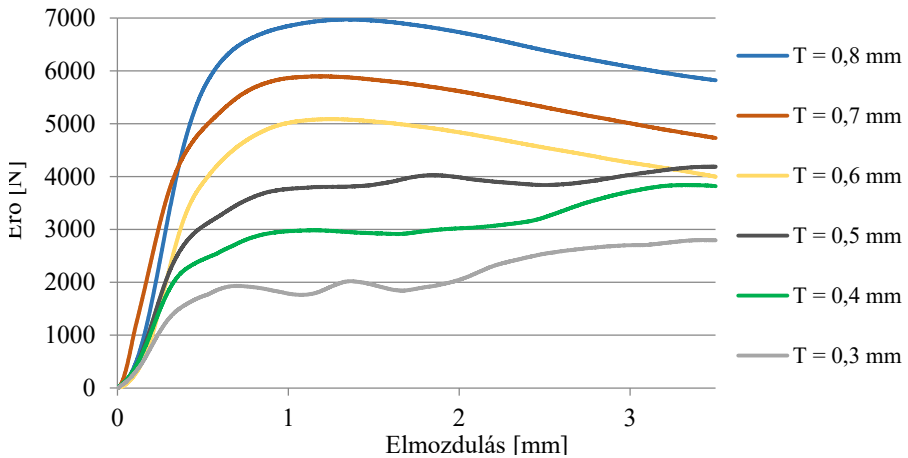
6. ábra: Elemtérkép az oldódási zónában.



Az elemtérképen megfigyelhető, hogy az olvadéktól a gömbhéj anyaga felé haladva az alumínium koncentrációja csökken, a vas és nikkel koncentrációja nő. A koncentráció hirtelen, ugrásszerűen változik a réteghatároknál. Az intermetallikus réteg és az olvadék közti hirtelen átmenet a vas koncentrációjában a gömbhéj külső felületét indikálja. Az intermetallikus réteg és gömbhéj anyaga közti hirtelen alumínium koncentráció csökkenés és az alumínium megnövekedett nikkel tartalma az oldódás első frontját indikálja.

Különböző falvastagságú gömbhéjak zömítő diagramjai a 7. ábrán láthatók. A nyomódiagramok alapján megállapítható, hogy a 0,3–0,5 mm falvastagságú erősítőanyagok nyomódiagramjai alacsony kezdeti erőcsúccsal rendelkeznek, továbbá a zömítés során közel egyenletes, platós szakaszt mutatnak.

7. ábra: Gömbhéjak nyomódiagramja



## KÖVETKEZTETÉSEK

A gyártott gömbhéjak geometriai vizsgálatai kimutatták, hogy a legalább 0,3 mm falvastagságú erősítőanyagok mérhető torzulás nélkül nyomtathatók az általunk alkalmazott technológiával. Míg a 0,1 és 0,2 mm falvastagságú erősítőanyagok már a nyomtatás vagy az eltávolítás során sérültek, ezért alkalmatlanok gömbhéj gyártásra. A sikeresen gyártott és eltávolított gömbhéjak esetében a névleges geometriától való eltérés átlagosan közel nulla. A szórásértékek a nyomtatás irányú eltérésekre mutatnak rá. A falvastagság eltérése a névleges értéktől átlagosan 0,01 mm körüli, ennek fő oka az alámetszés miatti falvastagság növekedés, valamint a támasz miatti többleanyag hatása. Mindkét mérés eredménye elhanyagolható mértékűnek tekinthető, kifejezetten, ha a támaszszerkezetek csökkentésének lehetőségét is figyelembe vesszük. Egy megfelelően kigyengített támaszszerkezet akár hibátlan felületleválasztást is lehetővé tehet.

Az alumíniumba merítéses vizsgálat kimutatta, hogy az erősítőanyag és az alumínium között egy intermetallikus réteg alakul ki 5 percnél nagyobb érintkezési idő esetén. Ennél nagyobb időtartam esetén egy vékonyfalú erősítőanyag teljes, vagy részleges feloldódása végbemehet. Továbbá az oldás hatására a mátrixanyag dúsul az erősítőanyag elemeivel, ami a mátrixanyag kedvezőtlen mechanikai tulajdonságaihoz vezethet. Ezért a fémhab gyártási technológiáját úgy kell megválasztani, hogy jelentős mértékű oldás ne következzen be. Ezek alapján kimondható, hogy a mátrixanyag és erősítőanyag együttes melegítésével járó szintaktikus fémhab gyártási módszerrel<sup>4</sup> a gyártott gömbhéjak nem használhatók. Ebben a konstrukcióban az olvadt alumínium huzamosabb ideig érintkezik az erősítőanyaggal, ami annak feloldódását okozhatja. Helyette a mátrixanyag külön megolvasztása javasolt.<sup>5</sup> Mivel itt az infiltrált alumínium csak rövid ideig érintkezik olvadék állapotban az erősítőanyaggal, ezért túlzott mértékű oldás nem mehet végbe a gyártás során.

A gyártott 7 mm átmérőjű erősítőanyagok nyomó vizsgálatai során a 0,3–0,5 mm falvastagságú gömbhéjak kedvező viselkedést mutattak. Ezek a gömbhéjak a zömítés során alacsony kezdeti erőcsúccsal rendelkeznek. Ezt követően egy közel egyeneses platós szakasz során tömörödik a gömbháj szerkezete. A fémhab szerkezetek tekintetében is hasonló a kedvező zömítési viselkedés, ezért feltételezhető, hogy ezen erősítőanyagok ideálisan alkalmazhatók ilyen felhasználásra.

## FELHASZNÁLT IRODALOM

- HATOS I. – HARGITAI H. – KOVÁCS J. G.: Műanyag fröccsöntő szerszámbetétek szinterezési technológiája, in: *Fejezetek Nemfémek Anyagok Legújabb Jár-műipari Kut. Területeiből*, Széchenyi István Egyetem, Győr, 2015, 88–111.
- KOVÁCS, S. E. – VARGA, L. – SZENTES, Z.: Analysis of a Special, 3D Metal-Printed HPDC Tool Material, in: *Int. J. Eng. Manag. Sci.*, 2020, 52., 251–265.
- ORBULOV, I. N. – SZLANCSIK, A. – KEMÉNY, A. – KINCSES, D.: Compressive mechanical properties of low-cost, aluminium matrix syntactic foams, in: *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, 2020, 135., 105923.
- ORBULOV, I. NORBERT – DOBRÁNSZKY, J.: Producing metal matrix syntactic foams by pressure infiltration, in: *Period. Polytech. Mech. Eng.*, 2008, 52., 35–42.
- ZINK B. – SZABÓ F. – HATOS I. – HARGITAI H. – KOVÁCS J. G.: DMLS szerszámbetétek szimulációs vizsgálata, in: *Műanyag- És Gumiipari Évkönyv*, 2014, 80–87.

---

[4] ORBULOV – DOBRÁNSZKY: i. m.

[5] ORBULOV – SZLANCSIK – KEMÉNY – KINCSES: i. m.