



HEGEDŰS ERNŐ*

ADAM-TECHNOLÓGIÁJÚ 3D-S FÉMNYOMTATÁS

9. ÁBRA.
Inconel 718 hőálló
anyagból nyomtatott
rakétahajtómű [25]

II. RÉSZ

TECHNOLÓGIAI JELLEMZŐK ÉS ALKALMAZÁSI LEHETŐSÉGEK
A HADIIPARBAN, A HADERŐBEN ÉS A KATONAI LOGISZTIKÁBAN,
KÜLÖNÖS TEKINTETTEL AZ UAV-KRA ÉS A KÖNNYŰJÁRMŰVEKRE

A cikk első része¹ az ADAM-technológiájú fémnyomtatás technológiai alkalmazási lehetőségeit ismertette a hadiiparban. A szerző tanulmányában kitért az additív gyártástechnológia e változatára jellemző technológiai jellegzetességekre, előnyökre és hátrányokra, ismertette az alkalmazás egyes példáit az UAV-k és a könnyűjárművek gyártásában. A cikk II. része a 3D-s fémnyomtatási eljárások repülőgépek, UAV-k és rakétahajtóművek gyártásában betöltött szerepét és jövőbeni lehetőségeit vizsgálja, különös tekintettel az ADAM-technológiára.

AZ ADDITÍV GYÁRTÁSTECHNOLÓGIA ELŐNYEI

A fém 3D-s nyomtatás alkalmazásával egyebek mellett összetett geometriák, bonyolult geometriák, csatornák és furatrendszerek, összetett szerkezetű rácsszerkezetek, illetve bennszülött² alkatrészek, zárt cellás struktúrák, összetett geometriák alakíthatók ki. Míg a hagyományos szubsztraktív³ eljárások mellett az ilyen formák csak több munkadarabból állíthatók össze, addig a 3D-s nyomtatással ez csak egyetlen munkafolyamat, így a komplex geometriájú alkatrészek gyártása terén komoly előnyre tett szert ez a technológia.



10. ÁBRA. 3D-s nyomtatott, kis tömegű tartó a repülőiparból a). [26]
Topológiai optimalizálás és rácsszerkezet alkalmazásával a hagyományos tartónál 63%-kal könnyebb repülőipari tartó titánból b) [27]

A folyékony hajtóanyagú rakéta-hajtóművek égéstere, vagy a gázturbinás hajtóművek tüzelőanyag-por-

* Alezredes, PhD, NKE
Hadtudományi és
Honvédtisztképző Kar,
Haditechnikai Tanszék,
adjunktus. ORCID: 0000-
0001-8457-5044

1 A tanulmány első része a Haditechnika folyóirat 2023/6. számában jelent meg (DOI: 10.23713/HT.57.6.13).

2 szétszedhetetlen, szerkezeti elemekre nem bontható alkatrészek.

3 kivonó, lebontó eljárás.



11. ÁBRA.
A topológiailag optimalizált (jobbra) 3D-s nyomtatott Airbus repülőalkatrész tömegét 50%-kal csökkentették (balra: konvencionális tervezési- és gyártástechnológiával előállított alkatrész grafikája) [29]



lasztófúvókái olyan összetett belső furatokat tartalmaznak, amelyek gyártásánál jelentős egyszerűsítést, az alkatrészek számának csökkentését, a gyártás gyorsabb és költség-hatékonyabb megvalósítását segíti elő az additív gyártástechnológia. Mivel ez a gyártási mód lehetővé teszi, hogy – topológiailag optimalizált geometriák létrehozásával, illetve generatív tervezési eljárások alkalmazásával – csak a teherviselő részeket alakítsák ki, és nem maradnak megmunkálási „feleslegek”, alkalmazása a gépelemek fajlagos tömegének csökkenéséhez vezet, amely pl. a repülőipari alkalmazás területén kiemelten fontos. (10.a ábra)

A repülőipar aspektusából elsősorban a tömegcsökkentés szempontja szerint optimalizált additív gyártási technológiák – a topológiailag optimalizált gépelemek, zárt belső cellák – gyártási lehetősége miatt jelentősen az additív gyártástechnológia, amellyel akár 30%-os tömegcsökkentés is elérhető a szilárdságtani paraméterek és a fáradásos jellemzők megtartása mellett. (10.b ábra) Az Airbus vállalatnál EOS nyomtatókkal 2019-től sorozatgyártásban „3D-s nyomtatással készülő alkatrészek könnyebbek lesznek, miközben semmit nem veszítenek szakítószilárdságukból. A nyomtatott alkatrészek 45%-kal könnyebbek, míg az előállításuk 25%-kal olcsóbb, mintha hagyományos eljárással készülneek”. [28] (11.ábra) A rakétahajtómű-gyártás szempontjából az összetett geomet-

riájú belső furatok létrehozása kiemelkedő jelentőséggel bír.

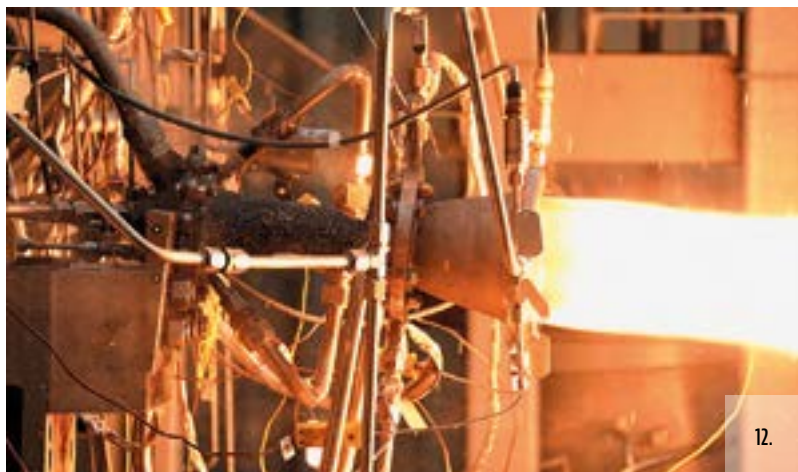
Összességében az additív gyártástechnológia technológiai alkalmazási lehetőségei a hadiiparban és a katonai logisztikában egyaránt jelentősek. [30] [31] [32] Azon belül az ADAM-technológiájú fémnyomtatás – amely más technológiákhoz képest fokozottan alkalmas magas hőállóságú fémek (pl. az ausztenites⁴ nikkel-króm alapú szuperötvözetek csoportjába tartozó Inconel), továbbá alacsony olvadáspontú fémek (pl. réz) illetve zárt belső cellák gyártására – kiemelt szerephez juthat a repülőgépek és rakétahajtóművek 3D-s nyomtatással végzett gyártásában. (A szuperötvözetek – komplex szerkezetű fémötvözetek – rendkívül magas hőálló képességgel rendelkeznek.) A terület dinamikus fejlődésen megy keresztül. [33] Ezt mutatja, hogy 2024. február 27–28-án nemzetközi tudományos konferenciát tartottak a légi- és űripar additív gyártással foglalkozó szereplői Bristolban. [34]

A REPÜLŐGÉP ÉS UAV-ALKATRÉSZEK 3D-S FÉMNYOMTATÁSA

A 3D-s fémnyomtatásnak is vannak technológiai korlátai, illetve olyan, a minőségét befolyásoló problémái, amelynek a megoldásán folyamatosan dolgoznak. [35] Ilyen pl. a fáradással szembeni fokozott érzékenység, vagy a gyártás során létrejött túlhevülés, ezért kiemelten fontos az additív technológiával gyártott fém termékek minőségbiztosítása a

repülésben. [36] Az EOS 3D ipari fémnyomtatók már rendelkeznek olyan minőségbiztosítási tanúsítvánnyal, amelyet a beépített infrakamerára alapoznak. A gyártás folyamata során az infrakamerával, minden legyártott rétegről felvételt készítenek, amelyet elektronikusán tárolnak egy dokumentumban. Az eljárás önmagában ugyan nem garantálja a gyártási hibák vagy a helyi a túlmelegedések létrejöttének kizárását, illetve elkerülését, de nyomon követhetővé teszi az adott gyártmány gyártási folyamatát, ezzel garantálva a repülőiparban megkövetelt minőséget, illetve feltarthatóvá teszi a gyártási hibát és kiszűrhetővé teszi a gyártási selejtet. Azonban – a gyártási folyamat adatainak rögzítésén és dokumentálásán túlmenően – a fémnyomtatási hibák valós időben is észlelhetők. A svájci EPFL (École Polytechnique Fédérale de Lausanne) intézet Termomechanikai Fémteni Laboratóriumának mérnökei és kutatói kifejlesztettek egy ehhez szükséges technológiát lézerporágy-olvasztás alapú additív fémtermékgyártáshoz. Alapja a szinkrotron röntgenképzés és az akusztikus felvétel szenzorfüzije, amely rétegenként valós idejű betekintést nyújt a fémnyomtatás folyamatába, megkönnyítve a termék minőségét veszélyeztető hibák – például túlhevülés, feledződés, kiégés, porózus üregek stb., amelyek a végtermékben szerkezeti vagy szilárdsági problémákat eredményezhetnek – felderítését. A röntgenfelvételeken történő mérés érdekében az EPFL olyan rendszert fejlesztett ki, amely megkönnyíti a gyártási eljárás során megolvadt fémbe zajló apró változások láthatóvá tételét. A Paul Scherrer Intézettel (PSI) és a Svájci Szövetségi Anyagtudományi és Technológiai Laboratóriummal (EMPA) közös vállalkozásban az EPFL operatív röntgenképzés kísérleteket és ultraérzékes mikrofonnal akusztikus emissziós méréseket ötvözött. „Az eredmények jelentős hatással vannak a lehetséges ipari alkalmazásokra, különösen az olyan ágazatokban, mint a repülőgépipar mérnöki tevékenységei.” [37]

4 Az ausztenites króm-nikkel acél a rozsdamentes anyagok leggyakrabban használt és legismertebb fajtája kiemelkedő korrózióállósággal, hidegalakíthatósággal és hegeszthetőséggel rendelkezik.



12.

Az amerikai és európai cégek 3D-s nyomtatás-technológiájának repülőipari fejlesztése területén elért eredményei mellett megjegyzendő, hogy már Kína repülőipara is belépett az additív gyártók táborába. „2013-ban nagy áttörést ért el Kína, amikor a repülőgépek öntött titán alkatrészeit megpróbálták 3D-s nyomtatott anyagokkal helyettesíteni. A kivitelező cég az AVIC Laser volt, amely az AVIC Heavy Machinery leányvállalata. Kína felismerte a gyártástechnológia anyagi előnyeit. Az eredeti titán alkatrészek költségeinek csupán 5%-át teszi ki a 3D-s nyomtatott alkatrészek előállításának költségei. Anyagvizsgálati szempontból is kifizetődő volt, hiszen a technológia a nagyméretű strukturális elemek nyomtatását is lehetővé tette titánötvözetből. Jelenleg a cég hét különböző repülőgéptípushoz gyárt alkatrészt az említett forradalmi módszerrel, köztük a Y-20 stratégiai teherszállító repülőgéphez.” [38]

Három évvel később, 2016-ban legyártották a világ egyik legnagyobb 3D-s nyomtatott repülőgép-alkatré-

szét, egy sárkányszerkezeti elemet. Az Airbus, az Autodesk és az APWork kooperációjával kifejlesztettek egy válaszfalat, amely elválasztja a repülőgép utasterét a repülőgép konyhájától. Az utaskísérők felhajtható üléseit szintén ezekre a falra rögzítették. A fal korábban csak igen összetett technológiával volt megtervezhető és legyártható, mivel helyet kellett adnia a vészhelyzet esetére tárolt hordálynak is. A 3D-s nyomtatással bonyolult struktúrák megtervezése immár nem jelentett gondot a cégek számára, így a lézeresen nyomtatott, titánból készült válaszfal jóval könnyebben elkészülhetett. Nemcsak a tervezés gördülékenységét befolyásolhatja a 3D-s nyomtatás, hanem az anyag minőségét és a szerkezet szilárdságát, illetve tömegét is. A legyártott válaszfal közel 50%-kal könnyebb volt, mint a korábbi változatok, ráadásul szerkezeti erősebb is lett. A csökkentett szerkezeti tömeg környezetvédelmi szempontból is előnyös helyzetbe hozta a 3D-s nyomtatás gyártástechnológiát alkalmazó légi jármű-

gyártót. A tömegcsökkenés ugyanis alacsonyabb üzemanyag-fogyasztást igényel, amely alacsonyabb károsanyag-kibocsátást (CO_2) eredményezett. A gyártó cég az A320-as repülőgépekbe építette be a válaszfalakat.

A modern gázturbinás hajtóművek legmagasabb hőmérsékletnek kitett eleme a turbinalapát, amelyet különlegesen magas olvadáspontú nikkeltötvözetekből – úgynevezett nikkeltötvözetekből – készítenek. Ezeknél körülbelül 10% titánt ötvöznek a nikkellel. A szuperötvözetek legújabb generációi számos további adalelemet – leggyakrabban krómot, molibdént, volfrámot – is tartalmaznak. Ezek az ötvözetek extrém magas hőmérsékleteken is megőrzik a szilárdságukat. Turbinalapátot 3D-s nyomtatással állít elő például az amerikai Sintavia cég. Tipikus hőálló szuperötvözet például az Inconel, amelynek nyomtatása elsősorban ADAM-technológiával valósítható meg.

A repülőgépek gázturbinában alkalmazott üzemanyagporlasztó-fúvókák gyártása terén is jelentős egyszerűsítést értek el additív gyártástechnológiával. A General Electric és a francia Snecma közös vállalata, a CFM International LEAP típusú gázturbinás hajtóművét a GE additív gyártású üzemanyag-fúvókájával szerelik. A CFM International LEAP repülőgép-hajtóműve több mint 6700 darabos megrendeléssel a LEAP a GE egyik legnagyobb gyártási darabszámú gázturbinás hajtóművének számít. 2015-ös megnyitását követően, a GE alabamai Auburn városában létesített gyára a LEAP-hajtóművek tüzelőanyag-befecskendező fúvókáit gyártja. (13. ábra) Fémnyomtatás-

12. ÁBRA. Inconel 625 magas hőszilárdságú anyagból, 3D-s fémnyomtatással készült, kis méretű rakétahajtómű testtüzeme [39]

13. ÁBRA. A GE additív gyártású üzemanyag-fúvókájával szerelik a CFM International LEAP repülőgép-hajtóművét [40]

14. ÁBRA. Additív gyártástechnológiával előállított optimalizált hőcserélő [41]



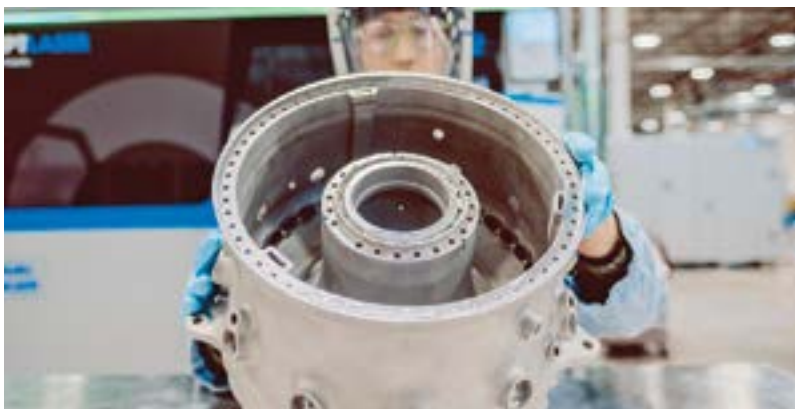
13.



14.

15. ÁBRA.

A General Electric Catalyst turbólégcsavaros gázturbinás hajtómű több mint 800 hagyományos gyártású alkatrészét 12 additív gyártású alkatrészre csökkentették [42]



sal ezeket az egységeket egyetlen darabból készítik el – míg korábban egy ilyen fúvókát közel 20 különálló alkatrészből kellett legyártani, majd összeszerelni. A nyomtatott fúvóka a korábban használtaknál 25%-kal könnyebb, ötször tartósabb, és az előállítás 30%-kal költséghatékonyabb. A hajtómű üzemanyag-fogyasztását – az összetettebb belső furatoknak, csatornáknak és geometriának köszönhetően – mintegy 5%-kal csökkentette az új a 3D-s nyomtatással gyártott fúvóka.

Rendkívül hasznosnak bizonyult a 3D-s fémmnyomatás technológia a repülőgépek és helikopterek összetett furatokkal és csatornákkal rendelkező hőcserélőjének gyártása során is. A helikopter-hőcserélő nyomtatása egyfelől egyszerűsíti a hőcserélő alkatrészeinek gyártását, másfelől javította a kritikus hőterhelésű alkatrészek hőtáradási képességét azáltal,

hogy nagyobb felületű vékony falat tudtak kialakítani. Javult a hőcserélő felület-térfogat aránya, ezzel kedvezőbbé váltak a fajlagos tömegparaméterei is. A megfelelő – levegővel biztosított – hűtés miatt a turbinalapátok bonyolult öntött szerkezetek, amelyekbe belső levegőjáratokat, míg a felületükre ezek kimeneti furatait helyezik el annak érdekében, hogy a kompresszorból odavezetett hideg levegő megfelelően hűtse a lapátok felületét.

Egy konkrét példa: a General Electric cég 3D-s nyomtatott alkatrészekből álló Catalyst légcavaros gázturbinájának fémmnyomatott üzemanyag-hőcserélője több száz alkatrész helyett immár egyetlen nyomtatott elemből áll, miközben mérete és tömege is csökkent. A 3D-s nyomtatott hőcserélő áramlási jellemzőiről elmondható, hogy korlátozott belső ellenállás mellett maximalizálja a hőtáradást. Az additív

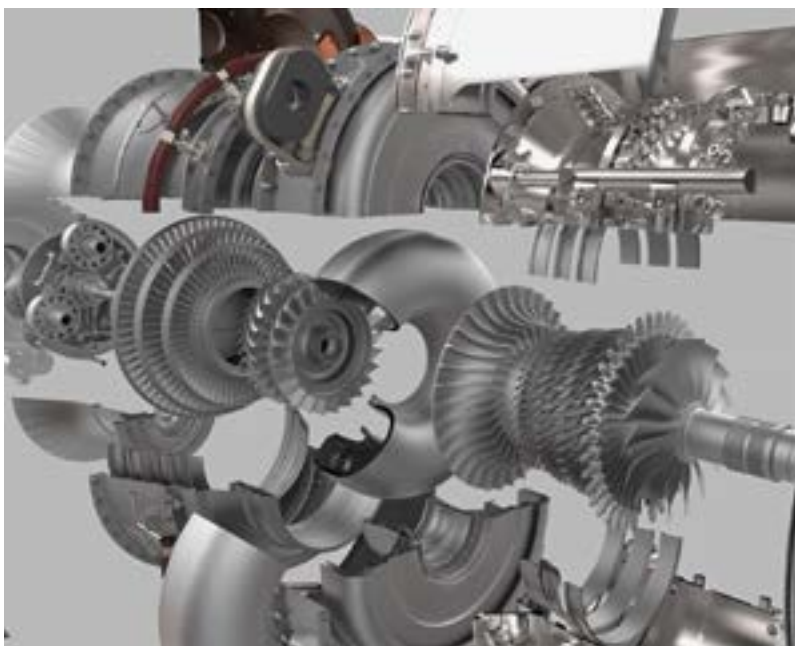
gyártás úgy tette lehetővé a hőcserélő-felületek növelését, hogy eközben a hőcserélő kisebb méretű, ezáltal egyúttal könnyebb is lett. (14. ábra)

A helikopter reduktorának olajhűtését végzi az Advanced Engineering Solutions (AES) által kifejlesztett hőcserélő, amely négyszer jobb hűtési teljesítményt mutat, mint a hagyományos gyártástechnológiával kialakított elődje. Az AES olyan nyomtatott szerkezeti geometriát alkalmazott, amelyet csak additív gyártás révén lehetett megvalósítani. Mérete csak fele akkora, és megnövelt kifáradási élettartammal rendelkezik, mivel egyetlen alkatrészből gyártják (szemben a több forrasztott alkatrészből előállított hagyományos hőcserélőkkel). A hőcserélő belső giroid rácsai a hatékonyabb hőtáradás érdekében maximalizálják a belső felületet.

A repülőgép-hajtóművek – különféle gázturbinák – 3D-s fémmnyomatott szerkezeti elemei is dinamikusan terjednek. A General Electric Catalyst turbólégcsavaros gázturbinás hajtómű a Beechcraft Denali hajtóművének prototípusa 2017-ben készült el. A hajtóművel 20%-kal jobb hatásfokot kívánnak elérni, mint a versenytársak – amit magas kompresszor-nyomásviszonnyal, változtatható állórészlapátokkal, valamint hűtött turbinalapátokkal és 3D-s nyomtatott alkatrészekkel hajtanak végre. (15. ábra)

A GE légcavaros gázturbinás hajtóműnek több mint 30%-a additív gyártástechnológiával készült. 3D-s nyomtatással hozták létre például a hajtómű fogaskerék-áttételét, valamint az égésteret is. (16. ábra) Az eszköz 969,4 kW (1300 LE) teljesítménnyel, valamint 16:1 teljes nyomásviszonnyal rendelkezik. Ezenfelül a csökkentett tömegeből adódóan 15%-kal kevesebb üzemanyagot fogyaszt. A hajtóművet 2018-ban építették be a Textron Aviation vállalat Cessna Denali nevű repülőgépebe. Összességében a General Electric Catalyst turbólégcsavaros gázturbinás hajtómű több mint 800 hagyományos gyártású alkatrészét 12 additív gyártású alkatrészre csökkentették.

Additív gyártástechnológiával – hőálló anyagból – kis méretű mikrogázturbinák is előállíthatók. Összességében nemzetközi példák alapján



16. ÁBRA.

A mintegy harmadában 3D-s nyomtatott alkatrészekből álló GE gázturbina 20%-kal kevesebb üzemanyagot fogyaszt és 10%-kal nagyobb teljesítményre képes, mint a kategóriájába tartozó korábbi hajtóművek [43]



17.

elmondható, hogy a 3D-s fémnymtatás egyidejűleg csökkenti a tömeget és a gyártási költségeket a repülőiparban, miközben az új vizsgálati eljárásokkal képes megfelelni az iparágra jellemző szigorú minőségbiztosítási követelményeknek.

RAKÉTAHAJTÓMŰVEK ALKATRÉSZEINEK 3D-S FÉMNYMOTATÁSA

Kiemelt jelentőségű, hogy a rakétahajtóművek sorozatgyártása milyen bonyolultságú feladatot jelent az ipar számára – illetve a 3D-s fémnymtatás elterjedésével milyen mértékben egyszerűsödik le, illetve válik olcsóbbá a rakétahajtómű-gyártás. Az alábbiakban erre a kérdésre válaszolva sorolunk fel technológiai példákat, figyelemmel kísérve az olyan ADAM-technológiához kötődő megoldásokat, mint pl. a már említett magas hőállóságú „szuperötvözetek” (pl. Inconel) nyomtatása rakétahajtóművek esetében. (17. ábra)

Az Európai Űrügynökség (ESA) és az Ariane Csoport (franciaországi székhelyű, 2015-ben alapított repülőgépipari vállalat, az Airbus és a Safran vegyesvállalata) bejelentette, hogy az együttműködés újabb szakaszába léptek, amelynek során az Ariane Csoport alkatrészeket gyárt az ESA rakétájának kilövéséhez. A Prométheusz rakétahajtómű az ESA Ariane rakétasorozatához készül, amelyet részben 3D-s nyomtatással alakítanak ki, folyékony oxigén és metán működteti. Az együttműködés fontos előrelépés a 3D-s nyomtatás és a rakéatechnológiák fejlődésében, mivel a Prométheusz egy alacsony árfekvésű rakétahajtómű, amelynél a fő fejlesztési cél az, hogy a mai hajtóműveknél – például a 10 millió eurós, 2005-

ös Vulcain 2-nél – tízszer olcsóbb rakétahajtóművet fejlesszenek. [46]

2023. március 8-án a Relativity Space vállalat felbocsátotta a Terran 1 típusú űrrakétáját a floridai Cape Canaveral-i Kennedy Űrközpontból. [47] A 35 méter magas rakéta 85%-a háromdimenziós nyomtatóval készült. A Relativity kifejezetten rakétaépítéshez létesített egy additív gyártóközpontot.

Az ausztrál SPEE3D nyomtatógyártó a SPACE3D projekt során szabadalmaztatott hidegfúvós (Cold Spray) additív gyártástechnológiájával fémből rakétahajtóműveket nyomtat. A munkához a SPEE3D Cold Spray technológiára fejlesztett Warp printerét használták. Technológiájukkal a fémnymtatási folyamat mintegy százszor gyorsabb, mintha más 3D-s fémnymotató megoldást alkalmaznának. A kinetikus (mozgási) energiával dolgozó hiperszonikus gázsugár fémfelszórási képességén alapuló hidegfúziós megoldással 17,9 kg fémet nyomtattak három óra alatt. [48] A percenkénti 100 g tempóban dolgozó nyomtatóval akár negyven kilós fém alkatrészek is készíthetők.



18.

17. ÁBRA. Inconel 718 anyagú 3D-s nyomtatású rakétahajtómű metszete [45]

18. ÁBRA. Additív gyártástechnológiával előállított kínai Deep Blue rakétahajtómű [49]

Az Orbex űrrepüléssel foglalkozó brit startup bemutatta a Prime Rocket rakétájának második fokozatát, amely jelenleg a világ legnagyobb 3D-s nyomtatással készült rakétahajtóműve. A brit Orbex repülőgépipari vállalat SLM-technológiát és magas hőállóságú nikkelötvözetet használt. A fém 3D-s nyomtatás lehetővé tette az Orbex számára, hogy 90%-kal csökkentse átfutási idejét, és 50%-kal csökkentse költségeit a hagyományosabb gyártási folyamatokhoz, például a CNC-megmunkáláshoz képest.

A Rocket Lab, egy kaliforniai székhelyű repülőgépipari vállalat bemutatta a 3D-s nyomtatással készült Rutherford rakétahajtóművet. A vállalat 2013 óta alkalmaz 3D-s nyomtatást minden repülőhajtómű-alkatrészéhez – beleértve az égéstereket, az üzemanyag-injektorfúvókákat, a szivattyúkat és a tüzelőanyag-szelepeket is. A Rutherford folyékony hajtóanyagú rakétahajtómű hajtja a Rocket Lab Electron rakétáját, amely kompozitokból készül, és akár 225 kg hasznos teher szállítására is képes. A rakétahajtómű alkatrészei Electron

19. ÁBRA. Részben réz alapanyag felhasználásával nyomtatott rakétahajtómű [44]



Beam Melting (EBM) technológiájú 3D-s nyomtatással készülnek.

A Deep Blue Aerospace Kína vezető repülőgépipari vállalatai közé tartozik. A cég a Farsoon FS621M típusú ipari 3D-s nyomtatóját alkalmazza rakétahajtómű 3D-s fém nyomtatására, 2021-től a DBA-M Grass Hopper Jump elnevezésű hordozórakétán. A Thunder-R1 típusú, 20 tonnás tolóerejű, kerozinnal és folyékony oxigénnel működő rakétahajtómű alkatrészeinek több mint 80%-át ezzel a technológiával állítják elő. [50] A rakétahajtómű 780 mm magas, és 550 mm átmérőjű égésterét Inconel hőálló anyagból nyomtatják. (18.ábra) A gyártásfolyamatnál a Farsoon FS621M ipari 3D-s nyomtató integrálásával 3D-s nyomtatással egyetlen darabból képesek előállítani a hagyományos megmunkálással csak

több darabból előállítható égésteret, ezért a rakétahajtómű égéskamráinak sorozatgyártása egyszerűbbé vált annak ellenére, hogy a rakétahajtómű égésterében több száz belső hűtőbordát és csatornát terveztek az égés hatékonyságának elősegítése érdekében. A 3D-s nyomtatás alkalmazása egyúttal lehetővé tette a rakétahajtómű tömegének csökkentését is.

A technológiára komoly jövő vár, mert a rakétagyártás gyakran olyan nyomtatási alapanyagok alkalmazását követeli meg, mint a hőálló Inconel vagy a jó hővezető réz. (19. ábra)

Az új technológiára, azon belül a nyomtatott megoldásokra specializálódott amerikai X-Bow (cross-bow) cég a szilárd tüzelőanyagú rakétamotorokat és egy sor, orbitális és szuborbitális pályára egyaránt

alkalmas, kis méretű hordozórakétát fejleszt. Az X-Bow a nyomtatott rakétahajtóművek tervezésére és fejlesztésére összpontosít, mivel azok sokkal olcsóbbak, mint a hagyományos technológiával gyártottak. A cég ügyfélköréhez az amerikai űripar meghatározó szervezetei, például a légierő kutatólaboratóriumai, az AFWERX, a Los Alamos és a Sandia Nemzeti Labor, valamint a Védelmi Kutatási Projektek Ügynöksége (DARPA) tartoznak. [51]

A TKP2021-NVA-16 számú project az Innovációs és Technológiai Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatással, a Tématerületi Kiválósági Program 2021 TKP2021-NVA pályázati program finanszírozásában valósult meg. ■



HIVATKOZÁSOK

- [25] To DARE Is to Do: How Metal 3D Printing Helps Cool DARE's First Liquid-Fueled Rocket Engine. materialise.com <https://www.materialise.com/en/inspiration/cases/cooling-rocket-engine-metal-3d-printing> (Letöltve: 2020.12.20.);
- [26] Achieve Improved Functionality, Decreased Weight, and Lower Costs. 3Dsystems.com, <https://www.3dsystems.com/aerospace-defense/lightweight-brackets> (Letöltve: 2020.2.1.);
- [27] Case study: A 63% Lighter Titanium Aerospace Part. materialise.com, <https://www.materialise.com/en/inspiration/cases/3d-printed-lightweight-titanium-aerospace-part> (Letöltve: 2020.2.1.);
- [28] 3D nyomtatóval készülnek az Airbus A350-es egyes alkatrészei Az Airbus Helicopters megkezdte az első, 3D nyomtatási technológiával készülő repülőgép-alkatrész gyártását. Airportal.hu, <https://airportal.hu/3d-nyomtatoval-keszulnek-az-airbus-a350-es-egyeb-alkatreszei/> (Letöltve: 2020.2.1.);
- [29] „EOS and Airbus Group Innovations Team on Aerospace Sustainability Study for Industrial 3D Printing” businesswire, <https://www.businesswire.com/news/home/20140204005189/en/EOS-and-Airbus-Group-Innovations-Team-on-Aerospace-Sustainability-Study-for-Industrial-3D-Printing> (Letöltés: 2024.2.23.);
- [30] Gyarmati József. Lánctalpas jármű kormányzása és ennek 3D modellezése Műszaki Katonai Közöny 33. évf. 2023. évi 3. szám pp. 51–61. <https://doi.org/10.32562/mkk.2023.3.5>;
- [31] Végvári Zsolt. A 3D nyomtatás felhasználási lehetőségei a műveleti logisztikában Katonai logisztika 2023. évi 1–2. szám pp. 177–198. <https://doi.org/10.30583/2023-1-2-177>;
- [32] Gávy György Viktor. Logisztikai járművek alkatrészpótlása 3D nyomtatási technológia alkalmazásával Katonai Logisztika 2023. évi 3–4. szám, <https://doi.org/10.30583/2023-3-4-208>;
- [33] Vég Róbert. A 4D nyomtatás és az okos anyagok alkalmazásának lehetőségei Műszaki Katonai Közöny, 2023. évi 4. szám;
- [34] Additive Manufacturing for Aerospace and Space (defenceiq.com) (Letöltve: 2024.2.1.);
- [35] Rákosi Sára, Sebők István, Szalai Tamás, Vég Róbert László. A 3D nyomtatás biztonságtechnikai és környezetvédelmi aspektusai Katonai Műszaki Közöny 33. évf. 1. sz. pp. 133–148. <https://doi.org/10.32562/mkk.2023.1.10>;
- [36] Thomas, Daniel J. Preventing the Failure of 3D-Printed Aerospace Components. Journal of Failure Analysis and Prevention volume 22, pp. 865–867. (2022) <https://doi.org/10.1007/s11668-022-01379-9> (Letöltve: 2024.2.1.);
- [37] Listening For Additive Manufacturing Defects In Real Time. metrology.news, <https://metrology.news/listening-for-additive-manufacturing-defects-in-real-time/> (Letöltve: 2023.12.12.);
- [38] Szűcs Viktor, Gajdács László. A 3d nyomtatás lehetőségei a repülőgépiparban. Repüléstudományi Közlemények, 32. évfolyam (2020) 2. szám pp. 97–104. <https://doi.org/10.32560/rk.2020.2.7>;
- [39] Gradl, Paul R., Christopher S. Protz, John C. Fikes, David L. Ellis, Laura J. Evans, A. Clark, Sandi G. Miller and Tyler B. Hudson. „Lightweight Thrust Chamber Assemblies using Multi-Alloy Additive Manufacturing and Composite Overwrap.” AIAA Propulsion and Energy 2020 Forum (2020): n. pag. <https://doi.org/10.2514/6.2020-3787> (Letöltve: 2024.2.7.);
- [40] <http://hu.insta3dp.com/info/manufacturing-tool-kit-for-the-aerospace-and-d-63483233.html> (Letöltve: 2020.2.1.);
- [41] Heat exchangers. 3Dsystems.com, <https://www.3dsystems.com/aerospace-defense/heat-exchangers> (Letöltve: 2020.2.1.);
- [42] Hurm, Nick, Turbo Props: GE's Catalyst engine wins award for 3-D design <https://blog.geaerospace.com/technology/turbo-props-ge-catalyst-engine-wins-award-for-3-d-design/> (Letöltve: 2024.2.5.);
- [43] Forrás: <https://images.planeandpilotmag.com/wp-pandp/2021/02/21190633/Screen-Shot-2021-02-16-at-11.23.29-AM-1536x1208.png> (Letöltve: 2020.2.1.);
- [44] Forrás: <https://www.fabbaloo.com/news/design-of-the-week-copper-aerospike-rocket-engine> (Letöltve: 2020.6.4.);
- [45] SLM fémnyomtatás: egy darabból gyártott rakétahajtómű égésterét. FreeDee, <https://www.freedee.hu/slm-femnyomtat-as-egy-darabbol-gyartott-raketahajtomu-egester/> (Letöltve: 2022.6.2.);
- [46] 3D nyomtatással készül az Európai Űrügynökség új rakétája. https://freedee.blog.hu/2017/12/20/3d_nyomtatással_keszul_az_europai_urugynokseg_uj_raketaja#more13511709 (Letöltve: 2024.2.5.);
- [47] Belák T. Nem sikerült a 3D nyomtatott rakéta kilövése. index.hu <https://index.hu/techtud/2023/03/23/nem-sikerult-a-3d-nyomtatott-raketa-kilovese/> (Letöltve: 2023.3.15.);
- [48] The World's Fastest Metal Parts Using Cold Spray Supersonic Particle Deposition. spee3D <https://www.spee3d.com/the-worlds-fastest-metal-parts-using-cold-spray/> (Letöltve: 2022.6.6.);
- [49] Listek, V. China's Deep Blue Aerospace Uses Farsoon Large Format Metal 3D Printing to Build Rockets. 3Dprint.com, <https://3dprint.com/294434/chinas-deep-blue-aerospace-uses-farsoon-large-format-metal-3d-printing-to-build-rockets/> (Letöltve: 2022.9.23.);
- [50] Deep Blue Aerospace deploys Farsoon metal 3D printing technology for rocket combustion chamber manufacture. AM Chronicle, <https://amchronicle.com/news/deep-blue-aerospace-deploys-farsoon-metal-3d-printing-technology-for-rocket-combustion-chamber-manufacture/> (Letöltve: 2022.9.24.);
- [51] Rakéta 3D nyomtatással. freedee.blog.hu, https://freedee.blog.hu/2022/04/07/raketamotorok_3d_nyomtatással#more17787910 (Letöltve: 2022.4.7.).